

На правах рукописи

Аксенов Алексей Олегович

**ЭТАПЫ МОРФОЛИТОГЕНЕЗА КОТЛОВИНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА В
ПОЗДНЕМ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ И ГОЛОЦЕНЕ**

1.6.14 Геоморфология и палеогеография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Санкт-Петербург

2026

Диссертация выполнена на кафедре геоморфологии Института наук о Земле федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Научный руководитель:

Рыбалко Александр Евменьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоморфологии Санкт-Петербургского государственного университета, главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга»

Официальные оппоненты:

Панин Андрей Валерьевич, доктор географических наук, член-корреспондент РАН, исполняющий обязанности директора федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт географии Российской академии наук»

Дорохов Дмитрий Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии Атлантики Атлантического отделения федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук»

Защита диссертации состоится в 15.00 часов «13» ноября 2026 г. на заседании совета 33.2.018.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, созданного на базе федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп. 12, ауд. 21.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена по адресу: 191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп. 5 и на сайте университета по адресу: https://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000001273.html

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сазонова Ирина Евгеньевна

Актуальность работы. В течение последнего поздневалдайского оледенения и послеледникового времени в Ладожском озере происходила неоднократная и разнонаправленная смена палеогеографических обстановок. Это привело к возникновению неоднородной геолого-геоморфологической структуры его котловины. Для определения условий, в которых формировался современный облик этого водоема, соискателем был применен морфолитогенетический принцип палеогеографических исследований.

Под морфолитогенезом понимается «сопряженное развитие рельефа и коррелятивных рыхлых отложений» [Геологический словарь, 2011]. Соответственно при выделении морфолитогенетических этапов взаимосвязанные формы рельефа и геологические образования соотносятся с интервалами геологического времени. Такой подход позволяет, с одной стороны, произвести возрастную и генетическую дискретизацию геолого-геоморфологической структуры котловины Ладожского озера, а с другой – обобщить разрозненные сведения о его донных отложениях и рельефе. Данные о происхождении отложений и форм донной поверхности способствуют вычленению морфолитогенетических процессов, предопределивших облик котловины, и тем самым провести реконструкцию палеогеографических обстановок.

Исследования эволюции Ладожского озера проводились неоднократно, как на его побережье [Земляков, 1932; Марков, 1949; Марков, 1949; Яковлев, 1925; Ailio, 1915; Нууррә, 1943; Ладожское озеро..., 1978; Кузнецов, Субетто, 2019; Сапелко и др., 2014], так и в акватории [Краснов, Рейнеке, 1935; Андреев, 1875; Гильзен, 1905; Молчанов, 1945; Семенович, 1966; Геоэкология..., 1995; Абрамова, Давыдова, Квасов, 1967; Subetto et al., 1998; Усенков, 2012; Амантов, Спиридонов, 1989; Беляев и др., 2020; Анохин и др., 2021a; Дудакова и др., 2021; Науменко и др., 2022; Andreev et al., 2019; Gromig et al., 2019; Kostrova et al., 2019; Ludikova et al., 2021; Savelieva et al., 2019; Lebas et al., 2021; Sapelko et al., 2019]. В основном они были сосредоточены на изучении состава донных отложений. Актуальность исследования обусловлена использованием в работе комплексного подхода анализа геологических и геоморфологических компонентов строения дна Ладожского озера, что позволяет значительно детализировать историю развития водоема и его побережья, дать ответы на ряд дискуссионных моментов, касающихся возраста и динамики событий последнего оледенения, эволюции приледниковых водоемов, характера современных озерных процессов и связанных с ними условий седиментации.

Целью работы является реконструкция процессов морфолитогенеза котловины Ладожского озера в позднем неоплейстоцене и голоцене, установление их возраста, определение соответствующих им отложений и форм рельефа. Для этого были поставлены следующие задачи:

1. Разработать авторский вариант местной сеймостратиграфической схемы отложений верхнего неоплейстоцена и голоцена;
2. Выполнить геоморфологическую интерпретацию сейсмоакустических данных, геоморфометрический анализ цифровой батиметрической модели, геоморфологическое картографирование поверхности дна;
3. Определить этапы морфолитогенеза и приуроченные к ним процессы, формы и отложения.

Объектом исследования являются рельеф донной поверхности и донные отложения Ладожского озера.

Предмет исследования – морфолитогенетические процессы и их динамика в позднем неоплейстоцене и голоцене.

Методология работы. Диссертационное исследование выполнено на основе применения двух групп методов: геолого-геофизических и геоморфологических методов. Первая группа включает в себя методы сеймостратиграфии, сейсмофациального анализа, секвентной стратиграфии. Геоморфологическая группа представлена методами морфогенетического и палеогеоморфологического анализа, геоморфометрии, аналитического геоморфологического картографирования по генетическому принципу.

Научная новизна работы определяется тем, что по генетическому принципу аналитического картографирования была впервые создана геоморфологическая карта поверхности дна Ладожского озера в масштабе 1 : 1 000 000. Впервые введено понятие «денудационно-аккумулятивного конструктивного рельефа». Выявлены ранее не исследованные формы рельефа на дне озера: течениевые дрифты и ложбины, озы Де Геера, приледниковые конусы выноса. Выделены три пояса краевых ледниковых образований. Обнаружены реликтовые береговые линии, расположенные ниже современного уровня водоема.

Создан авторский вариант местной сеймостратиграфической схемы отложений верхнего неоплейстоцена и голоцена Ладожского озера. Впервые выполнено детальное расчленение сеймостратиграфических подразделений до уровня сейсмотолщ, сеймопачек и сеймофаций. Выделенные сейсмотолщи сопоставлены с легендой Балтийской серии листов Государственной геологической карты.

На основе сеймостратиграфической интерпретации верхненеоплейстоцен-голоценовых образований, геоморфологического анализа донной поверхности и корреляции с палеогеографическими реконструкциями предыдущих исследователей определены морфолитогенетические процессы в котловине озера, существовавшие в различные этапы развития водоема. Установлены признаки процессов, не зафиксированных

предыдущими исследованиями, таких как айсберговая экзарация, транспортировка материала придонными течениями.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты позволяют актуализировать содержание Государственной геологической карты листа Р-35,(36) (Петрозаводск) [2015], уточнить региональные стратиграфические, палеогеографические и гляциоморфологические схемы. Выполнена и внедрена в Мониторинг Государственной геологической карты листов 1000/3 геоморфологическая карта Ладожского озера в масштабе 1 : 1 000 000. Полученные сведения о процессах осадконакопления и рельефообразования Ладожского озера позволяют дополнить существующие представления о гидродинамике крупных озерных бассейнов. Оработана методика геолого-геоморфологических исследований водоемов с привлечением комплекса батиметрических, геофизических и геологических данных.

Основные защищаемые положения:

1. Местная сеймостратиграфическая схема верхнеплейстоцен-голоценового разреза Ладожского озера включает в себя три сеймотолщи (D1, D2, D3), которые соответствуют следующим региональным стратиграфо-генетическим подразделениям Балтийской серийной легенды Государственной геологической карты Российской Федерации:

D1 – образования основной морены осташковского оледенения $g_{bnIIIos}$ и гляцигенного парагенетического комплекса интерстадиала Беллинг-Аллеред $GIIIb\sigma-al$;

D2 – ледниково-озерные образования Балтийского ледникового озера верхнего неоплейстоцена $lgIIIbl$;

D3 – озерные образования голоцена IH .

Выделенные сеймотолщи подразделяются на сеймопачки и сеймофации.

2. Рельеф дна Ладожского озера включает в себя шесть генетических типов: конструктивный, озерный, флювиальный, ледниковый, флювиогляциальный, ледниково-озерный, соотносимых с денудационной, денудационно-аккумулятивной и аккумулятивной группами. Возраст рельефа (за исключением конструктивного) охватывает стратиграфический интервал от четвертой ступени верхнего неоплейстоцена до голоцена. На основе генетической дискретизации поверхности озера подготовлена геоморфологическая карта в масштабе 1 : 1 000 000.
3. Морфолитогенез котловины Ладожского озера в позднем неоплейстоцене и голоцене происходил в четыре этапа:

- субгляциальный этап связан с перекрытием котловины покровным оледенением;
- маргинально-прогляциальный этап соответствует времени дегляциации озера в течение интерстадиала беллинг-аллеред;
- перигляциальный этап сопряжен с ледниково-озерными обстановками Балтийского ледникового озера;
- лимнический этап фиксируется установлением озерных обстановок, характерных для крупных водоемов гумидной зоны; этот процесс сопровождается неотектоническими движениями земной коры и вековыми колебаниями уровня воды.

