

ПАЛЕОЛИМНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РОССИИ:
ОТ КАЛИНИНГРАДА ДО КАМЧАТКИ

УДК 551.4.03:556.55(470.25)

СТРОЕНИЕ РЕЛЬЕФА КОТЛОВИНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ
И БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ[#]

© 2023 г. А. О. Аксенов^{1,2,*}, А. Е. Рыбалко^{1,3,4}, М. А. Науменко⁵,
М. Ю. Токарев⁶, Д. А. Субетто^{4,7,8}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

³ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

⁵Институт озераедения СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁶Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁷Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

⁸Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

*E-mail: aksenov2801@gmail.com

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

Несмотря на то, что за последние 70 лет накоплен большой объем данных о геологическом строении, четвертичном покрове и донных осадках крупнейшего в Европе Ладожского озера, геоморфологические особенности дна водоема изучены весьма слабо. Как правило, описание рельефа сводится к краткой характеристике морфометрических параметров и крупных элементов поверхности дна. В настоящем исследовании представлены принципиально новые сведения о геоморфологии дна Ладожского озера. На основе данных сейсмоакустического профилирования сверхвысокого разрешения, собранных в 2014 и 2015 гг., а также цифровой батиметрической модели котловины водоема в настоящей статье представлена новая интерпретация геоморфологических особенностей дна Ладожского озера. В результате интерпретации сейсмических данных, а также анализа морфологии путем полуавтоматической классификации параметров цифровой батиметрической модели (индекса батиметрической позиции и уклона) были выделены и охарактеризованы 6 генетических типов рельефа — денудационный конструктурный, эрозионный субаквальный, озерный, ледниковый, флювиогляциальный краевой, ледниково-озерный. Выделены формы мезо- и макрорельефа, такие как равнины, возвышенности, гряды, впадины, ложбины, долины. Подтверждено наличие признаков неотектонических вертикальных блоковых движений к северу от Валаамского архипелага, прослежены краевые образования невиской стадии осташковского оледенения в центральной части озера, представленные в виде форм водно-ледникового происхождения (озы и конуса выноса). Охарактеризованы условия и формы послеледникового рельефообразования в условиях ледниково-озерной и озерной седиментации. Выявленные особенности отражены в составленной авторами новой геоморфологической схеме масштаба 1:1 000 000, основанной на морфогенетическом принципе аналитического геоморфологического картирования.

Ключевые слова: Ладожское озеро, геоморфология, геоморфологическая схема, сейсмоакустическое профилирование, цифровая батиметрическая модель, озы, ледниковые гряды

DOI: 10.31857/S2949178923040035, **EDN:** YBPSNE

ВВЕДЕНИЕ

Ладожское озеро (площадь акватории — 17765 км², объем 848 км³) уже более 100 лет является объек-

том геологических (геологическое строение и тектоника котловины) и палеогеографических (развитие водоема в четвертичном периоде) исследований (Квасов и др., 1990). За последние 20 000—15 000 лет происходила деградация последнего оледенения, формирование самого озера и процесс его развития, сопровождавшийся многочисленными колебаниями уровня водоема. События, запечатленные в донных осадках за этот

[#] Ссылка для цитирования: Аксенов А.О., Рыбалко А.Е., Науменко М.А. и др. (2023). Строение рельефа котловины Ладожского озера по результатам интерпретации сейсмоакустических и батиметрических данных // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 4. С. 26–39. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040035>; <https://elibrary.ru/YBPSNE>

период времени, служат надежной основой для реконструкций развития палеогеографических условий в регионе.

Рельеф дна является интегральной формой сохранения информации об особенностях геологического развития подводных территорий, влияния современных геоморфологических процессов на преобразование (новообразование) черт устройства донной поверхности и является одним из ведущих факторов, обуславливающих особенности проявления четвертичного лито- и морфогенеза. Таким образом, необходимость изучения рельефа и геоморфологического картирования подводных территорий представляется безусловно актуальной, что подтверждается в нормативно-методических документах по проведению ГСШ-1000 (Методическое руководство..., 2009). Внедрение сейсмоакустических методов изучения морского и озерного дна открывает большие возможности перед геоморфологическими исследованиями и, в частности, для установления связей между морфологией и генетической интерпретацией форм донного рельефа, в том числе и в области ледниковой геологии.

Целью настоящей статьи является всесторонняя геоморфологическая характеристика донного рельефа Ладожского озера. Для достижения поставленной цели были выполнены интерпретация сейсмоакустических данных, а также морфологический анализ цифровой модели озера. На этой основе были выделены генетические типы рельефа котловины, описаны морфология, генезис и предполагаемый возраст основных форм рельефа. Все это нашло свое отражение в составленной авторами геоморфологической схеме масштаба 1:1 000 000.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИСТОРИИ ИЗУЧЕНИЯ РЕЛЬЕФА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

История изучения рыхлого покрова донных отложений и рельефа Ладожского озера насчитывает много лет. Планомерное изучение водоема началось в послевоенные годы и связано, прежде всего, с исследованиями Института озероведения АН СССР. Работы послевоенных лет, включавшие эхолотирование, а также отбор ковшовых и колонковых проб (с помощью трубки ГОИН длиной 1 м) были обобщены в монографии Н.И. Семеновича “Донные отложения Ладожского озера” (1965), где представлены данные о составе, свойствах и характере распределения донных осадков озера. По этим же колонкам были проведены биостратиграфические анализы (споропыльцевой и диатомовый), направленные исключительно на изучение голоценовых осадков (Абрамова и др., 1967; Давыдова, Трифонова, 1982; Давыдова, 1985).

В 1980-х гг. сотрудники ВСЕГЕИ вместе с Институтом озероведения АН СССР провели серию научных исследований на Ладожском озере, в которые впервые были включены методы сейсмоакустического профилирования для изучения строения четвертичного покрова. Одновременно был проведен геологический пробортбор с помощью грунтовых прямоточных трубок длиной до 5 м. Это позволило вскрыть не только голоценовые, но и подстилающие их отложения приледникового озера, а по результатам сейсмоакустического профилирования, основываясь на опыте Белого моря (Девдариани и др., 1993), сформулировать вывод о том, что разрез рыхлых отложений начинается с морены валдайского оледенения. Впервые установлены формы донного рельефа, указывающие на проявление неотектонических процессов (Амантов, Спиридонов, 1989). С начала 1990-х гг. появились обобщающие работы по результатам геолого-палеогеографических исследований озера (История Ладожского, Онежского..., 1990), строению донных отложений (Субетто и др., 1989), по палеолимнологическим реконструкциям на основе исследования донных отложений (Субетто, 2009). Первая схема распределения четвертичных отложений Ладожского озера, основанная на материалах ВСЕГЕИ и анализе многолетних исследований Института озероведения АН СССР, была опубликована в 1998 г. (Subetto et al., 1998).

Первое комплексное геоэкологическое исследование донных отложений и рельефа Ладожского озера было проведено в конце 1990-х гг. ВНИИОкеангеология (Щербаков и др., 2018). По материалам этих работ была выпущена монография “Геоэкология Ладожского озера” (1995), в которой кратко была охарактеризована геоморфология котловины озера. Там же была представлена первая геоморфологическая схема озера (Мусатов, 1995). На этой схеме были отражены различные по генезису поверхности, а также выделена сеть погребенных палеодолин.

В 2010-х гг. на акватории озера было проведено несколько экспедиций, которые затрагивали проблемы геоморфологии дна. Так, в 2013 г., в рамках российско-германского проекта “PLOT” были проведены площадные сейсмические исследования, результаты которых обобщены в статье (Lebas et al., 2021). По результатам этих исследований было выбрано место и пробурена глубокая скважина до глубины 22.75 м, в которой вскрываются голоценовые и верхненеоплейстоценовые отложения. Результаты анализа керна опубликованы в нескольких работах (Andreev et al., 2019; Gromig et al., 2019; Savelieva et al., 2019). Вопрос развития рельефа был затронут только в работе (Lebas et al., 2021).

Большой вклад в решение проблемы генезиса четвертичных отложений Ладожского озера и

связанных с ними форм донного рельефа был внесен А.В. Амантовым. Проанализировав многочисленные материалы ВСЕГЕИ, которые были получены методом непрерывного сейсмоакустического профилирования с электроискровым источником, а также многочисленные геологические и батиметрические материалы, он составил карту типов рельефа дна и пришел к выводу, что основным фактором развития котловины выступает ледниковая денудация. Сама котловина представляется “равнинным цирком ледникового щита” (Амантов, Амантова, 2014, с. 12). При этом авторами отрицалась активная роль неотектонических движений в формировании дна озера. Составленная А.В. Амантовым геологическая карта Ладожского озера (Амантов, 2014) является до сих пор основным источником информации о структурных факторах, влияющих на формирование его современного подводного рельефа.

Значительный вклад в изучение рельефа дна Ладожского озера внесло составление детальной цифровой батиметрической модели, которая послужила на долгие годы основным источником информации об особенностях морфометрии озерного дна (Науменко, 2013; Naumenko, 2020).

