

М.А. Науменко, А.В. Зелионко, З.В. Стрекалова

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОРФОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАЛОГО ОЗЕРА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ЭХОЛОТИРОВАНИЯ

М.А. Naumenko, A.V. Zelionko, Z.V. Strekalova

EXPERIENCE OF CREATION OF THE DIGITAL MORPHOMETRIC MODEL OF SMALL LAKE ON THE BASIS OF PRECISE ECHO-SOUNDING

Статья посвящена разработке методов и проведению вычислений характеристик подводного рельефа малого озера Нижегородской области – оз. Светлояр. Все вычисления сделаны на основе натуральных измерений современным эхолотом в озере. Впервые создана морфометрическая модель глубин и уклонов малого озера Светлояр с пространственным разрешением 10×10 м. Обсуждаются как результаты вычислений, так и методические аспекты вычислений.

Ключевые слова: цифровая модель подводного рельефа, морфометрические характеристики, оз. Светлояр.

The article is devoted to development of method of calculation of morphometric characteristics of small lake bottom relief. The small Lake Svetloyar is situated in the Nezhgorodskii Region of Russia. Based on the precise measurements of the depth the digital morphometric model is created for the first time with spatial resolution 10×10 m. Results are discussed in respect to the lake depth and slope distributions as well as to the method of calculation.

Keywords: digital model of bottom relief, morphometric characteristics, Lake Svetloyar.

Современное состояние цифрового моделирования разнообразных ландшафтов и территорий требует цифрового представления различных форм рельефа все с большей точностью [4]. Малые озера представляют собой наиболее многочисленные формы отрицательного рельефа земной поверхности, заполненные водой. Озерная котловина – это всегда депрессия по сравнению с окружающими формами рельефа. Морфометрические характеристики, форма котловины дают информацию о генезисе озера, подводном рельефе и определяют пространственную структуру гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров [1,3,4,6].

Создание цифровой модели подводного рельефа малого озера должно опираться на точные измерения глубины с достаточно высоким пространственным разрешением.

Малое озеро Светлояр, расположенное в Нижегородской области на Семеновском плато, было выбрано в качестве эталонного водного объекта для отработки методики определения морфометрических параметров. Для измерения глубин был использован эхолот Lowrance (точность определения глубины 0,1 м) с системой определения координат GPS. Измерения проводились с надувной лодки при штилевой погоде в течение 2-х дней. Общее количество измеренных глубин составило 22 230, береговая линия (урез воды) представлена 60 точками.

Географические координаты (долгота, широта) точек измерений были преобразованы в метрическую систему относительно реперной точки с координатами 45° восточной долготы и 56° северной широты по формулам Ф.Н. Красовского:

$$X = (a - 45) \cdot 111,321 \cdot \cos\left(b \cdot \frac{3,1415965}{180}\right) - 0,094 \cdot \cos\left(3 \cdot b \cdot \frac{3,1415965}{180}\right),$$
$$Y = (b - 56) \cdot 111,143 - 0,562 \cdot \cos\left(2 \cdot b \cdot \frac{3,1415965}{180}\right),$$

где X – километры от 45° восточной долготы; Y – километры от 56° северной широты; a – доли градуса от 45° восточной долготы; b – доли градуса от 56° северной широты.

Это позволило проводить корректное интерполирование глубин в равноотстоящие узлы и вычислять площади и объемы озерной котловины.

Анализ пространственного распределения точек измерений показал, что существует 1 038 точек с одинаковыми координатами, а среднее минимальное расстояние между измерениями без учета дублей составляет 0,7 м.

Изначальная карта распределения глубин оз. Светлояр была построена с помощью программы Surfer (рис.1). Для этой и всех последующих построенных карт в качестве метода интерполирования был выбран метод Кригинга (Kriging), так как он часто используется в географических и топографических работах. Все карты построены с одинаковым количеством узлов 50×37 с пространственным шагом 10 м.

