

М.А. Науменко, В.В. Гузиватый, Т.В. Сапелко

ЦИФРОВЫЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МАЛЫХ ОЗЕР

М.А. Naumenko, V.V. Guzivaty, T.V. Sapelko

DIGITAL MORPHOMETRIC MODELS OF SMALL LAKES

Статья посвящена методическим аспектам создания морфометрических моделей глубин и уклонов малых озер. На основе натурных измерений современным эхолотом построены цифровые модели с пространственным разрешением 10×10 м четырех озер Нижегородской и Тверской областей. Статистические характеристики распределения глубин и уклонов этих озер впервые рассчитаны на эквидистантной сетке. Обсуждаются преимущества цифровых моделей перед традиционными морфометрическими методами.

Ключевые слова: цифровая модель глубин и уклонов подводного рельефа малых озер, морфометрические характеристики, озера Нижегородской и Тверской областей.

The article is devoted to methodological aspects of creating of morphometric models of depths and slopes of small lakes. Based on field measurements by modern sonar the digital models with spatial resolution of 10×10 m of four lakes Nizhniy Novgorod and Tver regions have created. For the first time the statistical characteristics of the depth and slopes distribution of these lakes calculated on an equidistant grid. It have been discussed the advantages of digital models over traditional morphometric methods.

Key words: digital model of small lake's depth and slope, morphometric characteristics, lakes of Nizhniy Novgorod region and Tver region.

Лимнологические исследования требуют цифрового представления различных форм рельефа водосбора озера и его дна все с большей точностью, причем далеко не всегда цифровые данные (DEM) со спутников с пространственным разрешением 30 м (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.aspa>) позволяют распознать малые озера и определить их площадь в достаточной точностью. Более того, практически невозможно, используя дистанционную информацию напрямую рассчитать объем воды в малом озере и определить основные его морфометрические характеристики рельефа. Малые озера представляют собой наиболее многочисленные формы отрицательного рельефа земной поверхности, заполненные водой. Создание цифровых моделей подводного рельефа малых озер вызывает особый интерес как с методической точки зрения, так и при изучения термического и светового режима, процессов, ответственных за перераспределение грунтообразующего материала и его накопление в различных районах. Форма котловины дает информацию о генезисе озера, во многом определяют пространственную структуру лимнических параметров [2].

Опыт создания цифровой модели малого озера обсуждался ранее в [4]. В настоящей работе представлены несколько цифровых моделей малых озер площадями от

1 до 17 га и проведено обсуждение методических рекомендаций по их созданию и преимуществ цифровых моделей по сравнению с традиционными методами.

Создание цифровых моделей подводного рельефа малых озер должно опираться на точные измерения глубины с достаточно высоким пространственным разрешением. Следует отметить то, что для малых озер подобные исследования проводятся очень редко и морфометрические модели распределения глубин и уклонов выбранных малых озер созданы впервые.

Исходные данные были получены во время специализированных экспедиций на озера летом 2011–2013 гг. (озера Светлояр и Озерское, Нижегородская область) [1] и летом 2012 г. (озера Белое и Черное на острове Хачин озера Селигер, Тверская область), когда были проведены эхолотные измерения глубин. Для измерения глубин был использован эхолот Lowrance с системой определения координат GPS (точность определения глубины до 0,1 м, координат до 5 м). Измерения на озерах проводились с надувной лодки при штилевой погоде в течение одного–двух дней.

Для создания модели подводного рельефа реального озера точки измерения должны выбираться с условием возможно более равномерного покрытия акватории и отражением характерных особенностей расположения глубин.

В табл. 1 приведена характеристика исходных данных, используемых при построении моделей малых озер.

