

УДК 556.555

## МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗЕР ВОДОСБОРА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Н. Ю. Корнеенкова\*, М. А. Науменко

Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9,  
Санкт-Петербург, Россия, 196105), \*ntkorn87@gmail.com

Обширный водосбор крупнейшего европейского озера – Ладожского – занимает второе место по площади в России после водосбора озера Байкал. Он характеризуется многообразием типов подстилающей поверхности и сложной гидрографической сетью, представляющей ледниковые и водно-ледниковые формы рельефа. Впервые проведенный комплексный геоморфометрический анализ рельефа водосбора Ладожского озера с уточнением количества и размеров озер по высотной структуре водосбора выявил характерные особенности их распределения на основе цифровой модели и подтвердил различия между выбранными интервалами высот водосбора. Рассчитанное суммарное количество озер Ладожского водосбора составляет около 21 400 без учета водоемов менее 0,01 км<sup>2</sup>. Проведена новая оценка озерности территории водосбора по диапазонам высот, показано, что озерность уменьшается с высотой водосбора. Наибольшее количество озер расположено на высотах от 75 до 200 м и составляет около 77 % от общего количества озер площадью более 0,01 км<sup>2</sup>. Медианные значения площадей для каждого диапазона высот Ладожского водосбора колеблются от 0,04 до 0,06 км<sup>2</sup>. Большую часть, от 59 до 100 % общего количества озер для выбранных диапазонов высот, на водосборе составляют небольшие озера с площадью до 0,3 км<sup>2</sup>. Профильная кривизна рельефа объективно указывает на преобладание процессов денудации над процессами аккумуляции на высотах более 250 м. Приводится первая оценка объема чаши водосбора Ладожского озера.

Ключевые слова: водосбор Ладожского озера; цифровая модель рельефа; ГИС; морфометрические характеристики; озера; объем чаши водосбора

Для цитирования: Корнеенкова Н. Ю., Науменко М. А. Морфометрические особенности рельефа и распределение озер водосбора Ладожского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 5–17. doi: 10.17076/lim1923

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

## N. Yu. Korneenkova\*, M. A. Naumenko. MORPHOMETRIC FEATURES OF THE RELIEF AND DISTRIBUTION OF LAKES IN LAKE LADOGA CATCHMENT

*Institute of Limnology, St. Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences (9 Sevast'yanova St., 196105 St. Petersburg, Russia), \*ntkorn87@gmail.com*

The vast catchment area of the largest European lake – Lake Ladoga, is the second largest in Russia after that of Lake Baikal. It is characterized by a variety of underlying surface types and a complex hydrographic network representing glacial and aqueo-glacial relief forms. A comprehensive geomorphometric analysis of the relief in Ladoga Lake catchment, specifying the number and sizes of lakes in different elevation belts, revealed for the first time the characteristic features of their distribution based on a digital model and confirmed the differences between the selected catchment elevation intervals. The total number of lakes in the Ladoga catchment was estimated at about 21 400, excluding water bodies smaller than 0.01 km<sup>2</sup>. The percentage covers of lakes by elevation ranges were re-estimated, showing their decrease towards higher elevations. The greatest number of lakes is found at elevations between 75 and 200 m, accounting for about 77 % of the total number of lakes larger than 0.01 km<sup>2</sup>. Median lake sizes vary among elevation ranges of the Ladoga catchment from 0.04 to 0.06 km<sup>2</sup>. A majority of lakes in the selected elevation ranges, 59 to 100 % of the total number, are small lakes up to 0.3 km<sup>2</sup>. The relief profile curvature is an objective indicator that denudation processes prevail over accumulation processes at elevations higher than 250 m. A first estimate of the volume of the basin of the Lake Ladoga catchment is given.

**Keywords:** Lake Ladoga catchment; digital elevation model; GIS; morphometric characteristics; lakes; catchment basin volume

For citation: Korneenkova N. Yu., Naumenko M. A. Morphometric features of the relief and distribution of lakes in Lake Ladoga catchment. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 5–17. doi: 10.17076/lim1923

Funding. The work was carried out under state assignment within theme No. FFZF-2024-0001 “Ecosystems of Lake Ladoga, water bodies in its catchment and adjacent territories under natural and anthropogenic impacts in the context of climate change”.

### Введение

Рельеф является главным фактором перераспределения тепла и влаги на водосборной территории в определенном климатическом поясе, и как следствие, к нему приспосабливается биота, от него зависит характер почвообразующих процессов. Дистанционные методы, позволяющие получить новые данные с высоким пространственным разрешением о рельефе поверхности Земли, и интенсивно развивающиеся методы анализа, моделирования и картографического изображения морфометрических параметров рельефа [Симонов, 1998; Шварев и др., 2022] предоставляют новые возможности для количественного изучения структуры речных бассейнов и водосборных территорий крупных озер [Florinsky, 2016; Иванов, Ермолаев, 2017; Опекунова, Бардаш, 2022]. Рельеф, как один из главных системообразующих компонентов ландшафта, может быть принят в качестве входного параметра в математической и математико-картографической модели геосистем водосборов [Кошкарев, 2015]. Качество озерной воды непосредственно зависит от гидрологических,

гидрохимических и гидробиологических процессов на их водосборах, озеро и его водосбор – это единая природная система, процессы в которой оказывают взаимное влияние друг на друга [Драбкова, Сорокин, 1979; Håkanson, 2005; Sánchez Schacht et al., 2023].

Обширный водосбор крупнейшего в Европе Ладожского озера характеризуется многообразием типов подстилающей поверхности и сложной гидрографической сетью, представляющей хорошую сохранность ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа [Румянцев и др., 2015]. Водосбор насыщен большим количеством озер и болот. Озера оказывают регулирующее влияние на сток наносов, осаждая их в своей толще вследствие замедленного водообмена. Несмотря на относительно небольшую среднюю высоту (114 м) и амплитуду высот на водосборе Ладожского озера (до 390 м), морфология рельефа довольно разнообразна [Лукашов, 2000; Ладожское..., 2015]. Самый низкий уровень имеет замыкающее Ладожское озеро с отметкой 5,1 м над уровнем моря Балтийской системы высот (БС).

Главными особенностями гидрографической сети водосбора в пределах Карелии,

сегмента Балтийского кристаллического щита, являются геологическая молодость сети, неглубокое залегание кристаллических пород и малая мощность рыхлых четвертичных отложений [Озера..., 2013]. Комплексная характеристика водной сети Карелии приводится в статье А. В. Литвиненко [2024]. Образование различных типов четвертичных отложений зависело от условий осадконакопления, а также от состава и рельефа коренных пород [Шелехова, 2014]. Южная часть водосбора отличается от северной тем, что находится на Русской осадочной плите и имеет преимущественно плоский, холмисто-равнинный рельеф по сравнению с резко расчлененным, контрастным рельефом северной части бассейна Ладожского озера.

Количественная характеристика особенностей рельефа водосборной территории Ладожского озера представляется актуальной не только с фундаментальных географических позиций, но и с практической точки зрения, имея в виду активную

хозяйственную деятельность и, следовательно, антропогенные изменения окружающей среды.