Степень достоверности результатов работы обусловлена большим объемом использованных сейсмоакустических профилей, общая длина которых превышает 7300 км, наличием батиметрических данных в виде цифровой батиметрической модели Ладожского озера с пространственным разрешением 500 м. Полученные выводы были подтверждены существующими геохронологическими и палеогеографическими данными, что позволило уточнить и дополнить модель развития Ладожского озера в верхнем валдае и голоцене.

Личный вклад автора заключается в сборе, обобщении и интерпретации большого количества разрозненных геофизических данных, выполненных на акватории Ладожского озера различными организациями. Автором были исследованы и сопоставлены друг с другом материалы сейсмоакустического профилирования различных частотных модификаций, которые в дальнейшем были соотнесены с данными геологического прободоотбора. Также лично были проведены обработка и ГИС-анализ цифровой батиметрической модели Ладожского озера, предоставленной заведующим Лабораторией географии и гидрологии Института озероведения СПб ФИЦ РАН Михаилом Арсеньевичем Науменко. Полученные результаты о строении верхней части геологического разреза и рельефа поверхности дна Ладожского озера были сопоставлены с имеющимися геолого-геоморфологическими и палеогеографическими данными Института озероведения СПб ФИЦ РАН, Института Карпинского и других организаций и использованы для интерпретации эволюции водоема в верхнем валдае и голоцене.

Фактический материал был собран при выполнении Российско-Германского проекта 25 «ПЛЮТ – Палеолимнологический трансект» в рамках Соглашения о сотрудничестве в области морских исследований между Министерством образования и науки Российской Федерации и Федеральным министерством образования и научных исследований Федеративной республики Германия (2012-2020 гг.); работ центра анализа сейсмических данных МГУ им. М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургского государственного

университета и Института водных проблем севера КарНЦ РАН (гранты Санкт-Петербургского государственного университета № 18.42.1258.2014, № 18.42.1488.2015); государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 27.12.2023 г. № 049-00003-24-00 «Мониторинг государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 территории Российской Федерации и ее континентального шельфа в 2023-2025 годах»; государственного задания Института озероведения СПб ФИЦ РАН MNG-2019-0001. Работа частично поддержана грантами РНФ № 23-24-00319 и № 23-27-00273.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на Международной конференции по результатам экспедиционных исследований «Рельеф и четвертичные образований Арктики, субарктики и северо-запада России» в 2020 и 2023 гг. (г. Санкт-Петербург), Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование – MARESEDU» в 2020 и 2022 гг. (г. Москва), Международной конференции «Палеолимнология северной Евразии» в 2020 (г. Иркутск) и 2022 (г. Санкт-Петербург) гг., VII молодежной конференции «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и мирового океана» в 2021 г. (г. Санкт-Петербург), International Conference on Seafloor Landforms, Processes and Evolution в 2022 г. (Мальта), международной конференции на Всероссийской конференции «Морские и озерные бассейны восточной периферии Балтийского кристаллического щита в четвертичное время» в 2024 г. (г. Апатиты), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «IX Щукинские чтения: к 80-летию кафедры геоморфологии и палеогеографии и 270-летию Московского университета и XXXVIII Пленум геоморфологической комиссии РАН» в 2025 г. (г. Москва) и на XI Всероссийской конференции по изучению четвертичного периода в 2025 г. (г. Санкт-Петербург).

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 43 работы, наиболее значимые – 12; из них в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ – 7; в изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science – 12.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, физико-географического описания Ладожского озера и Приладожья (ГЛАВА 1), обзора геологических, геоморфологических и палеогеографических исследований озера (ГЛАВА 2) описания методики работы (ГЛАВА 3), описания результатов и обсуждения (ГЛАВЫ 4, 5, 6, 7, 8), заключения, списка литературы и трех приложений. Объем работы составляет 142 страницы. В тексте представлен 51 рисунок и 11 таблиц. Список литературы содержит 195 литературных источников, из которых 76 – на английском языке.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, д. г.-м. н. Александру Евменьевичу Рыбалко за непрерывное и тщательное научное руководство и помощь в подготовке и написании научных работ на протяжении всего периода подготовки диссертации. Автор признателен к. г. н. Г.Б. Федорову и профессору Кильского университета им. Кристиана Альбрехта С. Крастелю, сотрудникам кафедры сейсмометрии и геоакустики МГУ им. М.В. Ломоносова и центра анализа сейсмических данных научного парка МГУ, в частности к. т. н. М.Ю. Токареву, сотрудникам отдела региональной геэкологии и морской геологии Института Карпинского, в частности к. г.-м. н. А.Ю. Сергееву, к. г.-м. н. Д.В. Рябчук, к. г.-м. н. А.В. Амантову, сотрудникам Института озероведения СПб ФИЦ РАН, в частности д. г. н. М.А. Науменко, д. г. н. В.М. Анохину и к. б. н. Д.С. Дудаковой, а также к. г. н. П.Ю. Беляеву.

Автор также хочет выразить огромную благодарность сотрудникам отдела географии полярных стран ААНИИ, в частности д. г. н. Д.Ю. Большиянову, д. г. н. С.Р. Веркуличу, к. б. н. Н.А. Бакунову, С.А. Правкину, Д.А. Соловьевой, преподавателям кафедры геоморфологии СПбГУ, в частности д. г.-м. н. В.Ю. Кузнецову, к. г. н. Л.А. Савельевой, к. г. н. С.Ф. Болтрамовичу, Н.А. Костроминой, а также Т.А. Аксеновой, О.Ю. Аксенову, И.И. Корниловой, Д.В. Петрову, , М.А. Липатову, Е.В. Новоселовой, И.С. Сорокину, А.В. Андрианову, Н.Д. Харюшину, И.В. Труфанову, С.П. Железникову, Н.С. Маловой, А.И. Муравьеву.

Основное содержание работы

Глава 1. Физико-географическое описание

В первой главе представлена краткая характеристика географического положения и геологического строения Ладожского озера, описаны гидрологический режим водоема и климатический режимы Приладожья. Ладожское озеро расположено на стыке Русской платформенной плиты и Балтийского кристаллического щита и занимает Пашско-Ладожскую рифейскую грабен-синклиналь [Амантов, 2014].

В водном балансе водоема основную часть притока приходится на поступление речных вод и атмосферных осадков [Филатов, Балаганский, 2021]. Средний уровень озера составляет 4,78 м и понижается с трендом 3 мм/год, выделяются многолетние циклы колебаний уровня периодичностью в 30 и 5-11 лет [Науменко, 2015]. Температурный режим воды является димиктическим: дважды в год температура переходит отметку в 4° С [Распопов и др., 1969]. Ледовый покров на озере держится с ноября по май [Бородулин и др., 2015]. В акватории встречаются стоковые, ветровые и плотностные течения, последние являются наиболее распространенными в открытой части водоема [Калесник, 1968].

Высота волн в береговой зоне варьирует от 2 до 8 м в зависимости от типа берега [Кириллова, Распопов, 1971]. Минерализация вод слабая и ее показатель в среднем составляет 55-72 мг/л [Гусева, Игнатьева, 2021].

Район Ладожского озера находится в умеренном климатическом поясе, в зоне перехода от морского климата к континентальному. Значительную роль в формировании климата играют водные массы самого озера. Обычно средние показатели относительной влажности на побережье и акватории водоема выше, чем на прилегающих территориях, а средние температуры ниже [Каретников, Науменко, 2015]. Наиболее холодным месяцем является февраль со средними температурами -8 – -10 °С, наиболее теплым – июль с температурами 14-17 °С. Наибольшие показатели относительной влажности воздуха приходятся на декабрь и составляют 86-88 %, наименьшие в мае – 68-76 % [Каретников, Науменко, 2015]. Большую часть года преобладают юго-западные, южные и юго-восточные ветра. В теплое время года часты вторжения северных и северо-восточных ветров [Каретников, Науменко, 2015].

Глава 2. История геолого-геоморфологических исследований

В этой главе рассмотрены работы предыдущих исследователей. В разделе 2.1 представлены основные результаты геологического изучения озера. Выделено три этапа исследований. Первый этап начался в конце XIX века и продолжался вплоть до 40-х годов XX века. Эти работы в основном велись на побережье озера финскими и отечественными исследователями [Земляков, 1932; Марков, 1949; Марков, 1949; Яковлев, 1925; Ailio, 1915; Нууррӓ, 1943]. Начались первые работы по изучению дна озера [Краснов, Рейнеке, 1935; Андреев, 1875; Гильзен, 1905; Молчанов, 1945].