Приведенные выше публикации и взгляды легли в основу геоморфологической схемы масштаба 1:2500000, составленной во ВСЕГЕИ в рамках ГК-1000/3 (лист Р-(35),36-Петрозаводск) (Государственная геологическая карта..., 2015). В пределах Ладожского озера выделяются несколько форм поверхности дна. Северная часть представлена холмисто-грядовыми равнинами, центральная — волнистой озерной равниной, южная — плосковолнистыми ледниково-озерными равнинами и террасами. Южное и восточное побережье окаймляют холмисто-увалистые равнины. В этом случае большую часть поверхности, как принято для внутриконтинентальных водоемов, обозначают озерной равниной. Эта схема упрощенно описывает рельеф Ладожского озера, но, тем не менее, позволяет представить геоморфологическое строение озерной котловины и проследить основные этапы ее формирования.

В 2014–2015 гг. ЦМИ МГУ в содружестве с СПбГУ и Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН были проведены геофизические исследования четвертичного покрова Ладожского озера. По материалам этих рейсов П.Ю. Беляевым была составлена геоморфологическая схема Ладожского озера (2020). Данная схема была основана только на материалах сейсмоакустического профилирования и геологического пробоотбора, без применения цифровой батиметрической модели. Тем не менее, в отличие от предшественников, эта схема стала более подробной, выделены гряды различного ге-

незиса, равнины, погребенные долины и гравитационные формы рельефа.

Таким образом, в настоящее время накопилось большое количество новых данных для полноценного описания геоморфологического строения дна Ладожского озера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными материалами для статьи послужили данные многоканального сейсмоакустического профилирования сверхвысокого разрешения (Рыбалко и др., 2015; Егорова и др., 2017; Рыбалко и др., 2017), цифровая батиметрическая модель Ладожского озера, созданная в Институте озероведения СПб ФИЦ РАН (Naumenko, 2020; Науменко, 2013), а также материалы ранее выполненных исследований (Мусатов, 1995; Амантов, Амантова, 2014; Беляев, Рыбалко, Субетто, 2020).

В 2014 и 2015 г. на акватории Ладожского озера были получены сейсмоакустические данные при помощи 16-канальной косы и источников сигнала “Бумер” (частота излучения — 1.25–2 кГц) и “Спаркер” (частота излучения — 300–700 Гц). В 2014 г. было получено 780 км профилей, в 2015 г. — 410 км (рис. 1).

Интерпретация сейсмических данных произведена в программном обеспечении IHS The Kingdom Software 2015. На основе анализа волновых картин, выделения отражающих горизонтов и представлений о строении четвертичного покрова озера, а также используя данные интерпретационного пробоотбора, было выделено 5 сейсмических комплексов. Для расчета расстояния, пройденного сейсмическим сигналом, использовалась скорость прохождения сигнала в воде в районе 1500 м/с, скорость прохождения сигнала в четвертичных отложениях — 1600 м/с.

Батиметрические данные представлены в виде цифровой батиметрической модели с разрешением 500 м (рис. 1). Данная модель выполнена в результате интерполяции значений глубин с батиметрических карт (Naumenko, 2020). Анализ морфологии дна заключался в выделении поверхностей методом полуавтоматической инструментальной классификации рельефа. По батиметрическим данным были рассчитаны два морфометрических показателя: индекс батиметрической позиции (в двух вариациях — крупномасштабной (рис. 2, (а)) и мелкомасштабной (рис. 2, (б)), а также уклон дна (рис. 2, (в)). Индекс батиметрической позиции — это показатель, рассчитываемый как разница между значением глубины в ячейке модели рельефа и значением средней глубины в окрестности, задаваемой двумя радиусами — внутренним и внешним (Lundblad et al., 2006). Полученные значения приводятся к стандартизированной по среднеквадратичному отклонению (σ) шкале, где

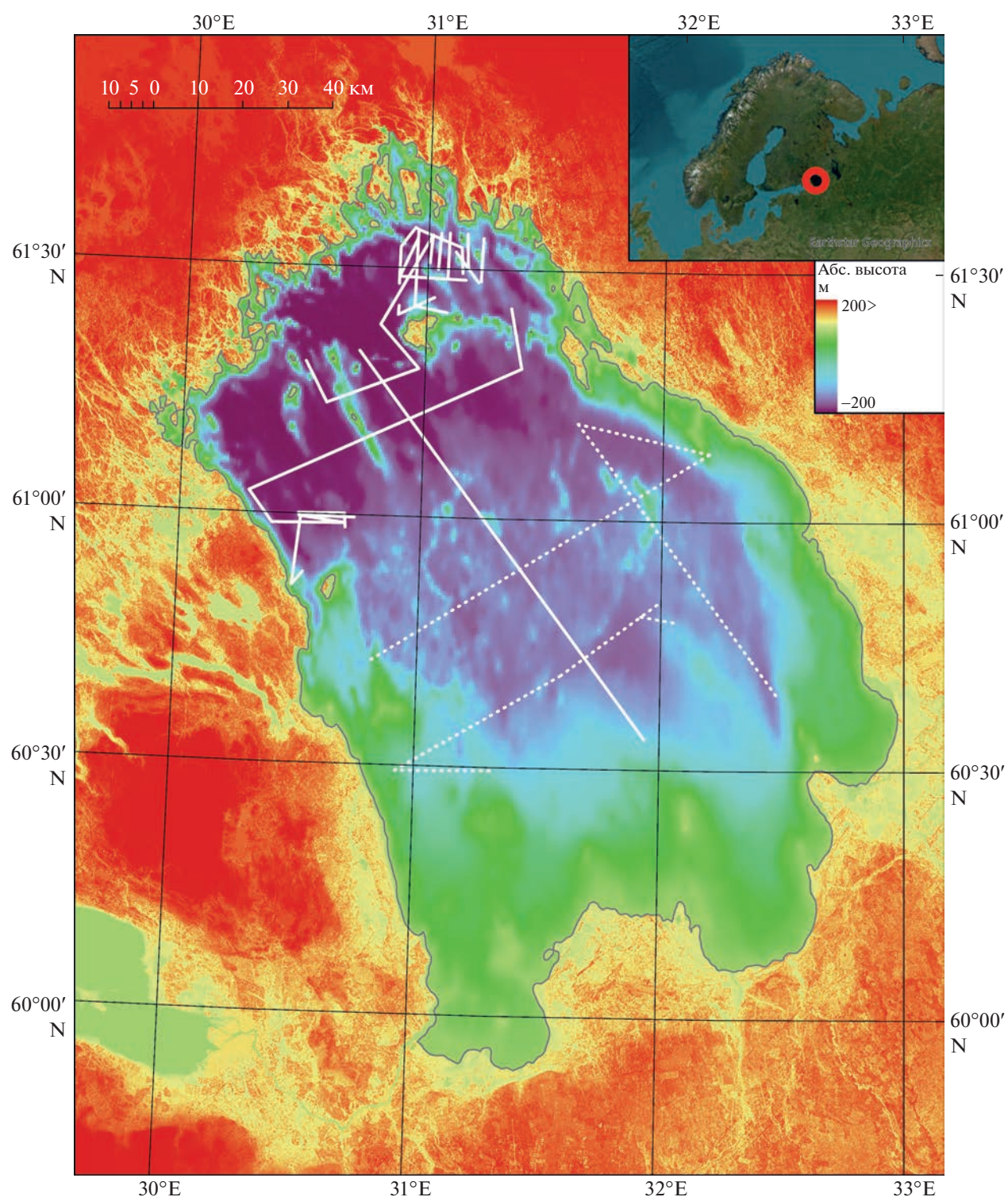


Рис. 1. Карта фактического материала. Цифровая батиметрическая модель Ладожского озера, совмещенная с цифровой моделью рельефа ASTER GDEM v.003 (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>), с положением сейсмических профилей. Сплошной линией показаны профили 2014 г., пунктирной – профили 2015 г.

Fig. 1. The map of fact material. Lake Ladoga digital bathymetric model merged with digital elevation model ASTER GDEM v.003 (Tachikawa et al., 2011) with location of seismic profiles. Solid line is for 2014 profiles, dotted line is for 2015 profiles.

