АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-6-642-652

Типы артефактов в цифровых моделях рельефа дна (на примере Арктического бассейна)

© 2020 г. А.С. Абрамова

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

Types of artifacts in digital bottom relief models (example of Arctic basin)

A.S. Abramova

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

Received May 14, 2020

Revised November 10, 2020

Accepted Desember 1, 2020

Keywords: Arctic, artifact, GEBCO, Global Topography, IBCAO, SRTM30_Plus.

Summary. The classification of types of artifacts encountered in digital bathymetry of IBCAO, GEBCO grid, SRTM30_Plus and Global Topography is given. All of the above-listed products represent shape of the Arctic seafloor and are publicly available through the internet. The artifacts observed could mislead geological interpretations; therefore it is necessary to emphasize the limitations of the portrayal of the seabed by digital bathymetry models. Any digital bathymetry model is a compilation of various data sources with different accuracies, resolution and distribution. Artifacts in the bathymetry grids are characterized by presence, distribution and spatial resolution of the source data. They can be caused by systematic errors in the source data, differences in source data horizontal resolution, the lack of source data and interpolation method (e.g. filling data gaps with predicted bathymetry, spline interpolation). The encountered artifacts were classified according to the factors which characterize them: multibeam data, singlebeam data, single spot sounding, gravity data, depth contours digitized from contour maps, "patching" different data sources, coastline dataset used for gridding, as well as the lack of any data. The observed artificial "morphology" in bathymetry grids include small and large scale artificial features: ridges and troughs, peak-like or pit-like features, flat areas, deeps and rises, artificial steps, terracing on slopes and negative depth values on land.

Citation: Abramova A.S. Types of artifacts in digital bottom relief models (example of Arctic basin). Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2020, 64 (6): 642–652. [In Russian]. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-6-642-652.

Поступила 14 мая 2020 г.

После доработки 10 ноября 2020 г.

Принята к печати 1 декабря 2020 г.

Ключевые слова: Арктика, артефакт, GEBCO, Global Topography, IBCAO, SRTM30_Plus,

Представлена классификация типичных артефактов для цифровых моделе рельефа (ЦМР) морского дна на примере анализа рельефа дна в моделях IBCAO, GEBCO, SRTM30_Plus и Global Topography. Наблюдаемые артефакты имеют морфологию, схожую с реальными формами рельефа на разных масштабных уровнях. Выявлено, что артефакты вызваны систематическими ошибками в исходных данных, различиями в горизонтальном разрешении исходных данных, отсутствием исходных данных, алгоритмом построения регулярных сеток и методов интерполяции (заполнение пробелов данных предсказанным рельефом, интерполяция сплайном). Артефакты были классифицированы в соответствии с факторами, которые их характеризуют: данные многолучевой съемки, однолучевой съемки, точечные промеры глубин, гравитационные данные, оцифрованные изобаты, метод «склеивания» разных источников данных, точность береговой линии, используемый для построения модели, краевые эффекты, а также ошибки интерполяции в районе отсутствия каких-либо данных.

Для цитирования: *Абрамова А.С.* Типы артефактов в цифровых моделях рельефа дна (на примере Арктического бассейна) // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т. 64. № 6. С. 642–652. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-6-642-652.

Введение

Батиметрические цифровые модели рельефа (ЦМР) дна служат основой для составления батиметрических карт и используются в морских фундаментальных исследованиях, а также служат основой для решения инженерных задач. Морфология дна океана в значительной степени отражает основные геологические процессы. На сегодняшний момент рельеф Луны и Марса известен намного детальнее, чем рельеф дна большей части океана. По оценке [1] 80% дна Мирового океана не откартографировано акустическими методами до разрешения в 1 км. Наиболее авторитетная ЦМР дна Арктического бассейна IBCAO [2] только на 11% основана на данных детальных высокоточных съемок многолучевым эхолотом.