Второй этап начался в послевоенные годы. Усилиями сотрудников Института озероведения РАН, ВСЕГЕИ, ВНИИОкеангеология были получены данные о гранулометрическом составе и распределении донных отложений [Семенович, 1966; Геоэкология..., 1995], их палеонтологическом составе [Абрамова, Давыдова, Квасов, 1967; Давыдова, 1985; Давыдова, Трифонова, 1982] и стратиграфии [Субетто, 2009; Subetto et al., 1998], литодинамических процессах [Усенков, 2012; Усенков, и др., 1999] и геоэкологической обстановке в озере [Геоэкология..., 1995], геологическом строении котловины [Амантов, 1993; Амантов, 2014; Амантов, Спиридонов, 1989].

Третий этап начался в 10-е годы XX века и представлен как отечественными, так и международными исследованиями. В 2013 году в Ладожском озере был осуществлен российско-германский проект PLOT, в рамках которого было проведено малоглубинное бурение неконсолидированных осадков, сейсморазведка высокого разрешения и

акустическое профилирование. По результатам этих работ был подготовлен ряд публикаций, посвященных палеогеографии водоема в поздне- и послеледниковое время [Andreev et al., 2019; Gromig et al., 2019; Kostrova et al., 2019; Ludikova et al., 2021; Savelieva et al., 2019; Lebas et al., 2021]. В 2014-2015 гг. на Ладожском озере состоялись две экспедиции проекта «Сопровождение комплексной экспедиции на Ладожском озере для изучения строения и стратификации четвертичного покрова и палеогеографического развития приозерного региона в позднем неоплейстоцене-голоцене», в которых приняли участие СПбГУ, ЦАСД МГУ и ИВПС КарНЦ РАН. В ходе этих работ была проведена сейсморазведка ультравысокого разрешения в северной и центральной частях озера (в 2014 г.) и сверхвысокого разрешения южной части (в 2015 г.). Это позволило уточнить представления о сейсмостратиграфии и геоморфологии дна озера [Беляев и др., 2020; Рыбалко и др., 2023; Rybalko et al., 2022]. Также продолжаются и комплексные исследования Института озероведения СПб ФИЦ РАН, направленные на изучение литологии донных осадков [Анохин и др., 2021a], возраста и происхождения отложений [Sapelko et al., 2019], климатических условий и колебаний водоема по данным о строении отложений малых озер на побережье [Кузнецов, Субетто, 2019; Сапелко и др., 2014; Сапелко и др., 2019; Сапелко, Терехов, Амантов, 2018], подводных ландшафтов [Дудакова и др., 2021; Дудакова, Дудаков, Анохин, 2018; Науменко и др., 2022].

В разделе 2.2 рассматривается история изучения рельефа поверхности озера. Первые работы по гидрографической съемке дна на акватории озера в конце XIX века [Андреев, 1875]. Первая работа о происхождении рельефа озера и его побережья была опубликована в 1978 году [Ладожское озеро..., 1978]. Следующее геоморфологическое исследование было выполнено Мусатовым Е.Е. [Геоэкология..., 1995], данные которого опирались на геолого-геофизические работы ВНИИОкеангеологии. Им было дано описание рельефа донной поверхности и составлена геоморфологическая схема. В публикации Амантова А.В. и Амантовой В.М. была представлена геоморфологическая схема, составленная с позиции ледниковой теории на основе данных, собранных в 80-е и 90-е годы сотрудниками ВСЕГЕИ. Впоследствии геоморфологическая схема озера была подготовлена в рамках Государственного геологического картирования для листа Р-35,(36), которая частично опиралась на предыдущие материалы [Бахтеев, 2015]. В последние годы были созданы еще две геоморфологических схемы. Первая выполнена Анохиным В.М. [Анохин и др., 2021b] по данным цифровой батиметрической модели Ладожского озера [Науменко, 2013a; Naumenko, 2020]. Вторая была составлена Беляевым П.Ю. по новым сейсмоакустическим данным, полученным в 2014-2015 гг. [Беляев и др., 2020]. Все эти данные были подвергнуты критическому анализу и использованы при подготовке диссертации.

Глава 3. Материалы и методы исследования

Для комплексной геоморфологической интерпретации были использованы как архивные, так и новейшие данные сейсмоакустических исследований, проведенных на Ладожском озере, в совокупности с цифровой батиметрической моделью. В разделе 3.1 описана характеристика и методика интерпретации материалов сейсмоакустики. Новые данные сейсмоакустического профилирования представлены четырьмя наборами. Материалы сейсморазведки высокого разрешения (СВР) и акустического профилирования (АПр) были получены в рамках полевых работ германско-российского проекта «PLOT» в 2013 году [Lebas et al., 2021]. В качестве источника сигнала для СВР был использован пневматический источник, для АПр – параметрический профилограф. Рабочая частота акустического сигнала СВР составила 100-500 Гц, АПр – 10 кГц. Материалы сейсморазведки ультравысокого (СУВР) и сверхвысокого разрешения (ССВР) были выполнены в ходе экспедиций СПбГУ, ЦАСД МГУ и ИВПС КарНЦ РАН в 2014 и 2015 гг. соответственно [Беляев и др., 2020]. В работах 2014 года использован электродинамический источник с рабочей частотой сигнала 2 кГц, в 2015 году – электроискровой источник с рабочей частотой сигнала 600 Гц.

Кроме того, в рамках работы использованы архивные геофизические материалы непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) и геолокации (ГЛ), собранные в рамках Государственного геологического картирования сотрудниками отдела региональной геоэкологии и морской геологии с 1987 по 1995 гг. [Амантов, 1991]. НСП было выполнено при помощи электроискрового источника с центральными частотами 250 и 450-500 Гц. Геолокация обеспечена пьезокерамическим источником с центральной частотой сигнала 7500 Гц.

В результате у нас имеется несколько наборов сейсмоакустических данных, различающихся вертикальным разрешением и глубиной (табл. 1). Низкочастотные данные (СВР, ССВР) позволяют четко проследить подошву неконсолидированных отложений, а также выделять отложения, характеризующиеся низкой акустической проницаемостью (например, ледниковые отложения). Благодаря материалам высокочастотной съемки (СУВР, АПр), мы можем детально охарактеризовать внутреннюю структуру сеймостратиграфических подразделений. Такая комбинация позволяет обеспечить надежную интерпретацию четвертичного разреза.

Обработанные данные были собраны автором в едином проекте. Интерпретация данных выполнена в программном обеспечении KINGDOM 2015 IHS Software. По типу волновой картины и наличию горизонтов несогласия были выделены четыре комплекса,

сопоставленные с геологическими данными. В дальнейшем, для верхнего сейсмокомплекса методом сейсмофациального анализа было проведено детальное расчленение на более мелкие подразделения – сеймопачки и сеймофации. В результате была предложен и обоснован авторский вариант местной сеймостратиграфической схемы.

Таблица 1. Характеристики наборов сейсмоакустических данных

Год и тип съемки	Тип источника	Центральная частота, Гц	Разрешение, м	Максимальная глубинность, м	Суммарная длина, км
НСП, 1987-1995	Электро-искровой	250 Гц и 450-500 Гц	3-5	100	4600
ГЛ, 1987-1995	Геолокатор	7500 Гц	0,4-0,5	25	
СВР, 2013	Пневматический	160-200	2-3	150	1500
АПр, 2013	Параметрический профилограф	10000	0,1	35	
СУВР, 2014	Электро-динамический	2000	0,2-0,3	50	780
ССВР, 2015	Электро-искровой	600	1	100	420
				Итого:	7300

В разделе 3.2 дана характеристика батиметрических данных и описана методика их анализа. Данные о глубинах Ладожского озера получены благодаря цифровой батиметрической модели (ЦБМ) Науменко М.А. [Naumenko, 2020]. Модель представляет собой грид значений глубины разрешением 500 X 500 м. Она была составлена на основе интерполяции значений глубины батиметрических карт масштабов 1 : 500 000 и 1 : 100 000. Первичная обработка ЦБМ выполнена в ГИС Surfer 13 Golden Software.