В связи с тем что большое количество точек измерений (около 5 %) имели одинаковые координаты, но при этом разные значения глубин, были проведены тестовые расчеты площади и объема озера с различными условиями, а именно:

- а) с глубиной по первой точке,
- б) со средним значением глубин,
- в) с максимальным значением глубины,
- г) с минимальным значением глубины,
- д) с медианным значением глубины.

Сравнение полученных результатов показало, что имеются только незначительные различия между величинами площади (в шестом знаке после запятой) и объема (в седьмом знаке после запятой) при изменении условий принятия глубины. Таким образом, было принято, что в случае одинаковых координат будет использоваться глубина, средняя из всех измеренных.

Радиус интерполирования – расстояние, на котором необходимо учитывать измерения глубин при расчете глубины в данной точке, – был выбран на основе сравнения площадей и объемов озера при радиусах 50, 100, 200 и 300 м. В расчетах использовался радиус интерполирования, равный 300 м, предложенный программой Surfer.

Всякая модель нуждается в верификации. Соответствие между измеренными величинами глубины и рассчитанными по морфометрической модели было определено на основе расчета их средней разности ΔZ и ошибки среднего δZ . Соответственно они равны $0,13 \pm 0,01$ м, что сравнимо с инструментальной ошибкой измерения. Для проверки надежности морфометрической модели из данных измерений глубины

были удалены случайным образом 10 % от общего количества, а именно 2 190 точек измерений, и проведено новое построение модели по оставшимся данным. Сравнение новых модельных результатов с удаленными 10 % данных дало те же самые величины $0,13 \pm 0,01$ м, что свидетельствует о надежности морфометрической модели.

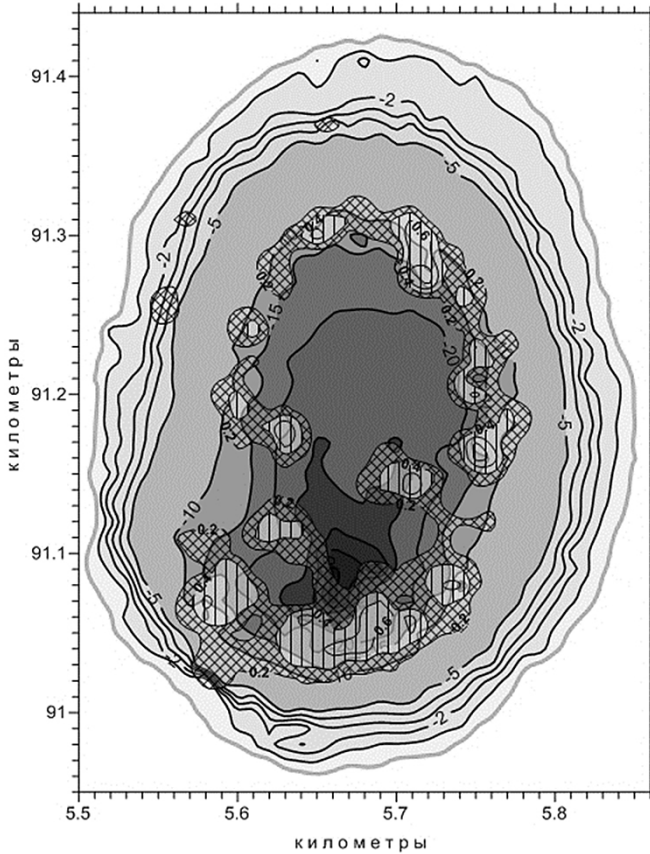


Рис. 1. Распределение глубин и ошибок измерения (более 0,2 м) оз. Светлояр.

