

# ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905

## SPLINE INTERPOLATION FOR BUILDING THREE-DIMENSIONAL BATHYMETRIC MODELS AT CHARTING INLAND WATERWAYS

**Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев, М. А. Квасной**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*A modified method for compiling electronic navigational charts of the Russian Federation inland waterways is proposed in the paper. This method allows to significantly speed up the process by means of automated construction of digital terrain models of the bottom relief. The aim of the method is to reduce costs associated with creating and maintaining an up-to-date collection of electronic navigational charts at cartography departments and offices of the inland waterways Administrations. A continuous survey grid is required to build a digital terrain model of the bottom relief. Such a grid can be obtained using a multibeam echo sounder. However, inland waterway hydrographic operations are mainly conducted with single beam echo sounders. Depth values obtained from surveying with a single beam echo sounder always form an irregular grid. The frequency of depths measured in this way does not allow building three-dimensional models. Therefore, it is necessary to mathematically complete the relief of the waterway bottom. The densification of the depth grid can be done using mathematical interpolation. The methods of interpolation implemented in cartographic and geoinformation software, as well as methods used by cartographers when working manually are analyzed. The analysis has showed that an irregular grid is always used when working manually. As for the software, only interpolation methods based on calculations performed with a regular grid are used, since these methods are easier to implement and require less computing power. The downside is that these methods lead to significant errors. To build three-dimensional bathymetric models with the smallest deviation from the true values, the method of biquadratic spline interpolation on an irregular grid is proposed. Digital terrain models of the bottom relief are proposed to be used for inland waterway cartography to automatically place isobaths, simplify the placement of fairways, and provide additional visual control of the quality of survey work.*

*Keywords: electronic navigational chart, inland waterways, accuracy of depths values, digital terrain model, interpolation, spline interpolation, irregular grid, unmanned navigation.*

### For citation:

Ratner, Elizaveta A., Aleksei I. Zaitsev, and Maksim A. Kvasnoy. "Spline interpolation for building three-dimensional bathymetric models at charting inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 894–905. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.

**УДК 528.06**

## СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

**Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев, М. А. Квасной**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье предлагается модифицированный метод создания электронных навигационных карт на внутренних водных путях Российской Федерации, позволяющий существенно ускорить процесс при помощи автоматизированного построения цифровых моделей рельефа дна. Целью предложенного метода является уменьшение затрат при создании и поддержании актуальной коллекции карт в картографических отделах и службах Администраций бассейнов внутренних водных путей. Отмечается, что для по-*

строения цифровой модели рельефа дна необходима сплошная сеть промера. Подобную сеть можно получить при выполнении работ многолучевым эхолотом. Гидрографические работы на внутренних водных путях преимущественно выполняются однолучевыми эхолотами. Значения глубин, полученных при выполнении промерных работ при помощи оборудования такого типа, всегда образуют нерегулярную сеть. Обращается внимание на то, что частота глубин, измеренных таким образом, не позволяет строить трехмерные модели, поэтому возникает необходимость математически достраивать рельеф поверхности дна водного пути. Сгущение сети глубин можно выполнить с помощью математической интерполяции. В статье проанализированы методы интерполяции, реализованные в картографических и геоинформационных программах, а также методы, применяемые специалистами-картографами при работе вручную. Анализ показал, что при работе вручную всегда используется нерегулярная сеть. В работе программного обеспечения применяются только методы интерполяции, основанные на расчетах по регулярной сети, поскольку их использование легче реализуемо и требует меньших вычислительных мощностей, но приводит к значительным погрешностям. Для построения трехмерных батиметрических моделей с наименьшими отклонениями от истинных значений авторами настоящего исследования предложен метод биквадратной сплайн-интерполяции на нерегулярной сети. В частности, предлагается цифровые модели рельефа дна использовать при картографировании ВВП для автоматизированного нанесения изобат, упрощения нанесения судового хода и дополнительного визуального контроля качества промерных работ.

**Ключевые слова:** электронная навигационная карта, внутренние водные пути, точность измерения глубин, цифровая модель рельефа дна, интерполяция, сплайн-интерполяция, нерегулярная сеть, безэкипажное судоходство.

**Для цитирования:**

Ратнер Е. А. Сплайн-интерполяция для построения трехмерных батиметрических моделей при картографировании внутренних водных путей / Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев, М. А. Квасной // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 894–905. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.

## **Введение (Introduction)**

Анализ современной гидрографической и картографической деятельности на внутренних водных путях (ВВП) Российской Федерации показывает, что гидрографические работы, которые на сегодняшний день частично автоматизированы, в полном объеме выполняются во всех администрациях бассейнов внутренних водных путей РФ (АБ ВВП). Однако полный цикл картографических работ, включающий создание электронных навигационных карт (ЭНК) в формате S-57, выполняют всего лишь четыре картографических отдела АБ ВВП из четырнадцати и картографическая служба Федерального государственного бюджетного учреждения «Канал имени Москвы».

Для развития картографических отделов и служб в АБ ВВП необходимо облегчить работу специалистов-картографов (например, частично автоматизировать производственный цикл создания ЭНК). Это позволит повысить надежность создаваемых картографических продуктов и даст возможность поддерживать уже созданную коллекцию электронных навигационных карт на уровне современности с наименьшими экономическими затратами. Для решения этих задач следует внедрить в процессы разработки и создания карт компьютерные технологии, а именно: экспертные системы, нейронные сети, системы распознавания образов, а также другие разделы искусственного интеллекта [1] и современные методы цифрового моделирования рельефа. Применение таких методов позволяет автоматизировать трудоемкие процессы создания различных типов карт, а также внести объективность в установлении положения характерных точек и линий рельефа [2].