Для анализа морфологии рельефа применен геоморфометрический метод. Путем полуавтоматической классификации с помощью индекса батиметрической позиции и уклона поверхности дна были выделены морфологические поверхности [Lundblad et al., 2006]. На основе сочетания этих параметров была создана классификация морфологических поверхностей дна. Эти поверхности отличаются друг от друга по относительной позиции (верхние, нижние) и по углу наклона (склоновые, субгоризонтальные). Всего выделено 8 видов поверхностей. Сочетая эти элементы друг с другом, мы можем выделить формы рельефа без генетической интерпретации – равнины, склоны, гряды, возвышенности, впадины, ложбины.

Полученная схема морфологических поверхностей стала основой для последующего создания геоморфологической карты дна Ладожского озера в масштабе 1 : 1 000 000. В ее основе лежит генетический принцип аналитического геоморфологического картографирования [Требования по созданию..., 2005]. Выделенные поверхности соотносятся с информацией о строении и стратиграфическом положении отложений, полученной по сейсмическим данным, тем самым картируются генетически однородные поверхности (ГОП). ГОП выделяются на карте площадными элементами. ГОП, не выраженные в масштабе, выделяются в качестве линейных и точечных элементов. Кроме того, на созданной геоморфологической карте были выделены структурные линии, являющиеся границами ГОП, погребенные (не выраженные в современном рельефе) формы, границы стадий последнего (осташковского) оледенения.

Раздел 3.3 посвящен хронологическим данным, использованным в главе 8. В работе представлены материалы радиоуглеродного датирования и варвохронометрии предыдущих исследователей. Калибровка радиоуглеродных дат выполнена с помощью R-пакета Rice версии 0.2.0 [Blaauw, 2024] с использованием калибровочной кривой IntCal20 [Reimer et al., 2020]. Варвохронологические данные взяты из публикаций [Bakhmutov, Zagniy, 1990] и [Gromig et al., 2019]. Для более точной привязки был пересчитан возраст пика западного склонения магнитного поля (ПЗС), по которому данные из работы [Bakhmutov, Zagniy, 1990] были привязаны к абсолютной геохронологической шкале М. Саарнисто и Т. Саариненом [Saarnisto, Saarinen, 2001].

Глава 4. Сейсмостратиграфия котловины Ладожского озера

В этой и в следующей главе раскрывается *защищаемое положение № 1*. Проведенный сейсмостратиграфический анализ позволяет выделить четыре комплекса (табл. 2). Эти комплексы были сопоставлены с результатами геологической интерпретации материалов НСП А.В. Амантова [Амантов, 1991; Амантов, 1993; Амантов, 2014; Амантов, Спиридонов, 1989].

Сейсмокомплекс А распространен в центральной и северной частях Ладожского озера. Представленный комплекс расчленен на два подкомплекса по типу волновой картины и морфологии толщи. Подкомплекс А1 интерпретируется как нижнерифейские осадочные и эффузивные образования, представленные песчаниками, аргиллитами и алевролитами, гравелитами и конгломератами, а также верхнерифейские базальты и песчаники яблоньской свиты [Амантов, 2014]. Подкомплекс А2 приурочен к отдельным возвышенностям северной части озера. А.В. Амантовым [1991; 2014] образования, сопоставляемые с этим подкомплексом, интерпретируются как среднерифейские

интрузивные образования, представленные магматическими породами: базальтами, габброидами и сиенитами.

Таблица 2. Сейсмостратиграфическая схема котловины Ладожского озера

Комплекс	Толща	Подразделения ОСШ	Индекс
D	D3	Осташковский горизонт верхнего неоплейстоцена- голоцен	QIIIos-H
	D2		
	D1		
C	C2	Четвертичная система (?)	QI-III(?)
	C1		
B	B2	Верхний венд, котлинский горизонт	V_{2kt}
	B1	Верхний венд, редкинский горизонт	V_{2rd}
A	A2	Средний рифей	RF_2
	A1	Нижний рифей	RF_1

Породы второго сейсмостратиграфического комплекса В составляют южную часть котловины Ладожского озера, где они несогласно налегают на породы комплекса А. Выделяются два подкомплекса – В1 и В2. По данным А.В. Амантова [2014] нижний подкомплекс В1 соотносится со старорусской свитой редкинского горизонта верхнего венда, породы которой представлены песчаниками, алевролитами, миктитами и гравелитами, уплотненными глинами и аргиллитами. Верхний подкомплекс В2 коррелирует с василеостровской свитой котлинского горизонта верхнего венда, которая сложена песчаниками, алевролитами, миктитами с прослоями уплотненных глин и аргиллитов, а также аргиллитоподобными глинами с прослоями песчаников и алевролитов.

Сейсмостратиграфический комплекс С имеет островное распространение в котловине Ладожского озера. Его волновая картина неоднородна по своей геометрии и волновой картине. Отложения, сопоставляемые с этим подразделением, формируют структуры заполнения эрозионных врезов в нижележащих комплексах (подкомплекс С1), составляют гряды и склоны котловины в ее северной части (подкомплекс С2). Предположительно отложения, сопоставляемые с этим комплексом, относятся к четвертичным отложениям нижнего-верхнего неоплейстоцена.

Верхнелепестово-голоценовым отложениям котловины Ладожского озера соответствует сейсмостратиграфический комплекс D. От нижележащих толщ он отделен высокоамплитудной отражающей границей, соответствующей региональному угловому несогласию.

Глава 5. Местная сеймостратиграфическая схема образований верхнего неоплейстоцена и голоцена

В комплексе D выделены три сеймотолщи D1, D2 и D3. Эти толщи в свою очередь подразделены на сеймопачки и сеймофации.

Раздел 5.1 посвящен сеймотолще D1. В ней выделяются две сеймопачки. Волновая картина нижней пачки D1-1 характеризуется хаотическим типом записи с короткими разноориентированными высокоамплитудными рефлекторами. Кровля пачки представлена высокоамплитудным рефлексом и имеет неровную, холмистую, волнистую и пилообразную морфологию. D1-1 коррелирует с отложениями основной морены ошашковского горизонта верхнего неоплейстоцена $g_{bn}IIIos$.

Вышележащая сеймопачка D1-2 довольно специфична. Преимущественно отложения, сопоставляемые с этим подразделением, распространены в центральной части бассейна, в других частях водоема встречаются фрагментарно. Она не имеет единой волновой картины и подразделяется на три сеймофации, латерально замещающие друг друга. Сейсмическая запись пачки, ее стратиграфическое положение и представления предыдущих исследователей об истории развития Ладожского озера позволяют нам интерпретировать эти отложения как маргинально-прогляциальный парагенетический комплекс бёллинг-аллёрдского интерстадиала $GIIIb\theta-al$, представленный краевыми и абляционными фациями ледниковых отложений (g_kIIIos), флювиогляциальными отложениями ($fIIIos$) и осадками прогляциальных озер ($lgIIIos$), сформированных в ходе дегляциации в интерстадиале бёллинг-аллёрд.

В разделе 5.2 описывается сеймотолща D2. Она распространена по озеру повсеместно, за исключением вершин гряд и возвышенностей, и имеет плащеобразное залегание. В целом кровля толщи ровная, волнистая, облекающая неровности поверхности нижележащих толщ. В вертикальном разрезе выделяются три сеймопачки – D2-1, D2-2, D2-3. Отложения, сопоставляемые с данной сеймостратиграфической толщей, интерпретируются как ледниково-озерные отложения приледниковых озер ($lgIIIbl$). Литостратиграфически в них описываются три слоя [Давыдова и др., 1998; Рыбалко и др., 2024], которые можно сопоставить с выделяемыми сеймопачками. Первая (верхняя) представлена серыми микрослоистыми глинами с увеличивающейся мощностью ритмов от 0,5 мм до 2 мм вниз по разрезу. Ниже залегает пачка ленточных глин преобладающего серого цвета, с мощностью ритмов от 5 до 8 мм. Нижняя пачка сложена серыми глинами с нечеткой параллельной слоистостью ленточного типа. Мощность ритмов составляет порядка 10-15 мм.

При продвижении с севера на юг наблюдается фациальное замещение двух нижних пачек D2-1 и D2-2 сейсмофацией D2a. Замещение наблюдается при уменьшении глубины выше 70 м, при этом D2a вклинивается между этими пачками. Для этой фации характерна низкоамплитудная хаотическая волновая картина. При этом иногда проявляются остаточные признаки слоистости. Кровля обретает изрезанную морфологию. При дальнейшем прослеживании толщи слоистость полностью исчезает, кровля становится холмистой. Эта сейсмофация сопоставляется с ледниково-озерными отложениями, турбированными айсберговым выпахиванием ($lg_{itIIIbI}$).