Для составления согласованных, охватывающих весь Мировой океан, ЦМР дна привлекается база данных из разнородных источников. Исходными данными, по которым строятся ЦМР дна, являются результаты гидрографических съемок многолучевыми и однолучевыми эхолотами с надводных и подводных носителей, локальные детальные ЦМР, разномасштабные оцифрованные навигационные и батиметрические карты и планшеты, в которых представлены точечные промеры и изобаты, а также результаты обработки данных спутниковой альтиметрии. Ярко выраженная нерегулярность и неравномерная плотность сетки исходных измерений различной точности и разрешения, по которым строятся батиметрические ЦМР, не обеспечивают необходимую точность для большинства морских приложений, а также влияют на качество ЦМР [3].

В настоящую эру высоких технологий, математико-картографического моделирования и возможности моментального обмена большими объемами информации расширился круг пользователей ЦМР дна. Ярким примером цифровой визуализации данных служит использование виртуальных глобусов, таких как Планета Земля (Google Earth) с подложкой рельефа дна мирового Океана (Google Ocean). Данный инструмент широко используется для

принятия маршрутных решений во время экспедиций и в научно-популярных и образовательных пелях.

Важнейшими факторами, определяющими качество батиметрических ЦМР, являются точность интерполяции в районах отсутствия данных об измеренных глубинах, а также наличие артефактов, которые значительно снижают качество ЦМР и оказывают влияние на расчеты морфометрических характеристик [4–6]. Для ЦМР морского дна особенно характерны артефакты, в связи с недостатком покрытия батиметрическими данными и особенно большими межгалсовыми пространствами [5]. Значительное ограничение в распределении и наличии исходных данных, в особенности в Арктических регионах, оставляет вопрос о качестве ЦМР всегда актуальным.

Постановка проблемы

По определению [7], артефакт — несуществующие аномалии в цифровой модели рельефа, которые обусловлены ошибками в исходных данных либо внедрены в модельную поверхность в результате алгоритма построения регулярной сетки модели. Артефакты характерны для любой ЦМР, но в зависимости от алгоритма моделирования они выражены больше или меньше. Для многих приложений абсолютная точность модели не так важна, как согласованность в относительном изменении значений. Точность подсчета математических операций над окрестными значениями в ЦМР, таких как уклоны и экспозиция склонов и другие локальные производные, будет зависеть от наличия артефактов [3, 4]. Таким образом, артефакты значительно снижают качество моделей, влияют на качество морфометрических характеристик, построенных по ним, а также артефакты часто можно ошибочно интерпретировать как реальные формы рельефа, которые по масштабу и внешнему виду очень с ними схожи.

Все рабочие группы, вовлеченные в цифровое батиметрическое моделирование, изучают оптимальные методы построения регу-

лярной сетки батиметрических данных, при которых минимизируются артефакты, вызванные интерполяцией в районах недостатка и нерегулярности исходных данных [2, 5, 8, 9]. Существует большое количество исследований по устранению артефактов, характерных для конкретных типов данных, например, для данных многолучевых сонаров [6, 10]. В работе [8] рассмотрены основные проблемы составления регулярной сетки ЦМР на основе изобат и выявлены ошибки в ЦМР, вызванные систематическими ошибками в обработке исходных данных однолучевых съемок. В работе [11] рассмотрены ошибки в шести общедоступных глобальных батиметрических ЦМР, такие как некоторые артефакты интерполяции: эффект террасирования на склонах, видимые следы данных эхолотирования на фоне более сглаженного «предсказанного рельефа», эффект сшивания данных из разных источников и ошибки регистрации. Между тем не хватает систематического обзора типов артефактов, которые характерны для батиметрических ЦМР.

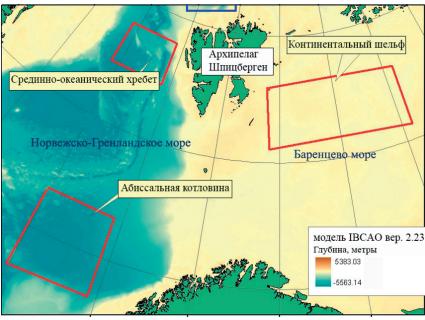


Рис. 1. Район исследования и местоположение полигонов исследования в разных морфологических провинциях на наличие артефактов в ЦМР

Fig. 1. Study area and location of three regions which represent tree morphological provinces used for inspection for the presence of artifacts in the bathymetry grids