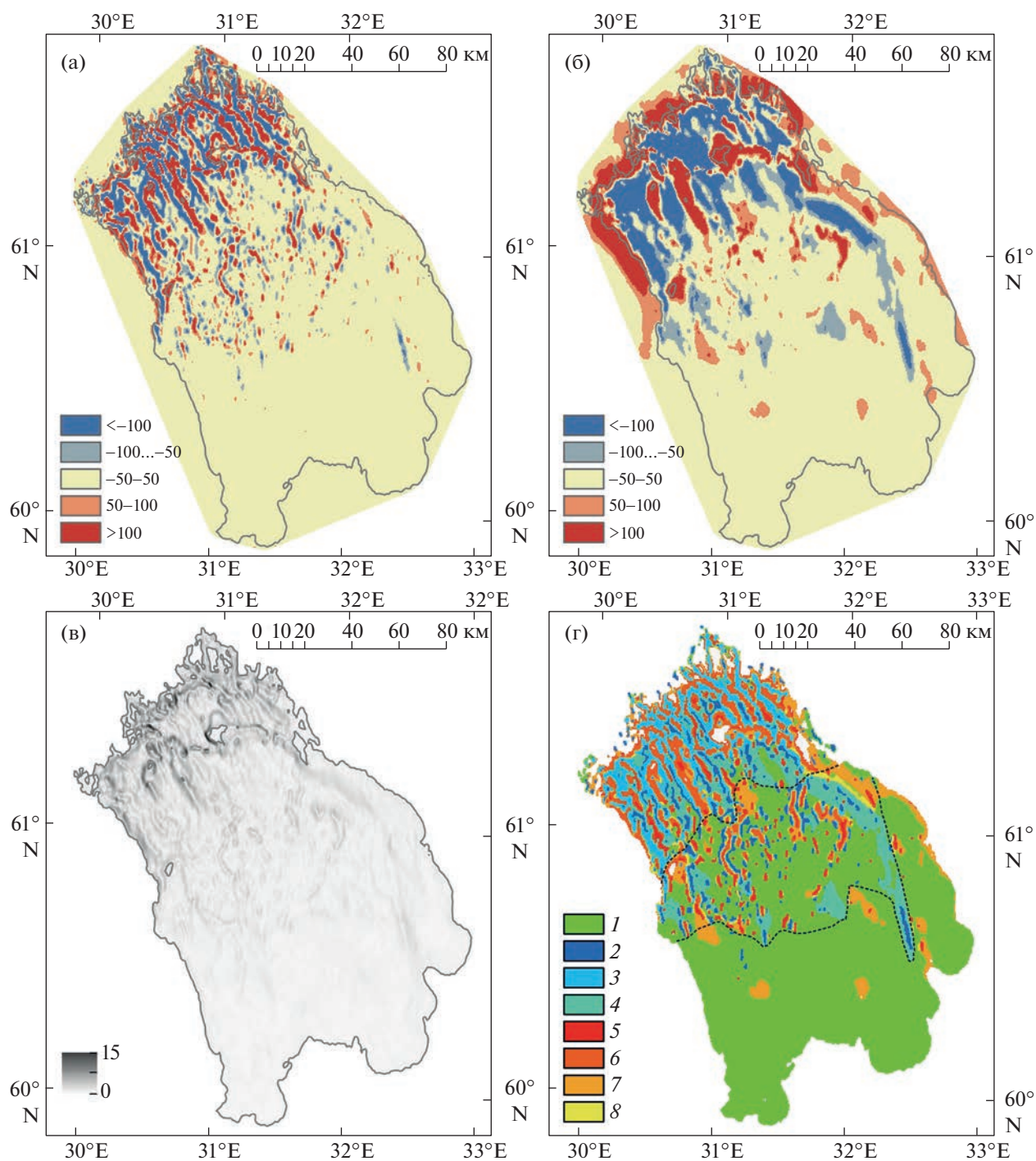


Рис. 2. Распределение крупномасштабного (а) и мелкомасштабного (б) индексов батиметрической позиции, значений уклона, град. (в) и поверхности, выделенные при помощи полуавтоматической классификации (г). *Равнинные поверхности:* 1 – субгоризонтальные; *поверхности впадин и ложбин:* 2 – субгоризонтальные, 3 – вдолькилевые субгоризонтальные, 4 – склоновые; *поверхности гряд и возвышенностей:* 5 – субгоризонтальные, 6 – вдольгребневые субгоризонтальные, 7 – склоновые; *промежуточные поверхности:* 8 – склоновые. Пунктирными линиями выделены границы морфологических районов.

Fig. 2. (a) – broad-scale bathymetric position index distribution; (б) – fine-scale bathymetric position index distribution; (в) – slope values distribution, °; (г) – areas defined by semi-automated classification. *Plain surfaces:* 1 – subhorizontal. *Hollows and depressions surfaces:* 2 – subhorizontal; 3 – along-thalweg subhorizontal; 4 – slope. *Ridges and heights surfaces:* 5 – subhorizontal; 6 – along-ridge subhorizontal; 7 – slope. *Mediate surfaces:* 8 – slope. Morphological areas borders are contoured with dashed lines.

0 — нулевое значение σ , 100 — положительное значение σ , —100 — отрицательное значение σ . Для крупномасштабного индекса использованы радиусы 1 км и 2.5 км соответственно, для мелко-масштабного — 6 км и 12 км. Для создания классификации использовался инструмент Benthic Terrain Modeller (Walbridge и др., 2018).

Составление геоморфологической схемы выполнено в ArcMap 10.8 (ESRI ArcGIS) на основе морфогенетического принципа аналитического геоморфологического картирования, заключающегося в отображении генетически однородных поверхностей. Выделенным при помощи морфологического анализа поверхностям присваиваются происхождение и относительный возраст на основе корреляции с сейсмоакустическими данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология дна. По результатам классификации рельефа было выделено 8 типов поверхностей (рис. 2, (г)), различающихся по относительной высоте и уклону. Мы можем наблюдать 3 четко выделяющихся зоны, в общих чертах соответствующих морфоструктурным районам, выделенным Е.Е. Мусатовым (1995): Северо-Ладожскому, Центрально-Ладожскому и Южно-Ладожскому. Южно-Ладожская зона представлена пологой равниной на глубинах от 0 до 50 м. На ней выделяются несколько поднятий высотой до 15 м.

Центрально-Ладожская зона представляет собой равнинную поверхность на глубинах от 50 до 80–100 м, осложненную положительными и отрицательными линейными формами северо-западной

и северо-восточной ориентировки (рис. 2, (г)). Относительная высота положительных форм (гряд и холмов) составляет 20–30 м. Глубина отрицательных форм (ложбин) — около 5–15 м. Вдоль восточного края Центрально-Ладожской зоны прослеживается крупная дугообразная впадина. Глубина впадины увеличивается от 15 до 30 м (с юга на север), а ширина — от 2 до 10 км.

Северо-Ладожская зона сформирована чередованием линейно вытянутых положительных форм (гряд и возвышенностей) северо-западной ориентировки, и отрицательных форм (впадин и ложбин) (рис. 2, (г)). Перепады глубин составляют от 20 до 80 м. Наиболее крупная гряда расположена примерно в центре Северо-Ладожской зоны. Ее относительная высота достигает 140 м. Наиболее глубокие впадины (>200 м) наблюдаются вдоль северного борта котловины. Мы можем выделить некоторые различия между западной и восточной частями зоны. В западной части линейные формы имеют более извилистый в плане облик, при этом характеризуются большой шириной — от 3 до 8 км. В восточной, напротив, линейные формы прямые, а их ширина достигает 3–4 км в среднем. Кроме того, в восточной половине выделяется группа возвышенностей, имеющих северо-восток-восточную ориентировку. Они формируют острова Валаамского архипелага. Относительная высота этих поднятий достигает 100 м.

Сейсмостратиграфия четвертичных отложений Ладожского озера. В основу геоморфологических построений были положены данные сейсмоакустики высокого разрешения (рис. 3), которые позволили построить сейсмостратиграфический

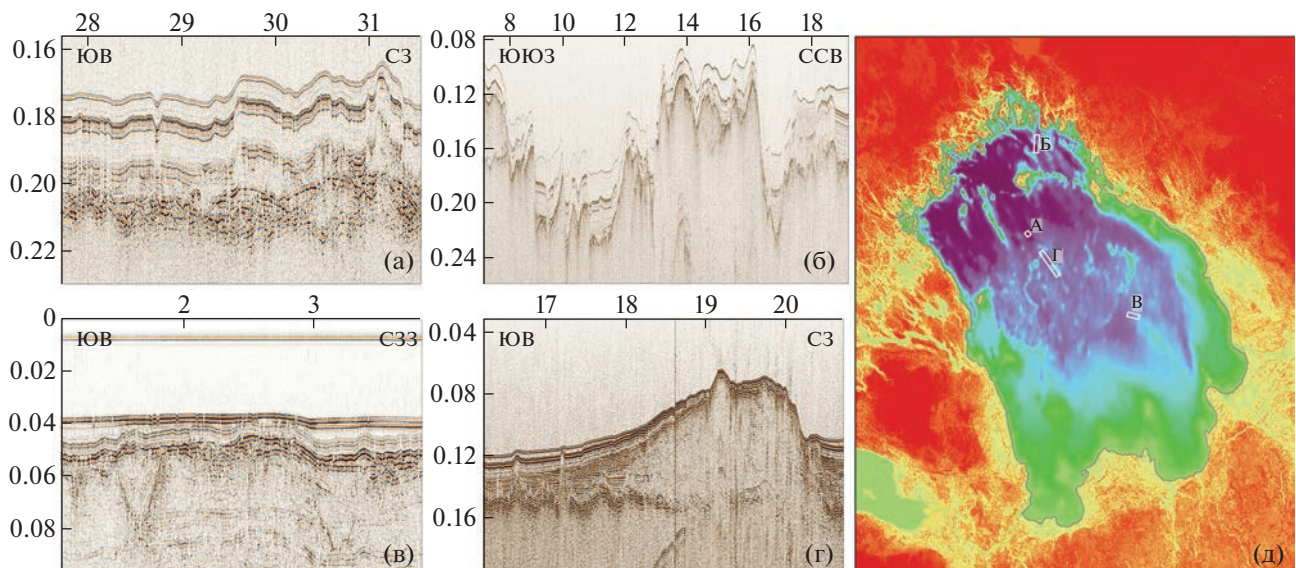


Рис. 3. Фрагменты сейсмических профилей, иллюстрирующие наиболее характерные формы донного рельефа Ладожского озера, без интерпретации (а–г) и положение фрагментов (д). По горизонтальной шкале — расстояние от начала профиля, км; по вертикальной — двойное время прохождения сейсмического сигнала, с.