Цифровые модели рельефа дна (ЦМР), построенные в автоматизированном режиме, позволяют облегчить выполнение картографических работ, в том числе нанесение судового хода при картографировании участков ВВП, не зарегулированных СНО, корректировку автоматически построенных изобат, а также контроль качества выполненных промерных работ. Кроме того, ЦМР можно применять как самостоятельный продукт для решения различных задач, начиная от простого анализа данных и заканчивая сложным комплексным моделированием [3]. К тому же батиметрические модели можно использовать в целях навигации, а также составлять на их основе трехмерные навигационные карты [4]. Актуальность применения ЦМР объясняется прежде всего тем, что такие модели предоставляют более наглядные и легко интерпретируемые данные,

они помогают наиболее полно передавать информацию об изменениях объектов и исследуемой среды с течением времени, а также позволяют реализовать ряд прикладных задач, для решения которых двухмерных данных недостаточно [5].

Трехмерное моделирование рельефа — это стандартная процедура, которая реализована во многих коммерческих и открытых геоинформационных системах (ArcGIS, GRASS и Surfer) и в универсальных математических пакетах (Matlab и Maple). Для построения трехмерных моделей (например, в программной среде ArcGIS, версия 10.3.1) предлагается проводить интерполяцию десяти различными способами [6]. В геоинформационных системах также реализованы еще более сложные подходы, в частности, перспективное панорамное трехмерное моделирование и плановое наклонное картографирование рельефа [7]. В современном программном обеспечении (ПО) для создания морских и речных карт (в частности, в ENC Designer) также реализована функция построения ЦМР, однако цифровые модели рельефа дна используются как самостоятельный продукт, а не в целях дальнейшего картографирования. Кроме того, необходимо учитывать, что процесс моделирования, как правило, проводится на основе ограниченного набора измерений, полученных по нерегулярной сети наблюдений [8], трансформируемой в регулярную. В результате точность построенной модели снижается.

Полученных данных при выполнении промерных работ с помощью однолучевого эхолота [9] для построения ЦМР недостаточно, так как предельно допустимое междугалсовое расстояние на водохранилищах, согласно данным, приведенным в таблице<sup>1</sup>, может составлять до 500 м. Схема расположения галсов при выполнении работ показана на рис. 1. В такой ситуации необходимо с помощью математических методов дотраивать рельеф поверхности дна водного пути. При выполнении промерных работ с помощью многолучевого эхолота необходимость в сгущении сети отсутствует [10].

#### Рекомендованное и предельно допустимое междугалсовое расстояние при выполнении промерных работ на ВВП

| Ширина участка, м | Масштаб съемки | Междугалсовое расстояние, м | Предельно допустимое междугалсовое расстояние, м |
|-------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|
| На перекатах      |                |                             |                                                  |
| До 100            | 1:2 000        | 10                          | 20                                               |
| 100–300           | 1:5 000        | 25                          | 50                                               |
|                   | 1:10 000       | 50                          | 100                                              |
|                   | 1:25 000       | 100                         | 125                                              |
| На плесах         |                |                             |                                                  |
| до 100            | 1:2 000        | 20                          | 40                                               |
| 100–300           | 1:5 000        | 50                          | 100                                              |
| Более 300         | 1:10 000       | 100                         | 200                                              |
|                   | 1:25 000       | 200                         | 250                                              |
|                   | 1:50 000       | 400                         | 500                                              |

На рис. 1 видно, что глубины, полученные с помощью однолучевого эхолота (промер выполнен на р. Уфа), всегда образуют нерегулярную сеть.

Оптимальным методом для сгущения сети промера служит математическая интерполяция. Решения, предлагаемые в данной статье, найдены на основе ранее выполненных исследований точности моделей рельефа, построенных интерполяционными методами. Анализ точности цифровых моделей рельефа дна, построенных различными методами интерполяции, описан в работах европейских, австралийских и американских ученых [6], [9], [10], [11]–[15] и др. Однако ра-

<sup>1</sup> Отчет о выполнении работы по государственному контракту от 29 мая 2017 года № 107171030003-Р по теме: «Проведение комплекса работ по созданию и обновлению баз данных навигационной информации для картографического обеспечения внутренних водных путей с использованием сигналов навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, перспективных глобальных навигационных спутниковых систем и их функциональных дополнений». Шифр: «Карта – Река». СПб: АО «Кронштадт», 2017. 90 с.

нее не рассматривался вопрос использования моделей рельефа дна при картографировании ВВП, а также построения трехмерных моделей на основе данных, полученных при выполнении промерных работ на ВВП с учетом их специфики.