Методика исследований

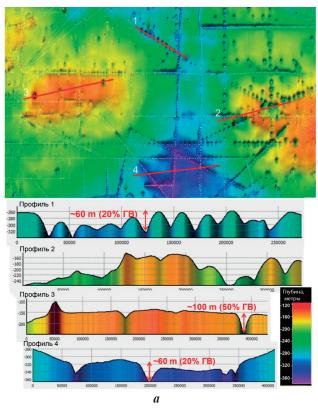
На примере четырех ЦМР IBCAO 2.23 [12], GEBCO_08 [13], Global Topography 13.1 [9], SRTM30_Plus 6.0 [14] представлена классификация типичных артефактов для ЦМР подводного рельефа. Необходимо отметить сходство рельефа в ЦМР IBCAO и GEBCO_08, а также в ЦМР Global Topography (GT) и SRTM30_Plus 6.0. Сходство вызвано единой базой данных и сходством методики построения. В связи с этим модели разделены на два типа.

- 1. Tun A. ЦМР, основанные исключительно на акустических данных: IBCAO, GEBCO_08 севернее 64° с.ш. ЦМР типа А построены на базе данных IBCAO в разных картографических проекциях с различным разрешением. Пробелы между измерениями глубин заполнены интерполяцией сплайном (с заполнением пробелов измерений оцифрованными изобатами).
- 2. *Тип Б*. Модели, основанные на акустических данных, комбинированных с «предсказанным» по гравитационным аномалиям рельефом: Global Topography и SRTM30_Plus. ЦМР типа Б имеют единую базу данных и по-

строены в разных картографических проекциях с различным разрешением.

ЦМР были визуально исследованы на предмет наличия артефактов в районе трех морфологических типов рельефа: континентальный шельф, абиссальная котловина, район срединно-океанического хребта (рис. 1). Разделение на морфологические типы обусловлено разной степенью изученности, разным типом исходных данных, разной степенью расчлененности картографируемого рельефа и корреляции между рельефом и гравитационным полем.

На континентальном шельфе (см. рис. 1) исходными данными для построения ЦМР дна в основном являются данные



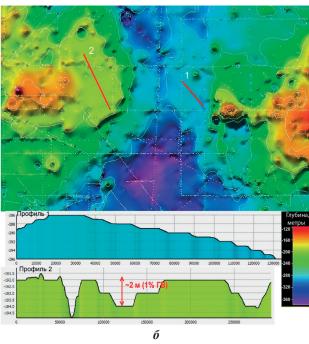


Рис. 2. 3D-рельеф в ЦМР в районе континентального шельфа (отмывка при косом освещении). Используется вертикальное преувеличение рельефа; точками на карте обозначено покрытие исходными данными: a — GT (вер.13.1); δ — GEBCO 08 (вер. 20091120)

Fig. 2. 3D shaded relief in the continental region. Vertical exaggeration is used, bathymetry is overlaid by source tracklines (white dots):

а — GT (v.13.1); б — GEBCO_08 (v. 20091120)

однолучевой съемки и точечные данные национальных гидрографических промеров. Пример покрытия исходными акустическими данными на шельфе отображен на рис. 2. Для континентального шельфа в целом характерна низкая степень корреляции между рельефом и гравитационным полем по причине модельных допущений о плотности коры переходного типа (между континентальной и океанической), плотность которой не известна на шельфе. Высокая мощность осадков на шельфе добавляет нелинейную корреляцию между рельефом и гравитационным полем [9].

На абиссальной котловине (см. рис. 1) исходными данными для построения ЦМР дна в основном являются данные однолучевой съемки и редкие галсовые проходы многолучевой съемкой. Пример покрытия исходными акустическими данными отображен на рис. 3–5.

