

Метод оценки выраженности артефактов в цифровых батиметрических моделях дна

© 2020 г. А.С. Абрамова

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

Method of assessment of magnitude of artifacts in digital bathymetry models

A.S. Abramova

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

Received June 24, 2019

Revised September 15, 2020

Accepted October 5, 2020

Keywords: Arctic, artifact, digital bathymetry model, spline interpolation, GEBCO, Global Topography.

Summary. In order to estimate the magnitude of artifacts in digital bathymetry models the consistency was assessed for GEBCO_08 and Global Topography (GT) grids. The method to assess consistency involves assessment of depth variability in the vicinity of source depth data for two grids and comparison to the «true» variability. In the test area of Barents shelf the standard deviation (SD) of variability is smaller in GEBCO_08: 5.6 m and 1.6% of water depth (WD) than in GT: 18.9 m and 5.4% of WD. This gives a quantitative measure of the magnitude of the artifacts for the grids. The artifacts in bathymetry can be as deep (as shallow) as 141% of WD in GT grid and 107% of WD in GEBCO_08 grid. We find that GEBCO_08 bathymetry grid perform better than GT grids in terms of internal consistency due to better construction algorithm. GT grid have pronounced artifacts in the test area due the poor performance of gravity prediction in shelf areas and high latitudes and due to the gridding algorithm used: the original measured depths are restored into predicted bathymetry surface with smooth transition using spline in tension algorithm.

Citation: 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.

Поступила 24 июня 2019 г.

После доработки 15 сентября 2020 г.

Принята к печати 5 октября 2020 г.

Ключевые слова: Арктика, артефакт, сплайн с натяжением, цифровая батиметрическая модель, GEBCO, Global Topography

Разработан метод оценки выраженности артефактов в ЦМР морского дна, который включает в себя метод численной оценки согласованности значений глубин в ЦМР. Метод был апробирован на тестовом участке шельфа Баренцева моря. В результате ЦМР GEBCO_08 является более согласованной, чем ЦМР Global Topography на тестовом участке. Стандартное отклонение изменчивости рельефа в пределах выбранного окна в ЦМР GEBCO_08 составляет 5,6 м и 1,6% глубины воды (ГВ), в ЦМР Predicted Topography составляет 8,9 м и 5,4% ГВ. Абсолютный максимум выраженности артефактов в батиметрии ЦМР Predicted Topography достигает 141% ГВ и в ЦМР GEBCO_08–107% ГВ.

Для цитирования: Абрамова А.С. Метод оценки выраженности артефактов в цифровых батиметрических моделях дна // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 5. С. 522–531. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-5-522-531.

Введение

Подводный рельеф — основа для любых комплексных морских исследований и используется в качестве подложки для маршрутных и инженерных решений. Геоморфологические и геолого-геофизические исследования [1, 2], определение границы континентального шельфа [3–5], обеспечение безопасности навига-

ции, изучение морского биоразнообразия [6], прогнозирование оползней [7] и других природных опасностей, разведка минеральных и биологических ресурсов и другие океанографические и экономические изыскания проводятся по данным наиболее актуальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) морского дна.

Общедоступные глобальные и региональные батиметрические ЦМР, такие как, например, IBCAO [8], Global Topography [9], GEBCO [10], SRTM30_Plus [11] и др., представляют собой компиляцию из разнородных данных неоднородной плотности, покрытия и точности. Исходными данными для ЦМР служат данные многолучевого и однолучевого эхолотирования, оцифрованные глубины с разномасштабных навигационных карт и планшетов, в которых представлены точечные промеры и изобаты, а также результаты обработки данных спутниковой альтиметрии.

Неоднородность и разновозрастность источников измерений глубин влияют на качество ЦМР, а также на морфометрические характеристики, построенные по таким ЦМР [12, 13]. Для цифровых моделей рельефа дна особенно характерны ошибки моделирования — артефакты [14–16], связанные с компиляцией данных разного разрешения, наличием систематических ошибок в исходных данных, а также в связи с большими межгалсовыми пространствами, заполненными интерполяцией [17]. Точность использованного метода интерполяции в областях, где нет данных об измеренных глубинах, а также наличие артефактов определяют качество батиметрических ЦМР [15].

Автоматическая идентификация артефактов в ЦМР требует знания о покрытии исходными данными и типах исходных данных, по которым строится ЦМР. Также необходимо учитывать разрешающую способность исходных данных и пространственное разрешение ЦМР для отделения высокочастотного шума интерполятора [13]. Артефакты имеют разные размеры точно так же, как и реальные формы рельефа [14], в связи с этим сложно идентифицировать артефакт и оценить его масштабы.

Метод и данные

На примере шельфового участка Баренцева моря был разработан метод численной оценки выраженности артефактов в ЦМР морского дна. Для апробации метода использовались

ЦМР GEBCO_08 и Global Topography (GT). По методу заполнения пустот между измеренными данными глубин их можно разделить на ЦМР разных типов: GEBCO_08 основана исключительно на акустических данных, пробелы между измерениями глубин заполнены интерполяцией сплайном с натяжением; GT основана на акустических данных, комбинированных с «предсказанным» по гравитационным аномалиям рельефом. Используется сглаживание между значениями измеренных и «предсказанных» глубин также с помощью алгоритма сплайн с натяжением [9, 11].