Таблица 1

Характеристика исходных данных и параметры созданных батиметрических моделей малых озер

Озеро	Широта φ, Долгота λ	Дата	Кол-во/плот- ность точек на 100 м ²	Ср. мин. расст., м	Эквив. расст., м	Модель		
						Кол-во узлов	Кол-во точек	ΔZ, м
Светлояр	56,8 45,0	22.08.11	22230/18	0,7	24	50×37	1850	0,13
Белое	57,2 33,0	07.07.12	10650/6	0,6	41	56×56	3136	0,01
Черное	57,2 33,0	09.07.12	46/<1		148	13×14	182	-
Озерское	56,7 45,7	29.08.11 30.06.11	46/<1	0,5	30	55×30	1650	0,05

Плотность покрытия акватории исходными измерениями глубин и степень взаимозависимости между глубинами будет определять принципы интерполирования.

Очевидно, что плотность измерений (Пи) колеблется от одной точки на 100 м² до 18 т./100 м². Эквивалентное расстояние, определяемое как

$$Эр = 100/Пи^{1/2}$$

превышает среднее минимальное расстояние между измерениями в 35–70 раз. Для озера Светлояр количество измерений избыточно. Наиболее рациональные батиметрические

съемки были проведены на озерах Белом и Озерском, о чем свидетельствуют и минимальные ошибки интерполирования ΔZ .

Перед построением моделей был выполнен анализ исходной эхолокационной информации с целью устранения точек-дублей с противоречивыми значениями глубин. Береговая линия (с нулевыми глубинами) дополнялась незначительным количеством точек выше уреза воды с положительными значениями высот для того, чтобы устранить появление неопределенности в распределении глубин озера при недостаточном количестве измерений в труднодоступных (в основном за счет произрастания высшей водной растительности) определенных участках.

Радиус интерполирования, расстояние на котором необходимо учитывать измерения глубин при расчете глубины в данной точке, для озер Светлояр и Белое, был выбран на основе тестовых вычислений и сравнения площадей и объемов озер при радиусах 50, 100, 200 и 350 м. Радиусы интерполирования были использованы для озера Светлояр — 300 м, для озера Белое — 350 м. Таким образом, можно рекомендовать радиус интерполирования, сравнимый с характерным горизонтальным масштабом водоема.

После преобразования данных и определения условий построения, созданы морфометрические модели озер с помощью программы Surfer в виде карт распределения глубин и трехмерных моделей, которые далее использовались в расчетах и визуализации результатов. При создании морфометрических моделей озер в качестве метода интерполирования был выбран метод Кригинга (Kriging), наиболее употребимый в геостатистике и хорошо зарекомендовавший себя в географических исследованиях. Все модели были построены с одним и тем же горизонтальным размером грида, равным 10 м. Это вполне оправдано, исходя из используемой дискретности измерений и стратегии съемки. Качество интерполирования определяется на основе оценки отклонений исходных точечных значений от результирующей поверхности.

Верификация модели распределения глубин малого озера может быть проведена на основе новых измерений глубин, что не всегда возможно. При достаточно большом количестве проведенных измерений глубины озера один из методов проверки надежности модели может быть основан на создании модели с меньшим количеством данных. Удалив из исходной информации случайным образом небольшое количество измерений (обычно 10 %), строится новая модель. Сравнение двух морфометрических моделей позволит сделать вывод о хорошем (или нет) соответствии между ними, а значит и их надежности. Такой метод верификации был применен при построении модели глубин озера Светлояр.

Цифровые модели позволяют не только провести корректный анализ распределения глубин на эквидистантной сетке, но и оценить трудно определяемую характеристику подводного рельефа дна — уклоны для каждого узла сетки. С помощью программы Surfer впервые рассчитаны уклоны озер Светлояр, Белое, Черное и Озерское, а также построены карты уклонов этих озер. На рис. 1 приведены распределения глубин и уклонов подводного рельефа озера Белое, самого большого из исследованных озер. Безусловно, такие карты предоставляют новые возможности для изучения озер. Подробное цифровое представление глубин в равноотстоящих узлах, а главное, уклонов позволяет без труда устанавливать эмпирические связи между лимническими параметрами и морфометрическими параметрами котловин. Например, видами растительности, уклонами дна, параметрами донных отложений и глубинами дна.

