

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.46.06

АНАЛИЗ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ

© 2013 г. М.А. Науменко

Институт озерадения РАН

Поступила в редакцию 12.04.2011 г.

Одним из важных направлений озерадения является количественная характеристика подводного рельефа крупных озёр и установление взаимосвязи между ее параметрами и гидрологическими особенностями котловины. На основе усовершенствованной цифровой модели дна Ладожского озера определены статистические характеристики глубин и уклонов дна лимнических районов и всего озера. Дается описание рельефа лимнических районов, его особенностей и процессов седиментации. Характерные горизонтальные масштабы определены с использованием двумерных пространственных автокорреляционных функций глубин и уклонов.

Введение. Подводный рельеф влияет на распределение и трансформацию различных видов вещества и энергии в озёрной котловине. Гидротермодинамические процессы в крупных озёрах во многом определяются распределением глубин, а морфометрические характеристики котловины озера – степень ветрового воздействия на водную толщу, степень перемешивания и меру обмена массой и энергией с атмосферой и проникновения тепла вглубь. Особое значение приобретают точные морфометрические величины для составления водного, теплового и химического баланса озера. От формы и размеров озёрной впадины зависят сроки ледостава и льдоразрушения. В зависимости от генезиса форм рельефа и, следовательно, различных морфометрических показателей: площади, максимальной и средней глубины, будет возникать пространственная неоднородность седиментационных процессов.

Современный уровень познания озёр базируется на создании их батиметрических моделей, позволяющих достаточно полно с использованием статистических методов изучать недоступный для визуального наблюдения подводный рельеф [2, 7, 16, 17]. В настоящее время созданы батиметрические модели Великих Американских озёр, Ладожского и Онежского озёр [9, 10], оз. Байкал [19]. Они позволили определить разнообразные объёмные и площадные характеристики как всей котловины озера, так и его лимнических районов [5].

Дно Ладожского озера относится к одному из наиболее типичных образцов внутриконтинентального гляциального шельфа. В пределах современного дна озера проходит важная в геологическом отношении шовная зона сочленения Балтийского щита и Русской плиты, предопределяющая сложное взаимоотношение разнорядковых комплексов, включающих древнейшие образования кристаллического цоколя архея [4]. В целом котловина крупнейшего в Европе озера представляет собой крупную депрессию, вытянутую в северо-западном направлении, навигационный уровень воды в которой располагается на высоте 5.1 м БС. Отношение максимальной длины озера к максимальной ширине равняется 1.75. Показатель площади, т.е. отношение площади зеркала озера к площади водосбора, составляет 0.06, а относительная глубина (отношение максимальной глубины к диаметру озера) – 0.0015.

Геологическое строение бассейна Ладожского озера оказывает большое влияние на особенности его подводного и надводного рельефа [8]. В четвертичное время в этой зоне происходили уникальные процессы развития материкового оледенения. На завершающих этапах оледенения материковый лёд взаимодействовал с пресноводными (приледниковыми) бассейнами, что приводило к перестройке рельефа и осадочного покрова, включая появление новых формирований специфического состава и строения [4]. Соответственно рельеф дна Ладожского озера обладает

характерными особенностями, свойственными областям, испытывающим воздействие покровного оледенения. К этим особенностям можно отнести широкое развитие интенсивно, но неглубоко расчлененных поверхностей на мелководных участках, наличие аккумулятивных поверхностей в крупных понижениях рельефа дна, малый размах относительных превышений и пологие углы склонов, интенсивное развитие процессов абразионно-аккумулятивного выравнивания.

До настоящего времени количественная характеристика распределения глубин, а тем более уклонов дна Ладожского озера была достаточно ограниченной, что и сдерживало развитие как лимнологических, так и геоморфологических исследований пространственной структуры подводного рельефа.

Цель настоящей работы – уточнение морфометрических характеристик Ладожского озера на основе расширенной базы данных по глубинам озера, а также анализ пространственной структуры распределения глубин и уклонов в различных лимнических районах.

Исходные данные и методика. Цифровые модели рельефа водосбора Ладожского озера и подводного рельефа Ладожского и Онежского озер (рис. 1) созданы несколько лет назад на основе крупномасштабных карт [9–13]. Характеристика методических приёмов создания батиметрических моделей уже описана в указанных работах. В качестве основной программы создания модели рельефа и его анализа была использована программа SURFER. К настоящему времени количество базовых точек с глубинами озера, используемых для построения модели Ладожского озера по сравнению с предыдущей версией, было увеличено на 24.4%. Среднее расстояние между ближайшими точками составляет 882 метра. Степень насыщенности, площадь, на которую приходится не менее одной точки, составляет 0.5 км^2 , а пространственное разрешение стало более детальным (шаг сетки $0.5 \times 0.5 \text{ км}$). В качестве основного метода интерполирования глубин морфометрической модели озера выбран метод кригинга. Было проведено нахождение оптимального шага эквидистантной сетки и радиуса интерполирования – максимального горизонтального расстояния, на котором учитываются базовые точки. Для шага интерполирования были выбраны 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 и 2.15 км (предложено программой), для радиуса интерполирования – 2, 5, 8, 10, 15, 20 и 174 км (предложено программой). 49 вычислений площади, объёма и ошибок интерполирования с различными сочетаниями параметров, включая и те, которые про-

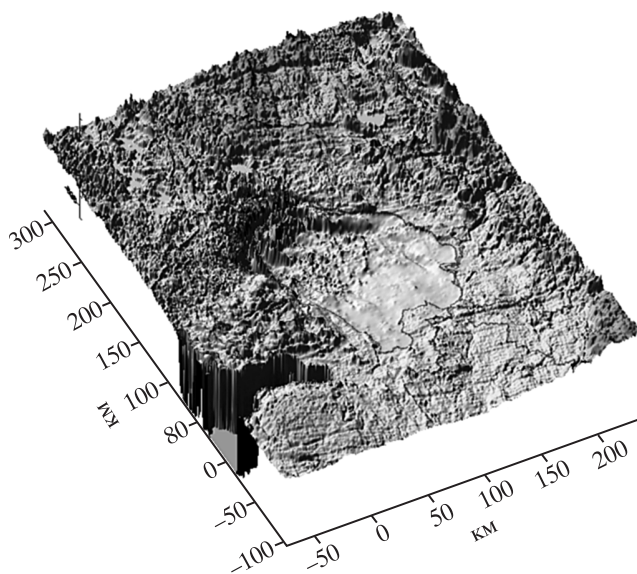


Рис. 1. Подводный рельеф Ладожского озера и рельеф его частного водосбора.

