

Способ оценки точности метода интерполяции в батиметрических цифровых моделях рельефа

© 2021 г. А.С. Абрамова

Геологический институт Российской Академии наук, Москва, Россия
abramanastas@gmail.com

Method to assess accuracy of interpolation in digital bathymetry models

A.S. Abramova

Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
abramanastas@gmail.com

Received August 11, 2020

Revised January 15, 2021

Accepted February 8, 2021

Keywords: digital bathymetry model, spline with tension interpolation, GEBCO, Global Topography, predicted topography

Summary. A method is developed to assess accuracy of the interpolation algorithm used in GEBCO_08 and Global Topography grids. Interpolation accuracy is assessed by considering whether there are correlations between the difference of GIN RAS multibeam grids and analyzed grids versus the distance to the closest source data point. The analysis shows that both datasets perform similarly due to the same interpolation algorithm used. Closer to the source data points accuracy of analysed grids is less than further away from the source data points. The distance at which the accuracy increases is controlled by source data density, number of data points within the polygons as well as the tension parameter used in spline interpolation method. It was not possible to assess how well the gravity derived predicted bathymetry interpolates across the data gaps, for the reason of relatively dense source data coverage within the study polygons. The stated spatial resolution of gravity is 20–160 km, while the furthest distance to the source data points varies within the polygons from 2 km to 10 km, with the maximum distance of 17 km. In order to assess accuracy of predicted bathymetry, larger areas with no soundings are required, with maximum distance to the nearest source data point exceeding 20 km.

Citation: Abramova A.S. Method to assess accuracy of interpolation in digital bathymetry models. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2021, 65 (1): 52–60. [In Russian]. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-1-52-60.

Поступила 11 августа 2020 г.

После доработки 15 января 2021 г.

Принята к публикации 8 февраля 2021 г.

Ключевые слова: батиметрическая цифровая модель рельефа, сплайн с натяжением, интерполяция, GEBCO, Global Topography, предсказанный рельеф

Разработан способ оценки точности метода интерполяции для ЦМР GEBCO_08 и Global Topography. Точность метода интерполяции оценивается по точности значений глубин в ЦМР в зависимости от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР, значения глубин которой основаны на измеренных исходных данных. В результате, наблюдается сходное распределение ошибок в обеих ЦМР: ближе к исходным данным точность ЦМР ниже, чем вдали от исходных точек данных. Расстояние, на котором уменьшаются ошибки, контролируется плотностью исходных данных, количеством точек данных внутри полигонов, а также параметром натяжения, используемым в алгоритме сплайн. Плотность распределения исходных данных в пределах полигонов исследования относительно высока для оценки точности предсказанного рельефа с заявленным пространственным разрешением 20–160 км.

Для цитирования: Абрамова А.С. Способ оценки точности метода интерполяции в батиметрических цифровых моделях рельефа // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65. № 1. С. 52–60. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-1-52-60.

Введение

На сегодняшний момент наиболее актуальными проблемами в цифровом моделировании являются обработка разнородных данных для получения последовательных и простых в ис-

пользовании регулярных сеток данных без пробелов в пространственном покрытии [1]. Ярким примером является модель высокого разрешения, полученная по данным радиолокационной топографической миссии Шаттла

(SRTM), которая предоставляет пространственное разрешение 1" (~30 м на экваторе) и вертикальную точность порядка нескольких метров для большей части суши [2]. К подобным моделям рельефа дна Мирового океана относятся батиметрические цифровые модели рельефа (ЦМР) ГЕБКО [3] и модель ИВСаО [4–6]. Помимо рельефа суши и батиметрии, такие глобальные цифровые модели как, например, возраст океанической коры [7] или модели морских гравитационных аномалий [8] также основаны на нерегулярно распределенных измерениях.

Одним из наиболее часто используемых в науках о Земле алгоритмов интерполяции является бикубическая сплайн-интерполяция [9], метод которой обеспечивает гладкую поверхность с непрерывными вторыми производными и минимальной кривизной. В связи с тем, что ограничение минимальной кривизны на поверхности может привести к артефактам интерполяции, метод интерполяции бикубическим сплайном был преобразован в алгоритм «сплайн минимальной кривизны с натяжением» [9, 10].

Алгоритм «сплайн с натяжением» — точный интерполятор, в котором создаваемая поверхность с непрерывными вторыми производными и общим квадратом кривизны, определяемым коэффициентом натяжения, точно проходит через исходные значения. Интерполированные значения в регулярной сетке вычисляются по взвешенному среднему близлежащих значений. Параметр натяжения определяет вес, придаваемый окружающим точкам данных: чем выше натяжение, тем больше веса придается значениям близлежащих точек данных. Таким образом, значение натяжения определяет кривизну поверхности: чем ниже значение натяжения, тем больше точек данных будут влиять на решение в каждой ячейке регулярной сетки; чем выше натяжение, тем меньше точек данных будут влиять на решение, допускающее высокие значения кривизны только в местах расположения точек исходных данных.