Для оценки выраженности артефактов в ЦМР были введены следующие характеристики рельефа: *согласованность* (consistency [16]) и *изменчивость* (расчлененность, variability [16]) батиметрической поверхности. При этом *изменчивость* рельефа является численной характеристикой *согласованности*.

Шельф Баренцева моря характеризуется относительно простой морфологией рельефа. Выбранный район достаточно прост с точки зрения источников исходных данных, используемых для построения батиметрических ЦМР: для этого района доступны только данные однолучевых съемок, данные гидрографических промеров и оцифрованные изобаты. Сравнивая рельеф в ЦМР двух типов (рис. 1, а и рис. 2, а) легко визуально определить в какой из моделей рельеф является более *согласованным*. Батиметрия в модели GT (см. рис. 2, а) характеризуется наличием множества артефактов в районе исходных данных, в то время как батиметрия GEBCO_08 (см. рис. 1, а) выглядит более согласованной в районе исходных данных. Эти различия обусловлены различиями в методике построения двух типов ЦМР. В то же время ожидается, что рельеф в модели GT будет более согласованным в областях, где отсутствуют данные измеренных глубин, где значения в ЦМР основаны на дополнительной информации — данных гравитационного поля.

В результате применения фильтра обнаружения границ к батиметрическим цифровым

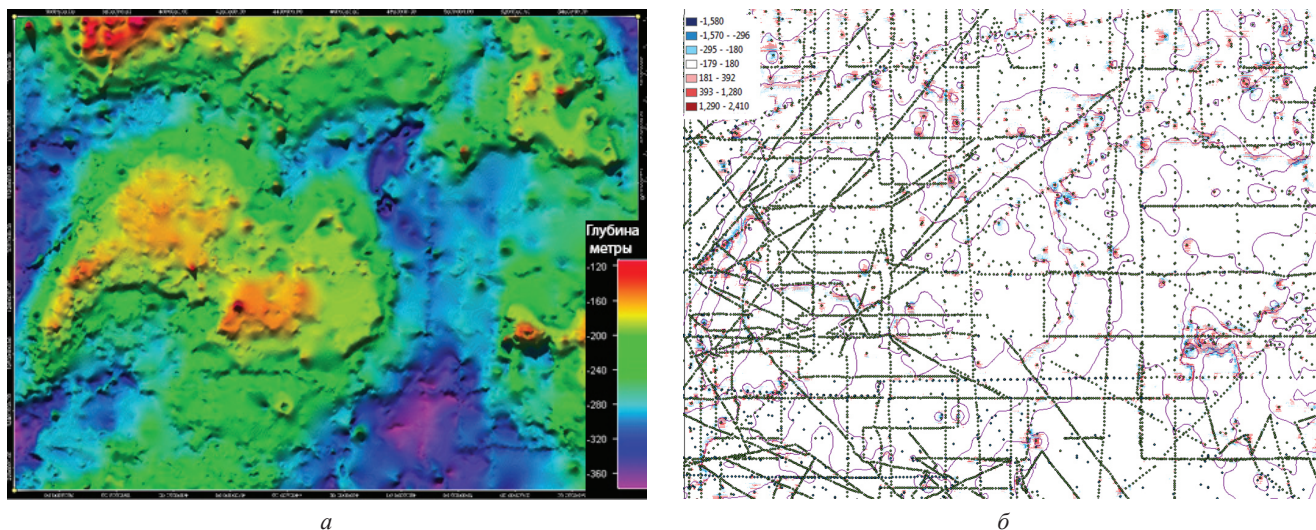


Рис. 1. ЦМР GEBCO_08:

a — рельеф в районе континентального шельфа; *б* — выделенные границы, полученные в результате применения фильтра обнаружения границ 7×7 пикселей к ЦМР. Поверх карты границ отображено местоположение исходных данных: точечные измерения (зеленым), исходные изобаты (фиолетовым)

Fig. 1. GEBCO_08:

a — bathymetry in grid for the continental shelf area; *б* — edge detection map produced by running 7×7 edge detection filter on the bathymetry. The map is overlaid by source soundings (green) and contours (violet)