грамма предложила по умолчанию, позволили найти их оптимальные величины.

Оптимальными параметрами были приняты параметры, при которых площадь акватории озера соответствует площади, определённой картографическими методами, с минимальной средней ошибкой интерполирования (в нашем случае 0.05 м) и наименьшей остаточной дисперсией. Таким образом, для используемого в построении морфометрической модели количества базовых точек (9855) оптимальными параметрами интерполирования были приняты: шаг – 0.5 км , радиус интерполирования – 8 км .

Общее количество точек эквидистантной сетки, используемых для вычисления морфометрических характеристик, составило 70 190.

Результаты. Цифровая модель позволила определить различные статистические характеристики глубин и уклонов озера, которые крайне трудно получить картографическими методами (таблица). Важной характеристикой озера является гистограмма глубин дна Ладожского озера, описывающая форму котловины и функцию распределения. Она имеет две моды, что свидетельствует о преобладании двух характерных диапазонов глубин. Это $0\text{--}18 \text{ м}$ – мелководная зона и $50\text{--}70 \text{ м}$ – зона озерного уступа (рис. 2).

Впервые были вычислены величины наибольшей крутизны склонов γ в каждом узле цифровой модели Ладожского озера и его водосбора. Средний уклон дна Ладожского озера (0.49° при ск.кв. откл. 0.76°) сравним со средним уклоном водосбора самого озера, для которого осредненный

Таблица. Статистические характеристики глубин и уклонов дна лимнических районов и всего Ладожского озера

Район	Кол-во точек	Площадь, км ²	Объём, км ³	Характеристики	Среднее	Медиана	Диапазон Н (м) и γ (град)	Ср. квд. откл.	C _v	Коэф. асимметрии	Коэф. эксцесса	Функция распредел.
I	21 048	5465.0	46.7	Н, м	8.8	8.9	0.0–18	5.06	0.58	0.0	-1.16	равномерн.
				γ, град	0.22	0.09	0.0–6.8	0.40	1.82	4.82	32.26	χ ²
II	18 513	4631.3	153.6	Н, м	33.2	32.7	18–50	9.46	0.28	0.1	-1.21	равномерн.
				γ, град	0.44	0.17	0.0–11.0	0.73	1.65	3.60	17.77	χ ²
III	14 689	3693.4	221.1	Н, м	59.9	60.0	50–70	5.40	0.09	0.0	-1.06	равномерн.
				γ, град	0.44	0.24	0.0–8.5	0.66	1.50	4.11	22.60	χ ²
IV	7628	1910.0	158.4	Н, м	82.9	81.7	70–100	8.84	0.11	0.32	-1.09	логнорм.
				γ, град	0.81	0.42	0.0–11.1	1.01	1.25	2.84	11.42	χ ²
V	5969	1487.9	174.7	Н, м	117.3	116.6	100–140	11.41	0.10	0.23	-1.09	χ ²
				γ, град	0.99	0.65	0.0–10.2	1.02	1.03	2.52	8.62	логнорм.
VI	2343	577.8	93.3	Н, м	161.9	157.2	140–230	17.11	0.10	0.87	0.02	χ ²
				γ, град	1.16	0.88	0.0–11.8	1.01	0.87	2.86	15.07	логнорм.
все озеро	70 190	17765.4	847.8	Н, м	48.3	41.6	0.0–230	39.9	0.82	1.06	-22.92	–
				γ, град	0.49	0.20	0.0–11.8	0.76	1.55	3.62	-15.11	χ ²

наибольший наклон земной поверхности составил 0.45° при максимальном значении 3.9° . Безусловно, величины крутизны склонов водосбора могут быть несколько занижены из-за базового шага сетки 1 км.

Характер расчлененности территории – весьма информативный признак особенностей рельефа. Вертикальная расчлененность подводного рельефа Ладожского озера больше, чем аналогичная величина его частного водосбора [13].

Гистограмма максимальных уклонов подводного рельефа озер мономодальна и асимметрична со значительным смещением максимума в область малых величин. Функция распределения уклонов в озере подчиняется χ^2 – распределению.

Объем озера вычислялся интегрированием с помощью метода трапеции и метода Симпсона. Точность интегрирования составляла 0.1 км^3 . Величина объема озера по сравнению с предыдущими вычислениями [9] увеличилась на 1.3% и стала $847.8 \pm 2.4 \text{ км}^3$, средняя глубина озера 47.8 м.

В крупных озерах в силу больших размеров и разнообразия глубин необходимо проводить районирование их акватории, выделяя районы, где лимнические процессы имеют одинаковую направленность. Несмотря на относительно небольшие максимальные глубины Ладожского озера (до 230 м), морфология дна довольно разнообразна. В его пределах можно выделить несколько районов, различающихся по морфологическим характеристикам.

На основе цифровой батиметрической модели Ладожского озера проведено лимническое районирование глубин озера, необходимое для изучения эволюции физико-химических и биологических процессов в сезонном и годовом цикле. Районирование глубин Ладожского озера способствовало выделению таких районов озера, где темпы протекания лимнических процессов в значительной мере определяются характерным распределением глубин, специфическими условиями теплонакопления и теплоотдачи в годовом термическом цикле [6, 11]. Акватория Ладожского озера была разбита на шесть районов: 1) мелководный, 2) переходный, 3) район озёрного уступа, 4) склоновый, 5) глубоководный, 6) впадины. Каждый из шести лимнических районов обладает специфическими особенностями, их описание приведено в [6]. Было показано, что в зависимости от глубины района существует пространственно-временная термическая дифференциация вод озера [11]. На рис. 3 приводится распределение глубин Ладожского озера, полученное на основе новой морфометрической модели с границами лимнических районов.