Алгоритм «сплайн с натяжением» используется при построении батиметрических цифровых моделей рельефа, таких как GEBCO_08 [3] и Global Topography (GT) [11]. Разница между данными моделями неоднократно обсуждалась в [12, 13]. Алгоритм используется в моделях по-разному. ЦМР GEBCO_08 построена на акустических данных измеренных глубин с помощью алгоритма сглаженного сплайна с натяжением (параметр натяжения 0,35).

Альтернативный метод заполнения пробелов данных в батиметрии был введен Смитом и Сандвеллом [11]. В своем методе они заполняют пробелы в замеренных данных предсказанным рельефом, полученным по гравиметрическим данным. Корреляция между крупномасштабной батиметрией (20–160 км) и гравитационным полем, определяет региональный коэффициент, применяемый к данным гравиметрии для получения «предсказанной» батиметрии [14]. «Предсказанный» по гравитационным аномалиям рельеф комбинируется с акустическими батиметрическими данными. Таким образом, пробелы в данных заполняются альтернативным источником данных. На последнем этапе компиляции ЦМР GT исходные измеренные значения глубин восстанавливаются в поверхность предсказанного рельефа, при этом разница между значениями исходных и предсказанных глубин в соседних ячейках сетки сглаживается с использованием алгоритма «сплайн с натяжением» (параметр натяжения = 0,75) [11, 15]. Поэтому эффект от использования сплайн-интерполяции в ЦМР GT можно наблюдать только вблизи точек исходных данных.

Данные и метод

В данной работе представлен разработанный способ оценки точности метода интерполяции на примере двух ЦМР GEBCO_08 и GT. Способ оценки точности метода интерполяции включает в себя расчет разности (ошибка) между значениями глубин в тестируемых ЦМР и значениями в эталонных ЦМР, построенных по данным многолучевого эхолотирова-

ния (МЛЭ). Точность интерполяции значений глубин оценивается по графику зависимости величины ошибок в ЦМР от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР, значение глубины в которой основано на измерениях. Для этого строится «матрица расстояний» по методу Маркс и др. [16].

В качестве эталона точности используются ЦМР, построенные по результатам данных МЛЭ в ходе 24–26-го рейсов Геологического института РАН (ГИН РАН) (2006–2008 г.) [17] с борта НИС «Академик Николай Страхов», оснащенного глубоководным (RESON Seabat 7150) и мелководным (Seabat 8111) комплексами МЛЭ с навигационной системой динамического позиционирования POS MV. Для обработки материалов МЛЭ применялось программное обеспечение RESON PDS2000. По результатам съемок МЛЭ были построены четыре ЦМР морского дна с разрешением 100 м (полигоны 1–4) и 50 м (полигон 4), расположенные в разных морфологических провинциях: срединно-океанический хребет Книповича (полигоны 1 и 2), абиссальная равнина норвежского бассейна (полигон 3), шельфовая равнина Баренцева моря: баренцевоморский трог (полигон 4) (рис. 1). Для программной реализации разработанного способа оценки точности и картографирования результатов использовались программы Golden Software Surfer, Generic Mapping Tools, Mathworks Matlab, ArcMap 10.0.

Тестируемые ЦМР построены в разных проекциях: GT в проекции Меркатора GMT (сферическая модель Земли) с разрешением сетки 1 угловая минута по меридиану; GEBCO_08 рассчитана по сетке сфероидических трапеций с равным угловым шагом по широте и долготе, образуемая точками пересечения параллелей и меридианов (ССТ), с разрешением сетки 30". Для сопоставимости расстояния до ближайших исходных данных измеряются в ячейках ЦМР. Таким образом, расстояния, покрытые ячейками сетки ЦМР GT 13.1 и GEBCO_08, не одинаковы.

Пример «матрицы расстояний» для по-

лигона 2 показан на рис. 2. Черными точками обозначены ячейки ЦМР, основанные на ис-