Границы водосборной территории крупнейшего европейского озера – Ладожского – определены еще в 1874 году И. А. Стрельбицким, как сообщает И. В. Молчанов [1945], затем они уточнялись и корректировались различными организациями по картам различного масштаба и детальности. Общая площадь вместе с площадями озер и границы водосбора, полученные в разное время, приведены в книге И. В. Молчанова [1945]. Отличия между максимальными и минимальными рассчитанными площадями водосбора Ладожского озера не превышают 3%. Так, по расчетам Стрельбицкого, площадь водосбора составляет 284 829 км<sup>2</sup>, а по данным Волховстроя и Сясьстроя – 276 164 км<sup>2</sup>. В 2003 г. создана первая цифровая модель водосбора Ладожского озера с пространственным разрешением 1×1 км на основе данных спутниковой альтиметрии [Науменко и др., 2003] (рис. 1, I).

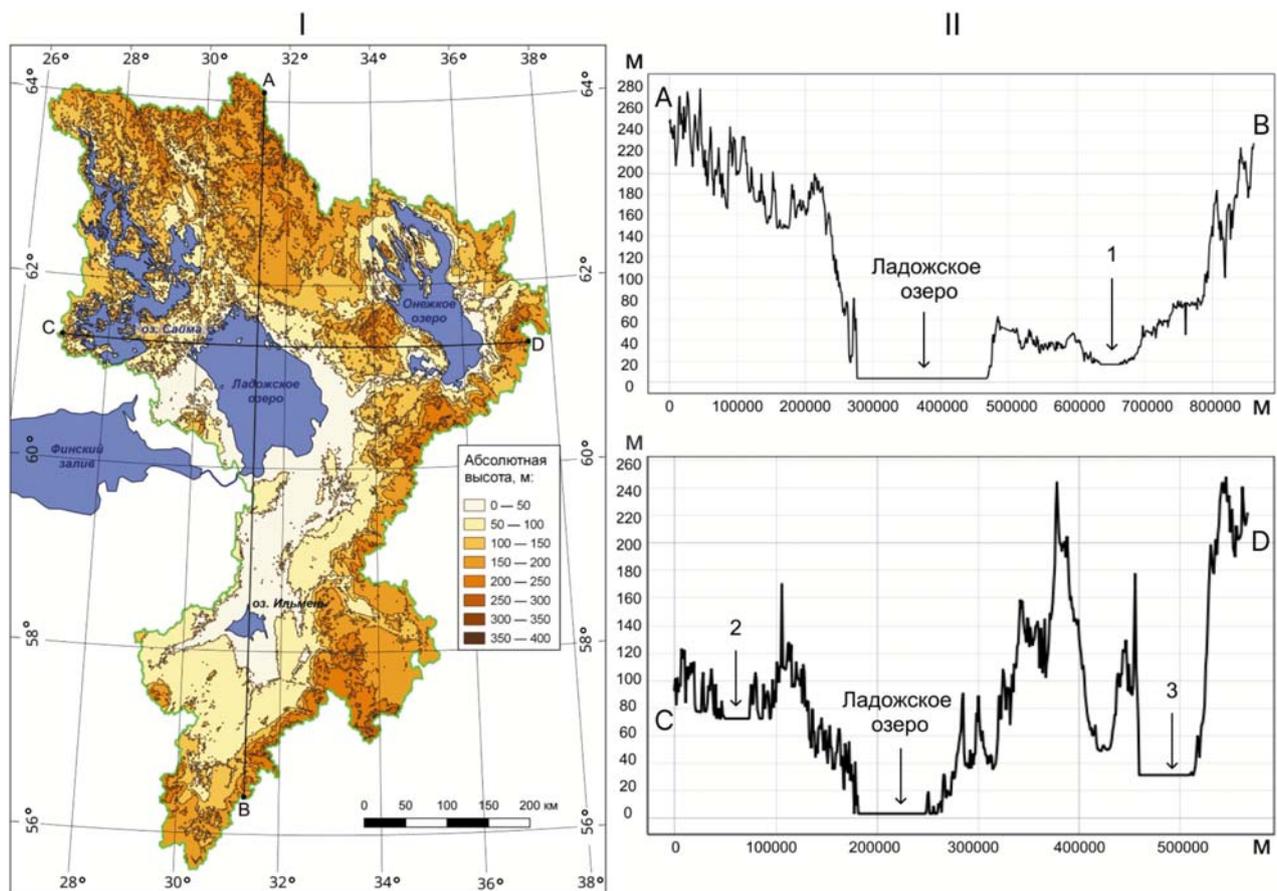


Рис. 1. Водосбор Ладожского озера, полученный на основе цифровой модели (I), профили высот по меридиональному и широтному направлению (II):

1 – оз. Ильмень, 2 – оз. Сайма, 3 – Онежское оз.

Fig. 1. Catchment area of Lake Ladoga obtained from the digital elevation model (I), elevation profiles along meridional and latitudinal directions (II):

1 – Lake Ilmen, 2 – Lake Saima, 3 – Lake Onega

Была определена площадь водосбора – 282 664 км<sup>2</sup>, которая фактически не отличалась от сделанных ранее оценок и практически совпадает с официальными данными – 282 700 км<sup>2</sup> [Ресурсы..., 1972]. Цифровая модель позволила определить не только относительные площади четырех частных водосборов: собственно Ладожского (17,1 %), Онежско-Свирского (29,1 %), Ильмень-Волховского (29,1 %) и Сайма-Вуоксинского (24,7 %), но и построить гистограммы их высот и уклонов [Науменко, Каретников, 2005]. Были рассчитаны базовые статистические морфометрические характеристики водосборов, построены и проанализированы их пространственные корреляционные функции.

Описание водосбора приводится в работах [Ладога..., 2013; Измайлова, Корнеева, 2021; Измайлова, Науменко, 2021]. Водосбор Ладожского озера по площади занимает второе место в России после водосбора озера Байкал. На водосборе Ладожского озера расположено более 50 000 озер [Ладожское..., 2002], в том числе три крупных, а именно: Онежское (общая площадь 9943 км<sup>2</sup>, высота БС – 33 м), оз. Ильмень (площадь ~ 950 км<sup>2</sup>, высота БС – 18,1 м), оз. Сайма (площадь 4380 км<sup>2</sup>, высота БС – 76 м). На рис. 1 показаны разрезы высот водосбора с севера на юг и с запада на восток.

Водосбор озера представляет собой своеобразную «чашу», верхней границей которой является водораздельная линия, а нижней – собственно акватория озера. Цель настоящей статьи заключается в выявлении количественных особенностей характеристик рельефа и распределения озер по ступеням (диапазнам) высот на основе геоморфометрического анализа цифровой модели высот водосбора Ладожского озера, что необходимо при моделировании внешней нагрузки на водоемы [Кондратьев и др., 2006; Кондратьев, 2007].

### Исходные данные и методика

Исходной информацией для анализа особенностей распределения высот и характеристик озер Ладожского водосбора послужила цифровая модель высот рельефа глобального охвата FABDEM (Forest And Buildings remove Copernicus DEM) с пространственным разрешением в 1 угловую секунду (примерно 30 м на экваторе). В основе набора данных лежит цифровая модель поверхности Copernicus GLO 30. При разработке модели рельефа FABDEM был применен алгоритм коррекции погрешностей, обусловленных учетом моделью Copernicus GLO 30 объектов, находящихся на земной поверхности, – лесных массивов,

зданий и др. Цифровая модель разработана исследователями из Бристольского университета и компании Fathom и размещена в свободном доступе для некоммерческого использования на сайте этой компании [Fathom's...]. Так как модель рельефа FABDEM изначально поставляется в системе координат WGS 84, для дальнейшего исследования было произведено перепроецирование растрового изображения в Универсальную поперечную проекцию Меркатора (UTM).

