

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЛЬЕФА ДНА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

© 2023 г. А. О. Аксенов^{a, b, *}

^aСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^bФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: aksenov2801@gmail.com

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принята к публикации 02.06.2023 г.

В данном исследовании приведены результаты морфологического анализа рельефа дна Ладожского озера. Для этого была выполнена полуавтоматическая инструментальная классификация цифровой батиметрической модели озера с использованием геоморфометрических параметров. В качестве классификаторов использованы индекс батиметрической позиции и уклон дна. Основываясь на этих показателях, были выделены 8 видов поверхностей, которые были отображены на морфологической схеме. На полученной схеме четко выражены равнины, склоны, а также линейные положительные (гряды, возвышенности) и отрицательные (ложбины, впадины) формы. По сочетанию этих элементов выделяются 3 зоны, соответствующие морфоструктурным районам Ладожского озера: Южно-Ладожская, Центрально-Ладожская и Северо-Ладожская. Различия этих зон зависят как от геологического строения коренных пород, так и от экзогенных геоморфологических факторов позднего неоплейстоцена (ледниковые, ледниково-озерные процессы). Предложенный метод демонстрирует свою объективность при исследовании сильно дифференцированного рельефа дна Ладожского озера.

Ключевые слова: Ладожское озеро, геоморфометрия, цифровая батиметрическая модель, индекс батиметрической позиции, субкавальная геоморфология

DOI: 10.31857/S0869607123010020, **EDN:** AARWHA

ВВЕДЕНИЕ

Со второй половины XX века Ладожское озеро стало объектом интенсивных геологических исследований. За последние 70 лет было опубликовано большое количество работ по геологическому строению [1, 2, 4], строению и происхождению четвертичных отложений [9, 10, 15], литологии донных осадков [9]. Большое внимание уделяется и рельефу дна озера. В том числе, в Институте Озероведения СПб ФИЦ РАН была создана цифровая батиметрическая модель Ладожского озера [8, 14]. Это позволило привлечь геоморфометрические методы для изучения морфологии дна.

Геоморфометрия – относительно новое направление в науках о рельефе. Ее суть заключается в представлении земной поверхности как матрицы высот, где каждой ячейке соответствует значение высоты. Применение математических преобразований позволяет извлечь из таких матриц (гридов) различные морфометрические параметры, такие как уклон, экспозиция, кривизна. Геоморфометрические методы широко применяются при геоморфологических, гидродинамических и ландшафтных исследова-

Таблица 1. Характеристики цифровой батиметрической модели Ладожского озера
Table 1. Lake Ladoga digital bathymetric model characteristics

Количество ячеек	90548
Максимальная глубина, м	–214.88
Максимальная высота, м	29.16
Среднее значение, м	–35.78
Медиана значений, м	–23.63

ниях водоемов [12]. Цель данной работы – анализ морфологии рельефа дна Ладожского озера с использованием полуавтоматической инструментальной классификации цифровой модели на основе вычисления геоморфометрических параметров, таких как индекс батиметрической позиции и уклон.

Ладожское озеро (61° с.ш., 31° в.д.) является самым крупным пресноводным водоемом Европы с площадью 17765.4 км² и объемом 847.8 км³, максимальная глубина – 233 м [14]. Оно расположено на контакте Восточно-Европейской платформы и Балтийского кристаллического щита. Рельеф дна предопределен морфоструктурой озера: плоская южная часть котловины озера сложена моноклинально залегающими осадочными породами позднего венда – раннего кембрия, северная расчлененная – сложно дислоцированными метаморфическими и кристаллическими породами архея – раннего рифея [2]. Четвертичный покров представлен отложениями позднего неоплейстоцена-голоцена: в подошве разреза залегают ледниковые и флювиогляциальные отложения поздневалдайского оледенения, которые перекрываются ледниково-озерными ленточными глинами поздневалдайских приледниковых водоемов и голоценовыми озерными илами [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных использована цифровая батиметрическая модель Ладожского озера Науменко М.А. [8] (рис. 1). Модель создана на основе интерполяции значений глубины с разномасштабных батиметрических карт. Она представляет собой двумерный грид значений глубины (м) с размером ячейки 500 × 500 м. Создание модели выполнено в программном обеспечении Surfer Golden Software. Информация о характеристиках модели представлена в табл. 1.