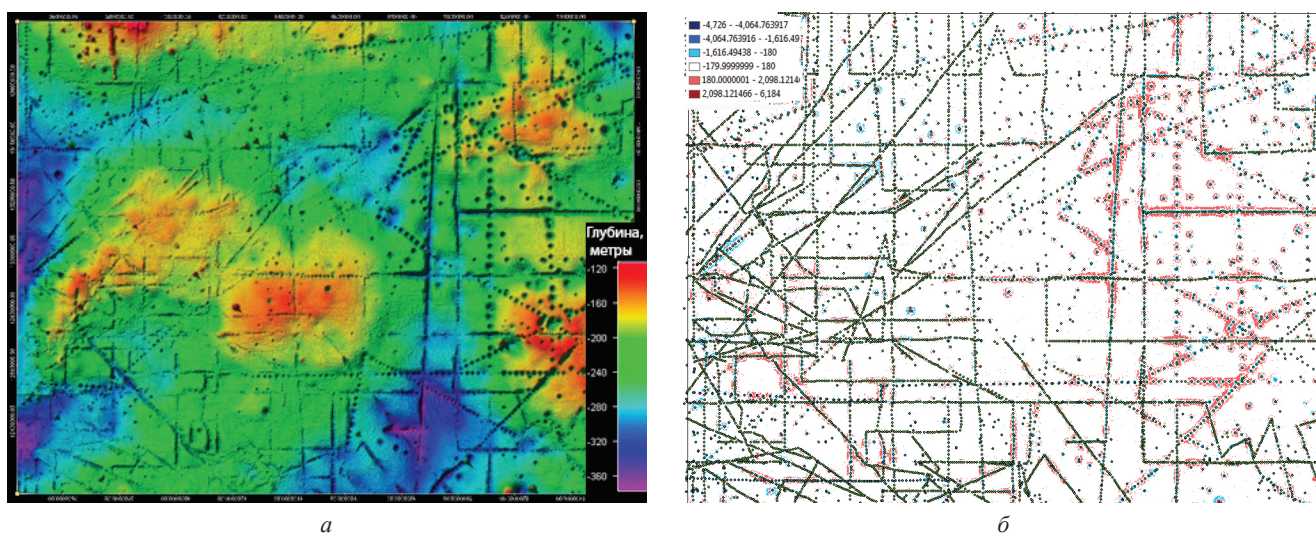


Рис. 2. ЦМР Global Topography:

a — рельеф в районе континентального шельфа; *б* — карта выделенных границ, полученная в результате применения фильтра обнаружения границ 7×7 пикселей к батиметрической цифровой модели. Поверх карты границ отображено местоположение исходных данных (зеленым)

Fig. 2. Global Topography:

a — bathymetry in grid for the continental shelf area; *б* — edge detection map produced by running 7×7 edge detection filter on the bathymetry. The map is overlaid by source data (green)

моделям GT и GEBCO_08 (рис. 1, *б*; и рис. 2, *б*), было обнаружено, что наибольшая *изменчивость* значений глубин в ЦМР наблюдается в районе исходных данных. Высокое значение границ коррелируется с местоположением исходных данных, особенно в областях, где значе-

ния глубин изобат не согласуются со значениями измеренных глубин. Установлено, что высокочастотные артефакты, как правило, ассоциируются с местоположением исходных данных [14, 16].

Метод численной оценки *согласованности* основан на сравнении *изменчивости* значе-

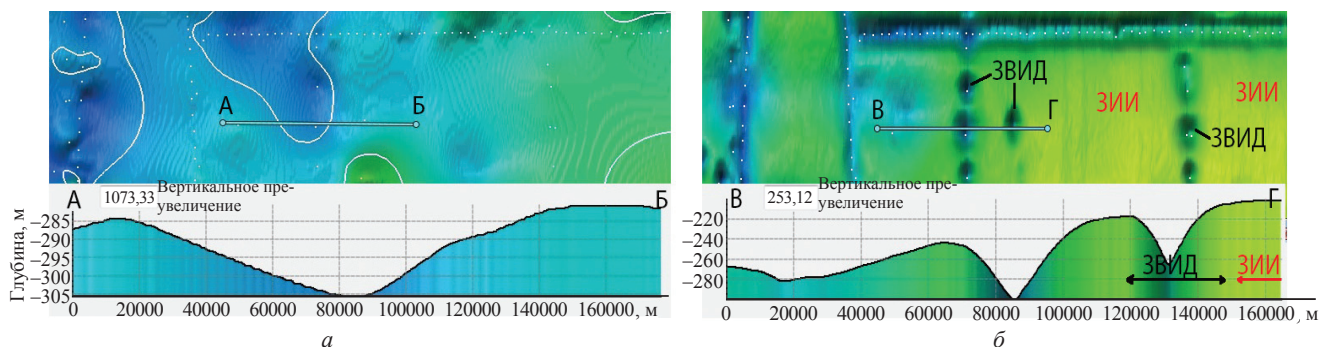


Рис. 3. Рельеф в ЦМР:

a — GEBCO_08; *б* — GT. Поверх батиметрии отображено местоположение исходных данных (белым) (см. текст)

Fig. 3. Bathymetry:

a — GEBCO_08; *б* — Global Topography. Bathymetry overlaid by input source soundings (white) (see text)

ний вокруг исходных данных для двух типов ЦМР со значением «истинной» изменчивости. Рис. 3 иллюстрирует морфологию, наблюдаемую в районе исходных данных для двух типов ЦМР. Как видно из рис. 3, поверхность рельефа более плавно проходит через исходные данные в ЦМР GEBCO_08 (см. рис. 3, *a*), по сравнению с ЦМР GT (см. рис. 3, *б*). Батиметрический профиль ВГ проведен в том же месте, что и профиль АБ. В ЦМР GEBCO_08 поверхность рельефа плавно проходит через исходные данные, в то время как ЦМР GT имеет «ямы» в местах расположения исходных данных.