Построение границ водосбора Ладожского озера осуществлялось по данным модели рельефа, разработанной в ИНОЗ РАН [Ладожское..., 2015] (западная часть водосбора), а также открытой базы гидрографических данных HydroSHEDS [Lehner et al., 2008] (южная, восточная, северная части водосбора).

Для того чтобы избежать влияния различных шумов и погрешностей исходных данных, модель высот была конвертирована в растр с разрешением 1 км для расчета статистических параметров высот и крутизны склонов (в градусах). Комплекс расчетов статистических параметров распределения площадей озер, уклонов и высот в границах водосбора Ладожского озера производился в среде ПО SAGA GIS [SAGA...] и QGIS.

В рамках исследования цифровая модель рельефа была переклассифицирована в бинарные растры, в каждом из которых значениям высот определенного диапазона присваивалось значение 1, а остальным значениям – 0. В исследовании рассмотрены диапазоны высот 0–50, 50–100, 100–150, 150–200, 200–250, 250–300, 300–350 и более 400 м. Полученные растровые данные преобразованы в векторный формат.

Чтобы рассчитать показатели высот и уклонов с использованием модуля Grid Values to Points в SAGA ГИС на основе цифровой модели рельефа и растра крутизны склонов, были построены точечные векторные слои, содержащие в таблице атрибутов значения высот или уклонов соответственно и координаты центров каждого пикселя. Расчет количества и площадей водоемов Ладожского водосбора выполнен на основе массива данных о водной поверхности Global Surface Water Seasonality (GSWSeasonality) [Pekel et al., 2016]. Массив GSWSeasonality представляет собой набор индексированных растровых изображений, содержащих сведения о количестве месяцев в году, в которые в каждом пикселе дешифрирована водная поверхность. Для расчета количества водоемов территории водосбора и их площадей использована автоматизированная

обработка массива GSWSeasonality. Выполнено перепроецирование векторного слоя в прямоугольную систему координат и удаление пикселей, соответствующих речной сети. С использованием инструмента «Базовая статистика» в ГИС QGIS получены статистические показатели площадей водоемов водосбора для каждого диапазона высот. В рамках указанных вычислений получены площадные характеристики более 56 000 водоемов. Однако в связи с погрешностями при измерении площадей и количества объектов с учетом их сезонности [Расулова, 2022] по снимкам среднего пространственного разрешения, на которых основан массив GSWSeasonality, рассчитанное в настоящем исследовании количество водоемов менее 0,01 км<sup>2</sup> на водосборе Ладожского озера следует считать завышенным. Для более точного учета водоемов с площадями менее 0,01 км<sup>2</sup> по данным GSWSeasonality необходимо проведение дополнительных исследований с применением визуально-инструментального дешифрирования.

## Результаты и обсуждение

Цифровая модель рельефа водосбора Ладожского озера позволила оценить изменение площади и объема чаши водосбора в зависимости от изменения высоты от уровня Ладожского озера до максимальной высоты водораздельной линии (рис. 2). Это первая оценка объема ледника, соответствующего стадии деградации ледникового покрова, когда территории, окружающие водосбор Ладожского озера, уже освободились от льда, но вся чаша водосбора была еще заполнена льдом. Эта величина может служить реперным значением при оценках эволюции ледникового покрытия водосбора. Минимальный объем и площадь при наименьших высотах водосбора отсчитывается от суммарного объема котловины Ладожского и Онежского озер [Науменко, 2013; Науменко, 2020]. Таким образом, общий объем чаши водосбора Ладожского озера составляет 48 732 км<sup>3</sup>, что примерно в 43 раза больше суммарного объема Ладожского, Онежского озер и озера Ильмень.

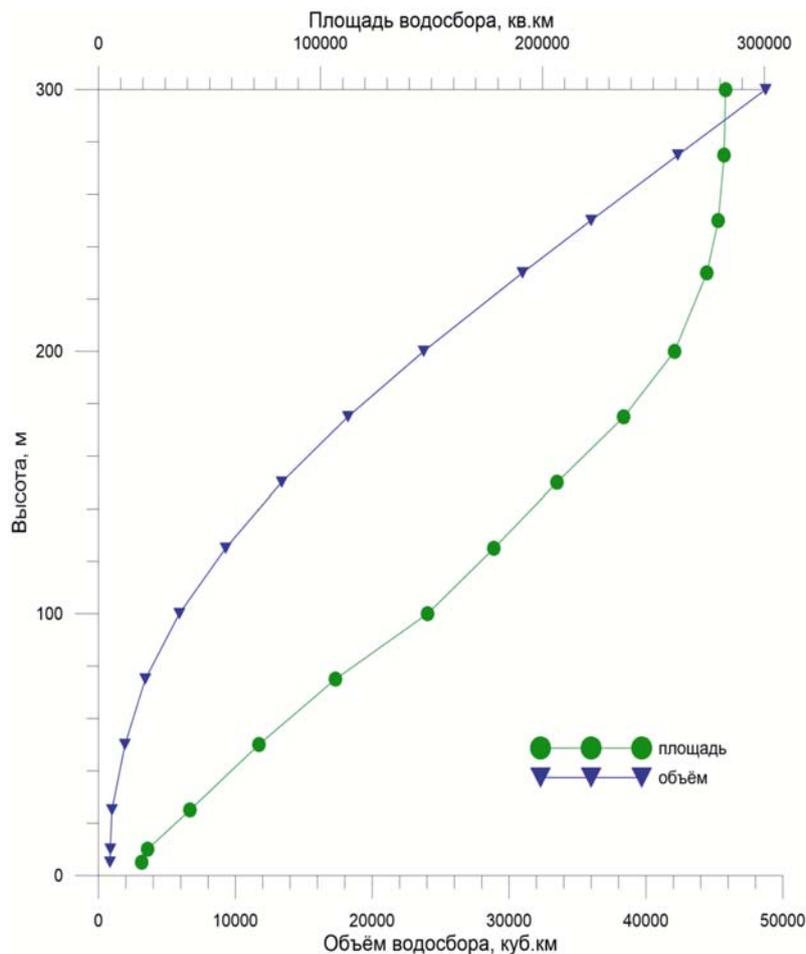


Рис. 2. Изменение площади и объема водосбора с высотой  
 Fig. 2. Change in the catchment area and volume with height

На рис. 3 приведены объединенные гистограммы высот водосбора и средних высот уреза воды озер по пятидесятиметровым диапазонам высот, что позволяет определить наиболее вероятные высоты водосбора Ладожского озера, где расположены озера, и их относительное количество. С очевидностью и статистической достоверностью подтверждаются различия между выбранными интервалами высот водосбора (табл.) на основе их вычисленных статистических характеристик. В самой нижней части водосбора на высотах до 50 метров расположены самые крупные озера водосбора: Ладожское, Онежское и Ильмень (рис. 1). В диапазоне 50–100 м расположены озера Сайменской системы и само озеро Сайма, площадь этого интервала высот самая большая на водосборе.