Морфологический анализ заключался в выделении и описании элементарных поверхностей рельефа дна. Для этого был использован метод Э. Лундблад и соавторов [13], который заключается в классификации модели с помощью крупно- и мелкомасштабного индекса батиметрической позиции (ИБП) и уклона. Использование индекса батиметрической позиции при классификации морфологии Ладожского озера обусловлено особенностями рельефа этого водоема. Контрастность поверхности дна (южная часть плоская и мелкая, северная – расчлененная и глубокая) не позволяет применять другие морфометрические параметры, такие как вертикальная расчлененность, шероховатость, относительная рельефность (разброс значений высоты в заданном окне) [12].

Изначально, индекс топографической позиции был разработан для геоморфологического картирования горных территорий [17]. Этот показатель позволяет сравнить значение ячейки грида со средним значением окрестности в определенном радиусе (рис. 2). Если значение ячейки больше среднего (положительное), то эта ячейка расположена выше относительно заданной окрестности. При отрицательных значениях, соответственно ниже. Значения, близкие к 0 представляют собой либо равнинные участки, либо склоны с постоянным углом наклона. Сочетание индекса и уклона позволило классифицировать горный рельеф и выделить такие элементы как каньоны,

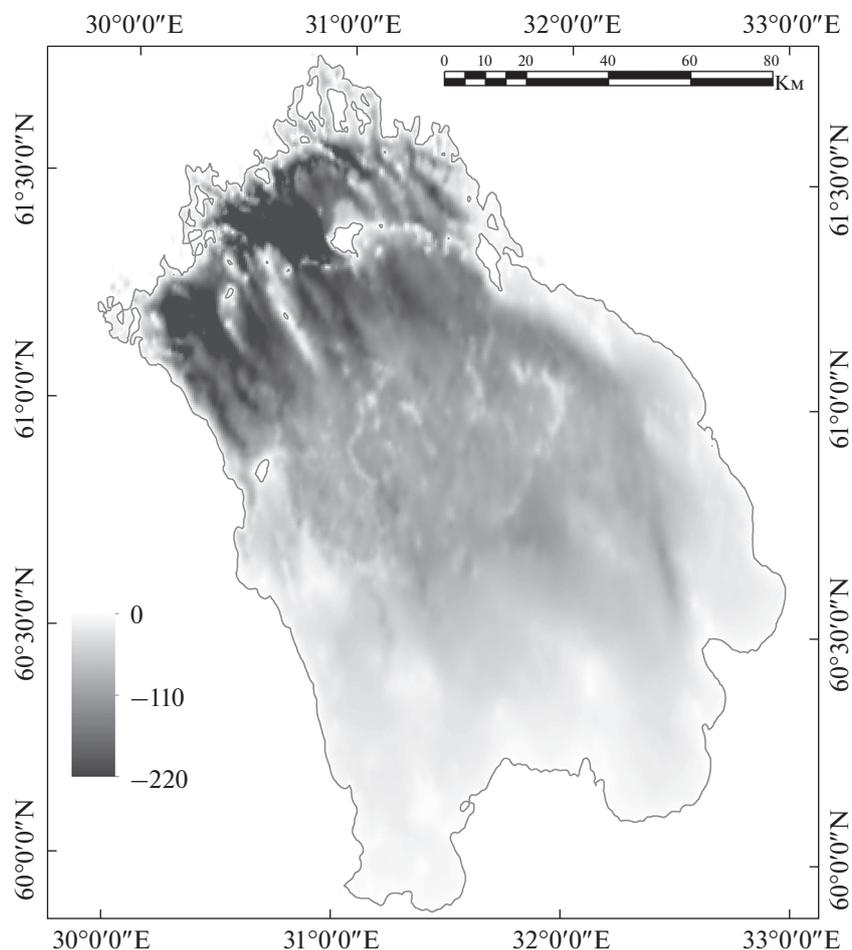


Рис. 1. Цифровая батиметрическая модель Ладожского озера.