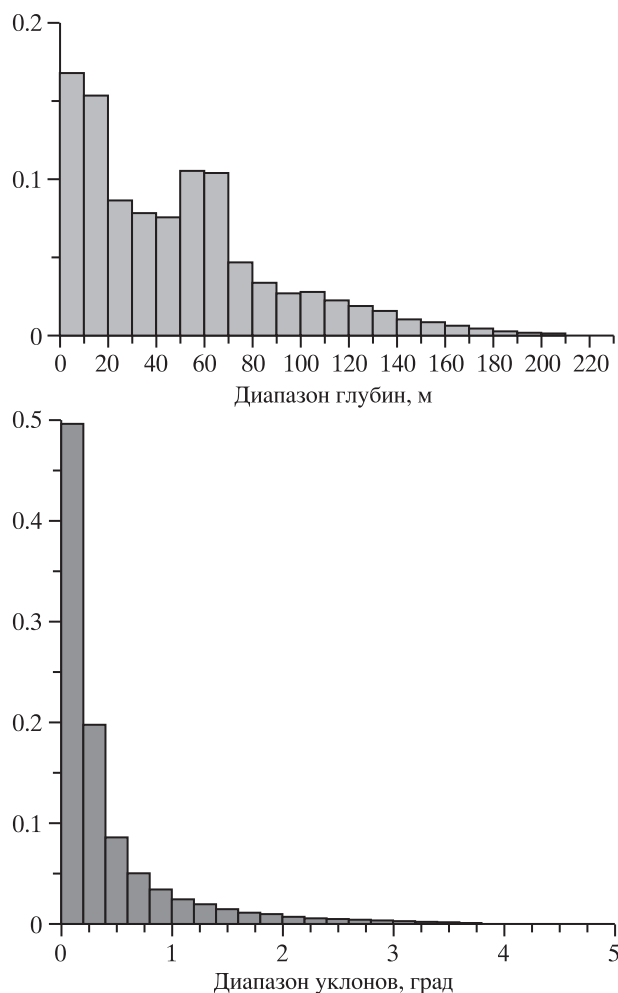


Рис. 2. Гистограммы распределения глубин и уклонов Ладожского озера. Вертикальная ось – в долях единицы.

Чтобы охарактеризовать морфометрические особенности распределения глубин шельфовых районов и озёр, необходимо рассматривать расчлененность поверхности дна и уклоны поверхности, отражающие степень выположенности рельефа как результат аккумулятивно-абразионной переработки [7]. На рис. 4 приводится распределение уклонов дна по акватории Ладожского озера. Анализ горизонтального распределения глубин и наибольших уклонов дна Ладожского озера был выполнен для характеристики особенностей лимнических районов.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) является хорошим показателем расчленённости рельефа и характеризует степень рассеяния глубин относительно их средних значения. СКО глубин лимнических районов увеличивается с увеличением глубин этих районов. СКО уклонов увеличивается от мелководного района до четвер-