В разделе 5.3 представлена характеристика толщи D3. Данное подразделение включает в себя четыре пачки. Сеймопачка D3-1 стратиграфически занимает положение либо между толщей D2 и другими пачками толщи D3, либо локализуется во врезках нижележащих подразделений комплекса D. Зачастую отложения, сопоставляемые с данным подразделением, приурочены к подножиям крутых склонов северной части озера. Пачка характеризуется акустически прозрачной волновой картиной, морфологически выражена в виде линзовидных тел. Мощность достигает 5-7 м. Она интерпретируется как озерные декливиальные и турбидитные отложения конца верхнего неоплейстоцена - начала нижнего голоцена ($ld,ltIIIos-H^1$).

Пачка D3-2 распространена в центральной и северной частях озера, на глубинах больше 50-60 м. D3-2 обладает неявнослоистой низкоамплитудной волновой картиной с покровной морфологией. Кровля пачки ровная, слегка волнистая. Стратиграфическое положение данной пачки позволяет коррелировать ее с нижнеголоценовыми отложениями (lH^1). Эта пачка состоит из двух сейсмофаций. Акустически прозрачные фации D3-2a приурочены к обстановкам нормального нефелоидного осадконакопления переходного периода от ледниково-озерного бассейна к озерному (lnH^1). Для фаций D3-2b характерно увеличение мощности (до 3 м) и появление тонкой параллельной слоистости. Нами эти фации трактуются как флювиально-нефелоидные (ln,lfH^1).

Сеймопачка D3-3 коррелирует с озерными осадками среднего-верхнего голоцена (lH^{2-3}). Она также включает в себя две фаций. Типичным нефелоидным фациям (lnH^{2-3}) соответствует D3-3a. Этому подразделению присуща крапчатая слабоамплитудная волновая картина со слабовыраженной параллельной слоистостью. Она покровно перекрывает нижележащие подразделения, облекая и заполняя неровности рельефа. Для фаций D3-3b характерно значительное увеличение наблюдаемой мощности отложений. Волновая картина сейсмофации представлена четкой параллельной слоистостью с циклическим чередованием рефлекторов, иногда прослеживаются внутрiformационные

эрозионные отражения. D3-3b отождествляются с флювиально-нефеллоидными фациями (ln,lfH²⁻³).

Сейсмопачка D3-4 характеризуется малой мощностью (около 1 м) и акустически прозрачным типом записи. Данное подразделение фрагментарно встречается в южной части озера, на мелководьях, залегая либо в покровном виде с холмистой морфологией, либо в виде одиночных холмистых тел. Это подразделение коррелирует с осадками ундалювиального генезиса (lvH).

В разделе 5.4 представлено более подробное обоснование стратиграфо-генетической интерпретации для отдельных подразделений комплекса D. Ранее в сейсмостратиграфической схеме Э. Лебас с соавторами подразделение S2, сопоставляемое с сейсмопачкой D1-2 в актуальной схеме, было соотнесено с отложениями микулинского и подпорожского горизонтов верхнего неоплейстоцена [Lebas et al., 2021], что обосновывалось ОСЛ-датами и спорово-пыльцевыми данными, полученными по керну Co1309 [Andreev et al., 2019]. Специфическая волновая картина подразделения, которая описана выше, объясняется ледниковой экзарацией и переработкой этих отложений. Эта интерпретация подвергается критике и в качестве аргументов представлены особенности волновой картины сейсмической записи пачки D1-2, диатомовая характеристика отложений керна [Ludikova et al., 2021], сопоставление с региональными коррелянтами микулинских и подпорожских образований, механизм формирования напорных ледниковых образований, методические аспекты оптически стимулированной люминесценции при датировании ледниковых и водно-ледниковых отложений.

Следующий дискуссионный момент касается наличия аккумулятивных тел с аномально высокой мощностью, сложенных озерными отложениями, сопоставляемыми с сейсмofациями D3-2b и D3-3b. Особенности морфологии этих тел и волновой картины сейсмической записи позволяют сопоставлять их с течениевыми дрифтами. Процессы флювиальной седиментации широко распространены на дне Мирового Океана, как в океанических котловинах, так и в шельфовых морях [Rebesco et al., 2014]. Примеры подобных процессов известны и в озерах [Ceramicola et al., 2001; Johnson et al., 1980]. Образование дрифтов в Ладожском озере связывается с взаимодействием плотностных течений, возникающих при продвижении термобара, ветровых и стоковых течений, возникающих в зимний период вследствие стока речных вод.

Глава 6. Геоморфология дна котловины Ладожского озера

В этой главе раскрывается *защищаемое положение № 2*. Раздел 6.1 посвящен описанию морфологии дна. По результатам полуавтоматической классификации рельефа

по ИБП и уклону было выделено восемь типов морфологических поверхностей, которые, позволяют выделять такие формы как равнины, впадины, ложбины, гряды, возвышенности, склоны. По морфологическим особенностям выделены Южно-Ладожская, Центрально-Ладожская и Северо-Ладожская зоны.

В разделе 6.2 описаны генетические типы и формы рельефа. Выделено 23 ГОП и форм рельефа, которые относятся к трем группам рельефа: денудационной, денудационно-аккумулятивной и аккумулятивной. В денудационной группе выделены поверхности конструктивного и озерного (абразионного) генетических типов. Такие же генетические типы, а также флювиальный представлены в денудационно-аккумулятивной группе. Поверхности аккумулятивной группы представлены озерным, ледниковым, гляциофлювиальным и ледниково-озерным типами. В отдельную категорию выделяется погребенный рельеф, который не участвует в современном геоморфологическом строении котловины, но важен при реконструкции палеогеографического развития.

Конструктивный тип рельефа распространен в северной части озера, где архей-нижнепротерозойские и рифейские сложнодислоцированные породы определяют морфологию поверхности дна с большими перепадами глубин. Этот тип отнесен в денудационную и денудационно-аккумулятивную генетические группы. К денудационной группе отнесены *грядовые равнины и возвышенности, сформированные за счет препарировки интрузивных тел*. Денудационно-аккумулятивная группа включает в себя три поверхности конструктивного рельефа: *грядово-ложбинные линейно расчлененные равнины с озерной нефелоидной аккумуляцией в ложбинах, фиардово-ихерные линейно расчлененные равнины с озерной нефелоидной аккумуляцией в ложбинах, грядово-ложбинные равнины с озерной нефелоидной аккумуляцией в ложбинах, формирующиеся с участием тектонических движений*.

К флювиальному генетическому типу относятся эрозионные долины и ложбины, частично заполненные флювиально-нефелоидными отложениями, течениевые ложбины и дрифты. *Эрозионные долины, частично заполненные флювиально-нефелоидными отложениями* относятся к денудационно-аккумулятивной группе. Эти формы рельефа не наблюдаются глубже 90 м и преимущественно встречаются в южной и центральной частях озера. *Течениевые ложбины и дрифты* относятся к денудационной и аккумулятивной группам соответственно и представляют собой парагенетические образования, формирующиеся под воздействием придонных течений.

Формы озерного генетического типа входят в денудационную, денудационно-аккумулятивную и аккумулятивную группы. К денудационной (абразионной) группе относятся *пологонаклонные террасированные равнины, сформированные абразионными*

процессами вследствие изменений уровня воды и волновой деятельности, а также абразионные уступы. Они приурочены к южной мелководной части озера. В денудационно-аккумулятивную группу входят *волнистые равнины, сформированные ундалювиальными и флювиальными процессами*. Эти поверхности приурочены к восточной и западной прибрежным частям Ладожского озера и распространены в пределах глубин от 0 до 40 м. Аккумулятивная группа представлена тремя видами поверхностей. *Слабонаклонные равнины, сформированные флювиально-нефелоидной и ундалювиальной аккумуляцией*, прослеживаются у восточного побережья Ладожского озера и морфоструктурно соответствуют склону Волхов-Мантсинсаарской впадины. На глубинах от 50 до 140 м наблюдаются *пологие равнины, сформированные флювиально-нефелоидной аккумуляцией*. Эти формы приурочены к восточной части Ладожского озера. На глубинах от 90 до 230 м в северной части озера расположены *волнистые равнины, сформированные нефелоидной аккумуляцией*.