Fig. 1. Lake Ladoga digital bathymetric model.

гряды, равнины, склоны и т.д. [17]. Лундблад и соавторы [13] адаптировали этот индекс под изучение субаквальных ландшафтов.

В данном исследовании классификация цифровой модели выполнена в ArcMap 10.8 ESRI. Автором был использован инструмент Benthic Terrain Modeler [16]. Для классификации используются значения уклона, а также крупно- и мелкомасштабного ИБП. Различные вариации индекса требуются для выделения как мелких (с крупномасштабным индексом) (рис. 3а), так и крупных (с мелкомасштабным индексом) (рис. 3б) форм. Для вычисления индекса подбираются два радиуса окрестности, ее ограничивающие – внутренний и внешний (рис. 2). Значение ячейки грида сравнивается с ячейками в пределах этих радиусов. Для вычисления крупномасштабного ИБП значение внутреннего радиуса равно 2 ячейкам, значение внешнего – 5. Для мелкомасштабного индекса внутренний радиус равен 12, внешний – 24. Затем методом скользящего окна выполняется расчет ИБП для всей цифровой модели. После этого значения индекса приводятся к стандартизированной по среднеквадратичному откло-

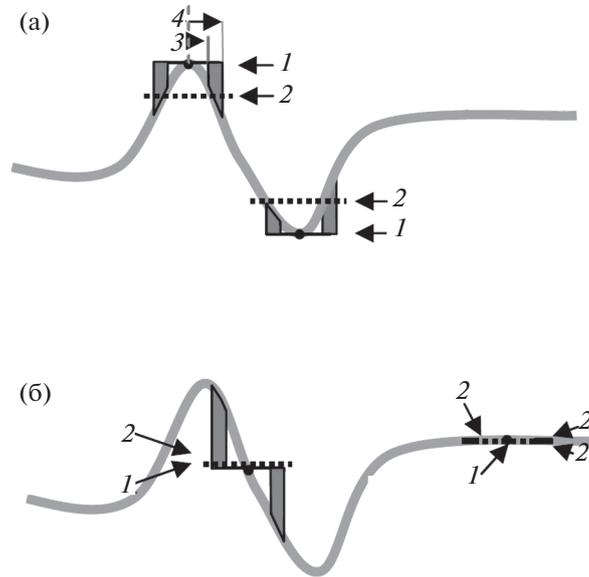


Рис. 2. Схема определения индекса топографической позиции по [17]: а – случай, при котором значения индекса значительно отличаются от 0 (значение высоты в точке больше или меньше среднего значения высоты в окрестности); б – случай, при котором значения индекса близки к 0 (значение высоты в точке равно среднему значению высоты в окрестности). 1 – значение высоты в точке; 2 – значение высоты в окрестности; 3 – внутренний радиус окрестности; 4 – внешний радиус окрестности.

Fig. 2. Schematic explanation of topographic position index [17]: а – the case when index values differ significantly from 0 (elevation is higher or lower than mean elevation neighborhood); б – the case when index values are close to 0 (elevation is equal to mean elevation neighborhood). 1 – elevation at point; 2 – mean elevation neighborhood; 3 – neighborhood inner radius; 4 – neighborhood outer radius.