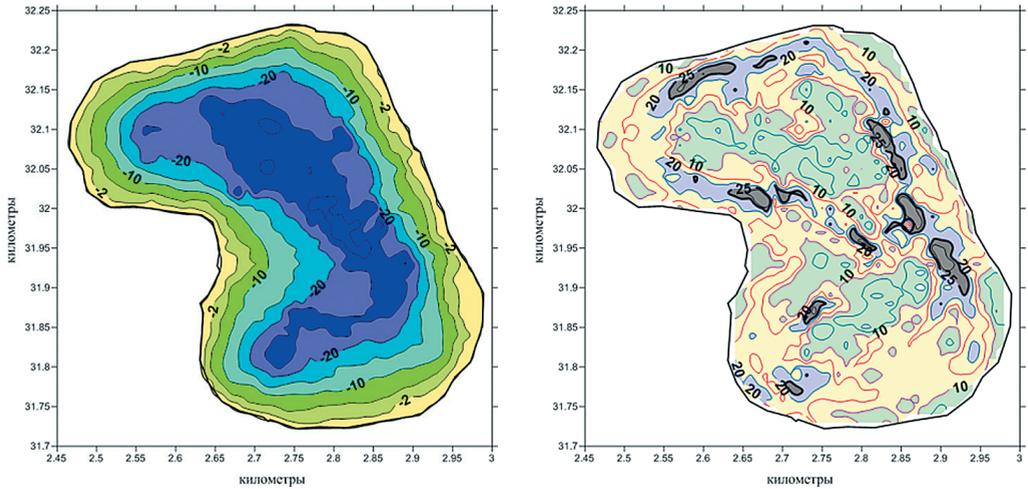


Рис. 1. Батиметрическая карта и карта уклонов озера Белого

Морфометрические модели глубин и уклонов позволили впервые корректно рассчитать основные морфометрические характеристики озерных котловин на эквидистантной сетке и их статистики.

В скобках (табл. 3) приведены средние значения глубин, полученные делением объема на площадь озера.

Таблица 2

Морфометрические параметры исследуемых озер

Морфометрические параметры	оз. Светлояр	оз. Белое	оз. Черное	оз. Озерское
Площадь зеркала, м ²	123234	169919	10136	67457
Объем, 10 ⁶ ×м ³	1,15	2,45	0,07	0,44
Направление главной оси, градусы	5° к востоку от меридиана	50° к западу от меридиана	48° к западу от меридиана	15° к западу от меридиана
Максимальная длина, м	472	591	127	492
Максимальная ширина, м	338	429	106	167
Длина береговой линии, м	1328	1718	362	1211
Изрезанность береговой линии	1,04	1,18	1,01	1,31
Коэффициент емкости	0,29	0,43	0,44	0,34
Коэффициент формы	1,4	1,38	1,2	2,95

Статистические характеристики глубин и уклонов исследуемых озер

Параметр	оз. Светлояр		оз. Белое		оз. Черное		оз. Озерецкое	
	Глубина, м	Уклон, град	Глубина, м	Уклон, град	Глубина, м	Уклон, град	Глубина, м	Уклон, град
Средняя	9,5(9,3)	9,8	14,6(14,4)	13,6	6,6(6,5)	18,0	6,6	10,1
Медиана	6,7	8,0	14,6	12,9	6,00	18,3	5,7	10,04
Максимум	32,7	32,4	33,7	44,1	15,2	28,6	18,9	24,7
Ср. квадр. откл.	8,15	5,95	9,3	6,71	4,52	4,93	5	5
Коеф. вариации	0,85	0,61	0,64	0,49	0,68	0,27	0,76	0,5
Коеф. асимметрии	0,78	1,17	0,00	0,59	0,27	-0,58	-0,64	0,3
Коеф. эксцесса	0,61	0,87	-1,33	0,56	-1,15	0,42	-0,63	-0,45

Для всех озер были построены батиграфическая (гипсометрическая) и объемная кривые через каждые 0,5 м глубины. Форма котловины чаще всего характеризуется относительной гипсометрической кривой по методу, разработанному Л. Хакансоном [6]. На основе этой кривой строится концепция для сравнения форм котловин. Кривая получается в результате нормирования абсолютных величин по оси абсцисс на площадь озера, а по оси ординат на максимальную глубину. Хакансон предложил принять за среднюю форму котловины озера $f(x)$, форму, описываемую относительной гипсометрической кривой, которая с 50 % вероятностью относит форму к выпуклому или вогнутому классу.