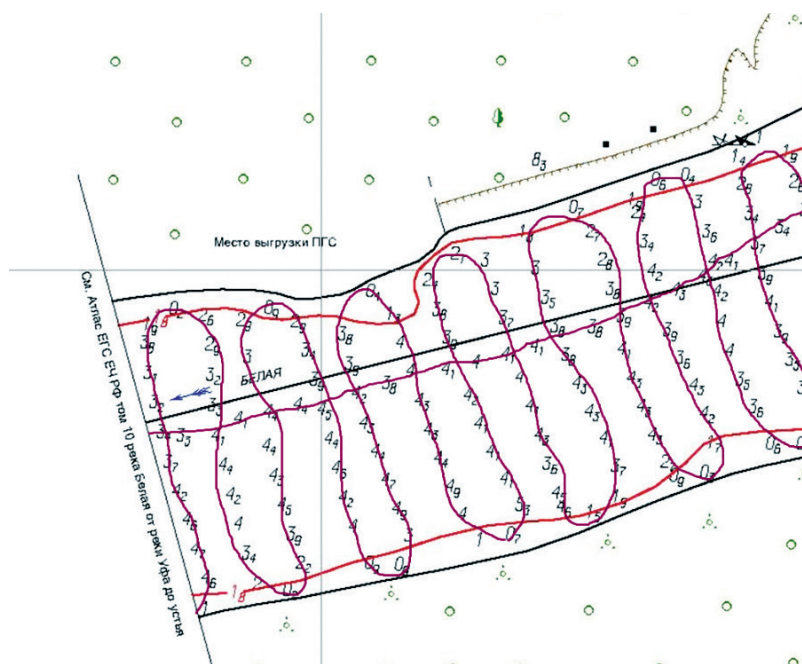


Рис. 1. Схема расположения галсов при выполнении гидрографических работ однолучевым эхолотом (масштаб 1:5 000)

Целью данного исследования является разработка метода частичной автоматизации картографического производства в АБ ВВП. В соответствии с целью исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ применяемых при картографировании ВВП сетей сгущения и методов интерполяции;
- подбор оптимального метода интерполяции;
- выполнение сгущения сети выбранным методом интерполяции;
- построение трехмерной цифровой модели;
- автоматизированное построение безопасной изобаты и нанесение судового хода.

Анализ методов нахождения промежуточных значений величин по имеющемуся дискретному набору глубин, используемых специалистами-картографами при ручной работе и в картографическом ПО, показал, что в работе в основном используются следующие классические методы.

1. *Интерполяция методом ближайшего соседа.* При использовании этого метода значение искомой глубины принимается равным значению ближайшей промеренной глубины [12]. При картографировании вручную данный метод не используется, а в некоторых программных продуктах глубина искомой точки принимается равной глубине, заданной в пикселе, в котором она размещена, что и является, по сути, интерполяцией методом ближайшего соседа на регулярной сети.

Формула для определения расстояния между двумя точками в двумерном пространстве (необходима для нахождения ближайшей точки):

$$\|ab\| = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}. \quad (1)$$

2. *Линейная и трилинейная интерполяция* — наиболее распространенные методы интерполяции, при использовании которых значение искомой точки принимается равным среднему значению двух ближайших точек на плоскости для линейной интерполяции и среднему значению двух

ближайших точек в трехмерном евклидовом пространстве — для трилинейной. Построение изобат в ряде картографических программ реализовано с помощью метода линейной интерполяции на регулярной сети, а построение изолиний вручную часто основывается на принципе методов как линейной, так и трилинейной интерполяций (соответственно без приведения сети к регулярному виду).

*Линейная интерполяция* — это интерполяция алгебраическим двучленом  $f(x) = ax + b$ , заданной в двух точках  $x_0$  и  $x_1$  отрезка  $[a, b]$ . Уравнение прямой с двумя заданными точками имеет вид:

$$\frac{y - f(x_0)}{f(x_1) - f(x_0)} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (2)$$

Соответственно для  $x \in [x_0, x_1]$

$$f(x) \approx y = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0). \quad (3)$$

*Трилинейная интерполяция* — метод многомерной интерполяции в трехмерном пространстве:

$$f(x, y, z) \approx \frac{f(x_0, y_0, z_0)}{\Delta} k_1 + \frac{f(x_1, y_0, z_0)}{\Delta} k_2 + \frac{f(x_1, y_0, z_1)}{\Delta} k_3 + \frac{f(x_1, y_1, z_0)}{\Delta} k_4 + \frac{f(x_1, y_1, z_1)}{\Delta} k_5,$$

где

$$\Delta = (x_1 - x_0)(y_1 - y_0)(z_1 - z_0);$$

$$k_1 = (x_1 - x)(y_1 - y)(z_1 - z);$$

$$k_2 = (x - x_0)(y_1 - y)(z_1 - z);$$

$$k_3 = (x - x_0)(y_1 - y)(z - z_0);$$

$$k_4 = (x - x_0)(y - y_0)(z_1 - z);$$

$$k_5 = (x - x_0)(y - y_0)(z - z_0).$$

3. *Треугольная интерполяция* — метод многомерной интерполяции в трехмерном евклидовом пространстве. Данная интерполяция является расширением трилинейной интерполяции, при которой значения функции  $f(x, y) = z$  интерполируются в искомой точке  $(x, y, z)$  в соответствии с известными значениями в окружающих трех точках. Обобщение основано на том, что искомая точка лежит не на линии, а внутри или на границе сформированного тремя известными точками треугольника. Треугольная интерполяция является расширением линейной интерполяции, действующей в пространстве. Построение изобат вручную иногда основывается на принципе метода треугольной интерполяции.