Ледниковый рельеф представлен только аккумулятивными формами. Они распространены в центральной части озера, где мощность ледниковых отложений наибольшая. *Грядово-западинные равнины фронтальной дегляциации, перекрытые маломощным комплексом ледниково-озерных и озерных отложений*, занимают большую площадь центральной части Ладожского озера. К формам ледникового рельефа отнесены *краевые ледниковые гряды*. Это линейные возвышенности высотой от 5 до 30 м, ориентированные параллельно предполагаемому фронту осташковского ледника, с юго-запада на северо-восток. Отдельно выделяются *краевые ледниковые гряды, сложенные отложениями приледниковых конусов выноса*. Это гряды, которые частично сохранили морфологию и строение конусов выноса талых ледниковых вод. В котловине озера наблюдается три пояса краевых гряд, которые мы условно назовем «сухановский» (по названию Сухановской банки), «коневецкий» и «валаамский». Сухановский краевой пояс приурочен к южной части грядово-западинных равнин фронтальной дегляциации. Коневецкий пояс наблюдается уже у северного края грядово-западинных равнин. Далее по направлению на север фиксируется валаамский пояс краевых гряд.

Флювиогляциальный генетический тип также включает в себя только аккумулятивные формы. К ним относятся приледниковые конусы выноса и озы Де Геера. *Приледниковые конусы выноса* расположены преимущественно в центральной части Ладожского озера. Это положительные формы рельефа длиной до 3 км, в плане имеющие каплеобразную форму и ориентированные с северо-запада на юго-восток. *Озы Де Геера* также наблюдаются в центральной части водоема. Это вытянутые гряды, длина которых варьируется от 5 до 20 км.

Ледниково-озерный рельеф представлен *слабонаклонными равнинами*. Это поверхности, расположенные в южной части Ладожского озера, на глубине от 15 до 50 м.

К погребенному рельефу отнесены эрозионные долины и гравитационные шлейфы. *Погребенные эрозионные долины* подразделяются на две группы – долины, выработанные в дочетвертичных образованиях, и долины, выработанные в верхнеплейстоценовых отложениях. *Погребенные гравитационные шлейфы* представляют собой аккумулятивные тела, распространенные в северной части котловины. Они приурочены к подножиям конструкторных гряд и возвышенностей.

Глава 7. Проявления тектонических движений

В этой и следующей главе раскрывается *защищаемое положение № 3*. Она посвящена вопросу неотектонического режима котловины озера. Рассмотрены точки зрения различных авторов на характер тектонических движений [Ладожское озеро..., 1978; Мусатов, 1995; Амантов, Амантова, 2014; Анохин и др., 2016; Ассиновская, Карпинский, 2020]. Сделан вывод о том, что в условиях маломощного осадочного чехла Ладожского озера типичные признаки тектонических деформаций на сейсмоакустических данных встречаются довольно редко. Наиболее убедительно выделяются дизъюнктивные нарушения в северо-восточной части Ладожского озера. Для обоснования тектонического поднятия восточной части озера использован метод секвентной стратиграфии. По разнице глубин залегания элементов голоценовых секвенций в южной и восточной частях озера установлено, что в последней наблюдается голоценовое поднятие земной коры с амплитудой до 10 м. Эти данные сопоставлены с признаками тектонических движений, выявленных при исследованиях на побережье озера [Кошечкин, Экман, 1993; Энман, 2006].

Глава 8. Этапы морфолитогенеза

В этой главе раскрывается *защищаемое положение № 3*. На основе сейсмofациальной интерпретации верхней части осадочного чехла, а также геоморфологического анализа сейсмоакустических и батиметрических данных в поздне-последледниковое время можно выделить четыре этапа морфолитогенеза котловины Ладожского озера: субгляциальный, маргинально-прогляциальный, перигляциальный и лимнический. Каждому из этих этапов соответствуют специфические отложения и формы рельефа. Принципиальная схема развития этих процессов представлена на рис. 1.

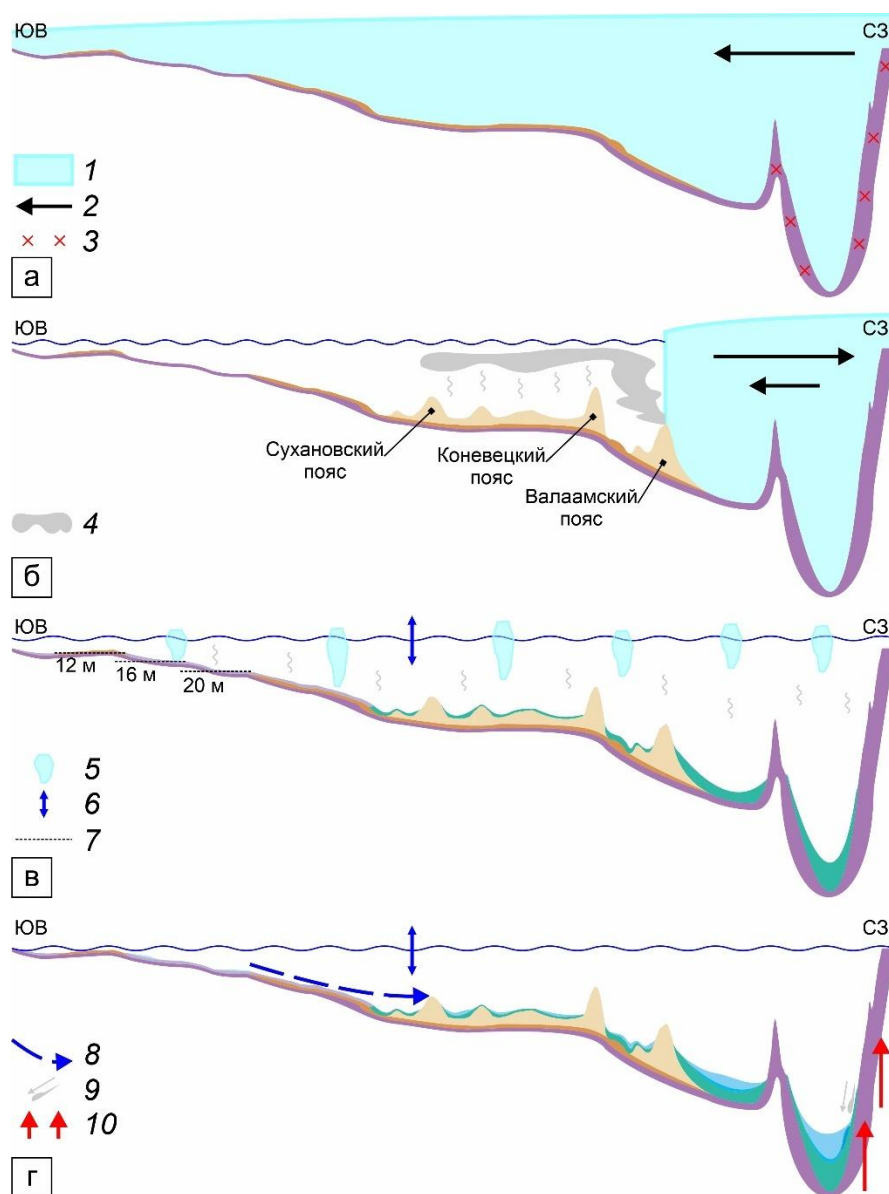


Рисунок 1. Схема морфолитогенетических процессов на различных этапах развития Ладожского озера; а – субгляциальный этап; б – маргинально-прогляциальный этап; в – перигляциальный этап; г – лимнический этап. Условные обозначения: 1 – ледниковый покров; 2 – направление наступления/отступления ледникового покрова; 3 – ледниковая экзарация; 4 – вынос ледникового материала в приледниковый бассейн; 5 – айсберги; 6 – вековые колебания уровня; 7 – реликтовые береговые линии; 8 – придонные течения; 9 – транспортировка гравитационного материала; 10 – неотектоническое поднятие земной коры

Начало *субгляциального этапа* связано с перекрытием котловины Ладожского озера Скандинавским ледниковым щитом последнего осташковского (поздневалдайского) оледенения. Окончание этого этапа приходится на время начала дегляциации котловины. В этот период основные процессы морфолитогенеза сводятся к ледниковой аккумуляции и

экзарации. Аккумулятивная составляющая заключается в формировании основной морены $g_{bn}IIIos$ (сейсмopачка D1-1). Экзарационная деятельность наиболее ярко проявляется в северной части озера, где наблюдается структурный рельеф, и выражается в обработке уже частичного отпрепарированного во время предыдущих оледенений грядово-ложбинного рельефа.