нению (σ) шкале (табл. 2). Уклон поверхности ($^{\circ}$) рассчитан с помощью инструмента ArcMap Slope как первая производная от высоты (глубины) (рис. 3в).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Автором данной работы на основе сочетания индекса батиметрической позиции и уклона разработана классификация поверхностей дна Ладожского озера. Эти поверхности отличаются друг от друга по относительной позиции (верхние, нижние) и по уклону (склоновые, субгоризонтальные). Благодаря небольшому радиусу окна круп-

Таблица 2. Стандартизированная шкала ИБП
Table 2. Standardized scale of bathymetric position index

Ст. ИБП	Значения σ	Интерпретация
< -100	$< -\sigma$	Наиболее низко расположенные поверхности
$-100 \dots -50$	$-\sigma \dots -0.5\sigma$	Нижние поверхности
$-50 \dots 50$	$-0.5\sigma \dots 0.5\sigma$	Нейтрально расположенные поверхности
$50 \dots 100$	$0.5\sigma \dots \sigma$	Верхние поверхности
> 100	$> \sigma$	Наиболее высоко расположенные поверхности

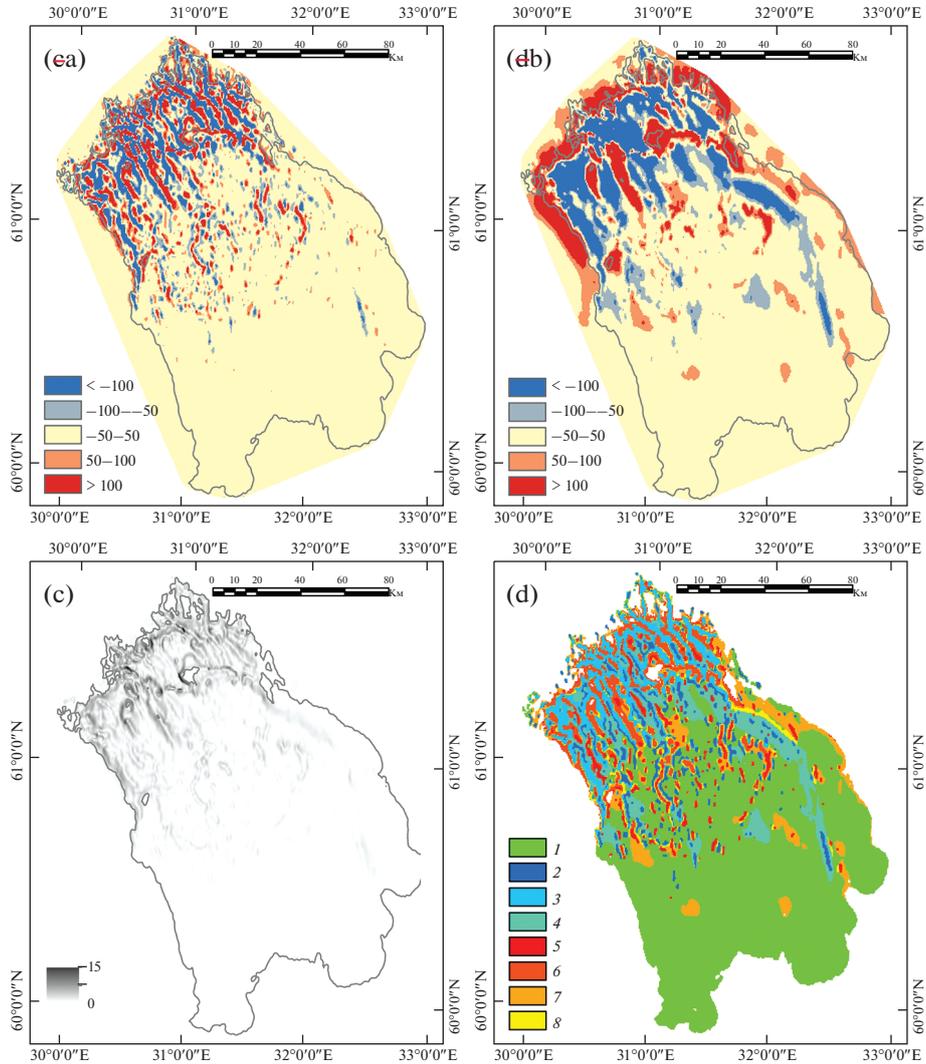


Рис. 3. а – распределение значений крупномасштабного индекса батиметрической поверхности, σ; бб – рас- пределение значений мелкомасштабного индекса батиметрической поверхности, σ; вв – распределение зна- чений уклона, °; dd – схема морфологических поверхностей.
Fig. 3. а – fine-scale bathymetric position index distribution, σ; бб – broad-scale bathymetric position distribu- tion; вв – slope values distribution, °; dd – morphological surfaces scheme.

номасштабного ИБП выделяются относительно узкие поверхности с большим значе- нием модуля индекса батиметрической позиции ($|\text{ст. ИБП}| > 50$), которые были клас- сифицированы как гребневые поверхности гряд (положительные значения ИБП) и килевые поверхности ложбин (отрицательные значения ИБП). Всего было класси- фицировано 8 видов поверхностей (табл. 3). Сочетая эти поверхности, выделяются такие элементарные формы как равнины, впадины, ложбины, гряды, возвышенности, скло- ны (рис. 3г).