Искомая точка находится на пересечении медиан взятого за основу треугольника, т. е. в точке центра его масс ( $M$ ) и рассчитывается по формулам:

$$M_x = \frac{a_x + b_x + c_x}{3}; \quad (5)$$

$$M_y = \frac{a_y + b_y + c_y}{3}; \quad (6)$$

$$M_z = \frac{a_z + b_z + c_z}{3}. \quad (7)$$

4. *Билинейная интерполяция* — это обобщение линейной интерполяции функций одной переменной для функции двух переменных, основанное на том, что искомая точка лежит не на линии, а внутри или на границе сформированного четырьмя известными точками прямоугольника, и обычная линейная интерполяция применяется последовательно в направлении четырех значений в углах четырехугольника, экстраполируя функцию на всю остальную поверхность. Принципы билинейной интерполяции часто используются при картографировании изолиний вручную.

Функция билинейной интерполяции имеет вид:

$$F(x, y) = a + bx + cy + dxy. \quad (8)$$

Интерполируемое значение функции  $f(x, y)$  вычисляется по следующей формуле:

$$f(x, y) = \frac{f(x_1, y_1)}{\Delta} k_1 + \frac{f(x_1, y_2)}{\Delta} k_2 + \frac{f(x_2, y_1)}{\Delta} k_3 + \frac{f(x_2, y_2)}{\Delta} k_4, \quad (9)$$

где

$$\Delta = (x_1 - x_0)(y_1 - y_0);$$

$$k_1 = (x_1 - x)(y_1 - y);$$

$$k_2 = (x - x_0)(y_1 - y);$$

$$k_3 = (x_1 - x)(y - y_0);$$

$$k_4 = (x - x_0)(y - y_0).$$

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотренные ранее виды интерполяции, используемые в картографии, показывают, что при работе вручную специалисты-картографы всегда применяют для построения нерегулярную сеть, в то время как в работе современного картографического ПО реализованы только методы интерполяции, основанные на расчетах по регулярной сети. Это связано с тем, что использование регулярных сетей упрощает алгоритмы и сокращает расчеты, а, следовательно, оно легче реализуемо и требует меньших вычислительных мощностей ЭВМ. Нерегулярная сеть требует, как правило, больших вычислительных мощностей и более сложных алгоритмов, позволяя при этом сохранить точность. Обработка поверхности триангуляционной нерегулярной сети, из-за сложности ее структуры, несколько менее эффективна, чем обработка растровых данных, однако использование для расчетов регулярных сетей приводит к погрешностям, размер которых зависит от степени упрощения. Поэтому триангуляционные нерегулярные сети используются для моделирования небольших областей с очень высокой точностью, например, в инженерных приложениях [16]. Несмотря на сложность реализации, авторы данной статьи предлагают использовать в ПО для картографирования ВВП именно нерегулярную сеть.

Анализ применения различных методов интерполяции при построении батиметрических ЦМР выполнен в работах [6], [9]; [10], [15], [17], [18]. Поскольку результаты оценки точности моделирования показали, что интерполяция методом сплайнов (кусочно-полиномиальных функций) позволяет создавать ЦМР с наименьшими ошибками для различных условий рельефа, авторы указанных ранее работ предлагают использовать для расчетов *метод биквадратной сплайн-интерполяции*. Интерполяция сплайнами гарантирует сходимость и устойчивость вычислительного процесса, т. е. максимальную степень приближения найденных значений к истинным и минимальное отклонение от исходной функции на заданном промежутке, поскольку сплайн-функция интерполирует значения  $(x_i, y_i)$  набором функций, каждая из которых определена на интервале  $[x_{i-1}; x_i]$ . Биквадратная сплайн-интерполяция — это метод многомерной интерполяции в трехмерном евклидовом пространстве, при которой следующие значения функций:

$$f(x_1, y_1) = z_1, f(x_2, y_2) = z_2, f(x_3, y_3) = z_3, f(x_4, y_4) = z_4, \quad (10)$$

интерполируются в четырех искомым точках:  $(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3, x_4, y_4, z_4)$  в соответствии с известными значениями в окружающих девяти точках. Обобщение основано на том, что искомые точки лежат не на линии, а внутри четырех четырехугольников, граничащих друг с другом двумя ребрами и сформированных девятью известными точками. При условии, что четырехугольники не образуют явно невыпуклую триангуляцию (наружный угол, образованный в месте примыкания четырехугольников, должен быть больше  $12,5^\circ$ ), по трем точкам, лежащим на каждом из внешних и центральных ребер, строятся квадратичные сплайн-функции и из полученных функций интерполируются значения в промежуточных точках (между узловыми точками). При соединении найденных точек образуются промежуточные ребра, на которых строятся квадратичные сплайн-функции и интерполируются значения в точках, равноудаленных от узловых точек. Построение биквадратной сплайн-интерполяции выполнено на рис. 2, где красным цветом показаны исходные точки и построенные на них четырехугольники, оранжевым — построенные сплайны, синим — полученные точки.