На основе верифицированной модели распределения глубин была впервые построена карта уклонов оз. Светлояр (рис. 2). Морфометрические модели глубин и уклонов позволили впервые корректно рассчитать основные морфометрические характеристики озерной котловины (табл. 1) и построить гистограммы глубин и уклонов для эквидистантной сетки. Построены батиграфическая и объемная кривые по значениям, снятым через каждые 0,5 м по глубине, что крайне сложно сделать по топографической карте (рис. 3).

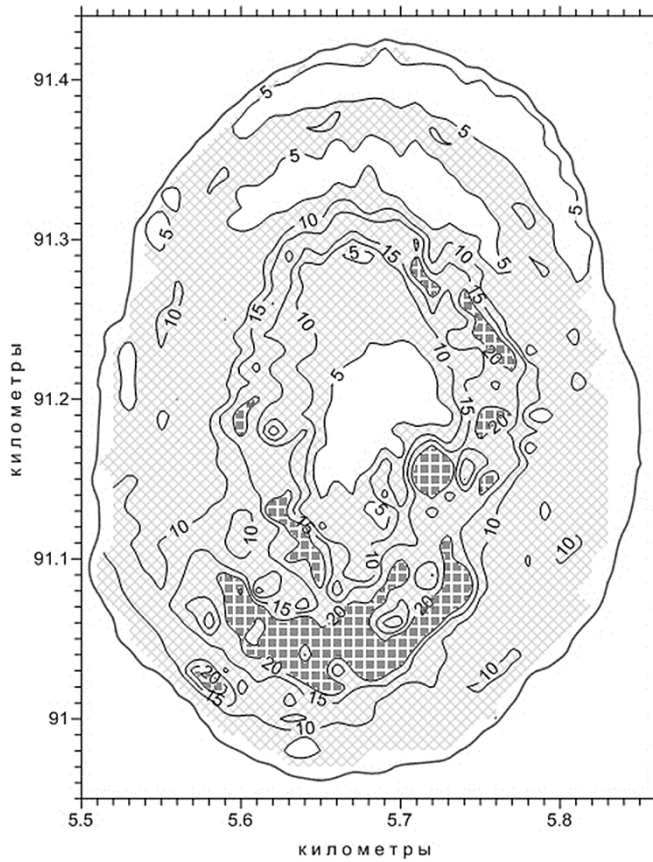


Рис. 2. Распределение уклонов дна оз. Светлояр.

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики озерной котловины

Морфометрический параметр	Значение
Площадь зеркала, м ²	123 234
Объем, 10 ⁶ *м ³	1,1514
Направление главной оси, град.	5° к востоку от N-S
Максимальная длина, м	472
Максимальная ширина, м	338
Длина береговой линии, м	1 328
Изрезанность относительно длины эллипса	1,04
Коэффициент емкости	0,29
Коэффициент формы	1,4

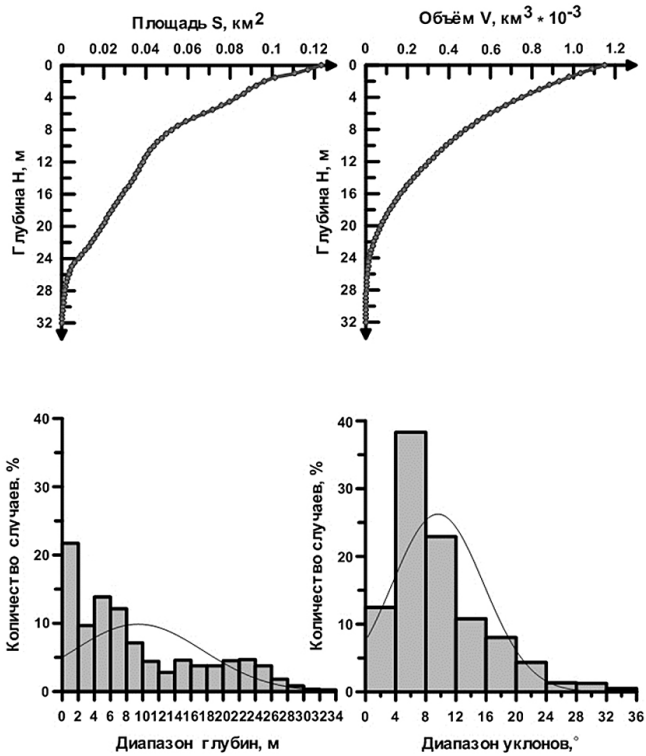


Рис. 3. Батиграфическая и объемная кривые, гистограммы глубин и уклонов дна оз. Светлояр.