Предполагается, что поверхность вокруг исходных данных будет согласованной до некоторой величины «истинной» изменчивости, и за пределами некоторого значения изменчивости станет несогласованной. Зонами влияния исходных данных (ЗВИД) называются области, в пределах которых значения глубин определяются значением исходных данных (см. рис. 3, *б*) и рис. 4. Зонами «истинной» изменчивости (ЗИИ) названы участки в ЦМР GT, где значения глубин основываются на «предсказанном» по гравитационным аномалиям рельефе (см. рис. 3, *б*, рис. 4). Метод предполагает допущение, что модельная поверхность рельефа, «предсказанного» по гравитационным аномалиям, отражает истинную характеристику изменчивости батиметрической поверхности.

На рис. 4 фиолетовым показаны ячейки, используемые для вычисления изменчивости

в ячейках исходных данных. Серым показаны ячейки, используемые для вычисления истинной изменчивости (ИИ). Желтые круги обозначают контур ЗВИД. Клетки вне желтого буфера используются для оценки ИИ. Если ячейки в окне, используемые для оценки ИИ, попадают в ЗВИД, они не используются в вычислении.

Для оценки согласованности рельефа в ЦМР GEBCO_08 и GT была использована следующая процедура (метод проиллюстрирован на рис. 4, расчеты выполнены в MATLAB).

1. Значение изменчивости рельефа вычисляется для каждой ячейки ЦМР, значение

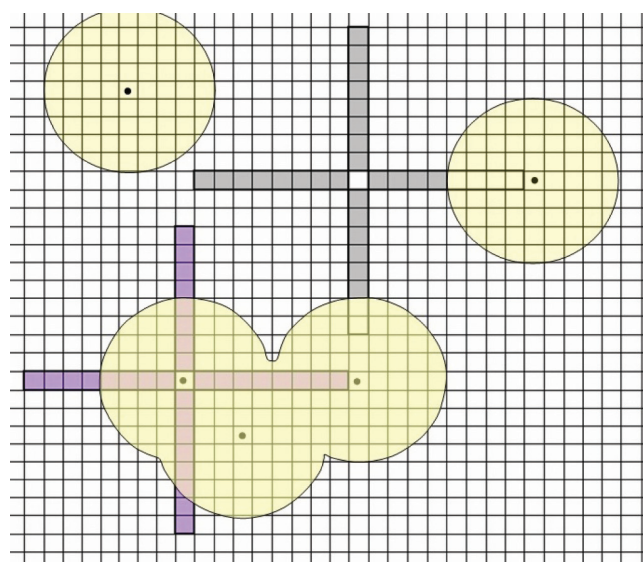


Рис. 4. Метод оценки изменчивости в местах расположения точек исходных данных (ячейки с черными точками) и снаружи, где оценивается ИИ (см. текст)

Fig. 4. Illustrates method of assessing variability at the location of source data points (cells with black dots) and outside, where the «true» variability is assumed (see text)

которой основано на исходных данных ($\Gamma_{исх}$) (ячейки с черными точками на рис. 4). За изменчивость принимается большее из двух значений разницы глубин между $\Gamma_{исх}$ и медианным значением глубины, рассчитанным по узкому окну X направления ($\Gamma_{медX}$), (без учета значения $\Gamma_{исх}$ в подсчете медианного значения) и между $\Gamma_{исх}$ и медианным значением глубины, рассчитанным по узкому окну Y направления ($\Gamma_{медY}$), (без учета значения $\Gamma_{исх}$ в подсчете медианного значения) (фиолетовые ячейки на рис. 4 указывают ячейки, использованные при расчете). Гистограмма распределения изменчивости глубин для ЦМР GEBCO_08 и GT приведена на рис. 5.

2. «Истинная» изменчивость вычисляется для каждой ячейки ЦМР Predicted Topography в пределах ЗИИ (серые ячейки на рис. 4). Ячейки, которые попадают в пределы ЗВИД, буферизируются и исключаются из вычисления (желтые ячейки на рис. 4). Значение изменчивости рассчитывается аналогично описанному в п.1: берется большее из двух значений изменчивости в пределах узкого окна в направлениях X и Y .

3. Изменчивость глубин для GEBCO_08 и GT сравнивается с «истинной» изменчивостью (см. рис. 5).

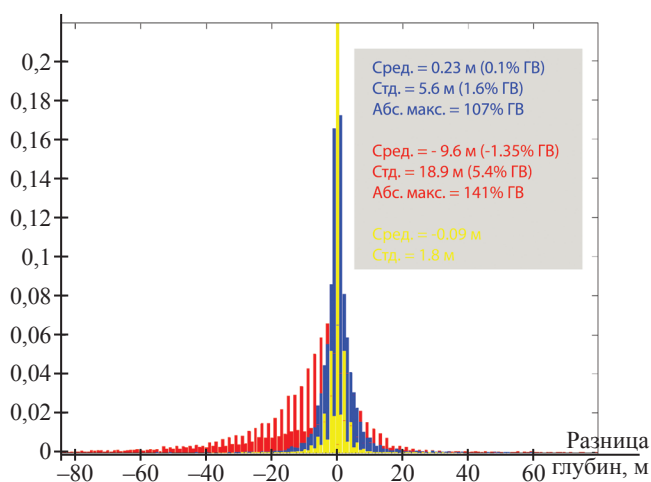


Рис. 5. Гистограмма распределения изменчивости глубин в ЦМР GEBCO_08 (синим), ЦМР GT (красным), гистограмма распределения «истинной» изменчивости (желтым)