Fig. 3. Seismic profiles fragments with typical bedforms of Lake Ladoga, without interpretation (a–g) and fragments location (д). Horizontal scale — offset, m; vertical scale — Two-way time of seismic signal, s.

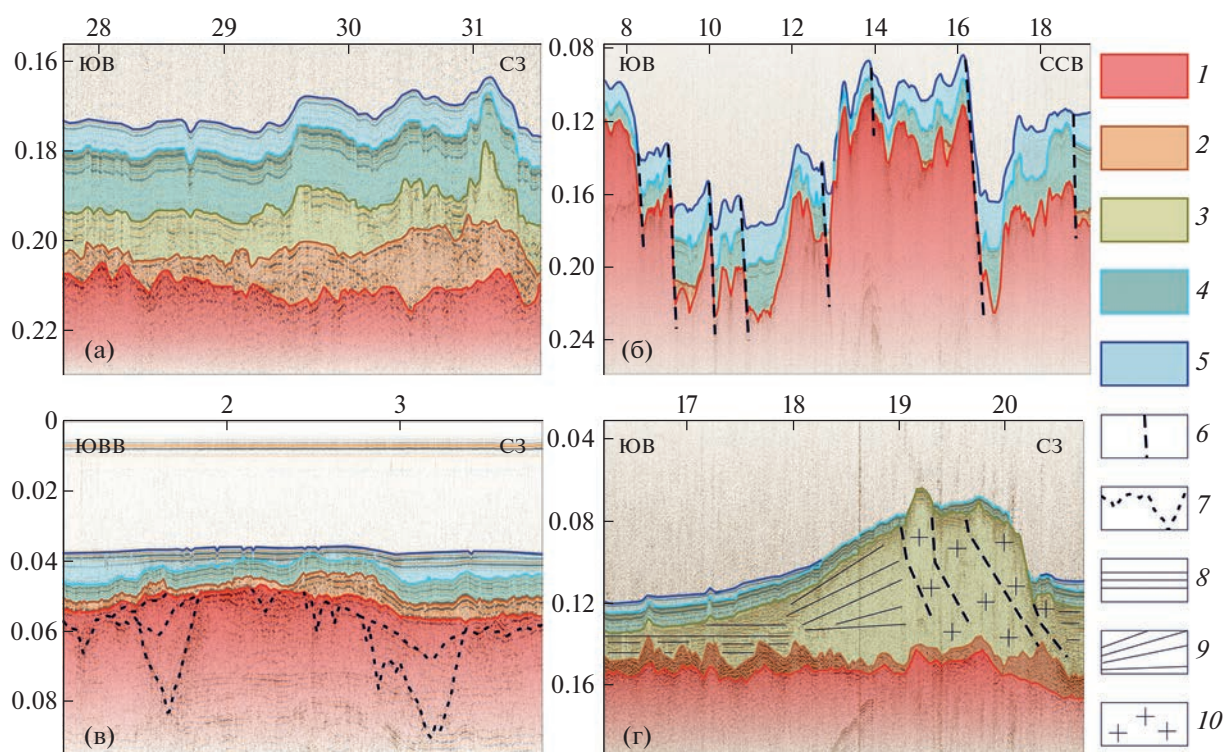


Рис. 4. Фрагменты сейсмических профилей с частичной интерпретацией. По горизонтальной шкале — расстояние от начала профиля, км; по вертикальной — двойное время прохождения сейсмического сигнала, с. (а) — типовой разрез четвертичных отложений; (б) — денудационные конструктивные гряды и впадины северной части котловины со сбросовыми неотектоническими нарушениями; (в) — ледниково-озерные равнины южной части котловины, в основании которых наблюдаются погребенные долины с несколькими этапами врезания; (г) — грядово-ложбинные равнины центральной части котловины с краевыми водно-ледниковыми образованиями. 1 — СК1; 2 — СК2; 3 — СК3; 4 — СК4; 5 — СК5; 6 — предполагаемые тектонические деформации; 7 — эрозионные контакты; 8 — субгоризонтальная слоистая волновая картина; 9 — наклонная клиноформная волновая картина; 10 — хаотическая волновая картина.

Fig. 4. Interpreted seismic profiles sections. Horizontal scale — offset, m; vertical scale — Two-way time of seismic signal, m/s. (a) — typical quaternary section; (б) — Denudative structural ridges and hollows of the northern part of the basin with neotectonic fault deformations; (в) — lacustrine glacial plains of the southern part of the basin, at the basement of which buried valleys with several incision cuts are witnessed; (г) — glacial plain with ridges and hollows and marginal water-glacial formations. Legend: 1 — seismic unit 1; 2 — seismic unit 2; 3 — seismic unit 3; 4 — seismic unit 4; 5 — seismic unit 5; 6 — assumed tectonic deformations; 7 — erosional cuts; 8 — subhorizontally layered seismic structure; 9 — inclined clinoform seismic structure; 10 — chaotic seismic structure.

разрез четвертичных отложений и подстилающих коренных пород. Всего было выделено 5 сейсмических комплексов (СК) (рис. 4, (а)). В основании разреза лежит комплекс, характеризующийся высокоамплитудными, наклонно ориентированными, поднимающимися по направлению с юга на север, рефлекторами (СК1). Видимая мощность этой толщи достигает 20 м. Контакт с вышележащим комплексом характеризуется угловым несогласием, проводится по смене волновой картины. Предполагается, что этот комплекс представлен дочетвертичными породами архей-кембрийского возраста (Амантов, 2014).

Комплекс СК2 характеризуется хаотической волновой картиной с короткими, разноориентированными высокоамплитудными рефлекторами (рис. 4, (а)). Соответствующие ему отложения залегают спорадически: они могут как образовать

аккумулятивные тела мощностью до 20 м, так и выклиниваться из разреза. Средняя мощность — 15–20 м. Они перекрываются вышележащими осадками с угловым несогласием. По характеру залегания и типу волновой картины мы можем определить отложения СК2 как основную морену осташковской эпохи (поздний валдай, МИС 2) (Subetto et al., 1998).

Волновая картина комплекса СК3 весьма разнообразна. На равнинных участках этот комплекс имеет субгоризонтально-слоистый и хаотический полупрозрачный тип записи. В понижениях рельефа тип записи меняется на субгоризонтально-слоистый, заполнения. Положительные аккумулятивные тела, сложенные СК3, состоят из сменяющих друг друга субгоризонтально-слоистых, наклонно-слоистых клиноформных и хаотических полупрозрачных фаций (рис. 4, (г)). Контакт

с отложениями верхнего комплекса несогласный. Отложения СКЗ имеют ограниченное распространение в пределах котловины Ладожского озера и, в основном, локализованы в центральной части котловины. Мощность их на равнинах составляет около 10 м, а в понижениях и аккумулятивных телах может достигать 50 м. По результатам бурения российско-германского проекта PLOT (Andreev et al., 2019; Ludikova et al., 2021) отложения СКЗ представлены мелководными фациями озерного бассейна верхнемикулинского-нижневалдайского возраста. Однако волновая картина СКЗ не позволяет трактовать эти отложения как бассейновые, поскольку для таких толщ не характерен хаотический тип записи, так же, как и формирование положительных аккумулятивных тел. Предложенная версия о субгляциальной экзарации доледниковых отложений (Lebas et al., 2021) с формированием положительных аккумулятивных тел — ледниковых холмов (hummocks) также не позволяет объяснить присутствие субгоризонтально-слоистых и наклонно-слоистых клиноформных сейсмофаций в этих телах. Поэтому мы предлагаем интерпретировать СКЗ как прогляциальный комплекс отложений, представленный различными фациями: ледниково-озерными проксимальными (характеризующимися субгоризонтальной слоистостью), флювиогляциальными фациями (с наклонной клиноформной слоистостью) и фациями абляционных и краевых морен (хаотическая полупрозрачная запись). Подробно о происхождении и возрасте аккумулятивных форм, сложенных отложениями СКЗ, будет сказано ниже.