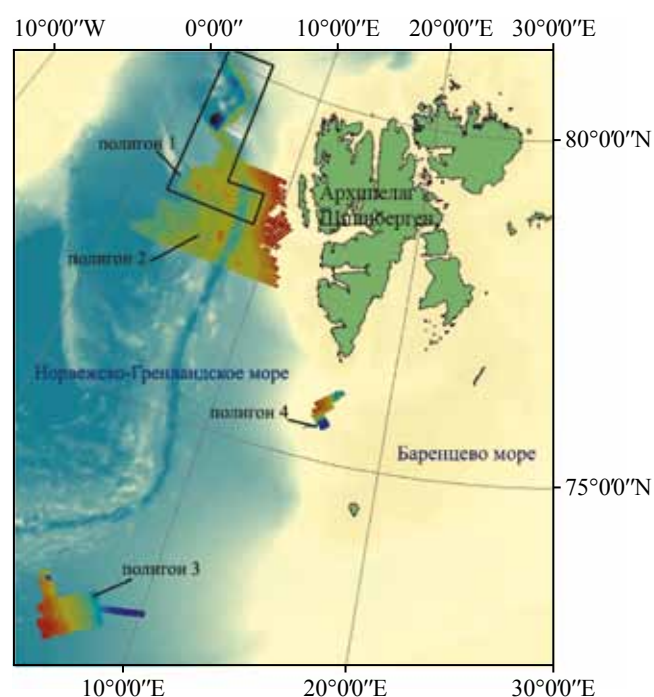


Рис. 1. Местоположение четырех полигонов съемок ГИН РАН МЛЭ в Норвежско-Гренландском и Баренцевом морях

Fig. 1. Location of four multibeam GIN RAS survey polygons in Norwegian-Greenland and Barents Seas

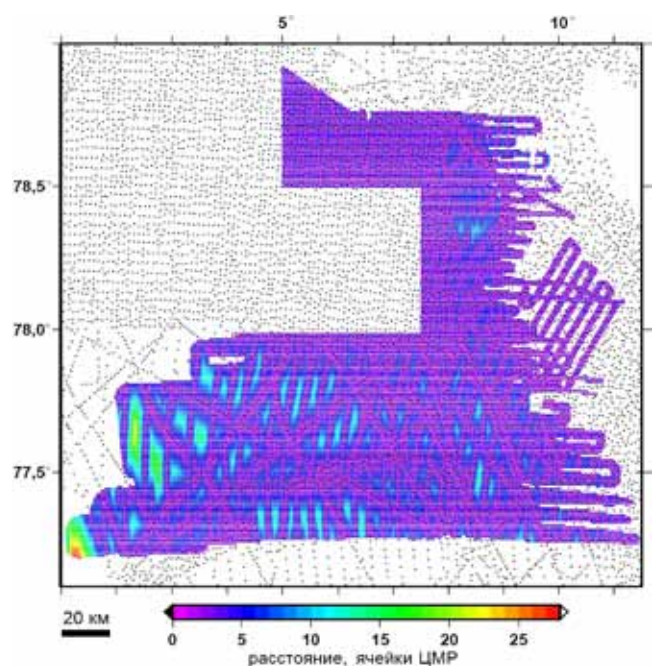


Рис. 2. Пример «матрицы расстояний» для ЦМР GEBCO_08, полигон 2

Fig. 2. Example of «distance grid» for GEBCO_08 grid at the polygon 2

ходных данных. Расстояние рассчитано только для зоны покрытия МЛЭ съемкой.

В связи с различием форматов ЦМР GEBCO_08 и GT для вычислений «матрицы расстояний» была выполнена несколько разная процедура для двух тестируемых ЦМР. «Матрица расстояний» для GT была рассчитана в пакете GMT. Для извлечения местоположений исходных данных для ЦМР GT используется GMT инструмент `img2grd`. Карта изученности была извлечена отдельно для каждого полигона. «Матрица расстояний» для ЦМР GT была построена в проекции ЦМР GT для каждого полигона при помощи GMT инструмента `grdmath`.

«Матрица расстояний» для ЦМР GEBCO_08 была рассчитана в ESRI ArcMap. Покрытие исходных данных для ЦМР ИВСаО и, следовательно, для GEBCO_08 было получено от Дэвида Сэндвелла (Калифорнийский университет в Сан Диего). Исходные данные GEBCO_08 были предоставлены в текстовом формате `xyz` на сетке SST и извлекались отдельно для каждого полигона с помощью GMT инструмента `gmtselect`. Расстояние рассчитывалось с помощью инструментария ArcMap Spatial Analyst Toolbox (`Distance > Euclidean Distance`). Инструмент рассчитывает расстояния с использованием декартовой метрики, которая не учитывает кривизну Земли. Предельные величины вычисляемых расстояний были таковы, что возникающая из-за применения плоской метрики ошибка в измерении расстояний были не значимы по сравнению с точностью выполняемых вычислений.

Угловые координаты для сетки ArcMap определяются координатами левого верхнего угла. На рис. 3 серая сетка иллюстрирует ЦМР GEBCO_08, синяя сетка — «матрицу расстояний», созданную в ArcMap на основе исходных точек `xyz` (черные точки). Для того, чтобы обеспечить точное совпадение «матрицы расстояний» с исходной сеткой, а также для покрытия той же области, в левый верхний угол файла исходных данных `xyz` была добавлена искус-