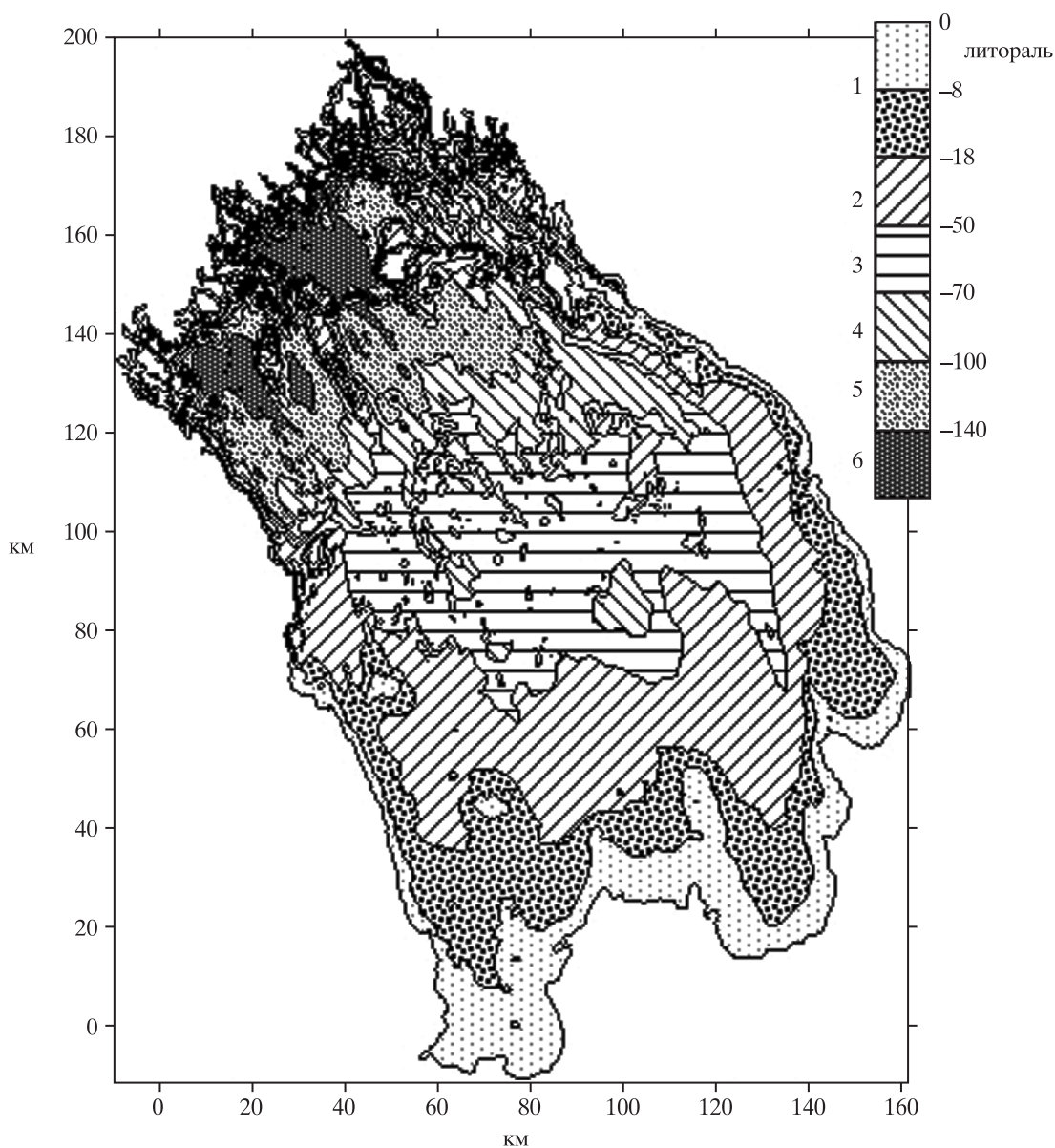


Рис. 3. Лимнические районы Ладожского озера.

того (склонового), начиная с которого, достигнув максимума, остается постоянным вплоть до наибольших глубин. Коэффициент вариации C_v как для глубин, так и для уклонов дна имеет тенденцию к уменьшению с увеличением глубин.

Коэффициент асимметрии A_s и коэффициент эксцесса E характеризует степень симметричности и островершинности функции распределения величин. При положительных значениях A_s модальные значения тяготеют к меньшим значениям [17]. При помощи E оценивается степень равновесия рельефообразующих факторов. Большие положительные коэффициенты E характеризуют преобладание каких-то определённых значений узкого диапазона.

Функции плотности вероятности глубин и уклонов лимнических районов проверялись на принадлежность их к четырём видам: равномерной плотности, логарифмически нормальному, гамма-распределению и χ^2 – распределению. Для последних трех распределений среднее значение нехарактерно, чаще встречаются значения меньше среднего. Критерием соответствия служили критерий Пирсона и Колмогорова-Смирнова. Глубины первых трех лимнических районов характеризуются законом равномерной плотности, четвертого – логарифмически нормального распределения, а более глубоководные районы – законом χ^2 – распределения. Уклоны подводного рельефа Ладожского имеют резко асимметричные функции рас-

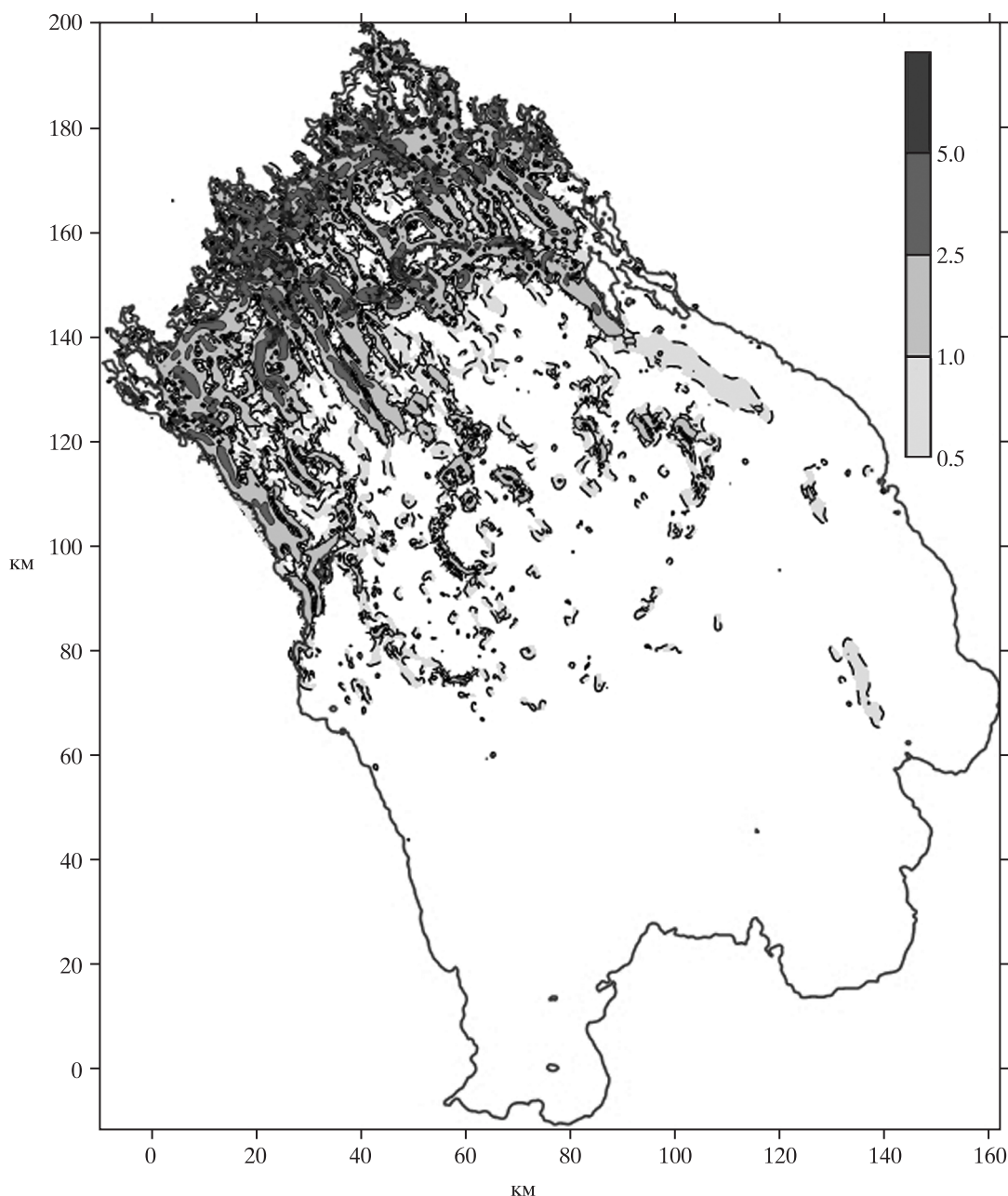


Рис. 4. Распределение углов наклона подводного рельефа Ладожского озера.