Для характеристики морфометрических особенностей распределения высот водосбора Ладожского озера необходимо оценить расчлененность рельефа и уклоны поверхности, отражающие степень выположенности рельефа как результат аккумулятивно-денудационной переработки.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) характеризует степень вертикальной расчле-

ненности рельефа и, как следует из таблицы, не сильно отличается между различными диапазонами высот, хотя по критерию Фишера эти отличия значимы.

С диапазона высот 50–100 м начинается закономерное увеличение уклонов и СКО последующих диапазонов высот, причем уклоны самого верхнего диапазона высот 350–400 м превышают уклоны самого низшего диапазона высот почти в 6 раз. Наиболее крутые и изменчивые склоны располагаются по водораздельной линии Ладожского водосбора.

Рассчитанное суммарное количество озер Ладожского водосбора составляет около 21 400 без учета водоемов площадью менее 1 га. Количество озер с первого до третьего диапазона высот увеличивается, достигая максимума на высотах 100–150 м, этот диапазон примерно поровну представлен в северной и южной частях водосбора. Наибольшее количество озер, как следует из рис. 4 и таблицы, расположено на высотах от 75 до 200 м и составляет около 77 % от общего количества озер с площадью более 1 га. С увеличением высоты Ладожского водосбора начиная с диапазона 100–150 м количество озер уменьшается.

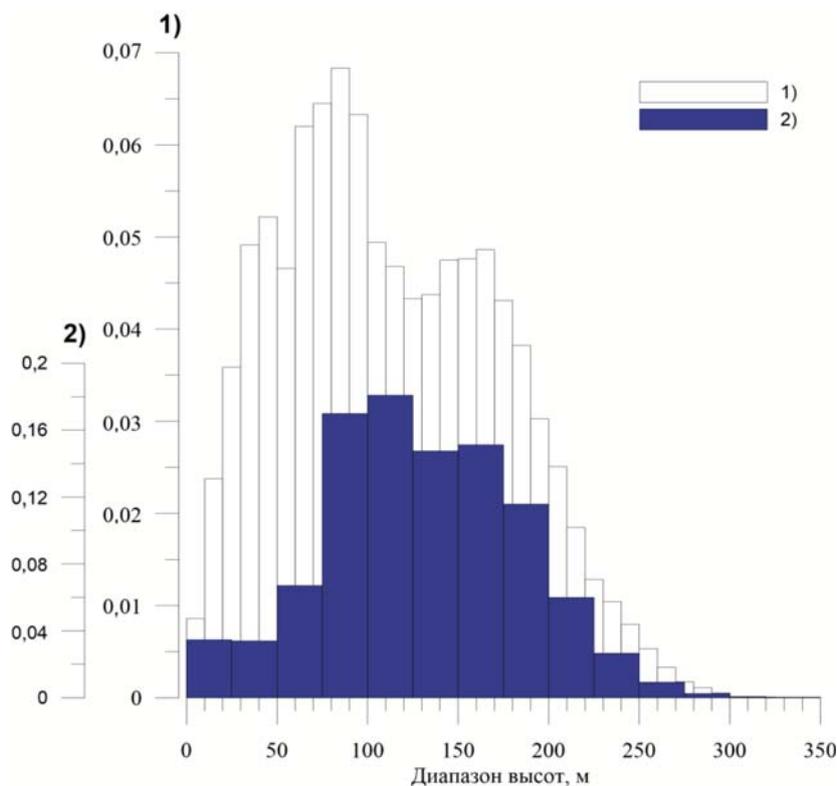


Рис. 3. Гистограммы высот общего водосбора (1) и средних высот уреза воды озер (2) по пятидесятиметровым диапазонам высот

Fig. 3. Total catchment elevations (1) and average elevations of lake's level (2) histograms by 50-meter elevation ranges

Статистические характеристики водосбора Ладожского озера  
 Statistical characteristics of the Ladoga Lake catchment

Диапазон высот, м Elevation range, m	Водосбор Ладожского озера с учетом крупных водоемов Catchment of Lake Ladoga including large reservoirs					Озера водосбора с площадью более 0,01 км <sup>2</sup> Catchment lakes with areas greater than 0.01 km <sup>2</sup>						
	Площадь территории, км <sup>2</sup> (%) Territory area, km <sup>2</sup> (%)	Средняя высота, м н.у.м. Average height, m ASL	СКО, м Mean square deviation, m	Средний уклон, град. (*) Average slope, degrees (*)	СКО, град. Mean square deviation, degrees	Кол-во озер Lake number	Общая площадь озер, км <sup>2</sup> Total lake area km <sup>2</sup>	Средняя площадь озер, км <sup>2</sup> Average lake area, km <sup>2</sup>	Медиана, км <sup>2</sup> Median, km <sup>2</sup>	% озер с площадью ≤ 0,3 км <sup>2</sup> % lake with a mirror area ≤ 0.3 km <sup>2</sup>	СКО, км <sup>2</sup> Mean square deviation, km <sup>2</sup>	Озерность, % Lake percentage, %
0–50	70 780 (25,6)	32,6	12,03	0,22 (1)	0,23	1302	29 172,7	22,4	0,0598	61	554,35	41,2
50–100	76 912 (27,9)	77,6	13,96	0,32 (1,45)	0,31	5165	10 153,9	1,97	0,0587	59	29,85	13,2
100–150	54 357 (19,7)	123,5	15,08	0,49 (2,20)	0,38	7082	3344,5	0,47	0,0464	67	6,34	6,2
150–200	51 904 (18,8)	172,6	13,78	0,44 (1,97)	0,35	5818	2539,0	0,44	0,0502	63	3,52	4,9
200–250	19 068 (6,9)	220,1	13,5	0,55 (2,47)	0,37	1865	376,7	0,2	0,039	62	1,06	2,0
250–300	2897 (1,0)	264,0	11,38	0,66 (2,99)	0,47	175	27,8	0,16	0,0369	74	0,79	1,0
300–350	120 (0,04)	314,9	11,81	1,32 (5,93)	1,09	14	0,6	0,05	0,0364	100	0,04	0,5

Примечание. \*Доли единицы от диапазона 0–50 м.

Note. \*Fractions of a unit from range 0–50 m.

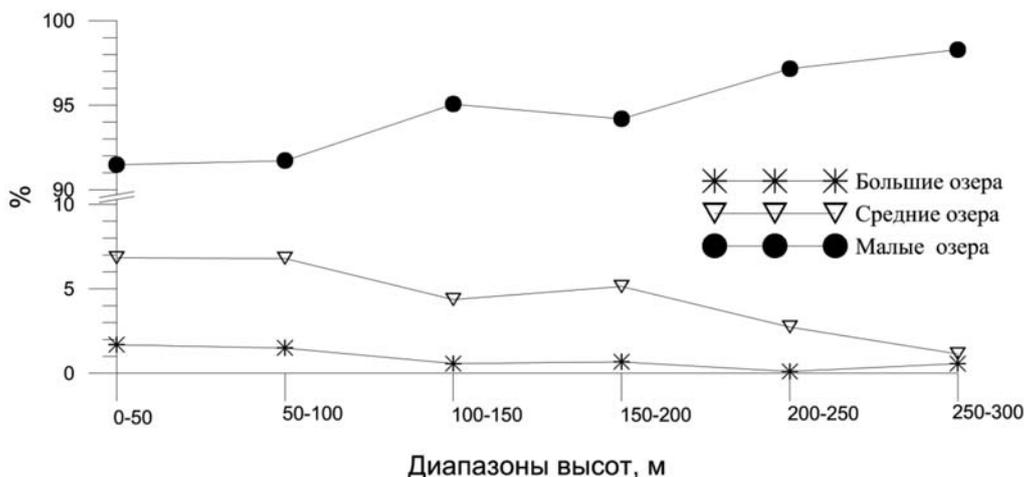


Рис. 4. Изменение количества озер по диапазонам высот водосбора

Fig. 4. Change in the number of lakes by catchment elevation ranges

Озера водосбора могут быть условно разделены на три группы: большие – с площадью не менее 10 км<sup>2</sup>, средние – от 10 до 1 км<sup>2</sup> и малые – менее 1 км<sup>2</sup>. Рис. 3 демонстрирует изменение количества трех классов озер в процентах от общего количества озер в выбранном диапазоне высот.