Осадочные образования СК4 распространены по всей котловине Ладожского озера. Для них характерна субгоризонтально-слоистая волновая картина. При этом амплитуды осей синфазности увеличиваются от подошвы к кровле. Мощность осадков СК4 составляет от 5 (Южно-Ладожская зона) до 35 м (Северно-Ладожская зона). Верхний контакт выделяется по параллельному несогласию. По данным (Gromig et al., 2019) отложения СК4 сопоставляются с ледниково-озерными ленточными глинами, формировавшимися с 13900 до 11380 л. н.

Венчают разрез отложения СК5. Их волновая картина определяется низкоамплитудными субгоризонтально-слоистыми рефлексорами. Средняя мощность составляет 10–15 м, а максимальная достигает 30 м в Северно-Ладожской зоне. Эта толща трактуется как озерные осадки голоценового возраста (Gromig et al., 2019).

ГЕОМОРФОЛОГИЯ КОТЛОВИНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

В результате анализа морфологии донной поверхности и волновой картины были выделены

2 денудационных и 4 аккумулятивных типа донного рельефа. Типы рельефа делятся на 16 генетически однородных поверхностей, которые были отображены на геоморфологической схеме Ладожского озера масштаба 1:1000000 (см. доп. материал)¹. Кроме того, были обозначены характерные линейные и точечные элементы, тектонические нарушения.

Денудационный структурный рельеф. Распространен в северной части озера, где кристаллические породы Балтийского щита предопределяют сложный рисунок поверхности дна с большими перепадами глубин. Геологическое строение этой части предопределено тремя комплексами коренных пород: нерасчлененным комплексом пород архейского и нижнепротерозойского возраста, верхнепротерозойскими (рифейскими) нерасчлененными породами и раннерифейским силлом (Амантов, 2014), вследствие чего этот рельеф можно подразделить на 3 зоны.

Грядово-увалистые (фиардово-шхерные) равнины, сложенные архейскими и раннепротерозойскими породами, обрамляют северную часть котловины. По сути, являются продолжением рельефа суши и представляют собой расчлененные поверхности с чередованием гряд и желобов, вытянутых в северо-западном направлении. Глубины в среднем не превышают 20 м, но могут достигать 50–70 м. В отрицательных формах рельефа происходит накопление голоценовых илов. На более мелководных участках происходит денудация ледниковых и ледниково-озерных осадков.

Нижнерифейскими метаморфическими нерасчлененными породами сложены гряды, возвышенности, впадины и ложбины, формирующие большую часть площади денудационного структурного типа рельефа. Вместе они формируют гребенчатый облик поверхности дна (рис. 4, б) с север-северо-западной и северо-западной ориентировкой форм. Средние уклоны достигают здесь 3.5–4°. Накопление осадков во впадинах сглаживает расчлененность рельефа. Поверхность гряд и возвышенностей сложена ледниковыми или ледниково-озерными отложениями, высота их может достигать 140–150 м. Впадины и ложбины, наравне с нефелоидными озерными равнинами (см. ниже), являются основными бассейнами осадконакопления. Мощность четвертичных отложений в таких впадинах может достигать 100 м, а максимальная мощность голоценовых осадков — до 30 м.

Для данного района характерны проявления дифференцированных неотектонических движений, сопровождаемых возникновением оползней и смещением четвертичных толщ по вертикали

¹ Дополнительный материал публикуется на сайте журнала “Геоморфология и палеогеография” — <https://geomorphology.igras.ru/jour/pages/view/dopmat>

(рис. 4, (б)). Однако о голоценовых движениях можно с уверенностью говорить лишь на участке между Валаамским архипелагом и шхерным северным берегом. Смещения толщи современных озерных осадков (до 30 м), инверсия аккумулятивных процессов (на более высоких участках большие мощности осадков) указывают на конседиментационный характер этих движений. Тектонические движения имеют место и по сей день, что подтверждается данными о сейсмических событиях, зафиксированных в Приладожье (Ассиновская, 2005). На остальной территории наблюдаются следы нарушений в толщах ледниково-озерных отложений, что, вероятно, свидетельствует о затухании этих движений на рубеже позднего неоплейстоцена-голоцена.

Последний подтип представлен массивами, грядами и возвышенностями, залегающими на нижнерифейских интрузивных телах — Валаамском силле (Свириденко, Светов, 2008), а также дайках Валаамско-Староладожской и Видлицко-Свирской зон (Амантов, 2014). Относительная высота этих форм под водой достигает 130 м. Валаамский массив представляет собой комплекс гряд и возвышенностей. Северная часть массива представляет собой структурную, относительно пологую террасу с мощностью четвертичных осадков до 15 м. Склоны ограничены резкими уступами, уклоны которых достигают 50° (Науменко и др., 2019). Большой уклон склонов приводит к возникновению гравитационных процессов (Науменко и др., 2022). Возвышенности дайковых зон представляют собой островершинные точечные формы с пологим юго-западным склоном, где происходит накопление осадков, и крутым северо-западным.

Эрозионный субаквальный рельеф. Это открытые и погребенные эрозионные долины. Они, в большинстве своем, локализованы в южной и центральной частях озера, где они протягиваются с юго-востока на северо-запад. Длина русел варьируется от 5 до 25 км, а глубина может достигать 30 м. Встречаются долины как с U-образным, так и с V-образным поперечным профилем. Эти формы рельефа развиты до глубины 120–130 м. Предполагается, что погребенные долины заполнены аллювиальными либо флювиогляциальными отложениями. Иногда в толще этих осадков можно наблюдать эрозионные контакты, что свидетельствует о нескольких этапах врезания (рис. 4, (в)). Погребенные долины также были выделены в публикациях (Мусатов, 1995) и (Амантов, Амантова, 2014).

Озерный нефелоидный рельеф. Озерные нефелоидные равнины располагаются в северной части котловины. Разрез представлен последовательностью ледниковых, ледниково-озерных и озерных отложений. Располагаются на глубинах

от 80 до 220 м. Максимальные уклоны составляют 0.4° . По сравнению со структурными впадинами и ложбинами, мощность озерных осадков здесь меньше — до 20 м с средней мощностью 10–15 м.

Ледниковый рельеф. Центральную часть озера занимает грядово-ложбинная ледниковая равнина (рис. 4, (г)). Она располагается на глубинах от 50 до 80–100 м. В основании разреза повсеместно залегают ледниковые отложения с прогляциальным комплексом. Поверхность равнины волнистая, при этом неровности частично сглажены ледниково-озерными отложениями. Озерные осадки здесь представлены спорадически и имеют малые мощности. Характерной чертой равнины являются гряды различной ориентировки, которые будут описаны ниже.

К ледниковому типу рельефа также относятся гряды, холмы и возвышенности, расположенные по южной и восточной периферии озера. Располагаются на повышении фундамента, вследствие чего не покрыты озерно-ледниковыми или озерными осадками. Сложены ледниковыми отложениями последнего ошашковского оледенения, накопление которых завершилось около 16000–14000 л. н. (Subetto et al., 1998). Относительная высота этих форм составляет 5–15 м, уклон — около 5° .

Флювиогляциальный рельеф краевых образований. Распространен в центральной части озера, преимущественно на глубинах 50–70 м. Представлен вытянутыми в северном и северо-западном направлениях озовыми грядами. Их относительная высота составляет 20–30 м, длина — до 8–11 км. Характеризуются островершинным гребнем, в поперечном разрезе имеют вид линзовидных тел. Иногда тела озв наследуют палеодолины. Эти формы сложены отложениями СКЗ с полупрозрачной хаотической волновой картиной.

Отдельно выделяются гряды и крупные холмы, ориентированные перпендикулярно озам. Южные склоны этих форм пологие, северные крутые. Высота также достигает 20–30 м. В разрезе их южные части сложены субгоризонтально-слоистыми фациями СКЗ, которые в направлении на север меняют волновую картину на наклонно-слоистую клиноформную, а после на хаотическую. Иногда наблюдаются несколько гряд, следующих цепочкой друг за другом с юга на север. Такое строение характерно для конусов выноса талых ледниковых вод, формирующихся в зоне выхода талых вод из ледника (Dowdeswell et al., 2015). Сочетание озв с краевыми образованиями подробно описано на восточном побережье Ладожского озера (Ладожское озеро..., 1978). Подобные образования встречаются и в краевых ансамблях гряд Салпаусселькя (Fyfe, 2008). В котловине озера наблюдаются две крупные серии подобных форм: вдоль южного и северного краев

грядово-ложбинной ледниковой равнины. Вероятно, они связаны с двумя фазами невиской краевой стадии, границу которой традиционно проводят через озеро или по его южному побережью (Геоморфология и четвертичные..., 1969). Возраст этой стадии в смежных регионах (Эстония) датируется 13900–13200 л. н. (Saarse et al., 2012), однако возраст краевых образований на дне Ладожского озера, вероятно, несколько древнее, поскольку 13900 л. н. здесь уже началось накопление ледниково-озерных ленточных глин (Gromig et al., 2019).