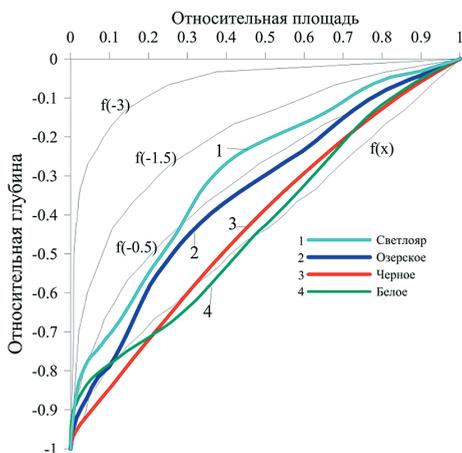


Рис. 2. Относительные гипсометрические кривые исследуемых озер

Статистические отклонения формы, соответствующие +0,5, +1,0, +1,5, +2,0 и +3,0 стандартного отклонения, обозначаются как $f(+0,5)$, $f(+1,0)$ и т.д. Если относительная гипсометрическая кривая лежит между типовыми кривыми $f(-3,0)$ и $f(-1,5)$, то форма котловины относится к очень выпуклому типу, вероятность этой формы составляет 6,5 %. К выпуклому типу относятся котловины, имеющие относительную

гипсометрическую кривую, лежащую между $f(-1,5)$ и $f(-0,5)$. Эта форма встречается с вероятностью 24,2 %. Средняя форма котловины озера имеет слабо выпуклый профиль дна, ее кривая лежит между $f(-0,5)$ и $f(+0,5)$. Эта форма котловины наиболее часто встречается, ее вероятность составляет 38,2 %.

Если относительная гипсометрическая кривая не имеет точек перегиба, Л. Хакансон определяет форму котловины как макротип. Если относительная кривая имеет одну точку перегиба относительно плавной кривой, то форма котловины относится к мезотипу; если точек перегиба несколько — микротипу. На рис. 2 приведены относительные гипсометрические кривые для четырех исследуемых озер. Относительные кривые озера Белое и Черное почти совпадают с кривой $f(x)$ и, следовательно, относятся к слабо выпуклому профилю днамикротипа. Форма котловины озер Светлояр и Озерское относятся к выпуклому типу (микротип), хотя кривая озера Светлояр указывает на более выпуклую форму дна.

Одним из преимуществ использования цифровых моделей с эквидистантной сеткой является возможность построения гистограммы глубин и уклонов, что также детально характеризует форму котловины озера.

С очевидностью выявляется, что два озера — Светлояр и Белое с близким площадями резко отличаются по распределению глубин и уклонов дна (рис. 3). Озеро Белое по объему в 2 раза больше озера Светлояр.

В двадцатом веке морфометрией малых озер в разное время занимались Г.Ю. Верещагин, А.А. Григорьев, С.Д. Муравейский, А.И. Сорокин и др., все исследования в то время проводились на основе топографических карт и традиционных методов измерений глубин. Ярким примером такого подхода является исследование озер острова Хачин, в том числе озера Белое [3].

Исследователями озер предпринимались попытки представить озерную котловину в виде трехмерной геометрической фигуры для расчета ее характеристик аналитически.

Такой подход позволил объединить многие черты водоемов в один тип, но при неизбежной грубой схематизации в значительной мере терялись важные индивидуальные черты водных объектов.