пределения: от χ^2 – распределения в мелководных районах до логарифмически нормального распределения в глубоководных районах (таблица).

Наиболее выровненной является южная часть Ладожского озера. Для неё характерно развитие слаборасчленённых поверхностей с незначительными относительными превышениями (1–3 м) и очень пологими углами склонов (менее 0.2°). В этой части озера, начинающейся от уреза воды до глубины 18–20 м, мощность четвертичных отложений, по геофизическим данным, составляет 10–15 м [18]. В южной части озера последни-

ковые образования представлены маломощным слоем (несколько сантиметров) песчаных и песчано-алевритовых отложений [3].

Литоральная зона (зона произрастания высшей водной растительности до глубины 8 м) занимает площадь при навигационной отметке уровня 5.1 м $S_{\text{лит.}} = 2543.0 \text{ км}^2$, а объем составляет $V_{\text{лит.}} = 9.67 \text{ км}^3$.

Десятиметровая изобата обрисовывает выступы коренного берега. Общая выравненность рельефа, развитого на осадочных породах, обусловлена длительным воздействием процессов

площадной денудации на квазигоризонтально залегающие, относительно малоустойчивые (по сравнению с кристаллическими породами) к размыву осадочные породы. В районах выноса крупных рек – Волхова, Паши, Свири в формировании рельефа значительную роль играют аккумулятивные процессы, заметно нивелирующие дно [4].

Следующая – полого – волнистая аккумулятивная поверхность (переходный район) расположена на глубинах 20–50 м. В этом районе увеличивается дисперсия как глубин, так и уклонов. В восточной части этого района уклоны больше, чем в западной. Характерной особенностью восточной части Ладожского озера является наличие довольно крупной линейной ложбины, которая хорошо очерчивается шестидесятиметровой изобатой с перепадом глубин от 40 до 92 м, протягивающейся вдоль восточного берега на расстоянии около 20 км от него (разрез т на рис. 6). Длина ложбины около 100 км. На глубинах 65–80 м она имеет симметричное строение, выше на север – восточная часть имеет меньшие отметки дна, чем западная. Углы склонов на всем протяжении ложбины составляют около 0.25° . Склоны не террасированы, что свидетельствует об их непохожести на речные долины. Возможно, эта ложбина является долиной стока талых ледниковых вод, на что указывает Амантов [1].

Срединная часть Ладожского озера, где расположен геометрический центр озера, представляет собой достаточно плоскую равнину, которая по статистическим характеристикам похожа на первый прибрежный район. Однако относительные превышения возрастают. Район характеризуется холмисто-грядовыми поверхностями экзарационно-аккумулятивного рельефа. На большой площади дна располагаются плащи ледниковых отложений, перекрытых поздне-последледниковыми отложениями общей мощностью 20–30 м [1]. В этом районе появляются гряды и ложбины с протяженностью 5–15 км при высоте от поверхности дна до 30 м. Углы склонов этих образований достигают 1° , появляется несколько холмов с углами 2° на семидесятиметровой изобате. Однако уклоны в 2° существуют и в западной прибрежной части озера в районе Суханевской банки и Коневецкого пролива.

При продвижении на север расчлененность подводного рельефа Ладожского озера заметно увеличивается, относительные превышения крупных форм достигают 60–100 м. Такой морфологический облик рельефа обусловлен, по всей видимости, избирательной денудацией устойчивых к размыву кристаллических пород. Ряд крупных вытянутых возвышенностей, простирающихся с ССЗ на ЮЮВ, начинают появляться в четвертом склоновом райо-

не и в следующем глубоководном районе, причем вершины этих возвышенностей могут быть островами, в частности Западного архипелага.

Резко расчлененный, контрастный рельеф северной части Ладожского озера отличен от менее холмистой поверхности дна центральной и южной частей озера. Как уже говорилось выше, четко выявляются различия в строении котловины южной и северной частей озера, граница между которыми условно проводится по линии Приозерск (западный берег) – Ууксу (северо-восточная часть озера). Севернее этой линии сказывается влияние Балтийского кристаллического щита. В районе о. Валаам и севернее его, в ладожских шхерах, особенно на северо-западе озера, углы склонов могут превышать 5° , что для подводного рельефа является довольно крутыми склонами, которые встречаются достаточно редко. Их наличие – свидетельство того, что рельеф сложен породами (или выработан в породах), плохо поддающимися размыву. Выше описанный рельеф сформировался в результате длительного воздействия процессов комплексной денудации на поверхность кристаллических пород. Значительную роль в создании современного облика этих поверхностей сыграли покровные ледники. Их экзарационная деятельность привела к существенному увеличению расчлененности рельефа.

Использование батиметрической модели Ладожского озера позволило построить и провести анализ типичных разрезов этого озера. На рис. 6 приведены разрезы, указанные на рис. 5. По сейсмоакустическим данным ледниковые образования составляют большинство поднятий в центре озера, а также обнажаются в береговой зоне южного побережья [3].

Продольные разрезы свидетельствуют о значительной пересеченности рельефа северных районов. Максимальные уклоны дна могут достигать 100 м на 1 км, то есть превышать средние уклоны примерно в 10 000 раз.

В диапазоне глубин 106–108 и 123–125 м склоны имеют максимальные углы от 5° до 10.2° .