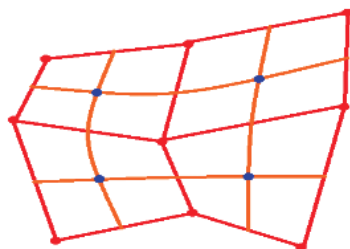


Рис. 2. Пример выполнения билинейной интерполяции

Функция биквадратной сплайн-интерполяции имеет вид:

$$f_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2; \quad (11)$$

$$f_i(y) = a_i + b_i y + c_i y^2.$$

Коэффициенты  $a, b, c$  находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} a_i + b_i x_1 + c_i x_1^2 = z_1; \\ a_i + b_i x_2 + c_i x_2^2 = z_2; \\ a_i + b_i x_3 + c_i x_3^2 = z_3. \end{cases} \quad (12)$$

После того как во всех возможных комбинациях, состоящих из четырех граничащих друг с другом двумя ребрами четырехугольников, образующих явно выпуклое множество, выполнена биквадратная интерполяция (полигоны, в которых выполнена интерполяция, помечаются и в дальнейшем отборе участие не принимают), в оставшихся четырехугольниках, из которых невозможно построить комбинацию, состоящую из четырех граничащих друг с другом двумя ребрами четырехугольников, выполняется билинейная интерполяция. Далее в оставшихся треугольниках выполняется треугольная интерполяция (данный метод интерполяции подробно описан выше). После того, как во всех полигонах интерполяция выполнена, все ранее расставленные метки снимаются.

Для расчетов можно использовать также бикубическую сплайн-интерполяцию, принцип которой аналогичен принципу биквадратной интерполяции, но выполняется не в четырех, а в девяти четырехугольниках. Однако в связи с тем, что формула для расчетов крайне громоздкая [19], а количество искомым комбинаций четырехугольников на нерегулярной сетке невелико, данный вид интерполяции не применяется.

### Результаты (Results)

Выполнена биквадратная сплайн-интерполяция на участке р. Тавда. На рис. 3 приведен фрагмент промерного планшета р. Тавда. На рис. 4 показана ЦМР участка р. Тавда, построенная только на основе имеющихся промерных данных. Далее была выполнена биквадратная сплайн-интерполяция. На рис. 5 показан массив исходных батиметрических данных и батиметрических данных, полученных по результатам сгущения сети (массив исходных батиметрических данных показан красным цветом, массив батиметрических данных, полученных по результатам биквадратной сплайн-интерполяции — синим цветом).

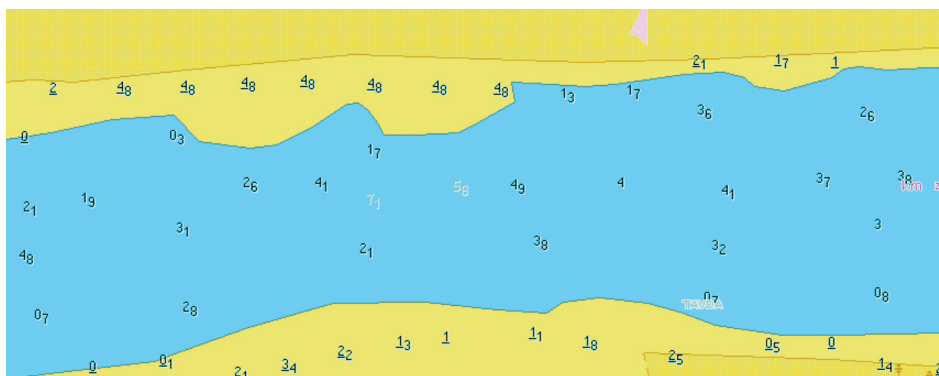


Рис. 3. Фрагмент промерного планшета р. Тавда в формате S-57

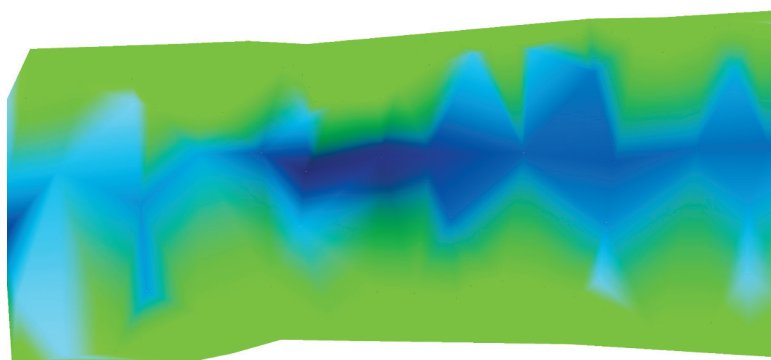


Рис. 4. Цифровая модель рельефа участка р. Тавда, построенная на основе имеющихся промерных данных

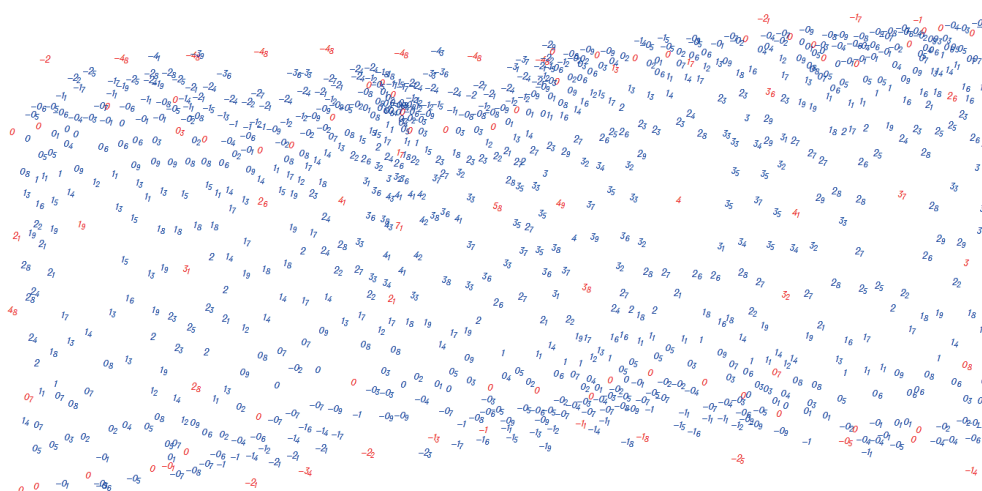


Рис. 5. Массив батиметрических данных, полученных по результатам биквадратной сплайн-интерполяции