Таблица 3. Классификация морфологических поверхностей. Условные обозначения: 1 – вид поверхности; 2 – нижний предел мелкомасштабного стандартизированного индекса батиметрической позиции; 3 – верхний предел мелкомасштабного стандартизированного индекса батиметрической позиции; 4 – нижний предел крупномасштабного стандартизированного индекса батиметрической позиции; 5 – верхний предел крупномасштабного стандартизированного индекса батиметрической позиции; 6 – нижний предел уклона; 7 – верхний предел уклона

1	2	3	4	5	6	7
Равнины	–50	50	–50	50	0	1
Днища впадин				–50	0	1
Килевые поверхности ложбин				–50	1	
Склоны впадин и ложбин		–50		50	1	
Вершины возвышенностей			50		0	1
Гребневые поверхности гряд			50		1	
Склоны гряд и возвышенностей	50				1	
Склоны с постоянным уклоном					1	

Таблица 4. Распределение поверхностей
Table 4. Surfaces distribution

Поверхность	Суммарная площадь, км ²	Доля суммарной площади, %
Равнины	10086.8	56.92
Днища впадин	899.73	5.08
Килевые поверхности ложбин	1502.09	8.48
Склоны впадин и ложбин	1619.88	9.14
Вершины возвышенностей	560.92	3.17
Гребневые поверхности гряд	1312.05	7.40
Склоны гряд и возвышенностей	1223.33	6.90
Склоны с постоянным уклоном	515.09	2.91
Всего	17719.89	100

В табл. 4 представлено распределение выделенных поверхностей. Как следует из этой таблицы, наиболее распространенным элементом дна Ладожского озера являются равнинные поверхности (56.92%). Доля же субгоризонтальных поверхностей в целом составляет 65.17%, в то время как склоновых поверхностей (с уклоном более 1°) – 34.83%. Доля отрицательных форм рельефа (впадины и ложбины) – 22.70%, положительных (гряды и возвышенности) – 17.47%, форм, занимающих нейтральное положение – 59.83%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По морфологии дна в Ладожском озере выделяются 3 зоны, соответствующие морфоструктурным районам [7]: Северо-Ладожскому, Центрально-Ладожскому и Южно-Ладожскому. Южно-Ладожская зона представляет собой пологую равнину на глубинах от 0 до 50 м. На ней выделяются несколько возвышенностей, высота этих положительных форм достигает 15 м. Эта зона является областью распространения леднико-

во-озерных отложений [15], а залегает она на породах осадочного чехла [2]. Эти факторы и повлияли на морфологию южной части Ладожского озера.