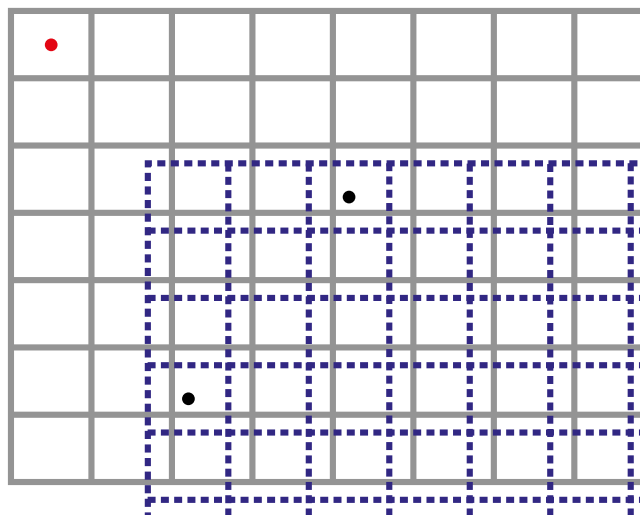


Рис. 3. Иллюстрация решения проблемы угловых координат

Fig. 3. Illustrates solution for edge problem

ственная точка (красного цвета). Необходимо точное совпадение ячеек в исходной ЦМР и «матрице расстояний». Таким образом была рассчитана «матрица расстояний» для каждого полигона с разрешением 30 дуговых секунд в географических координатах. После этого «матрица расстояний» экспортировалась в GMT для дальнейших расчетов.

Алгоритм для подсчёта «матрицы ошибок» разработан для подсчета разности значений глубин между тестируемыми ЦМР GEBCO_08 и GT и эталонными ЦМР ГИН РАН, которые построены в разных проекциях. Алгоритм включает следующие шаги: значение каждой ячейки в ЦМР ГИН РАН конвертируется в точечное значение `XYZ`; значения `XYZ` перепроецируются в проекцию тестируемой ЦМР; значения `XYZ` усредняются по ячейке ЦМР в соответствующей проекции; каждому значению в тестируемой ЦМР приписывается осреднённое значение из ЦМР ГИН РАН с помощью GMT инструмента `grdtrack`; считается разность значений глубин для каждой ячейки ЦМР.

Инструмент GMT `grdtrack` был использован для выборки соответствующих значений из «матрицы расстояний» и «матрицы ошибок» для каждой ячейки ЦМР для последующего построения графика зависимости.

Результаты

На рис. 4 и 5 представлено распределение ошибок в ЦМР GEBCO_08 и GT в зависимости от расстояний ячеек до ближайших исходных данных. Распределение ошибок варьирует в зависимости от полигона: внутри каждого полигона наблюдается разная плотность данных и размер выборки данных. Для распределения

ошибок в ЦМР GEBCO_08 и GT характерно уменьшение величины ошибки с увеличением расстояния от исходных данных на всех полигонах, за исключением полигона 4 для ЦМР GT. Размер ошибок при нулевом расстоянии соответствует погрешности в исходных данных. Наблюдаемое распределение ошибок обусловлено интерполяцией сплайном с на-