Далее на основе полученной методом интерполяции сети построена цифровая батиметрическая модель. По полученным значениям глубин в автоматическом режиме построены изобаты. На рис. 6 показана ЦМР участка р. Тавда с автоматически рассчитанными и построенными изобатами на основе данных, интерполированных методом биквадратной сплайн-интерполяции

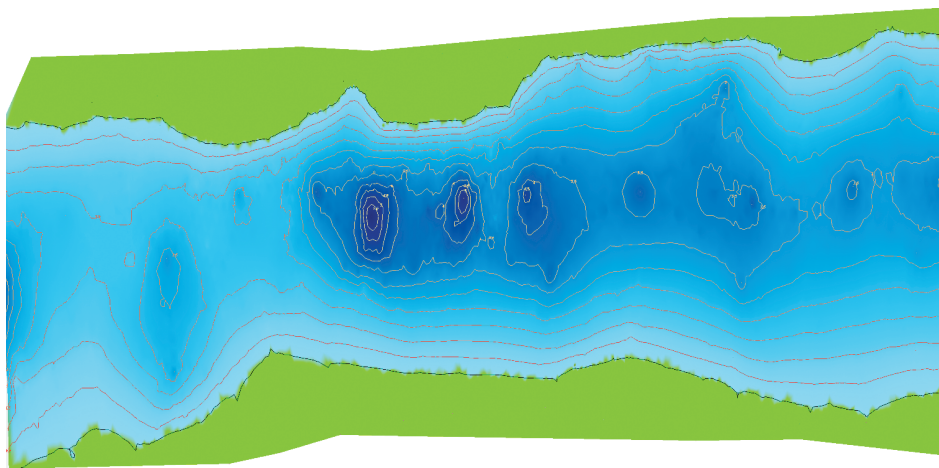


Рис. 6. Цифровая модель рельефа участка р. Тавда, построенная на основе сгущенной промерной сети

На основе полученной цифровой модели рассчитана безопасная изобата 1,2, по самым темным участкам которой проведен судовый ход. Полученные судовый ход и изобаты перенесены на ранее составленную электронную карту в формате S-57.

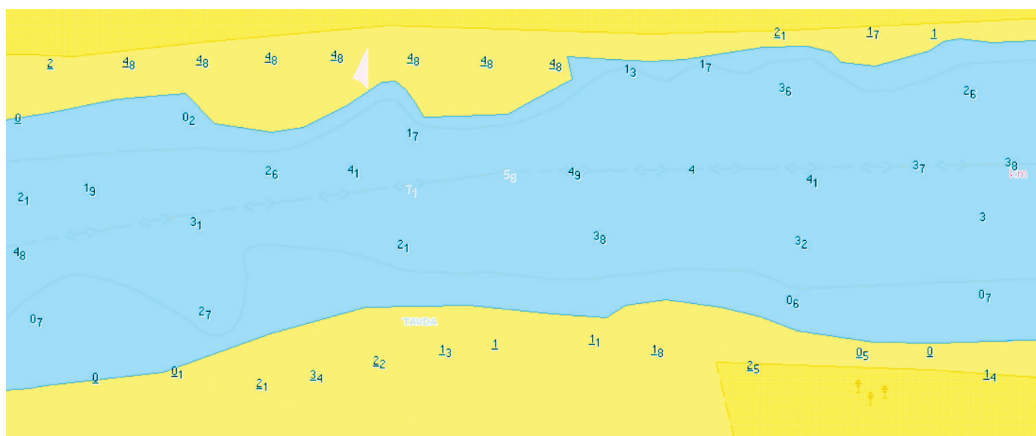


Рис. 7. Фрагмент ЭНК р. Тавда в формате S-57

На рис. 7 показана составленная ЭНК р. Тавда с автоматически построенной безопасной изобатой 1,2 м и судовым ходом, нанесенным по градиентной заливке ЦМР.

### Обсуждения (Diskussion)

На рис. 7 видно, что применение цифровых моделей рельефа дна для картографирования ВВП позволило упростить работу специалистов-картографов и снизить время, затрачиваемое ими на создание ячеек ЭНК (изобаты построены автоматически, судовый ход проведен практически моментально).

Описание метода, предложенного в данной статье, публикуется впервые, ранее подобные исследования не проводились.