Морфология Центрально-Ладожской зоны более разнообразна. В целом, она представляет собой равнинную поверхность на глубинах от 50 до 80–100 м, но при этом осложненную мезомасштабными положительными и отрицательными линейными формами. Высота положительных форм составляет 5–30 м. Выделяются два типа таких форм: длинные, вытянутые, высокие (20–30 м) гряды, и короткие невысокие гряды (5–10 м). Глубина отрицательных форм (ложбин) – около 5–15 м. Все линейные формы имеют северо-западную, северную и северо-восточную ориентировку. Амантовым А.В. [3] в этой области установлено существование ледниковых форм рельефа. Предполагается, что эти линейные элементы и являются ледниковыми морфоскульптурами поздневалдайского оледенения. Кроме того, вдоль восточного края Центрально-Ладожской зоны выделяется 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 представляет собой совокупность линейно вытянутых положительных форм (гряд и возвышенностей) северо-западной ориентировки, чередующихся с отрицательными формами (впадинами и ложбинами). Перепады глубин составляют от 20 до 80 м. Наиболее крупная гряда (Воссинансаарская) расположена примерно в центре Северно-Ладожской зоны. Ее относительная высота достигает 140 м. Наиболее глубокие впадины наблюдаются вдоль северного борта котловины, днища которых залегают на глубинах больше 200 м. Также фиксируются некоторые различия между западной и восточной частями зоны. В западной части линейные формы имеют более извилистый в плане облик, при этом характеризуются большей 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. Высота этих поднятий достигает 100 м. Морфология северо-ладожской зоны отражает сложнорасчлененную природу залегания пород Балтийского кристаллического щита с разломными тектоническими нарушениями и выходами силлов и даек [2].

Сравнивая полученную схему с аналогами, выполненными при помощи визуального анализа ЦМР [5], мы можем прийти к выводу, что положение элементов донной поверхности весьма хорошо коррелируется. Особенно заметно сходство положения линейных отрицательных и положительных форм. Тем не менее, использование ГИС-технологий позволяет минимизировать человеческий фактор и занимает гораздо меньше времени для анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе, впервые для исследования Ладожского озера применен геоморфометрический подход. Выполненная на основе индекса батиметрической позиции и уклона классификация цифровой батиметрической модели дна позволяет охарактеризовать морфологию субаквального рельефа с высокой детальностью. По результатам морфологического анализа выделены 3 зоны, соответствующие морфоструктурным районам: Южно-Ладожская (пологие равнины), Центрально-Ладожская (равнины с малыми положительными и отрицательными линейными формами) и Северо-Ладожская (расчлененный грядово-ложбинный рельеф). Установлено, что основные черты рельефа связаны либо с морфоструктурным фактором (грядово-ложбинный рельеф северо-ладожской зоны), либо с морфоскульптурным (ледниковые гряды и эрозионные ложбины центрально-ладожской зоны, ледниково-озерные равнины южно-ладожской зоны). Благодаря принципу вычисления индекса батиметрической позиции элементы морфологии рельефа хорошо определяются как на равнинных, пологих, так