Ледниково-озерный рельеф. Это наиболее пологие и мелководные равнины в южной части озера, сложенные ледниково-озерными ленточными глинами (рис. 4, (в)). Этот тип рельефа занимает большую часть поверхности дна водоема. Они расположены на глубинах от 0 до 50 м и характеризуются простым, двучленным строением разреза: на коренных породах, представленных осадочными породами платформенного чехла (СК1), залегают ледниково-озерные отложения (СК4). Однако с увеличением глубины, на изобатах 40–50 м в разрез вклиниваются отложения СК2 и СК5. Поверхность равнин осложнена реликтовыми береговыми формами типа абразионных террас и береговых валов (Aksenov et al., 2022). Также фиксируются эрозионные врезы: как погребенные под четвертичными осадками, так и открытые, вскрывающие ленточные глины. Формирование этих равнин происходило в период с 13900 по 11650 л. н. (Gromig et al., 2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была составлена геоморфологическая схема Ладожского озера, описаны генетические типы, а также строение, морфология, происхождение и возраст форм рельефа. Установлено, что рельеф котловины представлен денудационным структурным, эрозионным субаквальным, озерным нефелоидным, ледниковым, флювиогляциальным рельефом краевых образований, а также ледниково-озерным типами рельефа. Северная часть озера, характеризующаяся наибольшими амплитудами глубин, представлена денудационным структурным грядово-ложбинным рельефом. Эта область является главным седиментационным бассейном с наибольшими мощностями голоценовых осадков. Здесь, на относительно плоских поверхностях формируются нефелоидные озерные равнины. Северная часть котловины также характеризуется наличием признаков голоценовых вертикальных тектонических смещений, которые наиболее ярко выражены к северу от Валаамского архипелага. Для центральной части озера характерен грядово-ложбинный ледниковый рельеф. Наиболее примечательными формами являются образования

флювиогляциального краевого происхождения (озы и конуса выноса талых ледниковых вод). Краевые формы образуют вытянутые с юго-запада на северо-восток гряды. Эти образования коррелируются с первой и второй фазами Невской краевой стадии около 14000 л. н. Южная часть озера является областью распространения пологих ледниково-озерных равнин, формировавшихся с момента отступления ледников из Ладожского озера вплоть до начала голоцена. Рельеф этих поверхностей осложнен береговыми и эрозионными реликтовыми формами.

Полученные данные в дальнейшем могут стать основой для детальных палеогеографических реконструкций как самого водоема, так и всего Северо-Западного региона РФ. Представленная здесь геоморфологическая схема может быть использована в рамках мониторинга содержания Государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000 — специальной программы Роснедра, которую в настоящее время возглавляет ВСЕГЕИ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Геоморфологическая схема Р–(35), 36 (Ладожское озеро), масштаб 1:1 000 000 доступна по адресу: <https://geomorphology.igras.ru/jour/pages/view/dopmat>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Центру морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова и Институту водных проблем Севера КарНЦ РАН за проведение сейсмоакустических работ. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, (проект № 18-05-00303), РНФ (проект № 18-17-00176П), Госзадания Министерства просвещения РФ для РГПУ им. А.И. Герцена (VRFY 2023-0010), Института озерадения РАН – СПб ФИЦ РАН (FMNG-2019-0001), а также проектов СПбГУ (№ 18.42.1258.2014 и № 18.42.1488.2015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова С.А., Давыдова Н.Н., Квасов Д.Д. (1967). История Ладожского озера в голоцене по данным спорово-пыльцевого и диатомового анализов // История Озер Северо-Запада / Мат-лы I Симпозиума по истории озер Северо-Запада СССР (Ленинград, 17–20 ноября 1965 г.). К Междунар. симп. по истории озер (Венгрия, 1967 г.). Л.: Наука. С. 113–132.
- Амантов А.В. (2014). Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Региональная геология и металлогения. № 58. С. 22–32.
- Амантов А.В., Амантова М.Г. (2014). Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. № 59. С. 5–14.
- Амантов А.В., Спиридонов М.А. (1989). Геология Ладожского озера // Советская геология. № 4. С. 83–86.

- Ассиновская Б.А. (2005). Сейсмические события на Ладоге в XX веке // Известия РГО. Т. 137. № 4. С. 70–77.
- Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. (2020). Геоморфология котловины Ладожского озера. Новые данные // Астраханский вестник экологического образования. Т. 59. № 5. С. 142–154. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2020-19-5-142-154>
- Геоморфология и четвертичные отложения северо-запада европейской части СССР (Ленинградская, Псковская и Новгородская области). (1969) / Под ред. Д.Б. Малаховского, К.К. Маркова. Л.: Наука. 256 с.
- Геоэкология Ладожского озера. (1995) / Под ред. В.Л. Иванова, В.И. Гуревич. СПб: ВНИИОкеангеология. 209 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Третье поколение. Балтийская серия. Карта четвертичных образований. Лист Р-35(36). Петрозаводск. (2015) / Под ред. Ю.Б. Богданова. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2 л.
- Давыдова Н.Н. (1985). Диатомовые водоросли – индикаторы экологических условий водоемов в голоцене. Л.: Наука. 244 с.
- Давыдова Н.Н., Трифонова И.С. (1982). Изменения в составе диатомовых комплексов и содержания хлорофила “а” в осадках разных районов озера / Антропогенное эвтрофирование Ладожского Озера. Л.: Наука. С. 202–206.
- Девдариани Н.А., Старовойтов А.В., Стручков В.А. и др. (1993). Типы волновой картины и условия залегания ледниковых отложений Белого и Баренцева морей по данным непрерывного сейсмопрофилирования // Бюлл. МОИП. Отдел геологический. Т. 68. № 3. С. 117–122.
- Егорова Н.В., Рыбалко А.Е., Беляев П.Ю. и др. (2017). Итоги комплексных геолого-геофизических исследований на акватории Ладоги за 2014–2015 годы // Комплексные исследования Мирового океана / Мат-лы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. М: ИО РАН. С. 465–466.
- История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР). (1989) / Под ред. Д.Д. Квасова, Г.Г. Мартинсона, А.В. Раукаса. Л.: Наука. 280 с.
- Ладожское озеро: Развитие рельефа и условия формирования рельефа котловины. (1978) / Под ред. А.Д. Лукашова, Г.С. Бискэ, Г.Ц. Лак. Петрозаводск: Карелия. 206 с.
- Методическое руководство по геоморфологическому картографированию дна акваторий (морского и океанического дна) в комплекте Госгеолкарты 1000/3. (2009) / Под ред. А.Г. Зинченко, А.Н. Ласточкина. СПб.: ВСЕГЕИ. 49 с.
- Мусатов Е.Е. (1995). Геоморфология // Геоэкология Ладожского Озера. СПб: ВНИИОкеангеология. С. 36–43.
- Науменко М.А. (2013). Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Сер. географическая. № 1. С. 62–72. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-62-72>
- Науменко М.А., Гузиватый В.В., Нестеров Н.А. и др. (2019). Морфометрические особенности подводного склона юго-западной части острова Валаам // ДАН. Т. 486. № 3. С. 371–374. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863371-374>
- Науменко М.А., Гузиватый В.В., Дудакова Д.С. и др. (2022). Подводная морфоструктура Валаамского архипелага в Ладожском озере: первые видеоизображения и количественные оценки // ДАН. Науки о Земле. Т. 507. № 1. С. 126–131. <https://doi.org/10.31857/S268673972260117X>
- Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А. и др. (2017). Великие озера Европы – история развития, особенности геологического строения и их влияние на формирование современной геоэкологической обстановки // Озера Евразии: проблемы и пути их решения / Мат-лы 1-й Международной конференции (11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 609–616.
- Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Токарев М.Ю. (2015). Морской и озерный этапы развития Великих озер Европы (по данным сейсмоакустических исследований) // Геология морей и океанов / Мат-лы XXI Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ГЕОС. С. 310–313.
- Свириденко Л.П., Светов А.П. (2008). Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 123 с.
- Семенович Н.И. (1965). Донные отложения Ладожского озера. Л.: Наука. 124 с.
- Субетто Д.А. (2009). Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб: РГПУ им. А.И. Герцена. 343 с.
- Субетто Д.А., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А. (1989). Общая характеристика донных отложений // История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки (Серия: История озер СССР) / Под ред. Д.Д. Квасова, Г.Г. Мартинсона, А.В. Раукаса. Л.: Наука. С. 35–42.
- Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 [Электронный ресурс]. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 30.01.2023).
- Щербаков В.А., Рыбалко А.Е., Иванова В.В. и др. (2018). Роль ВНИИОкеангеология в развитии геоэкологических исследований в шельфовых морях России и становлении нового вида геологоразведочных работ – мониторинга геологической среды шельфа // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. СПб.: ВНИИОкеангеология. С. 523–534.
- Aksenov A.O., Krastel S., Rybalko A.E. et al. (2022). Geomorphological evidence of Lake Ladoga Holocene regressions after the Baltic Ice Lake drainage (derived from sediment echosounder data) // Limnology and Freshwater Biology. No. 4. P. 1378–1380. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1378>
- Andreev A.A., Shumilovskikh L.S., Saveliyeva L.A. et al. (2019). Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga // Boreas.