Наиболее крупные водоемы расположены в диапазоне высот до 50 м – Ладожское и Онежское озера, озеро Ильмень, Ивинский разлив, озера Вуокса и Отрадное. На абсолютных отметках от 50 до 100 м находятся такие крупные озера, как Сайма, Пиелинен, озера Сайменской системы Пихлайявеси, Оривеси, Хаукивеси, Пурувеси, Пюхяселькя и другие.

Количество больших и средних озер с высотой водосбора уменьшается с 1,7 и 6,8 % соответственно практически до нуля, а количество малых увеличивается с 91,5 до 98,3 % (рис. 4).

Медианные значения площадей для каждого диапазона высот Ладожского водосбора колеблются от 0,04 до 0,06 км<sup>2</sup>. Большую часть общего количества озер (от 59 до 100 %) для выбранных диапазонов высот на водосборе занимают небольшие озера с площадью до 0,3 км<sup>2</sup>, что определяется наличием множества заполненных водой тектонических нарушений и чрезвычайно расчлененным рельефом ледникового происхождения [Озера..., 2013].

Общая площадь водной поверхности озер водосбора Ладоги составляет примерно 18 400 км<sup>2</sup>, а с учетом Ладожского и Онежского озер – 45 600 км<sup>2</sup>. Общая озерность – отношение суммарной площади водной поверхности озер к общей площади водосбора, рассчитанная с учетом новых данных, равняется 16,5 %, что подтверждает опубликованные ранее данные [Озера..., 2013]. Следует заметить, что озерность меняется в зависимости от исследуемого диапазона высот (табл.). Наибольшую озерность имеет диапазон высот 0–50 м, с учетом площадей Ладожского и Онежского озер – 41,2 %. Следующий диапазон (50–100 м) характеризуется озерностью 13,2 %. С увеличением высот водосбора озерность снижается.

Морфология рельефа водосбора Ладожского озера во многом унаследована от предшествующих эпох плейстоцен-голоценовых трансгрессий и регрессий [Лукашов, 2000; Шелехова, 2014]. Экзогенные и эндогенные процессы по-разному влияют на геологические породы и осадки, образуя формы рельефа с различающимися морфометрическими параметрами. Отличаются углы склонов, относительные превышения, ориентировка и пространственное положение отдельных форм. Три морфологических параметра поверхности

(уклон, плановая и профильная кривизна) позволяют охарактеризовать разнообразные типы развития рельефа и объяснить условия их формирования [Бронгулеев, 2018]. С помощью цифровой модели высот водосбора впервые было рассчитано пространственное распределение двух важных параметров: плановой  $\alpha$  и профильной кривизны  $\beta$  рельефа водосбора Ладожского озера. Формулы можно найти на сайте GIS-Lab [Основные...].

Горизонтальная (плановая) кривизна характеризует изменение направления линий тока воды в плане в каждом узле грида и является мерой кривизны контуров. Отрицательные значения горизонтальной кривизны соответствуют зонам дивергенции (выпуклые участки), т. е. расхождению линий тока, а положительные значения указывают на сходящийся поток (конвергенцию) и характеризуют вогнутые участки. Нулевые значения указывают на плоскую поверхность [Бронгулеев, 2018].

Вертикальная (профильная) кривизна определяет изменения уклона склона вниз или вверх в направлении градиента в каждом узле грида. Вычисления параметра подобны вычислениям второй производной. Отрицательные значения указывают на ускоренное течение воды по поверхности и денудацию. Положительные значения характеризуют замедление потока по поверхности и аккумуляцию.

Обобщенная характеристика водосбора Ладожского озера может быть представлена в виде гистограмм вычисленных параметров плановой  $\alpha$  и профильной кривизны  $\beta$  рельефа по диапазонам выбранных интервалов высот. Вычислены коэффициенты асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E$ , которые характеризуют степень симметричности и островершинности функций распределения величин.

Гистограммы значений горизонтальной (плановой) кривизны  $\alpha$  по выбранным диапазонам высот по виду практически совпадают друг с другом. При малом коэффициенте асимметрии  $|A_s| < 0,66$  и отрицательном коэффициенте эксцесса  $E$  гистограммы представляют собой распределение равномерной плотности с одинаковой вероятностью появления каждого значения  $\alpha$ , что характеризует собой прямой склон (рис. 5).

На рис. 6 показаны гистограммы значений вертикальной (профильной) кривизны  $\beta$ , которые кардинально отличаются от  $\alpha$ . Для каждого диапазона высот водосбора гистограмма представляет высокую пикообразную кривую, ветви которой круто опускаются по оси ординат к оси абсцисс и затем резко переходят в шлейфы, причем положительная величина эксцесса  $E$

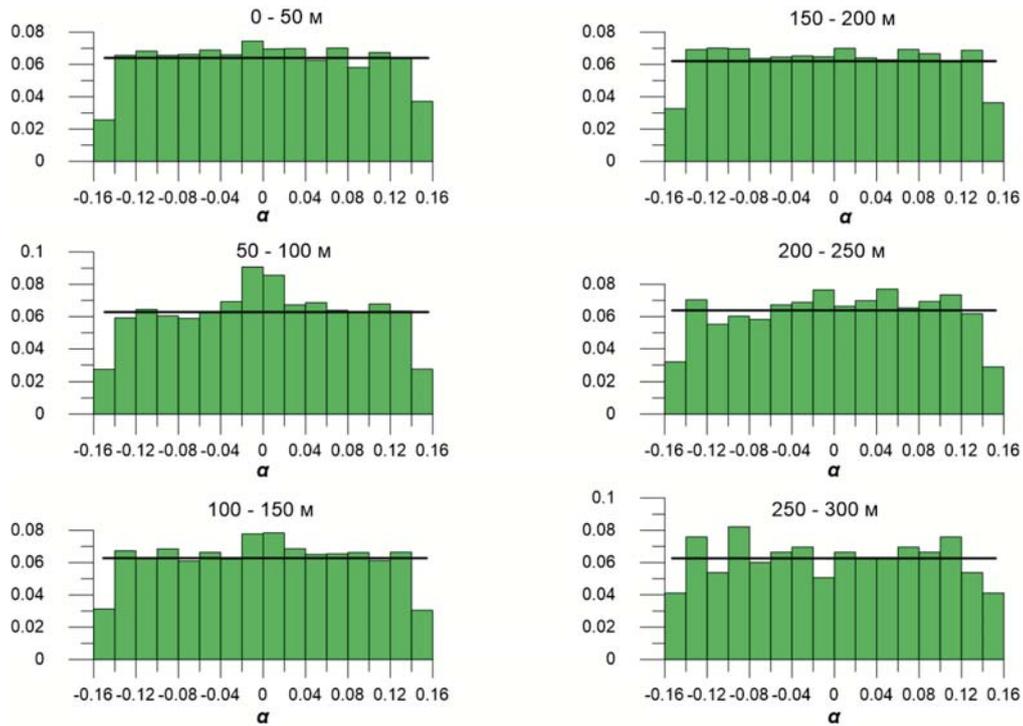


Рис. 5. Гистограммы плановой крутизны рельефа для диапазонов высот водосбора Ладожского озера