и на расчлененных с большими уклонами участках, что для Ладожского озера является принципиально важным фактором. Полученная схема может быть использована при геологических, геоморфологических, гидрологических, геоэкологических, ландшафтных исследованиях, может послужить основой для планирования точек донного пробоотбора и прочих видов исследований дна. Подобный метод может быть применен и для других водоемов юго-восточной периферии Балтийского кристаллического щита со схожим геологическим строением и историей развития (Онежское озеро, Белое море, Финский залив).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00319, <https://rscf.ru/project/23-24-00319/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амантов А.В.* Этапы геологического развития Ладожского озер // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб: РГО. 1993. С. 5–12.
2. *Амантов А.В.* Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Региональная геология и металлогения. 2014. вып. 58. С. 22–32.
3. *Амантов А.В., Амантова М.Г.* Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. 2014. вып. 59. С. 5–14.
4. *Амантов А.В., Спиридонов М.А.* Геология Ладожского озера // Советская Геология. 1989. вып. 4. С. 83–86.
5. *Анохин В.М., Науменко М.А., Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Рыбакин В.Н.* Геоморфологические особенности дна и берегов Ладожского озера // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. СПб: Российская академия наук. 2021. С. 151–164.
6. *Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А.* Геоморфология Ладожского озера. Новые данные // Астраханский вестник экологического образования. 2020. Т. 59. вып. 5. С. 142–154. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2020-19-5-142-154>
7. *Мусатов Е.Е.* Геоморфология // Геоэкология Ладожского озера. СПб: ВНИИ Океангеология. 1995. С. 36–43.
8. *Науменко М.А.* Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Изв. Российской академии наук. Серия географическая. 2013. № 1. С. 62–72. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2013-1-62-72>
9. *Семенович Н.И.* Донные отложения Ладожского озера. Л.: Наука, 1966. 124 с.
10. *Andreev A.A., Shumilovskikh L.S., Saveliya L.A., Gromig R., Fedorov G.B., Ludikova A., Wagner B., Wennrich V., Brill D., Melles M.* Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga // *Boreas*. 2019. V. 48. № 2. P. 377–386. <https://doi.org/10.1111/bor.12382>
11. *Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Saveliya L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., Melles M.* Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // *Boreas*. 2019. V. 48. № 2. P. 330–348. <https://doi.org/10.1111/bor.12379>
12. *Lecours V., Dolan M.F.J., Micallef A., Lucieer V.L.* A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016. V. 20. № 8. P. 3207–3244. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016>
13. *Lundblad E.R., Wright D.J., Miller J., Larkin E.M., Rinehart R., Naar D.F., Donahue B.T., Anderson S.M., Battista T.A.* Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa // *Marine Geodesy*. 2006. V. 29. № 2. P. 89–111. <https://doi.org/10.1080/01490410600738021>
14. *Naumenko M.A.* Lake Ladoga Digital Bathymetric Models: Development Approaches and Insight for Limnological Investigations // *Limnological Review*. 2020. V. 20. № 2. P. 65–80. <https://doi.org/10.2478/limre-2020-0008>
15. *Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E.* Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1998. V. 140. P. 113–119.
16. *Walbridge S., Slocum N., Pobuda M., Wright D.J.* Unified Geomorphological Analysis Workflows with Benthic Terrain Modeler // *Geosciences*. 2018. V. 94. № 8. P. 1–24. <https://doi.org/10.3390/geosciences8030094>
17. *Weiss A.D.* Topographic positions and landforms analysis // ESRI International User Conference. San Diego, USA. 2001.

Geomorphometric Methods Application for Lake Ladoga Bottom Morphology Investigation**A. O. Aksenov^{1, 2, *}**¹*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*²*FSBI "Arctic and Antarctic research institute", Saint-Petersburg, Russia***E-mail: aksenov2801@gmail.com*

Abstract—In present research results of Lake Ladoga bottom morphology analysis are presented. Semi-automated instrumental classification of digital bathymetric model with application of geomorphometric parameters was executed to achieve the goal. Bathymetric position index and slope were used as classifiers. As a result, 8 types of surfaces were distinguished, which were mapped on the morphological scheme. Plains, slopes and linear top (ridges, heights) and bottom (hollows, depressions) were distinguished. Combinations of such elements allow to contour 3 zones which correlate to morphostructural areas: South-Ladoga, Central-Ladoga, North-Ladoga. Differences of these zones depend on both lake's basin geological structure and exogenous factors of Late-Pleistocene-Holocene (glacial, glacial lacustrine processes). The suggested approach proves high efficiency for Lake Ladoga greatly variable morphology study.