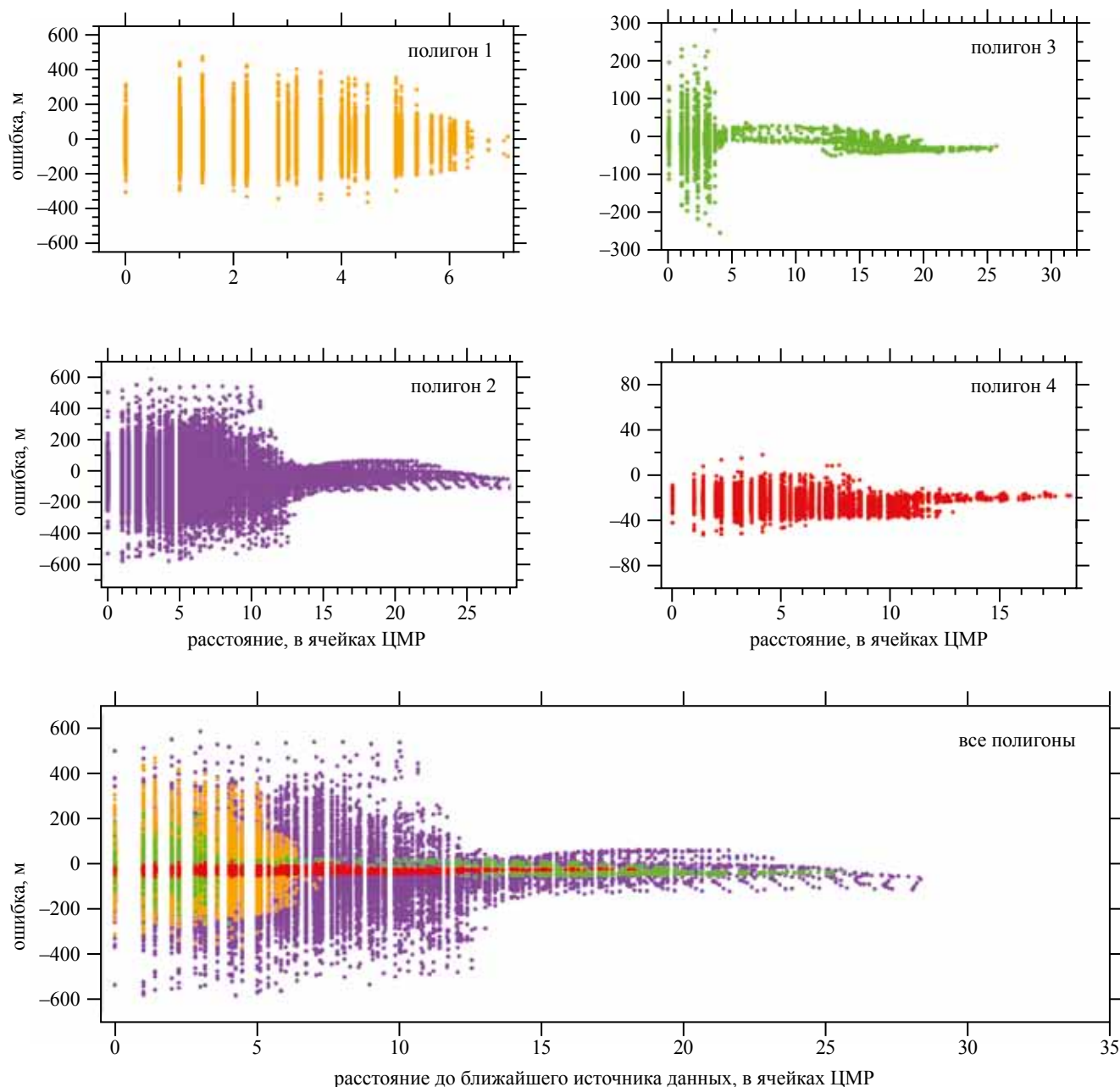


Рис. 4. Графики зависимости точности ЦМР от расстояния до ближайшего источника данных для GEBCO_08 на четырех полигонах съемки МЛЭ и комбинированный график для всех полигонов

Fig. 4. Plots of accuracy of GEBCO_08 grid versus distance to the nearest source data point at the four polygons and combined plot for all polygons

тяжением: интерполированная поверхность проходит точно через значения глубин исходных данных [10]. Таким образом, алгоритм не учитывает погрешность в значениях исходных

данных. Расстояние, при котором уменьшается ошибка, определяется параметром натяжения, поскольку натяжение определяет расстояние, при котором значения исходных данных влия-