Маргинально-прогляциальный этап связывается с дегляциацией котловины Ладожского озера в интерстадиале бёллинг-аллерёд. В это время происходило формирование гляцигенного парагенетического комплекса $GIIIb\theta-al$ (сейсмopачка D1-2), включающего в себя бассейновые краевые морены, флювиогляциальные и прогляциальные ледниково-озерные отложения, а также связанных с ним форм рельефа: грядово-западинных равнин центральной части Ладожского озера, краевых гряд, конусов выноса талых ледниковых вод, озв де Геера. Все это указывает на то, что деградация ледника происходила фронтальным способом в непосредственном контакте с приледниковым бассейном. При обильном таянии, связанным с интерстадиальными климатическими условиями происходил масштабный вынос талых ледниковых вод, которые и формировали флювиогляциальные формы рельефа.

Общая схема дегляциации озера представляется в следующем виде:

- 1) рецессия края ледника от Волхов-Невского водораздела, формирование Невского ледникового озера;
- 2) сухановская осцилляция;
- 3) суханово-коневецкая рецессия;
- 4) коневецкая стагнация;
- 5) коневец-валаамская рецессия;
- 6) валаамская осцилляция;
- 7) рецессия хейнола с полной дегляциацией котловины.

Перигляциальный этап связан с формированием и развитием Балтийского ледникового озера (БЛО). Эволюция этого бассейна сопровождается колебаниями уровня воды. По данным предыдущих исследователей фиксируются две трансгрессии, разделенные регрессией на границе аллерёда и позднего дриаса, а также финальная регрессия БЛО, завершившаяся его спуском на границе верхнего неоплейстоцена и голоцена.

В течение этого этапа в Ладожском озере происходит накопление ледниково-озерных ленточных глин $IgIIIbl$, что в сейсмостратиграфической схеме соответствует сейсмотолще D2. Она подразделяется на три замещающих друг друга по вертикали сейсмopачки – D2-1, D2-2, D2-3. По варвохронометрическим данным [Gromig et al., 2019]

формирование пачки D2-1 происходит около 13900 кал. л.н., D2-2 – 13900-11900 кал. л.н., D2-3 – 11900-11400 кал. л.н. Отдельно в сеймостратиграфической схеме выделяется распространенная в южной части Ладожского озера сеймофация D2a с хаотической волновой картиной, которая сопоставляется с погребенными ледниково-озерными отложениями, турбированными айсберговым выпахиванием ($lg_{itIIIbl}$). Ее образование связывается с подвижкой ледника Сальпаусселькя I 12,6-12,3 тыс. кал. л.н., или с трансгрессивно-регрессивными циклами Балтийского ледникового озера.

Анализ геоморфологии южной части Ладожского озера позволил выделить три реликтовых береговых линии, расположенных на глубинах 12, 16 и 20 м. Они фиксируются по небольшим абразионным уступам высотой около 2-3 м и аккумулятивным формам, сложенным сеймопачкой D3-4 (lvH). Предполагается, что они сформировались при снижении уровня Балтийского ледникового озера в конце верхнего неоплейстоцена и его окончательном спуске. Оценить максимальную величину понижения озера можно по погребенным долинам, которые выработаны в ледниково-озерных отложениях. Поскольку наблюдаемая глубина их тальвега достигает около 25 м, то мы можно полагать, что максимальное падение уровня достигало как минимум этих значений.

В голоцене начинается *лимнический этап* морфолитогенеза Ладожского озера. В самом начале этого этапа, при переходе от неоплейстоцена к голоцену, интенсифицировались процессы гравитационного перемещения материала. В разрезе северной части Ладожского озера это выражается в виде линзовидных тел сеймопачки D3-1, ассоциируемой с декливиальными и турбидитными отложениями, которые заключены между сеймотолщами D2 и D3. Предполагается, что это связано с возникновением сейсмических событий, ставших триггером для увеличенной транспортировки материала по склонам.

Период пребореального низкого уровня и анциловой трансгрессии в сеймостратиграфической схеме сопоставляется с пачкой D3-2, среднему и верхнему голоцену соответствует пачка D3-4. Рельефообразование в лимническом этапе связано с формированием озерных аккумулятивных, денудационно-аккумулятивных и абразионных равнин.

Береговые геоморфологические исследования позволяют говорить о том, что в котловине озера на протяжении всего голоцена испытывает неравномерные тектонические движения, что проявляется в разновысотном положении древних береговых линий на разных участках побережья.

Сейсмоакустические данные позволяют сделать вывод о том, что немалую роль в процессах голоценового осадконакопления играют придонные течения. Неоднородность

батиметрии Ладожского озера приводит к неравномерному прогреванию водных масс озера, что в свою очередь является причиной возникновения термобара. Движение термобара два раза в год обуславливает возникновение придонных течений. На мелководьях также свою роль играют ветровые и стоковые течения.

Заключение

В рамках выполненного диссертационного исследования были детально изучены геоморфология и строение верхней части геологического разреза котловины Ладожского озера. Фактический материал, ставший основой текущего исследования, представлен наборами разночастотных сейсмоакустических данных, а также цифровой батиметрической моделью Ладожского озера разрешением 500 м.

1. На основе интерпретации материалов сейсмоакустического профилирования был разработан авторский вариант местной сеймостратиграфической схемы отложений верхнего неоплейстоцена и голоцена Ладожского озера. Сейсмокомплекс D, соответствующий этим образованиям был подразделен на сеймотолщи, которые в свою очередь расчленены на сеймопачки и сеймофации. Сеймостратиграфические подразделения были соотнесены с имеющимися геологическими данными по дну акватории и побережью Ладожского озера. Выделено три сеймотолщи D1, D2 и D3, которые коррелируют с ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями осташковского горизонта, ледниково-озерными отложениями Балтийского ледникового озера и голоценовыми озерными отложениями.

Сеймотолща D1 состоит из двух пачек, нижняя (D1-1) коррелирует с основной мореной осташковского горизонта ($g_{bnIIIos}$), верхняя (D1-2) – с маргинально-прогляциальным комплексом ледниковых и водно-ледниковых отложений интерстадиала беллинг-аллеред ($GIIIb\varnothing-al$). В этой пачке выделены сеймофации, отражающие различные обстановки краевого и приледникового осадконакопления.

В сеймотолще D2 выделяются три сеймопачки и одна сеймофация. Сеймопачки D2-1, D2-2 и D2-3 сопоставлены с ленточноподобными ($lgIIIbl^1$), типичными ленточными ($lgIIIbl^2$) и микрослоистыми ($lgIIIbl^3$) глинами Балтийского ледникового озера, которые неоднократно были описаны в акватории Ладожского озера. Специфическая волновая картина сеймофации D2a позволяет связать ее с ледниково-озерными отложениями, турбированными айсберговым выпахиванием.

Сеймотолща D3 подразделена на четыре сеймопачки. Нижняя сеймопачка D3-1 сопоставлена с декливиальными и турбидитными отложениями, образованными на границе верхнего неоплейстоцена и голоцена ($ld,ltIIIos-H^1$). Следующие две сеймопачки D3-2 и D3-

3 коррелируют соответственно с нижнеголоценовыми (IN^1) и средне-верхнеголоценовыми озерными образованиями (IN^{2-3}). Эти две сейсмопачки по особенностям волновой картины подразделены на фации, соответствующие типичными нефелоидным осадкам и флювиально-нефелоидным образованиям. Последняя сейсмопачка встречается на южном мелководье Ладожского озера и сопоставляется с озерными ундалювиальными отложениями (IVN).

2. На основе разработанной сейсмостратиграфической схемы и геоморфометрического анализа цифровой батиметрической модели Ладожского озера по принципу аналитического генетического картирования была подготовлена геоморфологическая карта в масштабе 1 : 1 000 000. На донной поверхности выделено шесть генетических типов рельефа: конструктивный, флювиальный, озерный, ледниковый, флювиогляциальный и ледниково-озерный. Также выделяется категория погребенного рельефа. Конструктивный рельеф распространен в северной части озера и представлен поверхностями денудационного и денудационно-аккумулятивного характера. К флювиальному рельефу отнесены различные долины в частично погребенном состоянии, а также парагенетические пары эрозионных ложбин и аккумулятивных дрифтов. В озерном рельефе выделены поверхности денудационного (абразионного), денудационно-аккумулятивного и аккумулятивного типа. Формы озерного генезиса преимущественно встречаются по периферии озера. Ледниковый, флювиогляциальный и ледниково-озерный типы рельефа формируют морфологию центральной части Ладожского озера и характеризуются формами исключительно аккумулятивного характера. Погребенный рельеф представлен эрозионными долинами, а также гравитационными шлейфами.