Keywords: Lake Ladoga, geomorphometry, digital bathymetric model, bathymetric position index, subequal geomorphology

REFERENCES

1. Amantov A.V. Jetapy geologicheskogo razvitiya Ladozhskogo ozer // Jevoljucija prirodnyh obstanovok i sovremennoe sostojanie geosistemy Ladozhskogo ozera. SPb: RGO. 1993. S. 5–12.
2. Amantov A.V. Geologija dochetvertichnyh obrazovanij i tektonika Ladozhskogo ozera // Regional'naja geologija i metallogenija. 2014. vyp. 58. S. 22–32.
3. Amantov A.V., Amantova M.G. Razvitie kotloviny Ladozhskogo ozera s pozicij lednikovoj teorii // Regional'naja geologija i metallogenija. 2014. vyp. 59. S. 5–14.
4. Amantov A.V., Spiridonov M.A. Geologija Ladozhskogo ozera // Sovetskaja Geologija. 1989. vyp. 4. S. 83–86.
5. Anohin V.M., Naumenko M.A., Dudakova D.S., Dudakov M.O., Rybakin V.N. Geomorfologicheskie osobennosti dna i beregov Ladozhskogo ozera // Sovremennoe sostojanie i problemy antropogennoj transformacii jekosistemy Ladozhskogo ozera v uslovijah izmenjajushhegosja klimata. SPb: Rossijskaja akademija nauk. 2021. S. 151–164.
6. Beljaev P.Ju., Rybalko A.E., Subetto D.A. Geomorfologija Ladozhskogo ozera. Novye dannye // Astrahanskij vestnik jekologicheskogo obrazovanija. 2020. T. 59. vyp. 5. S. 142–154. DOI: 10.36698/2304-5957-2020-19-5-142-154
7. Musatov E.E. Geomorfologija // Geojekologija Ladozhskogo ozera. SPb: VNIIOkeangeologija. 1995. S. 36–43.
8. Naumenko M.A. Analiz morfometricheskikh harakteristik podvodnogo rel'efa Ladozhskogo ozera na osnove cifrovoj modeli // Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija geograficheskaja. 2013. № 1. S. 62–72. DOI: 10.15356/0373-2444-2013-1-62-72
9. Semenovich N.I. Donnye otlozhenija Ladozhskogo ozera. L.: Nauka, 1966. 124 s.
10. Andreev A.A., Shumilovskikh L.S., Savelieva L.A., Gromig R., Fedorov G.B., Ludikova A., Wagner B., Wennrich V., Brill D., Melles M. Environmental conditions in northwestern Russia during MIS 5 inferred from the pollen stratigraphy in a sediment core from Lake Ladoga // Boreas. 2019. Vol. 48. № 2. P. 377–386. DOI: 10.1111/bor.12382
11. Gromig R., Wagner B., Wennrich V., Fedorov G., Savelieva L., Lebas E., Krastel S., Brill D., Andreev A., Subetto D., Melles M. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments // Boreas. 2019. Vol. 48. № 2. P. 330–348. DOI: 10.1111/bor.12379
12. Lecours V., Dolan M.F.J., Micallef A., Lucieer V.L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor // Hydrology and Earth System Sciences. 2016. Vol. 20. № 8. P. 3207–3244. DOI: 10.5194/hess-20-3207-2016
13. Lundblad E.R., Wright D.J., Miller J., Larkin E.M., Rinehart R., Naar D.F., Donahue B.T., Anderson S.M., Battista T.A. Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa // Marine Geodesy. 2006. Vol. 29. № 2. P. 89–111. DOI: 10.1080/01490410600738021
14. Naumenko M.A. Lake Ladoga Digital Bathymetric Models: Development Approaches and Insight for Limnological Investigations // Limnological Review. 2020. Vol. 20. № 2. P. 65–80. DOI: 10.2478/limre-2020-0008

15. Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1998. Vol. 140. P. 113–119.
16. Walbridge S., Slocum N., Pobuda M., Wright D.J. Unified Geomorphological Analysis Workflows with Benthic Terrain Modeler // *Geosciences*. 2018. Vol. 94. № 8. P. 1–24. DOI: 10.3390/geosciences8030094
17. Weiss A.D. Topographic positions and landforms analysis // *ESRI International User Conference*. San Diego, USA. 2001.