Fig. 5. Histograms of profile curvature of relief for elevation ranges of the Ladoga Lake catchment

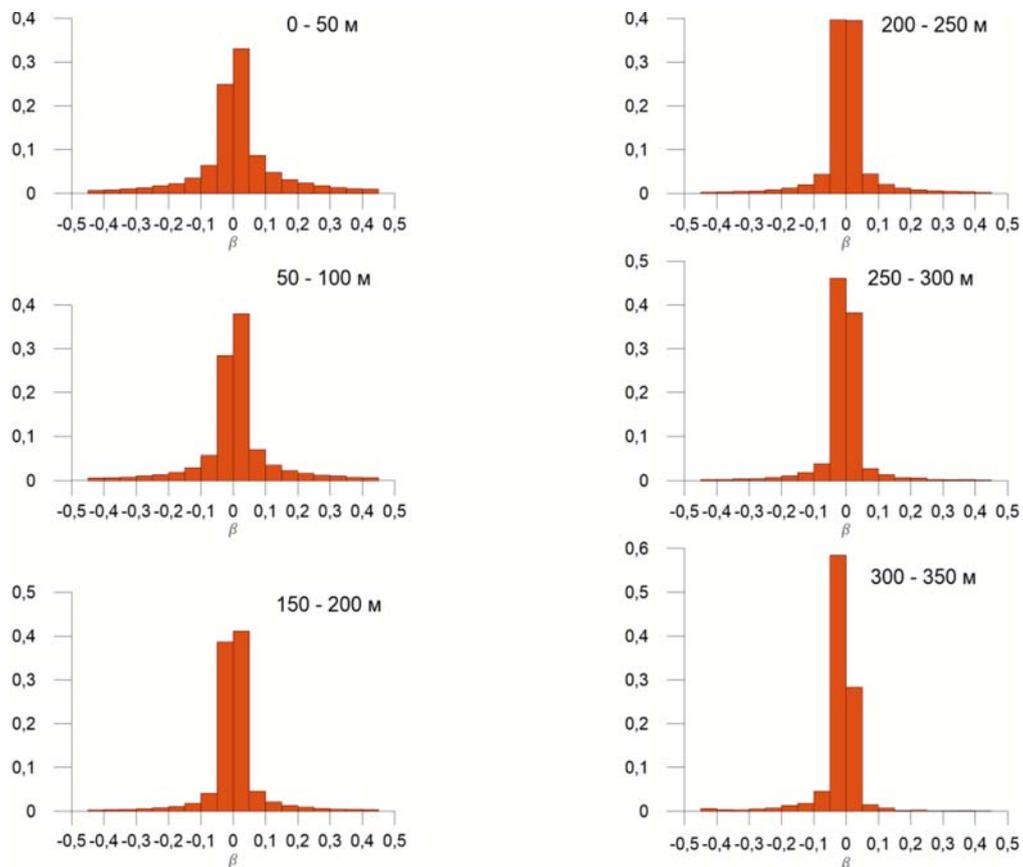


Рис. 6. Гистограммы профильной крутизны рельефа для диапазонов высот водосбора Ладожского озера

Fig. 6. Histograms of profile curvature of relief for elevation ranges of the Ladoga Lake catchment

возрастает с увеличением высоты водосбора. На гистограммах отчетливо проявляется эффект увеличения отрицательных значений  $\beta$  с увеличением высоты водосбора, что свидетельствует о преобладании денудации (процессов сноса и переноса пород в пониженные участки земной поверхности) с увеличением высоты в отличие от преобладания аккумуляции при положительных  $\beta$  на низких ступенях водосбора Ладожского озера. В диапазоне высот водосбора 200–250 м отмечается баланс между положительными и отрицательными значениями вертикальной (профильной) кривизны, что указывает на факт компенсации процессов аккумуляции процессами денудации.

Помимо вычисленных площадных и объемных параметров водосбора Ладожского озера и особенностей распределения озер и их количества параметры водораздельной линии являются важными морфометрическими характеристиками и могут служить основой для сравнения водосборных территорий озер, тем более что водораздельные линии в основном отражают черты «первоначального» рельефа, сохранившегося после освобождения из-под покрова льда [Науменко, 2020]. Максимальные высоты наблюдаются на северной и восточной окраинах водосбора (рис. 1). Средняя высота водораздельной линии (175,5 м) выше средней высоты общего водосбора (114,3 м) Ладожского озера в 1,5 раза. Ранее были определены длина водораздельной линии – 5764 км [Науменко и др., 2003], а также параметр изрезанности, равный отношению фактической длины линии к длине окружности, площадь которой равна площади водосбора. Этот параметр равен 3, что указывает на существование значительных пространственных нерегулярностей на границе водосбора. За характерный пространственный масштаб («ритм рельефа» [Спирidonов, 1952]) может быть принято среднее расстояние между ближайшим максимумом и минимумом высоты линии водосбора. Этот параметр равен  $\sim 2,5$  км и характеризует минимальный квазипериодический масштаб колебаний высоты водосборной линии Ладожского озера. Необходимые дальнейшие исследования водосбора Ладожского озера будут базироваться на концепции Пузаченко и др. [2002], определяющей структуру рельефа как «систему вложенных друг в друга иерархических уровней», связанных нелинейными автоколебаниями.

Кинематические модели эволюции склона при действии внешних факторов (тектонических движений), разработанные В. В. Бронгулевым [2018], могут детализировать и интерпретировать морфометрические процессы

на водосборе Ладожского озера, особенно в северной его части, где подтверждены вертикальные скорости с максимумом интенсивности поднятия 10 мм/год за счет механизма упругого восстановления изостатического равновесия земной коры после снятия ледовой нагрузки в голоцене [Галаганов и др., 2011; Розенберг и др., 2022; Мельник и др., 2022].

## Заключение

Подводя итог, можно констатировать, что использование цифровой модели рельефа водосбора Ладожского озера позволило провести комплексный морфометрический анализ рельефа с уточнением количества и размеров озер по высотно-поясной структуре водосбора и получить ранее не рассчитываемые параметры рельефа.

Суммарное количество озер Ладожского водосбора составляет около 21 400 (без учета водоемов площадью менее 0,01 км<sup>2</sup>). Наибольшее их количество расположено на высотах от 75 до 200 м. Большую часть водосбора для выбранных диапазонов высот занимают озера с площадью до 0,3 км<sup>2</sup>.