### Выводы (Summary)

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. На основе предложенной в данной работе биквадратной сплайн-интерполяции, с учетом деятельности картографических отделов и служб в АБ ВВП, можно сделать вывод о необходимости частичной автоматизации процесса создания ЭНК, поскольку она позволяет сократить время создания ЭНК и косвенно обеспечить поддержку существующей коллекции электронных навигационных карт на уровне современности, а также уменьшить экономические затраты и решить проблемы кадрового дефицита.
2. Одним из методов автоматизации картографических работ на ВВП служит построение цифровых моделей рельефа дна, что необходимо для автоматизированного нанесения изобат, упрощения нанесения судового хода и дополнительного визуального контроля качества промерных работ. Но поскольку для построения ЦВМ исходных данных, полученных с помощью однолучевого эхолота, недостаточно, необходимо выполнить сгущение сети, для этого предлагается выполнять интерполяцию.
3. Анализ методов интерполяции, применяемых для картографирования ВВП, показал, что при работе вручную специалисты-картографы всегда проводят интерполяцию на нерегулярной сети, однако работа выполняется «на глаз»; в специальном картографическом ПО, напротив, реализованы методы интерполяции, основанные на математических законах, однако для сгущения сети используется упрощенная регулярная сеть.
4. Предложенный в статье метод сплайн-интерполяции для построения ЦМР, который может быть легко реализуемым в ПО и выполняемым на нерегулярной сети, позволит сохранить точность изначально заданного промера и обеспечить в дальнейшем безопасность судоходства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанченко А. Л. Современные технологии обработки и представления пространственных данных / А. Л. Степанченко, К. С. Лотова, В. В. Шлапак, И. И. Лонский // Информация и космос. — 2019. — № 1. — С. 139–142.
2. Павлова А. И. Применение методов цифрового моделирования рельефа для создания карт пластики / А. И. Павлова // Сборник научных трудов XII Международной научной конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». — 2015. — С. 279–281.
3. Cebecauer T. Processing digital terrain models by regularized spline with tension: tuning interpolation parameters for different input datasets / T. Cebecauer, J. Hofierka, M. Suri // Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference. — 2002. — Pp. 123–134.
4. Прохоренков А. А. Использование трехмерных навигационных карт для повышения безопасности судоходства по внутренним водным путям / А. А. Прохоренков // International Journal of Advanced Studies. — 2019. — Т. 9. — № 1. — С. 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.
5. Майоров А. А. Перспективы развития компьютерных технологий создания цифровых моделей рельефа / А. А. Майоров, Т. К. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2011. — № 4. — С. 107–110.
6. Alcaras E. Interpolation single beam data for sea bottom GIS modelling / E. Alcaras, L. Carnevale, C. Parente // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. — 2020. — Vol. 8. — No. 2. — Pp. 591–597. DOI: 10.30534/ijeter/2020/50822020.
7. Флоринский И. В. Трехмерное моделирование рельефа: применение пакета Blender / И. В. Флоринский, С. В. Филиппов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2018. — Т. 24. — № 2. — С. 250–261. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-250-261.
8. Митюнина И. Ю. Особенности создания цифровых моделей геофизических полей геостатистическими методами / И. Ю. Митюнина // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. — 2019. — № 2 (39). — С. 236–240.
9. Parente C. Interpolation of Single Beam Echo Sounder Data for 3D Bathymetric Model / C. Parente, A. Valerio // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. — 2019. — Vol. 10. — No. 10. — Pp. 6–13.

10. Amante C. J. Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models / C. J. Amante, B. W. Eakins // *Journal of Coastal Research*. — 2016. — Is. 76. — Pp. 123–133. DOI: 10.2112/SI76-011.
11. Chaplot V. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density / V. Chaplot, F. Darboux, H. Bourennane, S. Leguédais, N. Silvera, K. Phachomphon // *Geomorphology*. — 2006. — Vol. 77. — Is. 1–2. — Pp. 126–141. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.12.010.
12. Li J. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists / J. Li, A. D. Heap. — Canberra, Australia: Commonwealth of Australia, 2008. — 137 p.
13. Erdogan S. A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale / S. Erdogan // *Earth surface processes and landforms*. — 2009. — Vol. 34. — Is. 3. — Pp. 366–376. DOI: 10.1002/esp.1731.
14. Guo Q. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods / Q. Guo, W. Li, H. Yu, O. Alvarez // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. — 2010. — Vol. 76. — Is. 6. — Pp. 701–712. DOI: 10.14358/PERS.76.6.701.
15. Wu C.-Y. Comparison of different spatial interpolation methods for historical hydrographic data of the lowermost Mississippi River / C.-Y. Wu, J. Mossa, L. Mao, M. Almulla // *Annals of GIS*. — 2019. — Vol. 25. — Is. 2. — Pp. 133–151. DOI: 10.1080/19475683.2019.1588781.
16. Руководство пользователя ArcGIS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm> (дата обращения: 12.05.2020).
17. Amante C. J. Estimating coastal digital elevation model uncertainty / C. J. Amante // *Journal of Coastal Research*. — 2018. — Vol. 34. — Is. 6. — Pp. 1382–1397. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-17-00211.1.
18. Павлова А. И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа / А.И. Павлова // *Автометрия*. — 2017. — Т. 53. — № 2. — С. 86–94. DOI: 10.15372/AUT20170210.
19. Wang K. A study of cubic spline interpolation / K. Wang // *InSight: Rivier Academic Journal*. — 2013. — Vol. 9. — Is. 2. — Pp. 1–15.