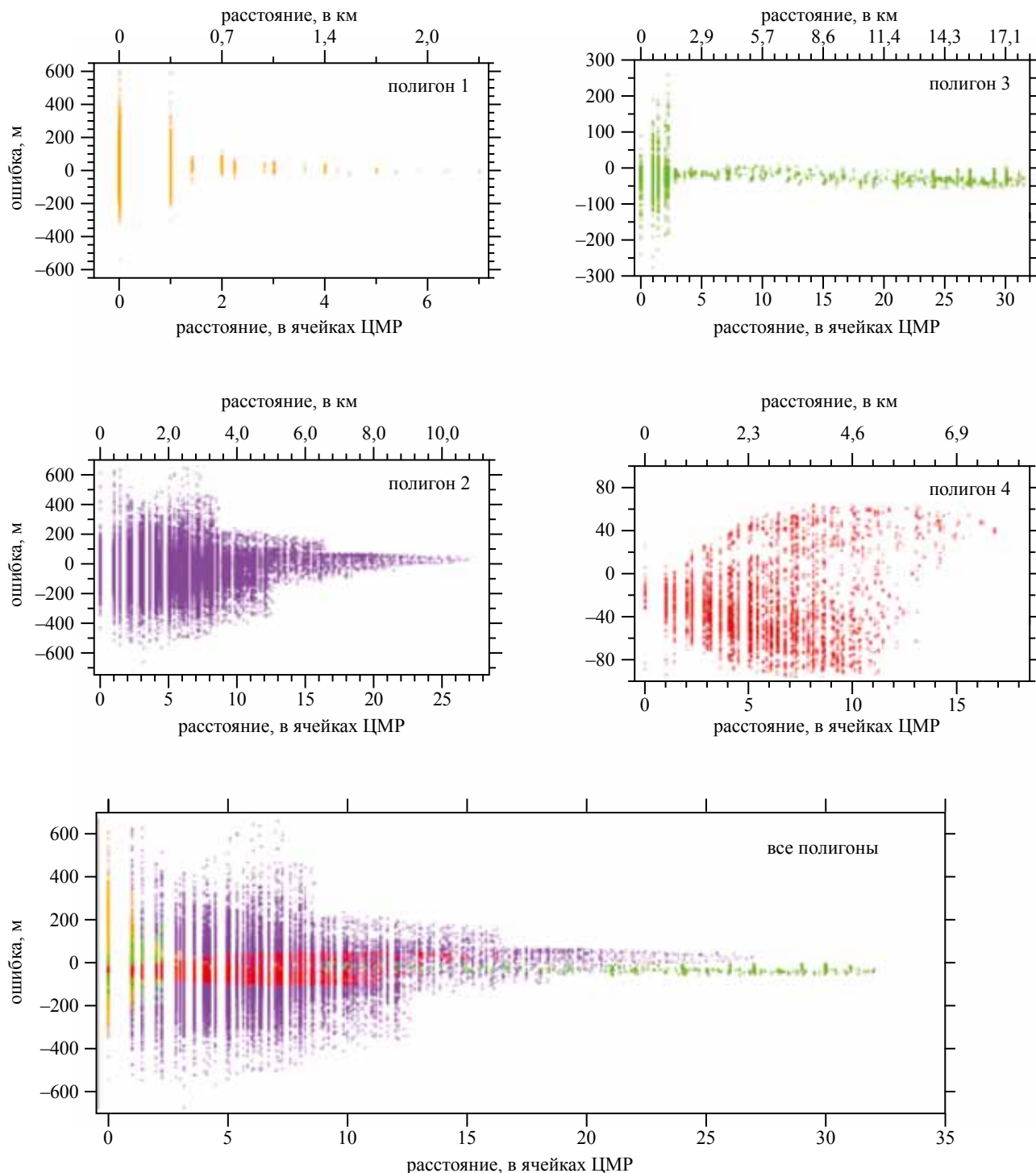


Рис. 5. Графики зависимости точности ЦМР от расстояния до ближайшего источника данных для GT на четырех полигонах съемки МЛЭ и комбинированный график для всех полигонов

Fig. 5. Plots of accuracy of GT grid versus distance to the nearest source data point at the four polygons and combined plot for all polygons

ют на интерполированные значения. За пределами определенного расстояния интерполированные значения в меньшей степени зависят от погрешности исходных данных и погрешности интерполированных значений сводятся к средней погрешности значений окружающих исходных данных.

Помимо параметра натяжения на распределение ошибок влияет количество точек данных внутри каждого полигона, а также плотность данных. По картам расстояний (см. рис. 2) видно, что области со значительным расстоянием, как правило, очень малы. Таким образом, уменьшение ошибок с увеличением расстояния соответствует уменьшению количества точек данных.

Для оценки точности предсказанного рельефа в ЦМР GT расстояние было преобразовано из ячеек в километры. Пересчет расстояния из ячеек в километры был выполнен в соответствии с приблизительной реальной площадью ячеек в зависимости от полигона (см. рис. 5). Расстояние до точек исходных данных в пределах полигонов варьирует от 2 до 10 км, при максимальном расстоянии в 17 км (полигон 3). Пространственное разрешение предсказанного рельефа составляет 20–160 км [11, 14]. Таким образом, для оценки того, насколько хорошо предсказанный рельеф заполняет пробелы данных, требуется площадь с максимальным расстоянием до ближайшей точки источника данных более 20 км.

В распределении ошибок наблюдается сходство для ЦМР GT и ЦМР GEBCO_08: ближе к исходным данным разница глубин с МЛЭ ГИН РАН выше, чем вдали от исходных точек данных. Расстояние, на котором уменьшаются различия, контролируется плотностью исходных данных, количеством точек данных внутри полигонов, а также параметром натяжения, используемым в алгоритме сплайн. Плотность распределения исходных данных в пределах полигонов исследования относительно высока для оценки точности предсказанного рельефа с заявленным пространственным разрешением 20–160 км.

Заключение

Был разработан способ оценки точности метода интерполяции. Точность метода интерполяции оценивается по точности значений глубин в ЦМР в зависимости от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР, значения глубин которой основаны на измеренных исходных данных.

Разработанный способ был апробирован на двух ЦМР с несколько различным алгоритмом заполнения пустот между исходными данными. В результате, наблюдается сходное распределение ошибок в ЦМР GEBCO_08 и ЦМР GT. В пределах каждого полигона характер распределения зависит от плотности исходных данных и количества ячеек регулярной сетки. Наблюдаемые ошибки в ячейках ЦМР, где расстояние до исходных значений равно нулю, отражают погрешность исходных данных. Наблюдается резкое уменьшение ошибки на некотором расстоянии от исходных данных. Расстояние, на котором уменьшаются ошибки, контролируется параметром натяжения, используемым в алгоритме сплайн, плотностью исходных данных, а также количеством точек данных внутри полигонов.

Оценить насколько хорошо предсказанный рельеф в ЦМР GT заполняет пробелы данных не представляется возможным по причине относительно высокой плотности исходных данных внутри исследуемых полигонов. Указанное пространственное разрешение предсказанного рельефа составляет 20–160 км, в то время как наибольшее расстояние до точек исходных данных варьирует в пределах полигонов от 2 до 10 км, а максимальное расстояние составляет 17 км.