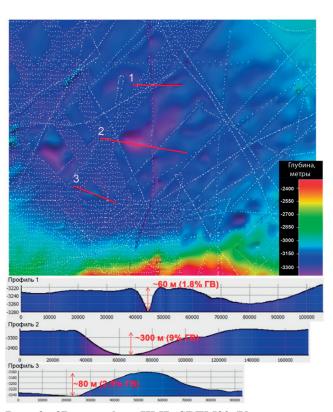


Рис. 3. 3D-рельеф в ЦМР SRTM30_Plus в районе абиссальной котловины. Используется отмывка при косом освещении и вертикальное преувеличение рельефа, точками обозначено покрытие исходными данными (см. текст)

Fig. 3. 3D shaded relief GT bathymetry in region of abyssal plain overlaid by source tracklines (white dots). Vertical exaggeration is used (see text)

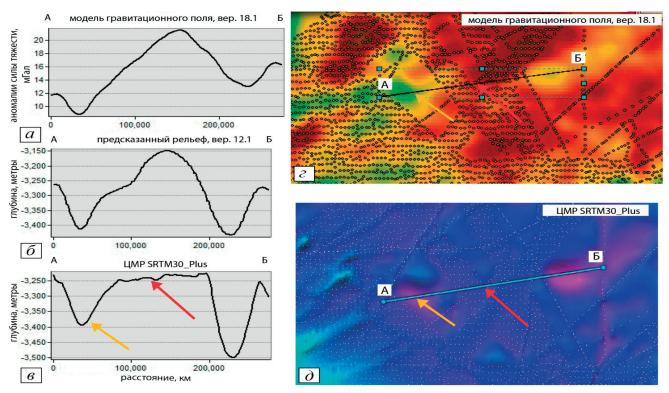


Рис. 4. Искусственные впадины и поднятия в районах, где нет линейной корреляции между рельефом (д) и гравитационным полем (г) в модели SRTM30_Plus (вер. 6.0) (см. текст)

Fig. 4. Illustrates area where no correlation between gravity (2) and bathymetry (0) is observed (see text)

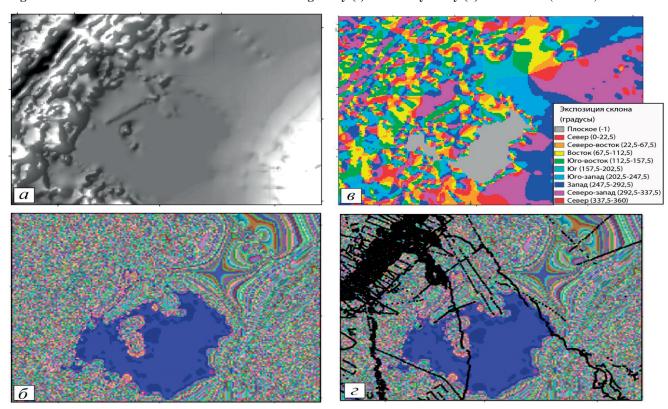


Рис. 5. Пример искусственной равнины (синяя форма) и искусственных звездоподобных форм в районе нехватки исходых данных в ЦМР IBCAO (см. текст)

Fig. 5. Example of artificial plain and artificial star like feature in the IBCAO bathymetry (see text)

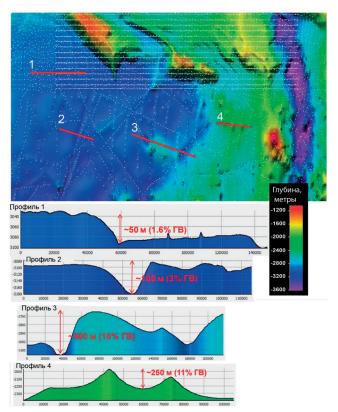


Рис. 6. 3D-рельеф в ЦМР GT (вер. 13.1) в районе срединно-океанического хребта (отмывка при косом освещении). Используется вертикальное преувеличение рельефа, точками на карте обозначено покрытие исходными данными (см. текст)

Fig. 6. 3D shaded relief GT bathymetry in the region of mid-oceanic ridge. Vertical exaggeration is used, bathymetry is overlaid by source tracklines (white dots) (see text)

Для этой морфологической провинции в целом характерна низкая степень корреляции между рельефом и гравитационным полем по причине высокой мощности осадков.

Ha срединно-океаническом хребте (COX) (см. рис. 1) исходными данными для построения ЦМР дна являются полигональные съемки многолучевым эхолотом, в сочетании с проходами однолучевым эхолотом и точечными данными национальных гидрографических промеров. Пример покрытия исходными акустическими данными отображен на рис. 6. Для СОХ в целом характерна высокая степень корреляции между рельефом и гравитационным полем по причине низкой мощности осадочного чехла (в зависимости от местных геологических условий).