Северная часть озера, расположенная в области распространения кристаллических пород, имеет неровное дно с многочисленными глубокими впадинами, сильно изрезанными берегами и многочисленными островами. В шхерных районах северной части озера последледниковые образования представлены обычно иловой толщей, распределение которой носит очаговый характер. Резко расчлененный, контрастный рельеф связан с коренным и ледниковым рельефом. К северу от Валаамского архипелага дно представляет сово-

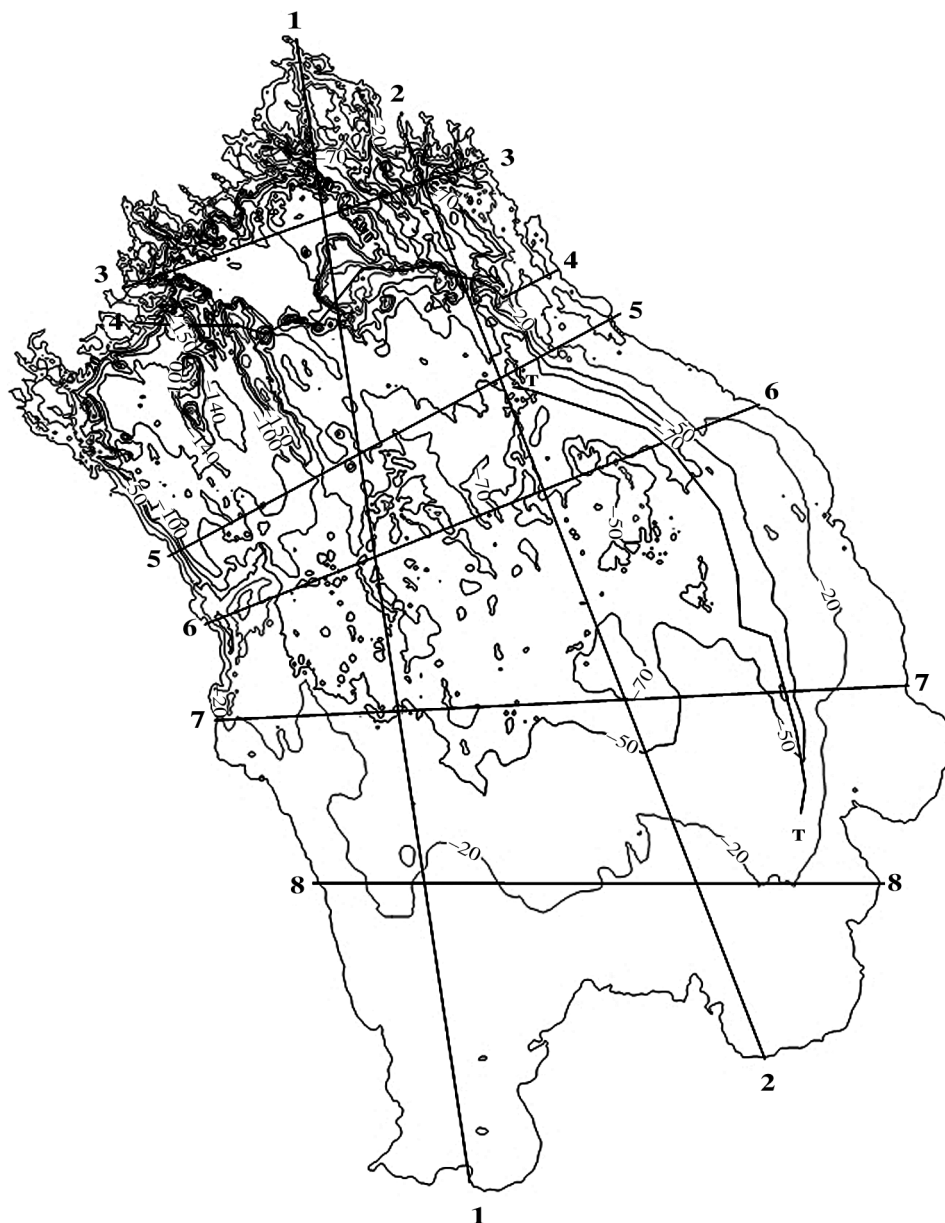


Рис. 5. Трансекты, для которых построено распределение глубин.

купность изолированных котловин с глубинами более 140 м, разделённых порогами с батиметрическими отметками 40–50 м. На основе батиметрической модели в Ладожском озере выделены 16 обособленных впадин с глубинами более 140 метров, которые в большинстве случаев совпадают с установленными или предполагаемыми разломами рифейского возраста. Уклоны во впадинах – самые максимальные из всех лимнических районов озер. В диапазоне глубин от 140 до 204 м наибольшие уклоны колеблются от 5.5 до 11.7°. Дно впадин заполнено четвертичными отложениями, мощность которых доходит до 60–70 м [18], однако на склонах их может не

быть совсем, что определяется крайне неровной кровлей коренного субстрата. Морфоструктуры, испытывающие унаследованное поднятие, характеризуются замедленной или даже отрицательной седиментацией – на месте тектонических поднятий наблюдаются выходы коренных пород [14].

Одним из важных выводов, получаемых из модельных расчетов, может служить вывод об обособленности северной части Ладожского озера от южной. Расчеты поперечного сечения на разрезе 3 свидетельствуют о том, что основной водообмен идет через проливы западнее о. Валаам при одинаковом расходе. Западные проливы глубже восточных примерно на 50 м. Поперечное