Благодарности. Автор выражает благодарность коллегам лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов ГИН РАН. Работа выполнена в рамках лабораторной темы: «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами» (государственная регистрация № 0135-2019-0076), а также

при поддержке грантов РФФИ № 18-05-70040 «Эволюция литосферы западной Арктики: процессы и механизмы, направленность развития, природные ресурсы и геологические опасности», № 18-35-20060 «Рельеф и геоморфологические процессы районов ресурсного освоения южной части Баренцевоморского шельфа».

Acknowledgements. The author expresses his gratitude to colleagues of the Laboratory of Geomorphology and Tectonics of the Ocean Floor at the GIN RAS. The work was carried out

ЛИТЕРАТУРА

1. Hell B., Jakobsson M. Gridding heterogeneous bathymetric data sets with stacked continuous curvature splines in tension // *Mar. Geophys. Res.* 2011. V. 32(4). P. 493–501.
2. Reuter H., Nelson A., Jarvis A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data // *International Journal of Geographic Information Science.* 2007. V. 21 (9). P. 983–1008.
3. Электронный ресурс: https://www.gebco.net/news_and_media/updated_gebco_08_release.html.
4. Jakobsson Martin & Mayer, Larry & Bringensparr, Caroline & Castro, Carlos & Mohammad, Rauzam & Johnson, Paul & Ketter, Tomer & Accettella, Daniela & Amblas, David & An, Lu & Arndt, Jan Erik & Canals, Miquel & Casamor, José Luis & Chauché, Nolwenn & Coakley, Bernard & Danielson, Seth & Demarte, Maurizio & Dickson, Mary-Lynn & Dorschel, Boris & Zinglensen, Karl. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // *Scientific Data.* 2020. V. 7 (176). P. 1–14.
5. Jakobsson M., Mayer L., Coakley B. Dowdeswell J.A., Forbes, S., Fridman, B., Hodnesdal, H., Noormets, R., Pedersen, R., Rebesco, M., Schenke, H.W., Zarayskaya, Y., Accettella, D., Armstrong, A., Anderson, R.M., Bienhoff, P., Camerlenghi, A., Church, I., Edwards, M., Gardner, J.V., Hall, J.K., Hell, B., Hestvik, O., Kristoffersen, Y., Marcussen, C., Mohammad, R., Mosher, D., Nghiem, S.V., Pedrosa, M.T., Travaglini, P.G., Weatherall, P. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // *Geophysical Research Letters.* 2012. V. 39 (1). P. 35–48.
6. Jakobsson M., Macnab R., Mayer L., Anderson R., Edward, M., Hatzky J., Schenke H.W., Johnson P. An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses // *Geophysical Research Letters.* 2008. V. 35 (L07602). P. 1–5.
7. Müller R. D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // *Geochemistry Geophysics Geosystems.* 2008. V. 9 (4). P. 1–19.

within the framework of the laboratory theme: "Geological hazards in the World Ocean and their relation to the relief, geodynamic and tectonic processes" (state registration No. 0135-2019-0076), as well as with the support of the RFBR grant No. 18-05-70040 "Lithospheric evolution in the Western Arctic: processes and mechanisms, development orientation, natural resources and geological hazards", No. 18-35-20060 "Sea floor topography and geomorphological processes in resource development areas of the southern Barents sea shelf".

REFERENCES

1. Hell B., Jakobsson M. Gridding heterogeneous bathymetric data sets with stacked continuous curvature splines in tension. *Mar. Geophys. Res.* 2011, 32(4): 493–501.
2. Reuter H., Nelson A., Jarvis A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographic Information Science.* 2007, 21 (9): 983–1008.
3. URL: https://www.gebco.net/news_and_media/updated_gebco_08_release.html.
4. Jakobsson Martin & Mayer, Larry & Bringensparr, Caroline & Castro, Carlos & Mohammad, Rauzam & Johnson, Paul & Ketter, Tomer & Accettella, Daniela & Amblas, David & An, Lu & Arndt, Jan Erik & Canals, Miquel & Casamor, José Luis & Chauché, Nolwenn & Coakley, Bernard & Danielson, Seth & Demarte, Maurizio & Dickson, Mary-Lynn & Dorschel, Boris & Zinglensen, Karl. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. *Scientific Data.* 2020, 7 (176): 1–14.
5. Jakobsson M., Mayer L., Coakley B. Dowdeswell J.A., Forbes, S., Fridman, B., Hodnesdal, H., Noormets, R., Pedersen, R., Rebesco, M., Schenke, H.W., Zarayskaya, Y., Accettella, D., Armstrong, A., Anderson, R.M., Bienhoff, P., Camerlenghi, A., Church, I., Edwards, M., Gardner, J.V., Hall, J.K., Hell, B., Hestvik, O., Kristoffersen, Y., Marcussen, C., Mohammad, R., Mosher, D., Nghiem, S.V., Pedrosa, M.T., Travaglini, P.G., Weatherall, P. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0. *Geophysical Research Letters.* 2012, 39 (1): 35–48.
6. Jakobsson M., Macnab R., Mayer L., Anderson R., Edwards M., Hatzky J., Schenke H. W., Johnson P. An improved bathymetric portrayal of the Arctic Ocean: Implications for ocean modeling and geological, geophysical and oceanographic analyses. *Geophysical Research Letters.* 2008, 35(L07602): 1–5.
7. Müller R. D., Sdrolias M., Gaina C., Roest W.R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems.* 2008, 9 (4): 1–19.