3. На основе сопоставления сейсмостратиграфических подразделений и форм рельефа, были определены четыре этапа морфолитогенеза котловины Ладожского озера в позднем неоплейстоцене и голоцене.

Субгляциальный этап связан с перекрытием котловины озера ледниковым покровом. В этот период происходила препарировка конструктивного рельефа в северной части водоема, а также аккумуляция основной морены.

На маргинально-прогляциальный этап приходится начало дегляциации котловины озера. Это время связано с возникновением первых приледниковых водоемов, форм и отложений краевого ледникового, флювиогляциального и ледниково-озерного происхождения. В течение этого этапа происходят две фазы осцилляции и одна фаза стагнации ледникового края, которые маркируются сухановским (осцилляция), коневецким (стагнация) и валаамским (осцилляция) поясами краевых ледниковых образований.

В перигляциальном этапе доминирующим процессом морфолитогенеза становится ледниково-озерное осадконакопление в условиях Балтийского ледникового озера. Формируются ледниково-озерные ленточные глины, которые частично сглаживают неровности рельефа предыдущих этапов. Этот период сопровождается колебаниями уровня приледникового бассейна. На последних этапах развития Балтийского ледникового озера происходило снижение его уровня ниже современного уровня Ладожского озера. Это привело к формированию реликтовых береговых линий на глубинах 12, 16 и 20 м. На осадконакопление также влияла и динамика ледникового края, уже покинувшего котловину озера. Образование отложений, турбированных айсберговым выпаживанием, связывается с наступлением ледника во время формирования краевого пояса Сальпаусселькя I.

В голоцене (лимнический этап) происходит переход от ледниково-озерных обстановок к озерным. Вероятно, при этом транзите имели место сейсмические события, которые привели к образованию линз декливиальных и турбидитных отложений у подножий склонов возвышенностей северной части озера. В течение голоцена развитие Ладожского озера сопровождалось колебаниями уровня, следы которых проявляются на побережье водоема в виде древних береговых форм рельефа. На осадконакопление в самом озере значительное влияние оказывают придонные течения, возникающие в результате движения термобара два раза в год, воздействия ветра и речного стока. Помимо этого, морфолитогенез котловины сопровождается неотектоническими движениями, признаки которых обнаруживаются как на дне озера, так и на его побережье.

Впервые получены следующие результаты:

- обосновано понятие «денудационно-аккумулятивного конструктивного генетического типа рельефа»
- доказано флювиогляциальное и ледниковое происхождение гряд центральной части Ладожского озера;
- выделены сухановский, коневецкий, валаамский краевые ледниковые пояса, возникшие в интерстадиале беллинг-аллеред;
- установлено, что ледниково-озерные отложения южной части Ладожского озера формировались с участием айсбергового выпаживания;
- обнаружены древние береговые линии на глубинах 12, 16 и 20 м, соотносимые со временем снижения Балтийского ледникового озера в конце верхнего неоплейстоцена, максимальная глубина снижения уровня оценивается в 25 м;
- подтверждено влияние придонных течений на осадконакопление в течение голоцена;

– данные о неотектоническом поднятии восточной и северо-восточной частей Ладожского озера сопоставлены со сведениями о неотектонических движениях на побережье.

Таким образом, выполненное исследование позволяет значительно детализировать историю развития Ладожского озера в верхнем валдае и голоцене. Продемонстрировано, что на строение рельефа и донных отложений оказывал влияние комплекс различных процессов, взаимосменяющих и взаимодополняющих друг друга на протяжении всей эволюции водоема.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, и индексируемых в международных базах данных

Scopus и Web of Science

1. Aksenov, A.O. Geomorphology of Lake Ladoga Basin / Aksenov A.O., Rybalko A.E., Naumenko M.A. // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – No. 4. – P. 492-494. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-492 (Scopus Q4)
2. Aksenov, A.O. Limnogenesis of Large Lakes in the North-West of the Russian Plain / Rybalko A.E., Subetto D.A., Belkina N.A., Strakhovenko V.D., Beliaev P.Yu., Tokarev M.Yu., Saveliyeva L.A., Potakhin M.S., Orlov A.V., Kublitskiy Yu.A., Aksenov A.O., Korost S.R. // Limnology and Freshwater Biology. – 2022. – No. 4. – P. 1559-1561. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1559 (Scopus Q4)
3. Aksenov, A.O. Geomorphological Evidence of Lake Ladoga Holocene Regressions after the Baltic Ice Lake Drainage (Derived from Sediment Echosounder Data) / Aksenov A.O., Krastel S., Rybalko A.E., Fedorov G.B. // Limnology and Freshwater Biology. – 2022. – No. 4. – P. 1378-1380. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1378 (Scopus Q4)
4. Аксенов, А.О. Формирование крупнейших озер северо-запада России по восточной периферии балтийского кристаллического щита / Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Белкина Н.А., Страховенко В.Д., Аксенов А.О., Беляев П.Ю., Токарев М.Ю., Савельева Л.А., Потахин М.С., Орлов А.В., Корост С.Р., Кублицкий Ю.А., Локтев А.С. // Геоморфология и палеогеография. – 2023. – Т. 54. – № 4. – С. 40-56. DOI: 10.31857/S2949178923040102 (перечень ВАК, Scopus Q2)
5. Аксенов, А.О. Строение рельефа котловины Ладожского озера по результатам интерпретации сейсмоакустических и батиметрических данных / Аксенов А.О., Рыбалко А.Е., Наumenko М.А., Токарев М.Ю., Субетто Д.А. // Геоморфология и

- палеогеография. – 2023. – Т. 54. – № 4. – С. 26-39. DOI: 10.31857/S2949178923040035 (перечень ВАК, Scopus Q2)
6. Аксенов, А.О. Применение геоморфометрического метода при исследовании рельефа дна Ладожского озера / Аксенов А.О. // Известия Русского географического общества. – 2023. – Т. 155. – № 1. – С. 3-12. DOI: 10.31857/S0869607123010020 (перечень ВАК)
 7. Aksenov, A.O. ¹³⁷Cs Migration and Profile in Bottom Sediments of Deep Drainage Lakes, North-Western Russia / Bakunov N.A., Bolshiyanov D.Yu., Aksenov A.O. // Radiochemistry. – 2023. – Vol. 65. – No. 5. – P. 585-591. DOI: 10.1134/s1066362223050090 (перечень ВАК, Scopus Q3, Web of Science Q4)
 8. Aksenov, A.O. The Geology, Geomorphology, and History of Lake Ladoga: a Review / Subetto D.A., Rybalko A.E., Naumenko M.A., Ludikova A.V., Kuznetsov D.D., Aksenov A.O., Tokarev M.Yu., Kublitskiy Yu.A. // Doklady Earth Sciences. – 2024. – Vol. 519. – No. S1. – P. S91-S109. DOI: 10.1134/S1028334X24604735 (перечень ВАК, Scopus Q3, WoS Q4)
 9. Аксенов, А.О. Отложения ледниково-водной формации в крупных озерах и внутренних морях восточной периферии Балтийского щита: особенности формирования, литологические особенности и место в палеогеографии позднего неоплейстоцена голоцена на северо-западе европейской части России / Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Токарев М.Ю., Репкина Т.Ю., Зарецкая Н.Е., Аксенов А.О., Беляев П.Ю. // Limnology and Freshwater Biology. – 2024. – № 4. – С. 630-635. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-630 (Scopus Q4)
 10. Аксенов, А.О. Корреляция береговых образований Тайпаловского залива с изменениями уровня Ладожского озера в голоцене / Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Правкин С.А., Лебедев Г.Б. // Limnology and Freshwater Biology. – 2024. – № 4. – С. 223-228. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-223 (Scopus Q4)
 11. Аксенов, А.О. Голоценовые колебания относительного уровня Ладожского озера в районе Тайпаловского залива / Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Правкин С.А., Лебедев Г.Б. // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2025. – Т. 71. – № 1. – С. 32-45. DOI: 10.30758/0555-2648-2025-71-1-32-45 (перечень ВАК, Scopus)
 12. Аксенов, А.О. Новые сведения о позднеголоценовых изменениях уровня Ладожского озера в южном Приладожье / Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Правкин С.А., Лебедев Г.Б., Пушина З.В., Зубкова П.С. // Известия Русского географического общества. – 2025. – Т. 157. – № 3. – С. 268-287. DOI: 10.7868/S3034538325030025 (перечень ВАК)