Fig. 5. Histogram of normalized distribution and statistics of variability in meters within a specified window for GEBCO_08 (blue), GT (red) and «truth» (yellow)

Буферная зона ЗВИД должна отграничивать из вычисления все ячейки, значение глубин которых зависят от $\Gamma_{исх}$. Диаметр ЗВИД определяет размер артефакта в поперечном сечении, он зависит от типа исходных данных, который его характеризует. Для данного района и данного типа данных выбранный размер буфера ЗВИД был взят из анализа карты выделенных границ (см. рис. 1, 2). Максимальная ЗВИД была взята в 10 ячеек ЦМР.

Размер окна для вычисления изменчивости рельефа ($\Gamma_{медX}$ и $\Gamma_{медY}$) должен быть достаточно большим, чтобы захватить значения из области ЗИИ. Выбор размера окна определяется горизонтальным разрешением исходных данных в этой области. Известно, что в районах где нет многолучевых данных высокого разрешения, горизонтальное разрешение «предсказанного» по гравитационным аномалиям рельефа GT составляет 20–25 км [9]. Таким образом, в районах, где нет многолучевой съемки, формы рельефа в поперечном сечении меньше 12,5 км (половина длины волны) будут считаться артефактами. Для модели GEBCO_08 это утверждение неверно, если присутствуют данные однолучевой съемки, которые имеют более высокое горизонтальное разрешение.

С целью учета различий в физическом покрытии ячейками ЦМР в разных проекциях был выбран различный размер окна для оценки изменчивости в ЦМР GEBCO_08 и GT (рис. 6). На рис. 6 географическая проекция — сетка сферических трапеций с равным угловым шагом по широте и долготе, образуемая точками пересечения параллелей и меридианов. Для области исследования (75°N) одна ячейка географической сетки покрывает приблизительно две ячейки сетки Меркатора в направлении Y и покрывает приблизительно половину ячейки сетки Меркатора в направлении X .

Расстояние в 12,5 км соответствует приблизительно 25 ячейкам в ЦМР GT на широте 75° с.ш. (исследуемый район), поэтому для GT выбрано окно 1×25 по X и 25×1 по Y направлению. Окно, выбранное для оценки ЦМР GEBCO_08, составило 1×53 по X и 1×13 по Y направлению.

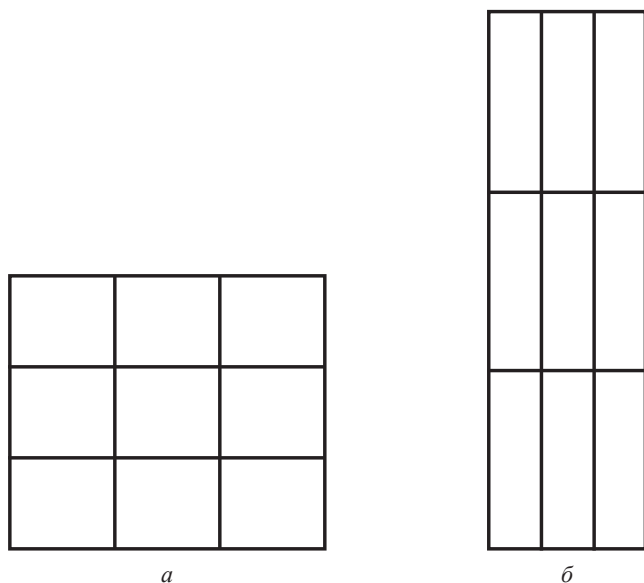


Рис. 5. Сравнение окна 3×3 для двух ЦМР:

a — ячейки сетки GT в проекции Меркатора; *b* — ячейки сетки GEBCO_08 в географической проекции

Fig. 5. Comparison of 3×3 window for two datasets:

a — GT grid cells in Mercator projection; *b* — GEBCO_08 grid cells in geographic coordinate system

Результаты

Распределение рассчитанной изменчивости рельефа и сравнение этой характеристики с «истинной» изменчивостью определяет согласованность анализируемых ЦМР и характеризует степень выраженности артефактов в районе континентального шельфа. На рис. 5 видно, что ЦМР GEBCO_08 характеризуется более узким графиком распределения изменчивости по сравнению с ЦМР GT и распределение близко к распределению истинной изменчивости. Для ЦМР GT распределение на много шире по сравнению с GEBCO_08 и наблюдается смещение в сторону отрицательных значений (со средним значением 1,35% глубины воды — ГВ), это означает, что значения глубин $\Gamma_{исх}$ в ЦМР GT чаще всего глубже, чем окружающие их значения глубин (см. рис. 2, *a*).