Результаты

Для визуального анализа подводного рельефа в ЦМР были использованы методы пространственной визуализации: просмотр информации о покрытии исходными данными и типами исходных данных, используемых для построения ЦМР, трехмерная (3D) визуализация подводного рельефа, аналитическая отмывка рельефа при косом освещении, вертикальное преувеличение рельефа, использование шкал рельефа с различными интервалами, построение профилей через характерные формы рельефа, расчет морфометрических характеристик. В результате визуального анализа наблюдаемые в рельефе артефакты были классифицированы в соответствии с факторами, которые их вызывают. В таблице приведена полная классификация типичных артефактов для ЦМР морского дна, с описанием характерной морфологии артефактов, иллюстрацией артефакта, а также типа ЦМР, в котором данный артефакт наблюдается.

На рис. 7 представлен подводный рельеф, построенный на основе анализируемых ЦМР. Можно выделить артефакты, характерные для любых типов морских ЦМР, а также артефакты, которые характерны для определенного типа (см. таблицу).

Наиболее характерными артефактами для ЦМР морского дна являются линейные артефакты галсовых промеров, вызванные данными однолучевого и многолучевого эхолота. В особенности они выделяются в ЦМР типа Б, в связи с особенностью построения ЦМР этого типа: измеренные данные глубин восстанавливаются в поверхность предсказанной батиметрии. Линейные артефакты проиллюстрированы на рис. 3 и 6. По морфологии они напоминают искусственные хребты (см. рис. 6, проф. 3, 4) и троги (см. рис. 6, проф. 2, рис. 3, проф. 1, рис. 2, а, проф. 4). Они наблюдаются явно вдоль галсов судовых съемок и легко идентифицируются при наложении на карту рельефа местоположения исходных данных. В случае, когда исходными данными служат единичные промеры глубин, наблюдаются

Классификация типичных для батиметрических ЦМР артефактов

Факторы, вызывающие артефакты	«Морфология» артефакта	Иллюстрация артефакта	Тип ЦМР, в которой наблюда- ется артефакт
Данные многолучевого эхолота	Высокочастотные формы рельефа	Рис. 6, профиль 1	АиБ
Данные однолучевого эхолота	Линейные артефакты — искус- ственные хребты и троги	Рис. 6, профиль 2, 3, 4, рис. 3, профиль 1	АиБ
Точечные промеры глубин	Искусственные холмы и впадины	Рис. 2, а, профиль 1, 2, 3, 4	АиБ
Изобаты	Террасированность склонов или несуществующие формы рельефа, в районах, где значения глубин по изобатам не совпадает с окружающими значениями	Рис. 2, б	A
Ошибки интерполяции в районах отсутствия акустических данных	Искусственные равнины либо впа- дины и звездоподобные формы	Рис. 5	A
Отсутствие акустических данных в моделях, которые используют «предсказанный рельеф»	Искусственные впадины и поднятия в районах, где нет линейной корреляции между рельефом и гравитационным полем	Рис. 3, профиль 2,3, рис. 4	Б
Высокочастотный шум в «пред- сказанном рельефе»	Эффект «апельсиновой корки» (orange peel) [11]	Рис. 7 (красный овал)	Б
Краевые эффекты по границе склеивания ЦМР разной точности и разрешения	Искусственные ступени, полосовые артефакты	Рис. 7 (красная стрелка), рис. 6, профиль 1	АиБ
Точность отображения береговой линии	Отрицательные значения высот на суше, искусственные острова	Рис. 7 (оранжевая стрелка), рис. 8, 9	АиБ

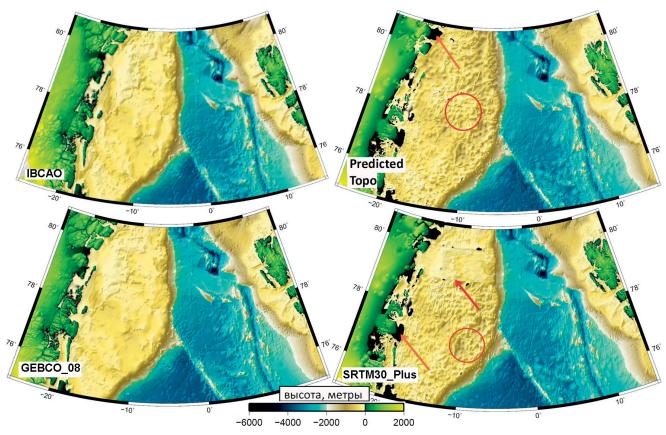


Рис. 7. Сравнение подводного рельефа, построенного на основе четырех анализируемых ЦМР