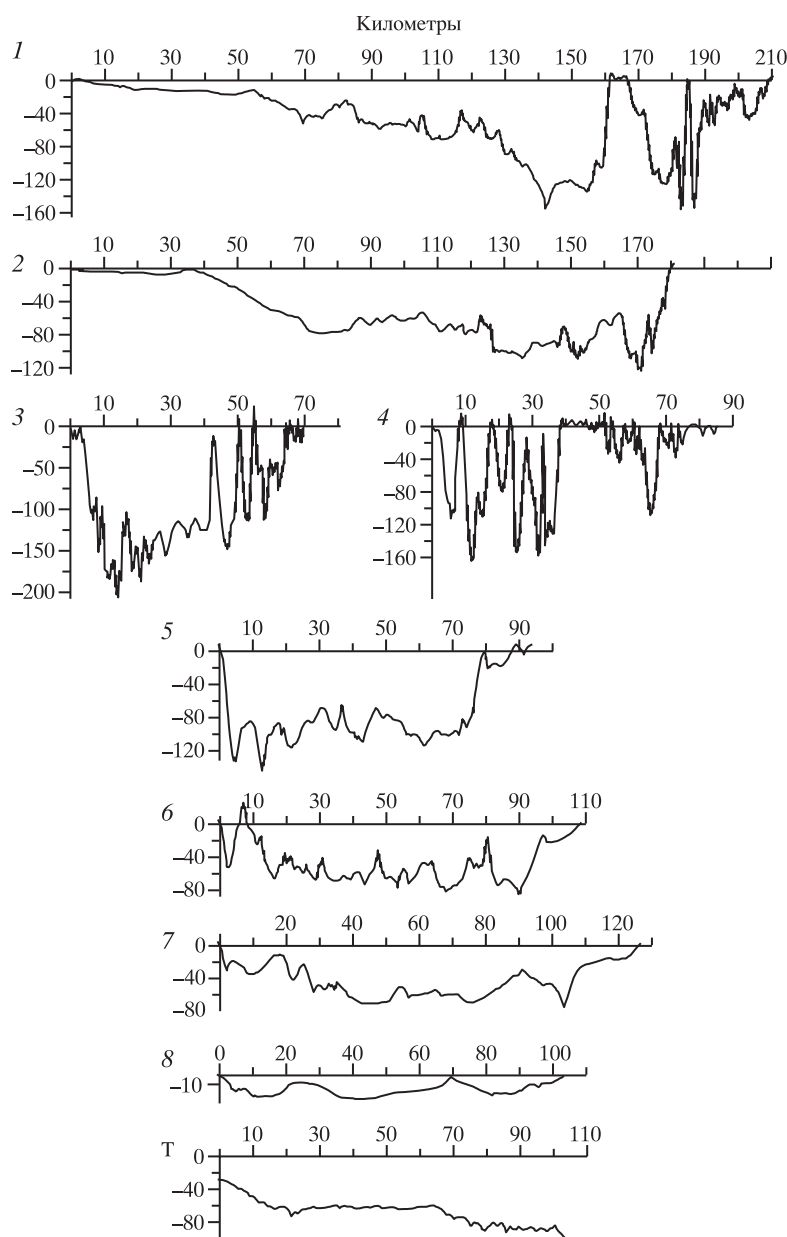


Рис. 6. Характерные профили дна Ладожского озера. Продольные разрезы (1, 2, т) начинаются с юга, поперечные (3, 4, 5, 6, 7, 8) – с запада. Вертикальные оси – глубины в метрах.

сечение западных проливов превышает поперечное сечение восточных на 76%.

Сложность рельефа может быть определена амплитудой глубин различных районов. Чем севернее находится геометрический центр района, чем больше расчлененность и амплитуда подводного рельефа Ладожского озера. Можно говорить о своеобразной вертикальной зональности, выражающейся в закономерном увеличении доли участия в формировании подводного рельефа аккумулятивных процессов. Различия в строении осадочной толщи в разных районах озера свидетельствуют о неравномерности и неоднородности осадконакоп-

ления на протяжении голоценового времени. Они определяются прежде всего морфометрическими особенностями котловины и динамическими процессами в водной толще озера. Горизонтальная и вертикальная расчлененность рельефа определяет литологические особенности донных отложений.

Важной характеристикой статистической структуры подводного рельефа является двумерная пространственная автокорреляционная функция. Оценка масштабов коррелированности типичных, реальных и аномальных полей различных лимнических характеристик может быть выполнена с помощью анализа параметров про-

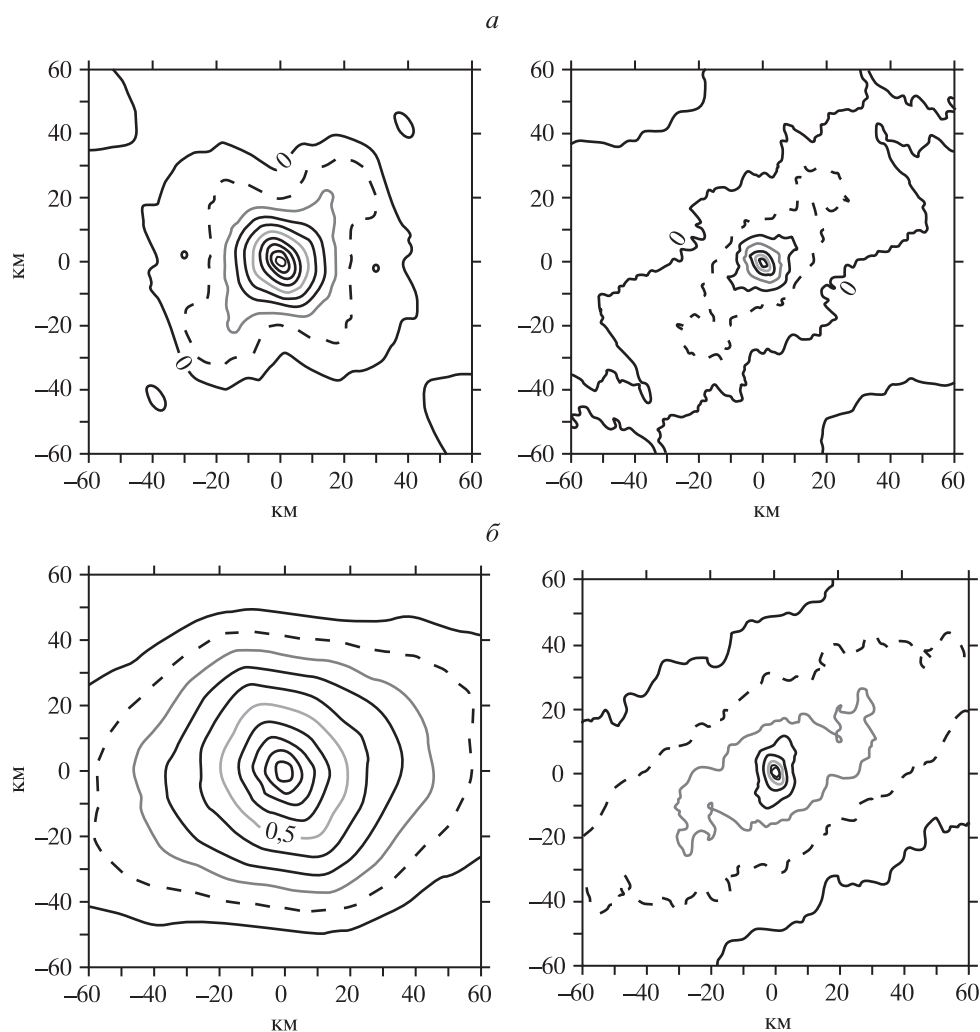


Рис. 7. Пространственные автокорреляционные функции глубин (слева) и уклонов (справа) для северной (а) и южной частей (б) Ладожского озера.