- Vol. 48. No. 2. P. 377–386.
<https://doi.org/10.1111/bor.12382>
- ASTER Global Digital Elevation Map [Электронный ресурс]. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (access date: 19.12.2022).
- Dowdeswell J.A., Hogan K.A., Arnold N.S. et al. (2015). Sediment-rich meltwater plumes and ice-proximal fans at the margins of modern and ancient tidewater glaciers: Observations and modeling // *Sedimentology*. Vol. 62. No. 6. P. 1665–1692.
<https://doi.org/10.1111/sed.12198>
- Fyfe G.J. (2008). The effect of water depth on ice-proximal glaciolacustrine sedimentation: Salpausselkä I, southern Finland // *Boreas*. Vol. 19. No. 2. P. 147–164.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1990.tb00576.x>
- Gromig R., Wagner B., Wennrich V. et al. (2019). Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // *Boreas*. Vol. 48. P. 330–348.
<https://doi.org/10.1111/bor.12379>
- Lebas E., Gromig R., Krastel S. et al. (2021). Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga // *Quat. Sci. Rev.* Vol. 251. No. 2. P. 106637.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106637>
- Ludikova A.V., Subetto D.A., Andreev A.A. et al. (2021). The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? // *J. Paleolimnol.* Vol. 65. No. 1. P. 85–99.
<https://doi.org/10.1007/s10933-020-00150-0>
- Lundblad E.R., Wright D.J., Miller J. et al. (2006). A Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa // *Marine Geodesy*. Vol. 29. No. 2. P. 89–111.
<https://doi.org/10.1080/01490410600738021>
- Naumenko M.A. (2020). Lake Ladoga Digital Bathymetric Models: Development Approaches and Insight for Limnological Investigations // *Limnol. Rev.* Vol. 20. No. 2. P. 65–80.
<https://doi.org/10.2478/limre-2020-0008>
- Saarse L., Heinsalu A., Veski S. (2012). Deglaciation chronology of the Pandivere and Palivere ice-marginal zones in Estonia // *Geol. Q.* Vol. 56. No. 2. P. 353–362.
<https://doi.org/10.7306/gq.1027>
- Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. (2019). Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record // *Boreas*. Vol. 48. No. 2. P. 349–360.
<https://doi.org/10.1111/bor.12376>
- Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E. (1998). Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 140. P. 113–119.
[https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00032-7)
- Walbridge S., Slocum N., Pobuda M. et al. (2018). Unified Geomorphological Analysis Workflows with Benthic Terrain Modeler // *Geosciences*. Vol. 94. No. 8. P. 1–24.
<https://doi.org/10.3390/geosciences8030094>

RELIEF STRUCTURE OF THE LAKE LADOGA BOTTOM BASED ON SEISMIC-ACOUSTIC AND BATHYMETRIC DATA²

A. O. Aksenov^{a,b,#}, A. E. Rybalko^{a,c,d}, M. A. Naumenko^e, M. Yu. Tokarev^f, and D. A. Subetto^{d,g,h}

^a*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

^b*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia*

^c*VNIIOkeangeologia, Saint-Petersburg, Russia*

^d*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, Russia*

^e*Institute of Limnology SPb FRC RAS, Saint-Petersburg, Russia*

^f*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^g*Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg, Russia*

^h*Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of RAS, Barnaul, Russia*

[#]*E-mail: aksekov2801@gmail.com*

A large amount of data on geological structure, quaternary deposits and bottom sediments of Lake Ladoga was obtained during the last 70 years. Meanwhile, bottom geomorphology of the lake is poorly studied. In most of cases geomorphological description includes only short morphometric characteristics and large-scale bottom elements description. In the present study new materials on Lake Ladoga bottom geomorphology is presented. Ultrahigh-resolution seismic data of 2014 and 2015 expeditions on research vessel “Ekolog” (Organizers: Saint-Petersburg State University, Marine Research Center of MSU, and Karelian Scientific Center of RAS), as well as digital bathymetric model of the basin, developed in the Institute of Limnology of SPb FRC RAS were used as original data. As a result of geomorphological interpretation 6 geomorphological genetic types were characterized: denudative constructive, erosional subequal, lacustrine, glacial, fluvio-glacial marginal, and glacial lacustrine. Meso- and macroscale forms such as plains, ridges, hollows, valleys were distinguished. Signs of neotectonic movements north of Vallaam archipelago were approved. Terminal glacial landforms produced during the Neva stage of the Ostashkov glaciation were traced in the central part of the

² For citation: Aksenov A.O., Rybalko A.E., Naumenko M.A. et al. (2023). Relief structure of the Lake Ladoga bottom based on seismic-acoustic and bathymetric data. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 4. P. 26–39. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923040035>; <https://elibrary.ru/YBPSNE>

lake. Conditions and forms of the postglacial landscape development were characterized. These data were used to construct 1:1000000 scale geomorphological scheme applying the morphogenetic approach of analytical geomorphological mapping.

Keywords: Lake Ladoga, subaqual geomorphology, geomorphological mapping, seismic profiling, digital bathymetric data

SUPPLEMENTARY MATERIALS

The geomorphological scheme P–(35), 36 (Lake Ladoga), scale 1:1000000 is available at: <https://geomorphology.igras.ru/jour/pages/view/dopmat>.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors are grateful to Marine Research Center of MSU and Northern Water Problems Institute KarRC RAS for seismic surveys execution. The study is performed with support of RFBR (project No. 18-05-00303), RSF (project No. 18-17-00176), Ministry of Education (VRFY-2023-0010), Institute of Limnology SPb FRC RAS (FMNG-2019-0001) and SPSU (projects No. 18.42.1258.2014 and No. 42.1488.2015).

REFERENCES

- Abramova S.A., Davydova N.N., Kvasov D.D. (1967). History of Lake Ladoga in the Holocene according to spore-pollen and diatom analysis. *Istoriya Ozer Severo-Zapada: Materialy I Simpoziuma po istorii ozer Severo-Zapada SSSR. (Leningrad, 17–20 noyabrya 1965 g.). K Mezhdunar. simp. po istorii ozer (Vengriya, 1967 g.)*. Leningrad: Nauka (Publ.). P. 113–132. (in Russ.).
- Aksenov A.O., Krastel S., Rybalko A.E. et al. (2022). Geomorphological evidence of Lake Ladoga Holocene regressions after the Baltic Ice Lake drainage (derived from sediment echosounder data). *Limnology and Freshwater Biology*. No. 4. P. 1378–1380. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1378>
- Amantov A.V. (2014). Geology of the Pre-Quaternary formations and tectonics of Lake Ladoga. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. No. 58. P. 22–32. (in Russ.).
- Amantov A.V., Amantova M.G. (2014). Lake Ladoga basin development with implications of aspects of the glacial theory. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. No. 59. P. 5–14. (in Russ.).
- Amantov A.V., Spiridonov M.A. (1989). Lake Ladoga geology. *Sovetskaya Geologiya*. No. 4. P. 83–86. (in Russ.).
- Andreev A.A., Shumilovskikh L.S., Savelieva L.A. et al. (2019). Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga. *Boreas*. Vol. 48. No. 2 P. 377–386. <https://doi.org/10.1111/bor.12382>
- Assinovskaya B.A. (2005). Seismic events of Ladoga in XX century. *Izvestiya RGO*. Iss. 137. No. 4. P. 70–77. (in Russ.).
- ASTER Global Digital Elevation Map [Электронный ресурс]. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (access date: 19.12.2022).
- Beliaev P.Yu., Rybalko A.E., Subetto D.A. (2020). Geomorphology of the Lake Ladoga basin. New data. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. Iss. 59. No. 5. P. 142–154. (in Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2020-19-5-142-154>
- Bogdanov Yu.B. (Ed.). (2015). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:1000000. Tret'e pokolenie. Baltiiskaya seriya. Karta chetvertichnykh obrazovaniy. List P-35, (36) (Petrozavodsk) (State geological map of Russian Federation of 1 : 1000000 scale. The third generation. Baltic series. Map of quaternary formations. Page P-35, (36) (Petrozavodsk)). Saint-Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI (Publ.). 2 p. (in Russ.).
- Davydova N.N. (1985). Diatomovye vodorosli – indikatory ekologicheskikh uslovii vodoemov v golotsene (Diatoms as indicators of Holocene Lake environments) Leningrad: Nauka (Publ.). 244 p. (in Russ.).
- Davydova N.N., Trifonova I.S. (1982). Changes in the composition of diatom complexes and chlorophyll “a” content in sediments of different parts of the lake. *Antropogennoe evtrofirovanie Ladozhskogo Oзера*. Leningrad: Nauka (Publ.). P. 202–206. (in Russ.).
- Devdariani N.A., Starovojtov A.V., Struchkov V.A. et al. (1993). Types of wave pattern and glacial sediments bedding conditions of the White and Barents Seas obtained from continuous seismic profiling. *Bull. Soc. Imp. Nat. Mosc. Otdel geologicheskii*. Iss. 68. No. 3. P. 117–122. (in Russ.).
- Dowdeswell J.A., Hogan K.A., Arnold N.S. et al. (2015). Sediment-rich meltwater plumes and ice-proximal fans at the margins of modern and ancient tidewater glaciers: Observations and modeling. *Sedimentology*. Vol. 62. No. 6. P. 1665–1692. <https://doi.org/10.1111/sed.12198>
- Egorova N.V., Rybalko A.E., Beliaev P.Yu. et al. (2017). Results of complex geological and geophysical survey at the water area of Lake Ladoga in 2014–2015. *Kompleksnye issledovaniya Mirovogo okeana. Materialy II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh*. Moscow: IO RAS (Publ.). P. 465–466. (in Russ.).
- Fyfe G.J. (2008). The effect of water depth on ice-proximal glaciolacustrine sedimentation: Salpausselkä I, southern Finland. *Boreas*. Vol. 19. No. 2. P. 147–164. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1990.tb00576.x>
- Gromig R., Wagner B., Wennrich V. et al. (2019). Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments. *Boreas*. Vol. 48. P. 330–348. <https://doi.org/10.1111/bor.12379>
- Ivanov V.L., Gurevich V.I. (Eds.). (1995). Geoekologiya Ladozhskogo ozero (Geoecology of Lake Ladoga). Saint-Petersburg: VNIIOkaenologiya (Publ.). 209 p. (in Russ.).
- Kvasov D.D., Martinson G.G., Raukas A.V. (Eds.). (1989). Istoriya ozer SSSR. Istoriya Ladozhskogo, Onezhskogo, Pskovsko-Chudskogo ozer, Baikala i Khanki (History of the USSR lakes. The history of the Ladoga, Onega, Peipsi, Baikal and Khanka Lakes). Leningrad: Nauka (Publ.). 280 p. (in Russ.).