Наблюдаемые пики четных значений в распределении изменчивости GT вызваны тем, что значения глубин в ЦМР GT закодированы по типу исходных данных – четные значения глубин в ЦМР имеют ячейки, значения которых основаны на «предсказанном» рельефе, а нечетные значения глубин в ЦМР – ячейки,

значения которых основаны на измеренных глубинах $\Gamma_{исх}$. Изменчивость в каждой ячейке сетки GT вычисляется как разность между нечетным значением $\Gamma_{исх}$ и медианной по четному числу (24 ячейки) четных значений. Из гистограммы видно, что значение изменчивости в ЦМР GT является четным значением чаще, чем нечетным (см. рис. 5).

Статистическая оценка согласованности, проведенная для ЦМР каждого типа, показала, что ЦМР GEBCO_08 являются более согласованной, чем ЦМР GT в районе шельфа Баренцева моря. Стандартное отклонение изменчивости рельефа в пределах выбранного окна в GEBCO_08 меньше (5,6 м и 1,6% ГВ), чем в GT (18,9 м и 5,4% ГВ). Эти данные характеризуют степень выраженности артефактов для двух ЦМР.

Обсуждение результатов

ЦМР GEBCO_08 и GT имеют очень четкие различия, связанные с методом построения, а также с различием в источниках данных. Наиболее явное различие заключается в визуальном виде и внутренней согласованности ЦМР (см. рис. 1, 2). Рельеф в ЦМР GEBCO_08 визуально более согласованный по сравнению с ЦМР GT, в рельефе которого присутствуют очевидные артефакты. Эти артефакты не только нежелательны для визуализации, но и могут быть ошибочно восприняты неосведомленными пользователями как реальные формы рельефа.

Одна из причин артефактов в ЦМР GT — алгоритм построения регулярной сетки ЦМР. Артефакты вызваны используемым алгоритмом построения регулярной сетки: исходные значения глубин восстанавливаются в поверхность «предсказанного» рельефа, при этом разность между значениями исходных и «предсказанных» глубин в соседних ячейках сетки сглаживаются с использованием алгоритма сплайн с натяжением [9, 11]. Данная процедура направлена на сохранение значений измеренных глубин и сохранение разрешения в районах, где проводилась многолучевая съемка. В то же время в районах, где присутствуют

только данные однолучевой съемки и точечные измерения глубин, артефакты становятся выраженными в том случае если эти значения глубин не соответствуют «предсказанному» рельефу. Эти артефакты создают в батиметрии формы рельефа с длинами волн (в зонах отсутствия многолучевых данных), которые не представлены методом «предсказанного» рельефа с заявленным пространственным разрешением 20–160 км [18].

По результатам оценки внутренней согласованности рельефа, в рельефе ЦМР GT присутствуют частоты с пространственной длиной волны менее 12,5 км. При этом выраженность артефактов в ЦМР GT в шельфовых районах достигают 141% (абс. макс.) (см. рис. 5). Согласно Marks and Smith [19], «ошибки» в «предсказанном» рельефе не зависят от глубины воды и составляют 50 м в 50% случаев и 220 м в 90% случаев. Эти «ошибки» незначительны для глубоководных участков, но имеют решающее значение на мелководье.

Метод спутниковой альтиметрии для картографирования рельефа океана имеет несколько ограничений [20]. В районах с высокой мощностью осадочного чехла, особенно в районах арктического шельфа, точность инверсии, а следовательно, «предсказанных» глубин — ниже. Спутники, оснащённые альтиметрами, не обеспечивают покрытия центральной части Северного Ледовитого океана. Дополнительные ограничения для спутниковой альтиметрии создаёт постоянное ледовое покрытие полярных областей, что добавляет дополнительный шум в альтиметрические измерения [18, 21]. Согласно [21], максимальное пространственное разрешение моделей «предсказанного» рельефа в Арктике (к югу от 80° с.ш.) составляет 35 км. Эти ограничения следует учитывать при применении моделей, использующих «предсказанный» рельеф в Арктике. Выраженность артефактов показывает насколько хорошо «предсказанный» рельеф соответствует измеренным значениям глубины и визуально показывают, насколько надежна «предсказанная» батиметрия на шельфе.

Разработанный метод численной оценки выраженности артефактов в ЦМР морского дна был апробирован на участке с простым рельефом, а также с одним типом исходных данных. Помимо шельфа, метод будет удовлетворительно работать в районе абиссальной равнины и континентального склона, для которых также характерна простая морфология и относительно низкая изученность. В случае районов с высокой расчлененностью рельефа, таких как срединно-океанический хребет и наличием разных типов данных с разным горизонтальным разрешением (многолучевая и однолучевая съемка, отдельные промеры глубин) данный метод работать не будет. В районах со сплошной многолучевой съемкой будут присутствовать реальные высокочастотные формы рельефа, таким образом, районы съемок будут характеризовать истинную изменчивость рельефа с поправкой на наличие высокочастотных артефактов, характерных исключительно для многолучевой съемки.