пространственных автокорреляционных функций, построенных для исследуемых полей. Автокорреляционные функции, использованные в работе, определяются уравнением

$$C(x, y) = \frac{1}{N^2 \cdot C(0,0)} \times \sum_{i=0}^{N-n-1} \sum_{j=0}^{N-m-1} x(i, j) \cdot z(i + \Delta x, j + \Delta y),$$

где $z(x, y)$ – глубина, N – число информационных точек поля $z(i, j)$, $\Delta x, \Delta y$ – шаг сетки.

Значение АКФ быстро уменьшается, если в рельефе преобладают мелкие формы, если рельеф характеризуется большими формами, значение АКФ изменяется медленно. Расстояние, на котором статистическая связь значительно уменьшается (обычно от 1 до 0.5), называют радиусом автокорреляции, который используется для оценки степени

пространственной коррелированности элементов рельефа. На рис. 7 приведены пространственные автокорреляционные функции для северной (а) и южной частей (б) Ладожского озера. В южной части озера АКФ глубин имеют радиус корреляции около 20 и 10 км для уклонов, что примерно в два раза больше, чем для северной части озера, что указывает на наличие форм рельефа в южной части, больших по сравнению с северной частью.

Организация мониторинга во многом определяется пространственными корреляционными функциями. Формирование структур с характерными масштабами в распределении глубин озера приводит к соответствующему структурированию полей гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров. Регистрация таких структур как дистанционными, так и контактными методами – крайне необходима для решения многих лимнических задач.

По представлению Пузаченко и др. [15], пространственная структура рельефа организована как “система вложенных друг в друга иерархических уровней”, связанных нелинейными автоколебаниями. Безусловно, это представление может быть крайне полезным при изучении подводного рельефа Ладожского озера. Геологические особенности находят отражения в различных формах и масштабах подводного рельефа.

Новое определение морфометрических характеристик рельефа дна Ладожского озера важно как для гидрологических, так и палеолимнологических исследований, а также трехмерного моделирования процессов в котловине озера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амантов А.М. Этапы геологического развития Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб: Изд-во РГО, 1993. С. 5–13.
2. Берлянт А.М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 239 с.
3. Давыдова Н.Н., Делюсина И.В., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А и др. Донные отложения Ладожского озера и его эволюция в позднем плейстоцене-голоцене // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. СПб: Изд-во РГО, 1993. С. 14–24.
4. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Под ред. А.Ф. Трешникова. Л.: Наука, 1990. 280 с.
5. Ладожское озеро. Атлас. ГУНИО. 2002.
6. Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / Под ред. В.А. Румянцева и В.Г. Дробковой. СПб.: Наука, 2002. 328 с.
7. Молчанов И.В. Ладожское озеро. Ленинград – Москва: Гидрометеиздат, 1945. 552 с.
8. Ласточкин А.Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория геосистем). СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 763 с.
9. Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера // ДАН. 1995. Т. 345. № 4. С. 514–517.
10. Науменко М.А. Новое определение морфометрических характеристик Онежского озера // Доклады РАН. 2000. Т. 370. № 3. С. 393–396.
11. Науменко М.А., Каретников С.Г., Гузиватый В.В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера // Доклады РАН. 2000. Т. 373. № 2. С. 247–250.
12. Науменко М.А. Сравнительный анализ морфометрических характеристик Ладожского и Онежского озер // Ладожское озеро / Под ред. Н.Н. Филатова. Петрозаводск, 2000. С. 319–324.
13. Науменко М.А., Каретников С.Г. Ладожское озеро и его водосбор: цифровая модель и новые результаты // Тр. XII съезда Русского географического общества. Т. 6. СПб., 2005. С. 82–86.
14. Петров К.М. Подводные ландшафты. Теория, методы исследований. Л.: Наука, 1989. 126 с.
15. Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алещенко Г.М. Анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.
16. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. М.-Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.
17. Сорокин А.И. Гидрографические исследования Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 288 с.
18. Субетто Д.А. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 344 с.
19. Шерстянкин П.П., Алексеев С.П., Абрамов А.М., Ставров К.Г. и др. Батиметрическая электронная карта озера Байкал // ДАН. 2006. Т. 408. № 1. С. 102–107.
20. Naumenko M., Karetnikov S., Doganovsky A., Ivanova J. Topographic characteristics of Lake Ladoga catchment basin // 4th Intern. Lake Ladoga Symposium, Velikiy Novgorod, Russia, 2–6 Sep. 2002 / Eds. H. Simola, Terzhevik A.Yu., M. Viljanen and I.J. Hopolainen. Joensuu: Joensuun Yliopisto, 2003. P. 476–480.

Analysis of Morphometric Characteristics of Bottom Relief of Lake Ladoga on the Basis of the Digital Model

M.A. Naumenko

Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences

One of the important issues in limnology is the quantitative description of bottom relief of large lakes and the identification of relationships between geomorphological properties and hydrological features of lake depression. On the basis of the advanced digital model of Lake Ladoga bottom relief the statistical characteristics of depth and slope of the lake and its limnetic zones are determined. The description of the limnetic zones relief and features of sedimentation is given. Characteristic horizontal scales are determined with use of two-dimensional spatial autocorrelation functions of depths and slopes.