Fig. 7. Comparison of shaded topography of analysed bathymetry DTMs

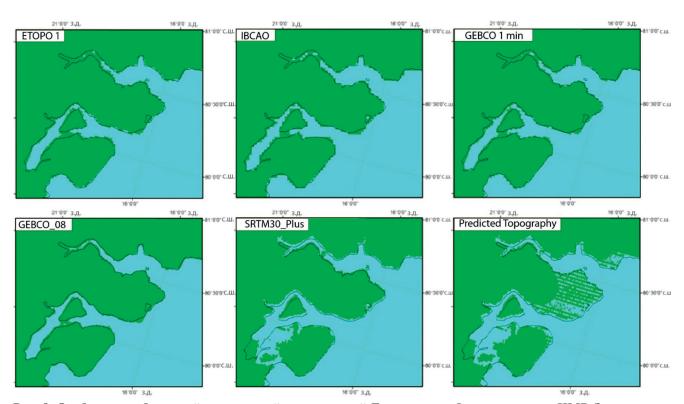


Рис. 8. Отображение береговой линии в районе восточной Гренландии общедоступными ЦМР. Зеленым показаны значения высот выше нуля, голубым — ниже нуля. Отображена береговая линия GEBCO

Fig. 8. Comparison of how well bathymetry grids resolve coastline in the Greenland region on a relatively large scale. The gridded bathymetry is overlain by the GEBCO shoreline

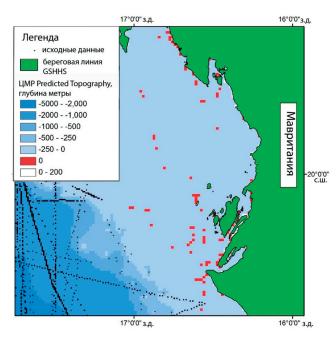


Рис. 9. Пример присутствия нулевых значений в ЦМР Predicted Topography. Данные значения должны находиться вдоль береговой линии, однако, наблюдаются случайные «острова».

Fig. 9. Example of presence of zero values in the bathymetry of Predicted Topography

искусственные холмы и впадины. Особенно они выражены в ЦМР типа Б в районах, где значения точечных промеров глубин и однолучевой съемкой не совпадает с предсказанным рельефом (см. рис. 2, a).

Отдельно необходимо уделить внимание артефактам, связанным с данными многолучевых съемок: это высокочастотные артефакты (см. рис. 6, проф. 1), вызванные ошибками калибровки эхолота, а также ошибками преломления боковых лучей [6, 10].

Для ЦМР типа А характерен известный эффект террас, в связи с построением рельефа по изобатам. Пример такого артефакта приведен на рис. 2, δ . Еще несколько типов артефактов, характерных для ЦМР типа А, проиллюстрировано на рис. 5. Синий многоугольник обозначает местоположение района абиссальной котловины. На рис. 5, a, δ показан рельеф в ЦМР IBCAO. На рис. 5, δ каждое значение глубины показано случайным цветом, чтобы подчеркнуть артефакты. В районах с сильной

нехваткой данных (покрытие исходными данными отображено на рис. 5, ε) наблюдается искусственная равнина (синий цвет на рис. 5, δ) и звездоподобные формы рельефа. Карта экспозиции склонов (см. рис. 5, θ) подчеркивает звездоподобный и плоский артефакт.

К артефактам, которые характерны для обоих типов ЦМР, относятся ступени в рельефе (см. рис. 6 проф. 1), полосовые артефакты по границе склеивания ЦМР разной точности и разрешения (см. рис. 7, красная стрелка), а также ошибки в береговой линии, такие как сдвиг в береговой линии (см. рис. 7, оранжевая стрелка), отрицательные значения глубин на суше (см. рис. 8), нулевые значения глубин в открытом море, где нет островов (см. рис. 9).