- Lebas E., Gromig R., Krastel S. et al. (2021). Pre-glacial and post-glacial history of the Scandinavian Ice Sheet in NW Russia – Evidence from Lake Ladoga. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 251. No. 2. P. 106637. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106637>
- Ludikova A.V., Subetto D.A., Andreev A.A. et al. (2021). The first dated preglacial diatom record in Lake Ladoga: long-term marine influence or redeposition story? *J. Paleolimnol.* Vol. 65. No. 1. P. 85–99. <https://doi.org/10.1007/s10933-020-00150-0>
- Lukashov A.D., Biskje G.S., Lak G.C. (Eds.). (1978). Ladozhskoe ozero: Razvitie rel'efa i usloviya formirovaniya rel'efa kotloviny (Lake Ladoga: geomorphological development and conditions of basin geomorphology formation). Petrozavodsk: Karelija (Publ.). 206 p. (in Russ.).
- Lundblad E.R., Wright D.J., Miller J. et al. (2006). A Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa. *Marine Geodesy.* Vol. 29. No. 2. P. 89–111. <https://doi.org/10.1080/01490410600738021>
- Malahovskij D.B., Markov K.K. (Eds.) (1969). Geomorfologiya i chetvertichnye otlozheniya severo-zapada evropeiskoi chasti SSSR (Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti) (Geomorphology and quaternary sediments of the North-Western part of Russia (Leningrad, Pskov and Novgorod regions). Leningrad: Nauka (Publ.). 256 p. (in Russ.).
- Musatov E.E. (1995). Geomorphology. *Geoekologiya Ladozhskogo Oзера*. Saint-Petersburg: VNIIOkeanogeologiya (Publ.). P. 36–43. (in Russ.).
- Naumenko M.A. (2020). Lake Ladoga Digital Bathymetric Models: Development Approaches and Insight for Limnological Investigations. *Limnol. Rev.* Vol. 20. No. 2. P. 65–80. <https://doi.org/10.2478/limre-2020-0008>
- Naumenko M.A. (2013). Analysis of morphometric characteristics of bottom relief of Lake Ladoga on the basis of digital model. *Izvestiya RAN. Ser. geograficheskaya.* No. 1. P. 62–72. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-62-72> (in Russ.).
- Naumenko M.A., Guzivatyj V.V., Dudakova D.S. et al. (2022). Bottom morphostructure of the Valaam Archipelago in Lake Ladoga: the first video images and quantitative assessments. *Doklady RAN. Nauki o Zemle.* Iss. 507. No. 1. P. 126–131. <https://doi.org/10.31857/S268673972260117X> (in Russ.).
- Naumenko M.A., Guzivaty V.V., Nesterov N.A. et al. (2019). Morphometric features of the submarine slope of the southwestern part of Valaam island. *Dokl. Earth Sci.* Vol. 486. No. 1. P. 585–587. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19050234>
- Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Yu. (2015). Marine and lacustrine development stages of the Great European Lakes (obtained with seismoacoustic surveys). *Geologiya morei i okeanov: Materialy XXI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. Iss. IV.* Moscow: GEOS (Publ.). P. 310–313. (in Russ.).
- Rybalko A.E., Tokarev M.Yu., Subetto D.A. et al. (2017). The Great Lakes of Europe – the history of development, the features of geological structure and their effect on the formation of the modern geo-ecological situation. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya. Materialy I-oi Mezhdunar. konf. (11–15 sentyabrya 2017 goda)*. Petrozavodsk: KarRC RAS (Publ.). P. 609–616. (in Russ.).
- Saarse L., Heinsalu A., Veski S. (2012). Deglaciation chronology of the Pandivere and Palivere ice-marginal zones in Estonia. *Geol. Q.* Vol. 56. No. 2. P. 353–362. <https://doi.org/10.7306/gq.1027>
- Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. (2019). Vegetation and climate changes in northwestern Russia during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record. *Boreas.* Vol. 48. No. 2. P. 349–360. <https://doi.org/10.1111/bor.12376>
- Scherbakov V.A., Rybalko A.E., Ivanova V.V. et al. (2018). VNIIOkeanogeologia role in development of geocological surveys at the shelf seas of Russia and development of a new type of geological surveys – monitoring of shelf geological environment. *70 let v Arctice, Antartice and the Mirovom okeane*. Saint-Petersburg: VNIIOkeanogeologiya (Publ.). P. 523–534 (in Russ.).
- Semenovich N.I. (1965). Donnye otlozheniya Ladozhskogo ozero (Bottom sediments of Lake Ladoga). Leningrad: Nauka (Publ.). 124 p. (in Russ.).
- Subetto D.A. (2009) Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii (Lake bottom sediments: paleolimnological reconstructions). Saint-Petersburg: RGPU im. A.I. Gercena (Publ.). 343 p. (in Russ.).
- Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E. (1998). Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* Vol. 140. P. 113–119. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00032-7)
- Subetto D.A., Rybalko A.E., Spiridonov M.A. (1989). General features of bottom sediments. In: Kvasov D.D., Martinson G.G., and Raukas A.V. (Eds.). *Istoriya Ladozhskogo, Onezhskogo, Pskovsko-Chudskogo ozer, Baikala i Khanki (Seriya: Istoriya ozer SSSR)*. Leningrad: Nauka (Publ.). P. 35–42. (in Russ.).
- Sviridenko L.P., Svetov A.P. (2008). Valaamskii sill gabbrodoleritov i geodinamika kotloviny Ladozhskogo ozero (Valaam gabbro-dolerite sill and geodynamics of the Lake Ladoga Basin). Petrozavodsk: KarRC RAS (Publ.). 123 p. (in Russ.).
- Ukaz Prezidenta Rossiskoi Federatsii ot 07.05.2018 g. No. 204 [Electronic data]. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (access date: 30.01.2023). (in Russ.).
- Walbridge S., Slocum N., Pobuda M. et al. (2018). Unified Geomorphological Analysis Workflows with Benthic Terrain Modeler. *Geosciences.* Vol. 94. No. 8. P. 1–24. <https://doi.org/10.3390/geosciences8030094>
- Zinchenko A.G., Lastochkin A.N. (Eds.). (2009). Metodicheskoe rukovodstvo po geomorfologicheskomu kartografirovaniyu dna akvatorii (morskogo i okeanicheskogo dna) v komplekte Gosgeolkarty 1000/3 (Methodological guide water basins bottom geomorphological mapping in the set of Gosgeolkarta 1000/3). Saint-Petersburg: VSEGEI (Publ.). 49 p. (in Russ.).