Для подавляющего большинства озер мира их площадь и объем были вычислены планиметрическими методами с использованием крупномасштабных карт. Но это не позволяло определить особенности рельефа. Для малых озер такие вычисления были особенно трудны, так как масштабы топографических карт не позволяют корректно производить эти вычисления. Поэтому создание цифровых моделей котловины малых озер — новое перспективное направление в лимнологии, именно цифровая модель подводного рельефа позволяет провести тщательное изучение рельефа озера.

Первые результаты позволили количественно определить как параметры распределение глубин, так и уклонов малых озер, что несомненно полезно для изучения озерных процессов, зарастания водоемов, организации наблюдений, лимнологической типизации и прогнозирования большинства процессов в озерах. Следует рекомендовать при планировании измерения глубин малого озера, чтобы эквивалентное расстояние составляло 30–40 м.

Значения уклонов изученных озер очень большие по сравнению с уклонами дна, например, Ладожского озера [5]. На склонах с углами более 5° возможны движения по склону, сползание придонных взвешенных веществ [6].

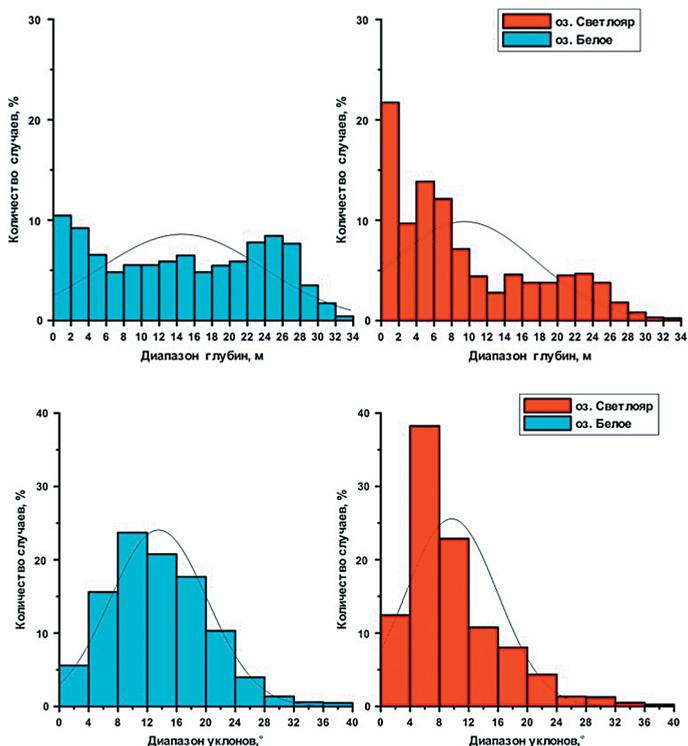


Рис. 3. Гистограммы глубин и уклонов оз. Светлояр и оз.Белое

Цифровые трехмерные моделиозерных котловин важны для изучения генезиса озер и сравнения форм котловин озер, в том числе при выявлении астроблем.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить магистров А.В. Зелионко и З.В. Стрекалову за проведение необходимых вычислений морфометрических характеристик озер.

Литература

1. Баянов Н.Г., Кривдина Т.В. Типология и свойства озер Нижегородского Заволжья. // Изв. РАН. Серия геогр., 2011, № 5, с. 85–96.
2. Догановский А.М. Гидрология суши. — СПб., 2012. — 524 с.
3. Закуленков Л.Д., Назаров А.А. Озера острова Хачин. // Ученые записки Калининского пед. института, 1967, № 44, с. 85–98.
4. Науменко М.А., Зелионко А.В., Стрекалова З.В. Опыт создания цифровой морфометрической модели ма-лого озера на основе высокоточного эхолотирования. // Ученые записки РГГМУ, 2012, № 25, с. 35–40.
5. Науменко М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели. // Изв. РАН. Серия геогр., 2011, № 5, с. 85–96.
6. Håkanson L. A Manual of LakeMorphometry. — Springer-Verlag, 1981. — 80 p.