В рельефе ЦМР типа Б наблюдается так называемый эффект «апельсиновой корки» (orange peel) [11] (см. рис. 7, красный овал). Особенно хорошо он наблюдается на шельфе Гренландии, где он сочетается с линейными артефактами, вызванными единичными судовыми проходами. Еще один тип артефакта, который характерен для ЦМР типа Б — это искусственные впадины и поднятия в районах, где нет линейной корреляции между рельефом и гравитационным полем (см. рис. 3, проф. 2, 3 и рис. 4). На рис. 4, ∂ изображен рельеф в ЦМР SRTM30 Plus в районе абиссальной равнины с высокой мощностью осадков, точками на карте обозначено покрытие исходными данными, на рис. 4, г — карта гравитационного поля на том же участке, что и рис. 4, д. В соответствии с методом построения ЦМР типа Б, значения аномального гравитационного поля (см, рис. 4, a) [14] по коэффициэнту корреляции масштабируется в предсказанный рельеф (см. рис. 4, б), на следующем этапе исходные значения глубин восстанавливаются в поверхность предсказанного рельефа (см. рис. 4, в). Как видно из рис. 4, искусственная впадина (желтая стрелка) в модели SRTM30 Plus взята из значений гравитационного поля в районе, где нет исходных данных батиметрических промеров. Из рис. 4, б, в видно, что в районе, где есть исходные батиметрические данные (красная стрелка), нет явной корреляции между гравитационным полем и рельефом. Таким образом образуются искусственные впадины и поднятия в ЦМР типа Б в районах абиссальных котловин, для которых характерна высокая мощность осадочного чехла и низкая степень корреляции между рельефом и гравитационным полем.

Заключение

В данной работе представлена классификация артефактов, встречающихся в нескольких версиях региональных и глобальных ЦМР: IBCAO, SRTM30_Plus, Global Topography и GEBCO_08. ЦМР были визуально исследованы на наличие артефактов в районах трех морфологических провинций: континентальный шельф, абиссальная котловина, район срединно-океанических хребта для которых характерна разная степень изученности и разные типы исходных батиметрических данных.

Артефакты присутствуют в любой ЦМР, но в зависимости от алгоритма моделирования они будут выражены больше или меньше. Было выявлено, что артефакты вызваны систематическими ошибками в исходных данных, различиями в горизонтальном разрешении исходных данных, отсутствием исходных данных, алгоритмом построения регулярных сеток и методом интерполяции (заполнение пробелов данных «предсказанным рельефом», интерполяция сплайном).

Артефакты были классифицированы в соответствии с факторами, которые их характеризуют: данные многолучевой съемки, однолучевой съемки, точечные промеры глубин, гравитационные данные, оцифрованные изобаты, метод «склеивания» разных источников данных, точность береговой линии, краевые эффекты, а также ошибки интерполяции в районе отсутствия каких-либо данных. Наблюдаемые артефакты имеют «морфологию», схожую с реальными формами рельефа на разных масштабных уровнях, и включают следующие формы: хребты и троги, холмы и впадины, плоские поверхности, террасы, звез-

доподобные формы, отрицательные значения высот на суше (см. таблицу).

Способами идентификации артефактов являются визуальные методы: просмотр информации о покрытии исходными данными и типами исходных данных, используемых для построения ЦМР, 3D-визуализация подводного рельефа, аналитическая отмывка рельефа при косом освещении, вертикальное преувеличение рельефа, использование шкал рельефа с различными интервалами, построение профилей через характерные формы рельефа и расчет морфометрических характеристик. Артефакты присутствуют в любой ЦМР, но в зависимости от алгоритма моделирования они будут выражены больше или меньше. Для ЦМР, построенных на основе акустических данных, комбинированных с «предсказанным» по гравитационным аномалиям рельефом, характерны более выраженные артефакты. Это связано с используемым алгоритмом построения регулярной сетки: исходные значения глубин восстанавливаются в поверхность «предсказанного рельефа», при этом разница между значениями исходных и предсказанных глубин в соседних ячейках сетки сглаживаются с использованием алгоритма сплайн с натяжением [14, 9]. Батиметрия ІВСАО демонстрирует более сглаженный рельеф благодаря улучшенному алгоритму построения регулярной сетки по сравнению с ЦМР. Сглаженный рельеф реализуется так называемым методом сглаженного сплайна, который обеспечивает сохранение детальности рельефа в районах покрытия дан-