Заключение

В работе представлен метод численной оценки выраженности артефактов, который включает в себя оценку согласованности и изменчивости рельефа в ЦМР. Метод был апробирован на участке шельфа Баренцева моря на ЦМР GEBCO_08 и GT. При помощи цифровой визуализации данных было установлено, что высокочастотные артефакты в ЦМР ассоциируются с местоположением исходных данных. Метод численной оценки согласованности основан на сравнении изменчивости значений вокруг исходных данных для двух типов ЦМР со значением «истинной» изменчивости.

Статистическая оценка согласованности, проведенная для ЦМР каждого типа, показала, что ЦМР GEBCO_08 более согласованна, чем ЦМР GT, в рельефе которой присутствуют очевидные артефакты. В результате стандартное отклонение значений изменчивости меньше в GEBCO_08: 5,6 м и 1,6% ГВ, чем в GT: 18,9 м и 5,4% ГВ. Это дает количественную оценку выраженности артефактов в цифровых

моделях: артефакты в батиметрии могут достигать 141% ГВ в модели GT и 107% ГВ в модели GEBCO_08.

Таким образом, модель GEBCO_08 более согласованная, чем модель GT, по причине лучшего алгоритма построения. Для модели GT на тестовом районе характерны ярко выраженные артефакты из-за ограничений метода «предсказанного» рельефа в шельфовых районах и высоких широтах, а также из-за используемого алгоритма сетки: исходные значения глубин восстанавливаются в поверхность «предсказанного» рельефа, при этом разность между значениями исходных и «предсказанных» глубин в соседних ячейках сетки сглаживаются с использованием алгоритма сплайн с натяжением.

Разработанный метод численной оценки выраженности артефактов удовлетворительно работает в районах с простой морфологией, таких как шельф, абиссальная равнина и континентальный склон. В случае районов с высокой расчлененностью рельефа и наличием разных типов данных с разным горизонтальным разрешением метод работать не будет.

Благодарности. Автор выражает благодарность коллегам лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов ГИН РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз Е.А., Мазарович А.О., Абрамова А.С., Ефимов В.Н., Зарайская Ю.А., Соколов С.Ю. Неотектоника северо-запада Баренцева моря // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып 2. М.: ГЕОС. 2010. С. 161–173.
2. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О., Добролюбова К.О. Современная тектоническая обстановка северной части хребта Книповича, Атлантика // Геотектоника. 2014. № 3. С. 16–29.
3. Нарышкин Г.Д., Фридман Б.С., Алексеев С.П., Костенич А.В. Решение проблемы делимитации Арктического бассейна по результатам гидрографических исследований // Арктика: экология и экономика. 2011. №3. С.36–47.
4. Фирсов Ю.Г. Современная батиметрическая съемка Северного Ледовитого океана в контексте определения внешних границ континентального шельфа в Арктике // Вестник государственного университета морского и

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 так же 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 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. Moroz E.A., Mazarovich A.O., Abramova A.S., Efimov V.N., Zarayskaya Yu.A., Sokolov S.Yu. Neotectonics of the northwest Barents Sea. *Geology and geoecology kontinentalnih okrain Evrazii*. 2010, 2:161–173. [In Russian].
2. Sokolov S.Yu., Abramova A.S., Zaraiskaya Yu.A., Mazarovich A.O., Dobrolyubov, K.O. Modern tectonic situation of the northern part of the Knipovich Ridge, Atlantic. *Geotectonics*. 2014, 3: 16–29. [In Russian].
3. Naryshkin G.D., Friedman B.S., Alekseev S.P., Kostenich A.V. Solution of the Arctic basin delimitation problem based on the hydrographic research results. *Arctic: Ecology and Economics*. 2011, 3: 36–47. [In Russian].
4. Firsov Yu.G. Modern bathymetric survey of the Arctic Ocean in the context of determination of the continental shelf outer limits in Arctic. *Vestnik of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and River Navy*. 2016, 6 (40):

речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. №6 (40). С. 1–15.

5. Фридман Б. База батиметрических данных для определения ВГКШ России в Арктике // Геоинформатика. 2007. № 1. С. 15–22.

6. Abramova A.S., Zarayskaya Y.A., Kiseleva E.A., Vodopyanov S.S., Makushkina A.I., Sokolov S.Y. Marine seabed landscape analyses based on hydroacoustic data, underwater video recordings and bottom sampling in the southern part of the Barents sea using GIS database // Proceedings of the 7th International Conference on Cartography & GIS, 18–23 June 2018, Sozopol, Bulgaria. V. 1. Sofia: Bulgarian Cartographic Association. 2018. P. 148–157.

7. Мазарович А.О., Мороз Е.А., Турко Н.Н., Зарайская Ю.А., Добролюбова К.О. Оползневые процессы в рифовых зонах северной Атлантики // Срединно-океанические хребты: новые данные о геологическом строении, рудоносности и экологии гидротермальных систем. XI рабочее совещание проекта Russian Ridge 2019. 3–4 июня. М.: ГЕОХИ РАН. С. 36–38.

8. Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., Hodnesdal H., Noormets R., Pedersen R., Rebecco 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., and Weatherall P. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // Geophysical Research Letters. 2012. V.39. P.1.

9. Smith W. H. F. and Sandwell D. T. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings // Science. 1997. V. 277. P. 1956–1962.