8. Sandwell D. T., Smith W. H. F. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 10039–10054.
9. Briggs I.C. Machine contouring using minimum curvature // Geophysics. 1974. V. 39. P. 39–48.
10. Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension // Geophysics. 1990. V.55 (3). P. 293–305.
11. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings // Science. 1997. V. 277. P. 1956–1962.
12. Абрамова А.С. Типы артефактов в цифровых моделях рельефа дна на примере общедоступных ЦМР в Арктике // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 6. С. 642–652. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-6-642-652.
13. Абрамова А.С. Метод оценки выраженности артефактов в цифровых моделях рельефа дна // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 5. С. 522–531. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-5-522-531.
14. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Bathymetric estimation, in Satellite Altimetry and Earth Sciences, Ch. 12, International Geophysics. 2001. V. 69. P. 441-457
15. Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.H.F., Braud J., Binder B., Depner J., Fabre D., Factor J., Ingalls S., Kim S.-H., Ladner R., Marks K., Nelson S., Pharaoh A., Sharman G., Trimmer R., Rosenburg J. von, Wallace G., and Weatherall P. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS // Marine Geodesy. 2009. V. 32. № 4. P. 355–371.
16. Marks K.M., Smith W.H.F., Sandwell D.T. Evolution of errors in the altimetric bathymetry models used by Google Earth and GEBCO // Mar. Geophys. Res. 2010. V. 31 (3). P. 223–238.
17. Зайончек А.В., Брекке Х., Соколов С.Ю., Мазарович А.О., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Кохан А.В., Мороз Е.А., Пейве А.А., Чамов Н.П., Ямпольский К.П. Строение зоны перехода континент–океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24, 25 и 26 рейсов НИС «Академик Николай Страхов», 2006-2009 гг.). Строение и история развития литосферы. Вклад России в Международный Полярный Год. М.: Paulsen, 2010. С. 111–157.
8. Sandwell D. T., Smith W.H.F. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. Journal of Geophysical Research. 1997, 102: 10039–10054.
9. Briggs I.C. Machine contouring using minimum curvature. Geophysics. 1974, 39: 39–48.
10. Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension. Geophysics. 1990, 55 (3): 293–305.
11. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. Science. 1997, 277: 1956–1962.
12. Abramova A.S. Types of artifacts in the publicly available digital bathymetry models in the Arctic. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2020, 64 (6): 642–652. [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-6-642-652.
13. Abramova A.S. Method of assessment of magnitude of artifacts in digital bathymetry models. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2020, 64 (5): 522–531. [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-5-522-531.
14. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Bathymetric estimation, in Satellite Altimetry and Earth Sciences, Ch. 12, International Geophysics. 2001, 69: 441–457.
15. Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.H.F., Braud J., Binder B., Depner J., Fabre D., Factor J., Ingalls S., Kim S.-H., Ladner R., Marks K., Nelson S., Pharaoh A., Sharman G., Trimmer R., Rosenburg J. von, Wallace G., Weatherall P. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS. Marine Geodesy. 2009, 32 (4): 355–371.
16. Marks K.M., Smith W.H.F., Sandwell D.T. Evolution of errors in the altimetric bathymetry models used by Google Earth and GEBCO. Mar. Geophys. Res. 2010, 31 (3): 223–238.
17. Zayonchek A.V., Brekke H., Sokolov S.Y., Mazarovich A.O., Dobrolyubova K.O., Efimov V.N., Abramova A.S., Zarayskaya Yu, Yampolsky K.P. *Stroenie zoni perehoda kontinent-ocean severo-zapadnogo obramlenia (po dannim 24, 25 i 26 rejsov NIS «Akademik Nikolaj Strakhov»*. Construction of the continental-ocean transition zone of the north-western frame of the Barents Sea (according to the data of 24, 25 and 26 flights of NIS "Academician Nikolai Strakhov", 2006-2009). Structure and history of lithosphere development. Russia's contribution to the International Polar Year. Moscow: Paulsen, 2010: 111–157. [In Russian].