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Mayer L., Jakobsson M., Allen G., Dorschel B., Falconer R., Ferrini V., Lamarche G., Snaith H., Weatherall P. The Nippon Foundation GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030 // Geosciences. 2018. V. 8. №2. P. 1–18.
- 2. 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.,

ными высокого разрешения и подавление артефактов единичных галсовых промеров [5].

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 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. Mayer L., Jakobsson M., Allen G., Dorschel B., Falconer R., Ferrini V., Lamarche G., Snaith H., Weatherall P. The Nippon Foundation GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030. Geosciences. 2018, 8 (2): 1–18.
- 2. 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. P. 1–5.
- 3. 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.
- 4. *Florinsky I.V.* Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam: Elsevier Academic Press. 2nd ed. 2016. 486 p.
- 5. *Hell B., Jakobsson M.* Gridding heterogeneous bathymetric data sets with stacked continuous curvature splines in tension // Marine Geophysical Research. 2011. V. 32. № 4, P. 493–501.
- 6. Lecours V., Devillers R., Lucieer L., Vanessa Brown, Craig. Artefacts in Marine Digital Terrain Models: A Multiscale Analysis of Their Impact on the Derivation of Terrain Attributes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. P. 5391–5406.
- 7. *Maune D.F.* Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2nd edition. 2007. 655 p.
- 8. *Smith W.H.* On the Accuracy of Digital Bathymetric Data // Journal of Geophysical Research. 1993. V. 98. № B6. P. 9591–9603.
- 9. *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.
- 10. *Hughes-Clarke J.E., Mayer L.A., Wells D.E.* Shallow-water imaging multibeam sonars: a new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf // Marine Geophysical Research. 1996. V. 18. P. 607–629.
- 11. *Marks K.M. Smith W.H.F.* An evaluation of publicly available global bathymetry grids // Marine Geophysical Research. 2006. V. 27. № 1. P. 19–34.
- 12. Электронный ресурс: http://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/ 2008.
- 13. 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. V. 32. № 4. P. 355–371. DOI: 10.1080/01490410903297766.
- 14. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-a altimetry: ridge segmentation versus spreading rate // Journal of Geophys. Res. 2009. V. 114 B01411. P. 1–18.

- Weatherall P. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0. Geophysical Research Letters. 2012, 39: 1–5.
- 3. 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.
- 4. *Florinsky I.V.* Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Amsterdam: Elsevier Academic Press. 2nd ed. 2016. 486 p.
- 5. Hell B., Jakobsson M. Gridding heterogeneous bathymetric data sets with stacked continuous curvature splines in tension. Marine Geophysical Research. 2011, 32 (4): 493–501.
- 6. Lecours V., Devillers R., Lucieer L., Vanessa Brown, Craig. Artefacts in Marine Digital Terrain Models: A Multiscale Analysis of Their Impact on the Derivation of Terrain Attributes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017, 55: 5391–5406.
- 7. Maune D.F. Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2nd edition. 2007: 655 p.
- 8. *Smith W.H.* On the Accuracy of Digital Bathymetric Data Journal of Geophysical Research. 1993, 98 (B6): 9591–9603.
- 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. *Hughes-Clarke J.E.*, *Mayer L.A.*, *Wells D.E.* Shallowwater imaging multibeam sonars: a new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. Marine Geophysical Research. 1996, 18: 607–629.
- 11. *Marks K.M. Smith W.H.F.* An evaluation of publicly available global bathymetry grids. Marine Geophysical Research. 2006, 27 (1): 19–34.
- 12. URL: http://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/gebco/ 2008.
- 13. 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 .DOI: 10.1080/01490410903297766.
- 14. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-a altimetry: ridge segmentation versus spreading rate. Journal of Geophys. Res. 2009, 114 (B01411): 1–18.