Показано, что озерность водосбора меняется в зависимости от исследуемого диапазона высот. Наибольшую озерность имеет диапазон высот 0–50 м. С увеличением высот водосбора озерность снижается.

Выявлено преобладание денудации с увеличением высоты в отличие от преобладания аккумуляции на низких ступенях водосбора Ладожского озера. В диапазоне высот водосбора 200–250 м отмечается баланс между положительными и отрицательными значениями вертикальной (профильной) кривизны, что указывает на факт компенсации процессов аккумуляции процессами денудации.

Определен минимальный квазипериодический масштаб колебаний высоты водосборной линии Ладожского озера.

Результаты являются значимыми для строительства дорог, планирования и создания природных охраняемых территорий и сельскохозяйственных угодий и ирригации, а также для оценки рисков природопользования.

## Литература

- Бронгулеев В. В. Математические методы в геоморфологии. Избранные работы. М.: Медиа-Пресс, 2018. 128 с.
- Галаганов О. Н., Горшков В. Л., Гусева Т. В., Розенберг Н. К., Передерин В. П., Щербакова Н. В.

Современные движения земной коры Ладожско-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. № 8(2). С. 130–136.

Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 196 с.

Иванов М. А., Ермолаев О. П. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и AsterGDEM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 98–109. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109

Измайлова А. В., Корнеев Н. Ю. Малые озера в пределах Ладожского бассейна // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. М.: РАН, 2021. С. 34–39.

Измайлова А. В., Науменко М. А. Общая характеристика водосбора // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. М.: РАН, 2021. С. 22–25.

Кондратьев С. А., Ульянова Т. Ю., Моисеенков А. И., Измайлова А. В., Шкробец А. Е. Информационное обеспечение работ по изучению водных ресурсов Ладожского озера и его бассейна // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 5. С. 538–542.

Кондратьев С. А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.

Кожкарев А. В. Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа // Вопросы географии. Сб. 140: Современная геоморфология / Отв. ред. В. М. Котляков, ред. В. В. Бронгулеев, А. Н. Маккавеев, Э. А. Лихачева. М.: Кодекс, 2015. С. 56–71.

Ладога / Ред. В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.

Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Ред. В. А. Румянцев. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.

Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее / Ред. В. А. Румянцев, В. Г. Драбкова. СПб.: Наука, 2002. 326 с.

Литвиненко А. В. Комплексная характеристика водной сети Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 2. С. 6–24. doi: 10.17076/lit1829

Лукашов А. Д. Геоморфологические особенности территории // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Заонежского полуострова и Северного Приладожья / Под ред. А. Н. Громцева, В. И. Крутова. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. С. 198–208.

Мельник Г. Э., Стеблов Г. М., Галаганов О. Н., Крупеникова И. С., Мокрова А. Н., Розенберг Н. К., Передерин Ф. В., Передерин В. П. Исследование постледниковых движений Фенноскандии по

данным глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. 2022. № 2. С. 26–36. doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Молчанов И. В. Ладожское озеро. М.-Л.: Гидрометеиздат, 1945. 559 с.

Науменко М. А., Каретников С. Г. Ладожское озеро и его водосбор: цифровая модель и новые результаты // Труды XII съезда Русского географического общества (Кронштадт, 15–19 августа 2005 г.). Т. 6. Кронштадт: Изд-во СПбГУ, 2005. С. 82–86.

Науменко М. А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 62–72. doi: 10.15356/0373-2444-2013-1-62-72

Науменко М. А., Каретников С. Г., Догановский А. М., Иванова Ю. А. Новое определение топографических характеристик водосбора Ладожского озера // Охрана и рациональное использование водных ресурсов Ладожского озера и других больших озер (Великий Новгород, 2–6 сентября 2002 г.). Великий Новгород: АССПИН, 2003. С. 412–415.

Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов, В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 484 с.

Опекунова М. Ю., Бардаш А. В. Морфометрический анализ рельефа бассейна реки Ии (Иркутская область) // География и природные ресурсы. 2022. № 1. С. 102–109. doi: 10.15372/GIPR20220111

Основные геоморфометрические параметры: теория // GIS-Lab. URL: <https://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html> (дата обращения: 06.02.2023).

Пузаченко Ю. Г., Онуфреня И. А., Алещенко Г. М. Анализ иерархической организации рельефа // Известия РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.

Расулова А. М. Оценка динамики поверхностных водных объектов на водосборе Ладожского озера по данным Global Surface Water // Геодезия и картография. 2022. № 7. С. 39–48. doi: 10.22389/0016-7126-2022-985-7-39-48

Ресурсы поверхностных вод СССР. Карелия и Северо-Запад / Под ред. В. Е. Водограецкого. Т. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 528 с.

Розенберг Н. К., Передерин Ф. В., Передерин В. П. Исследование постледниковых движений Фенноскандии по данным глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. 2022. № 2. С. 26–36. doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера европейской части России. СПб.: Лема, 2015. 392 с.

Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа. М.-Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.

Спирidonов А. И. Геоморфологическое картографирование. М.: Гос. изд-во геогр. литер., 1952. 185 с.

Шварев С. В., Голосов В. Н., Лебедева Е. В., Лихачева Э. А., Харченко С. В. Актуальная геоморфология: оценка природных рисков и системное природно-антропогенное взаимодействие // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92, № 6. С. 593–601. doi: 10.31857/S086958732206010X

Шелехова Т. С. Особенности четвертичных отложений и геоморфологии Зеленого пояса Фенноскандии // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 6. С. 17–23.

Fathom's Product Stack [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fathom.global/product/fabdem/> (дата обращения: 16.01.2023).

Florinsky I. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press, 2016. 506 p.

Håkanson L. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology – ranking based on statistical analyses // *Hydrobiologia*. 2005. Vol. 541. P. 117–137. doi: 10.1007/s10750-004-5032-7

Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2008. Vol. 89(10). P. 93–94. doi: 10.1029/2008eo100001

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

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. 2016. No. 540(7633). P. 418–422. doi: 10.1038/nature20584

SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses. URL: <http://saga-gis.org> (дата обращения: 21.01.2023).

Sánchez Schacht J. R., MacKeigan P. W., Taranu Z. E., Huot Ya., Gregory-Eaves. I. Agricultural land use and morphometry explain substantial variation in nutrient and ion concentrations in lakes across Canada // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2023. Vol. 80, no. 11. P. 1785–1797. doi: 10.1139/cjfas-2023-0109

## References

Basic geomorphometric parameters: theory. *GIS-Lab*. (In Russ.). URL: <https://gis-lab.info/qa/geomorphometric-parameters-theory.html> (accessed: 06.02.2023).

Bronguleev V. V. Mathematical methods in geomorphology. Selected works. Moscow: Media-Press; 2018. 128 p. (In Russ.)

Drabkova V. G., Sorokin I. N. The lake and its catchment are a single natural system. Leningrad: Nauka; 1979. 196 p. (In Russ.)

Fathom's Product Stack. URL: <https://www.fathom.global/product/fabdem/> (accessed: 16.01.2023).

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia. A reference book. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 484 p. (In Russ.)

Florinsky I. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press; 2016. 506 p.

Galaganov O. N., Gorshkov V. L., Guseva T. V., Rozenberg N. K., Perederin V. P., Sherbakova N. V. Modern movements of the Ladoga-Onega crust according to satellite and ground-based measurements. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2011;8(2):130–136. (In Russ.)