## REFERENCES

1. Stepanchenko, A. L., K. S. Lotova, V. V. Shlapak, and I. I. Lonskii. “Sovremennye tekhnologii obrabotki i predstavleniya prostranstvennykh dannykh.” *Informatsiya i kosmos* 1 (2019): 139–142.
2. Pavlova, A. I. “Primenenie metodov tsifrovogo modelirovaniya rel’efa dlya sozdaniya kart plastiki.” *Sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Sovremen-nye instrumental’nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii»*. 2015. 279–281.
3. Cebecauer, Tomas, Jaroslav Hofierka, and Marcel Suri. “Processing digital terrain models by regularized spline with tension: tuning interpolation parameters for different input datasets.” *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*. 2002. 123–134.
4. Prokhorenkov, Andrei Aleksandrovich. “Use of three-dimensional navigation charts to improve inland waterways navigation safety.” *International Journal of Advanced Studies* 9.1 (2019): 26–49. DOI: 10.12731/2227-930X-2019-1-26-49.
5. Maiorov, A. A., and T. K. Nguen. “Perspektivy razvitiya komp’yuternykh tekhnologii sozdaniya tsifrovyykh modelei rel’efa.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos”emka* 4 (2011): 107–110.
6. Alcaras, Emanuele, Luigi Carnevale, and Claudio Parente. “Interpolating single-beam data for sea bottom GIS modelling.” *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research* 8.2 (2020): 591–597. DOI: 10.30534/ijeter/2020/50822020.
7. Florinsky, Igor V., and Sergey V. Filippov. “Three-dimensional terrain modeling: application of the blender package.” *Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”* 24.2 (2018): 250–261. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-250-261.
8. Mitunina, I. Iu. “Special aspects of geostatistical modeling of geophysical fields.” *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala* 2(39) (2019): 236–240.
9. Parente Claudio, and Andrea Vallario. “Interpolation of Single Beam Echo Sounder Data for 3D Bathymetric Model.” *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering* 10.10 (2019): 6–13.
10. Amante, Christopher J., and Barry W. Eakins. “Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models.” *Journal of Coastal Research* 76 (2016): 123–133. DOI: 10.2112/SI76-011.
11. Chaplot, Vincent, Frédéric Darboux, Hocine Bourennane, Sophie Leguédais, Norbert Silvera, and Konngkeo Phachomphon. “Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation mo-

dels in relation to landform types and data density.” *Geomorphology* 77.1–2 (2006): 126–141. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.12.010.

12. Li, Jin, and Andrew D. Heap. *A review of spatial interpolation methods for environmental scientists*. Canberra, Australia: Commonwealth of Australia, 2008.

13. Erdogan, Saffet. “A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale.” *Earth surface processes and landforms* 34.3 (2009): 366–376. DOI: 10.1002/esp.1731.

14. Guo, Qinghua, Wenkai Li, Hong Yu, and Otto Alvarez. “Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods.” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76.6 (2010): 701–712. DOI: 10.14358/PERS.76.6.701.

15. Wu, Chia-Yu, Joann Mossa, Liang Mao, and Mohammad Almulla. “Comparison of different spatial interpolation methods for historical hydrographic data of the lowermost Mississippi River.” *Annals of GIS* 25.2 (2019): 133–151. DOI: 10.1080/19475683.2019.1588781.

16. Rukovodstvo pol'zovatelya ArcGIS. Web. 12 May 2020 <<https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/fundamentals-of-3d-surfaces.htm>>.

17. Amante, Christopher J. “Estimating coastal digital elevation model uncertainty.” *Journal of Coastal Research* 34.6 (2018): 1382–1397. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-17-00211.1.

18. Pavlova, A. I. “Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models.” *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 53.2 (2017): 171–177. DOI: 10.3103/S8756699017020108.

19. Wang, Kai. “A study of cubic spline interpolation.” *InSight: Rivier Academic Journal* 9.2 (2013): 1–15.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ратнер Елизавета Аркадьевна** — аспирант  
Научный руководитель:  
Зайцев Алексей Иванович  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [elizaveta.a.ratner@gmail.com](mailto:elizaveta.a.ratner@gmail.com),  
[kaf\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@gumrf.ru)  
**Зайцев Алексей Иванович** —  
кандидат технических наук, капитан дальнего  
плавания, генеральный директор;  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
ООО «Научно-промышленное предприятие  
«Маринерус»  
198207, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Ленинский пр., 199, лит. Б, офис 1  
e-mail: [kaf\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@gumrf.ru), [zaliv@bk.ru](mailto:zaliv@bk.ru)  
**Квасной Максим Андреевич** —  
программист  
Отраслевой центр разработки и внедрения  
информационных систем  
107078, Российская Федерация, Москва, ул.  
Каланчевская, 13  
e-mail: [maksim.kvasnoy@ocrv.ru](mailto:maksim.kvasnoy@ocrv.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ratner, Elizaveta A.** — Postgraduate  
Supervisor:  
Zaitsev, Aleksei I.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [elizaveta.a.ratner@gmail.com](mailto:elizaveta.a.ratner@gmail.com),  
[kaf\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@gumrf.ru)  
**Zaitsev, Aleksei I.** —  
PhD,  
Sea Captain, G.M.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
Scientific industrial enterprise  
“Marinerus”, Ltd.  
199/B Leninskii Av., St. Petersburg, 198207,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_svvp@gumrf.ru](mailto:kaf_svvp@gumrf.ru), [zaliv@bk.ru](mailto:zaliv@bk.ru)  
**Kvasnoy, Maksim A.** —  
Software developer  
Industry Center for Information systems development  
and implementation  
13 Kalachevskaya Str., Moscow, 107078,  
Russian Federation  
e-mail: [maksim.kvasnoy@ocrv.ru](mailto:maksim.kvasnoy@ocrv.ru)

Статья поступила в редакцию 27 августа 2020 г.  
Received: August 27, 2020.