Площадь озера лишь на 1,7 % меньше площади эллипса с наибольшими длиной и шириной озера, длина береговой линии на 4 % больше длины этого эллипса.

Гистограммы глубин и уклонов указывают на резкое отличие их функций распределения от нормального распределения. Глубины распределяются в виде трех ступеней в диапазоне: 0-2 , 4-8 и 20-26 м. В табл. 2 приведены основные статистики распределения глубин и уклонов, рассчитанные по морфометрической модели [значения средней глубины получены путем осреднения равномерных значений глубины и (в скобках) путем деления объема озера на площадь].

В любом озере при измерении глубин наблюдаются ошибки, они связаны как с методикой измерений, так и с подводным рельефом. Для оценивания возможных ошибок и их пространственного расположения поверхность озера была разделена на 1 121 квадрат со стороной 10 м. Для каждого квадрата, в котором имелось больше одного измерения, были рассчитаны основные статистики, в том числе стандартная ошибка среднего по формуле:

$$\delta Z = \frac{s}{\sqrt{n}},$$

где s – среднее квадратическое отклонение; n – количество членов выборки.

Основные статистики распределения глубин и уклонов

Параметр	Глубина, м	Уклон, град.
Средняя величина	9,5 (9,3)	9,8
Медиана	6,7	8,0
Максимальная величина	32,7	32,4
Среднее квадратическое отклонение	8,15	5,95
Коэффициент вариации	0,85	0,61
Коэффициент асимметрии	0,78	1,17
Коэффициент эксцесса	0,61	0,87

Пространственное распределение ошибок было совмещено с распределением глубин озера (см. рис.1). Для его построения были использованы средние координаты квадратов. После сравнения карт очевидно, что наибольшие ошибки (от 0,6 м до максимальной 1,67 м) наблюдаются на свалах глубин и больших уклонах, а на плоском дне ошибки намного меньше (от 0 до 0,1 м), сравнимы с точностью измерений.

Озеро Светлояр практически с идеальной эллипсообразной поверхностью относится, вероятно, к провальным (карстовым) озерам, форма котловины которого близка к конусообразной [2]. Средний уклон дна озера составляет около 10°, модальный – 6° при максимальном 32,4°. Значения уклонов очень большие по сравнению с уклонами дна, например, Ладожского озера.

Таким образом, использование высокоточного эхолотирования малого озера позволило разработать методику построения, верификации и применения морфометрической модели для исследования распределения глубин и уклонов оз. Светлояр.

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Морфометрические характеристики речных русел и пойм. / Ученые записки РГГМУ, 2010, № 13, с. 13-17.
2. *Баянов Н.Г., Кривдина Т.В.* Типология свойства озер Нижегородского Заволжья. // Изв. РАН. Сер. геогр., 2011, №5, с.85-96.
3. *Науменко М.А.* Новое определение морфометрических характеристик Ладожского озера // Докл. РАН, 1995, т. 345, №4, с.514-517.
4. *Науменко М.А.* Новое определение морфометрических характеристик Онежского озера // Докл. РАН, 2000, т. 370, № 3, с. 393-396.
5. *Пузаченко Ю.Г., Онуфрениа И.А., Алещенко Г.М.* Анализ иерархический организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр., 2002, №4, с. 29-38.
6. *Симонов Ю.Г.* Морфометрический анализ рельефа. – М.-Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. – 272 с.