Håkanson L. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology – ranking based

on statistical analyses. *Hydrobiologia = Hydrobiology*. 2005;541:117–137. doi: 10.1007/s10750-004-5032-7

Ivanov M. A., Ermolaev O. P. Geomorphometric analysis of river basins of the Volga Federal District using SRTM and Aster GDEM data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2017;14(2):98–109. (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109

Izmailova A. V., Korneenkova N. Yu. Small lakes within the Ladoga basin. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate*. Moscow; 2021. P. 34–39. (In Russ.)

Izmailova A. V., Naumenko M. A. General characteristics of the catchment. *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogennoi transformatsii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata = Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem in a changing climate*. Moscow; 2021. P. 22–25. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A. Formation of external loads on water bodies: modeling problems. St. Petersburg; 2007. 253 p. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Ul'yanova T. Yu., Moiseenkov A. I., Izmailova A. V., Shkrebet A. E. Information support for studying water resources of Lake Ladoga and its basin. *Water Resources*. 2006;33(5):494–498. doi: 10.1134/S0097807806050034

Koshkarev A. V. Modern methods and technologies of digital elevation modeling. *Voprosy geografii. Sb. 140: Sovremennaya geomorfologiya = Issues of Geography. Iss. 140: Modern Geomorphology*. Moscow; 2015. P. 56–71. (In Russ.)

Lehner B., Verdin K., Jarvis A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2008;89(10):93–94. doi: 10.1029/2008eo100001

Litvinenko A. V. A comprehensive account of the Karelian water network. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2024;2:6–24. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1829

Lukashov A. D. Geomorphological features of the territory. *Inventarizatsiya i izuchenie biologicheskogo raznoobraziya na territorii Zaonezhskogo poluostrova i Severnogo Priladozh'ya = Inventory and study of biodiversity in the territory of the Zaonezhsky Peninsula and Northern Ladoga Region*. Petrozavodsk; 2000. P. 198–208. (In Russ.)

Mel'nik G. E., Steblov G. M., Galaganov O. N., Krupennikova I. S., Mokrova A. N., Rozenberg N. K., Perederin F. V., Perederin V. P. Study of the post-glacial movements of Fennoscandia according to global navigation satellite systems. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography*. 2022;2:26–36. (In Russ.). doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Molchanov I. V. Lake Ladoga. Moscow-Leningrad; 1945. 559 p. (In Russ.)

Naumenko M. A. Analysis of the morphometric characteristics of the underwater relief of Lake Ladoga based on a digital model. *Izvestiya RAN. Ser. Geogr. = Izvestia*

RAS. *Geographical Ser.* 2013;1:62–72. (In Russ.). doi: 10.15356/0373-2444-2013-1-62-72

Naumenko M. A., Karetnikov S. G. Lake Ladoga and its catchment: digital model and new results. *Trudy XII s"ezda Russkogo geograficheskogo obshchestva (Kronshtadt, 15–19 avgusta 2005 goda) = Proceedings of XII Congress of the Russian Geographical Society (Kronshtadt, August 15–19, 2005)*. Vol. 6. Kronshtadt: SPbGU; 2005. P. 82–86. (In Russ.)

Naumenko M. A., Karetnikov S. G., Doganovskii A. M., Ivanova Yu. A. A new definition of the topographic characteristics of the Lake Ladoga catchment. *Okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie vodnykh resursov Ladozhskogo ozera i drugikh bol'shikh ozer = Protection and rational use of water resources of Lake Ladoga and other large lakes*. Veliky Novgorod; 2003. P. 412–415. (In Russ.)

Naumenko M. A. Lake Ladoga digital bathymetric models: development approaches and insight for limnological investigations. *Limnological Review*. 2020;20(2):65–80. doi: 10.2478/limre-2020-0008

Opekunova M. Yu., Bardash A. V. Morphometric analysis of the relief of the Iya River basin (Irkutsk Region). *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2022;1:102–109. (In Russ.). doi: 10.15372/GIPR20220111

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016;540(7633):418–422. doi: 10.1038/nature20584

Puzachenko Yu. G., Onufrenya I. A., Aleshchenko G. M. Analysis of the hierarchical organization of relief. *Izvestiya RAN. Ser. Geogr. = Izvestia RAS. Geographical Ser.* 2002;4:29–38. (In Russ.)

Rasulova A. M. Assessment of surface water bodies dynamics in Lake Ladoga catchment area according to the project Global Surface Water. *Geodesy and Cartography*. 2022;7:39–48. (In Russ.). doi: 10.22389/0016-7126-2022-985-7-39-48

Rozenberg N. K., Perederin F. V., Perederin V. P. Study of the post-glacial movements of Fennoscandia

according to global navigation satellite systems. *Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography*. 2022;2:26–36. (In Russ.). doi: 10.22389/0016-7126-2022-980-2-26-36

Rumyantsev V. A. (ed.). Lake Ladoga and the sights of its shore. An atlas. St. Petersburg; 2015. 200 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G. (eds.). Lake Ladoga: past, present, future. St. Petersburg; 2022. 326 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Lakes of the European part of Russia. St. Petersburg: Lema; 2015. 392 p. (In Russ.)

Rumyantsev V. A., Kondrat'ev S. A. (eds.). Ladoga. St. Petersburg; 2013. 468 p. (In Russ.)

SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses. URL: <http://saga-gis.org> (accessed: 21.01.2023).

Sánchez Schacht J. R., MacKeigan P. W., Taranu Z. E., Huot Ya., Gregory-Eaves. I. Agricultural land use and morphometry explain substantial variation in nutrient and ion concentrations in lakes across Canada. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2023;80(11):1785–1797. doi: 10.1139/cjfas-2023-0109

Shelekhova T. S. Features of the Quaternary deposits and geomorphology of the Green Belt of Fennoscandia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2014;6: 17–23. (In Russ.)

Shvarev S. V., Golosov V. N., Lebedeva E. V., Likhacheva E. A., Kharchenko S. V. Current geomorphology: natural risk assessment and environmental and anthropogenic interaction. *Vestnik Rossiiskoi Akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022;92(6):593–601. (In Russ.). doi: 10.31857/S086958732206010X

Simonov Yu. G. Morphometric analysis of relief. Moscow-Smolensk: Izd-vo SGU; 1998. 272 p. (In Russ.)

Spiridonov A. I. Geomorphological mapping. Moscow; 1952. 185 p. (In Russ.)

Surface water resources of the USSR. Karelia and the Northwest. Vol. 2, Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1972. 528 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 31.05.2024; принята к публикации / accepted: 13.09.2024.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Корнеева Наталья Юрьевна

аспирант, младший научный сотрудник лаборатории географии и гидрологии

e-mail: [ntkorn87@gmail.com](mailto:ntkorn87@gmail.com)

### Науменко Михаил Арсеньевич

д-р геогр. наук, профессор, руководитель лаборатории географии и гидрологии

e-mail: [m.a.naumenko@mail.ru](mailto:m.a.naumenko@mail.ru)

## CONTRIBUTORS:

### Korneenkova, Natalya

Doctoral Student, Junior Researcher

### Naumenko, Mikhail

Dr. Sci. (Geog.), Professor, Head of Laboratory