10. Электронный ресурс: http://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/ 2008.

11. 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.

12. Lecours V., Dolan M.J., Micallef A., Lucieer V.L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor // Hydrology and Earth System Sciences. 2016. V. 20. P. 3207–3244.

13. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: Дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. Пушино: ИМПБ РАН, 2010. 267 с.

14. Abramova A. Artifacts in the Arctic digital bathymetry models, Theory and methods of Polar Science // Proceedings of international youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. St.

1–15. [In Russian].

5. Friedman B. Bathymetric data base for Russian outer continental shelf limit definition in the Arctic. *Geoinformatica*. 2007, 1: 15–22. [In Russian].

6. Abramova A.S., Zarayskaya Y.A., Kiseleva E.A., Vodopyanov S.S., Makushkina A.I., Sokolov S.Y. Marine seabed landscape analyses based on hydroacoustic data, underwater video recordings and bottom sampling in the southern part of the Barents sea using GIS database. Proceedings of the 7th International Conference on Cartography & GIS, 18–23 June 2018, Sozopol, Bulgaria. Sofia: Bulgarian Cartographic Association. 2018, 1: 148–157.

7. Mazarovich A.O., Moroz E.A., Turko N.N., Zarayskaya Yu.A., Dobrolyubova K.O. Landslide processes in the rift zones of the North Atlantic. *Mid-oceanic ridges: new data on the geological structure, ore-bearing capacity and ecology of the hydrothermal systems. XI workshop of the Russian Ridge 2019 project. 3-4 June*. Moscow: GEOKHI RAS, 2019: 36–38. [In Russian].

8. Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., Hodnesdal H., Noormets R., Pedersen R., Rebecco 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.

9. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*. 1997, 277: 1956–1962.

10. URL: http://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/ 2008.

11. 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, 32 (4): 355–371.

12. Lecours V., Dolan M.J., Micallef A., Lucieer V.L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016, 20: 3207–3244.

13. Florinsky I.V. *Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya rel'efa*. Theory and Applications of Mathematical Cartographic Modelling of Topography. PhD. Institute of Mathematical Problems of Biology, Russian Academy of Sciences, Pushchino. 2010: 267 p. [In Russian].

14. Abramova A. Artifacts in the Arctic digital bathymetry models, Theory and methods of Polar Science. Proceedings of international youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics. St.

Petersburg, Russia, 17–19 May 2018. P.1–10.

15. *Abramova A., Monahan D., Mayer L.A., Lippmann T.C., Calder B.R.* Quality assessment of GEBCO_08, Smith and Sandwell and SRTM30_Plus grids in the Arctic // American Geophysical Union 2012 Fall Meeting, San Francisco, 3–7 Dec. 2012.

16. *Abramova A.S.* Comparison and evaluation of global publicly available bathymetry grids in the Arctic. M.S. Thesis, Ann Arbor: ProQuest/UMI. 2012. 173 p.

17. *Hell B., Jakobsson M.* Gridding heterogeneous bathymetric data sets with stacked continuous curvature splines in tension // *Marine Geophysical Research*. 2011. 32 (4). P. 493–501.

18. *Smith W.H.F., Sandwell, D.T.* Bathymetric estimation // *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. Ch. 12. International Geophysics. 2001. 69. P. 441–457.

19. *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.

20. *Hell B.* Towards the compilation of a new Digital Bathymetric Model of the North Atlantic Ocean. M.S. thesis. 2011. 21 p.

21. *McAdoo D.C., Farrell S.L., Laxon S.W., Zwally H.J., Yi D., Ridout A.L.* Arctic Ocean gravity field derived from ICESat and ERS-2 altimetry: Tectonic implications // *Journal of Geophysical Research*. 2008. 113 (B05408). P. 1–12.

Petersburg, Russia, 17–19 May. 2018:1–10.

15. *Abramova A., Monahan D., Mayer L.A., Lippmann T.C., Calder B.R.* Quality assessment of GEBCO_08, Smith and Sandwell and SRTM30_Plus grids in the Arctic. American Geophysical Union 2012 Fall Meeting, San Francisco, 3–7 Dec. 2012.

16. *Abramova A.S.* Comparison and evaluation of global publicly available bathymetry grids in the Arctic. M.S. Thesis, Ann Arbor: ProQuest/UMI. 2012: 173 p.

17. *Hell B., Jakobsson M.* Gridding heterogeneous bathymetric data sets with stacked continuous curvature splines in tension. *Marine Geophysical Research*. 2011. 32 (4): 493–501.

18. *Smit W.H.F., Sandwell D.T.* Bathymetric estimation. *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. Ch. 12. International Geophysics. 2001. 69: 441–457.

19. *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.

20. *Hell B.* Towards the compilation of a new Digital Bathymetric Model of the North Atlantic Ocean. M.S. thesis. 2011: 21 p.

21. *McAdoo D.C., Farrell S.L., Laxon S.W., Zwally H.J., Yi D., Ridout A.L.* Arctic Ocean gravity field derived from ICESat and ERS-2 altimetry: Tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*. 2008, 113 (B05408): 1–12.