

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ»

На правах рукописи

Абрамова Анастасия Сергеевна

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА
МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА ОКЕАНА
(НА ПРИМЕРЕ АРКТИКИ)**

25.00.33 – Картография

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Флоринский Игорь Васильевич

Москва – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения	5
Введение	8
Глава 1 Современное состояние картографирования и цифрового моделирования рельефа дна океанов	17
1.1 История развития морского картографирования	17
1.2 Типы батиметрических данных, по которым строятся цифровые модели рельефа дна океанов	24
1.2.1 Однолучевое эхолотирование	24
1.2.2 Съёмка рельефа морского дна с помощью многолучевого эхолота	31
1.2.3 Предсказанный рельеф морского дна по данным спутниковой альтиметрии	37
1.3 Проблема точности и качества в математико-картографическом моделировании рельефа морского дна	39
1.4 Основные критерии оценки точности и качества батиметрических цифровых моделей рельефа	44
Выводы по главе 1	47
Глава 2 Характеристика использованных батиметрических цифровых моделей рельефа	48
2.1 Типы сеток и алгоритмы интерполяции батиметрических цифровых моделей рельефа	48
2.2 Основные характеристики общедоступных цифровых моделей рельефа, описывающих подводный рельеф Арктики	52
2.2.1 Методика построения батиметрических цифровых моделей рельефа по данным эхолотирования	56
2.2.2 Методика построения батиметрических цифровых моделей рельефа по данным эхолотирования и спутниковой альтиметрии	58
2.3 Характеристика полигонов эталонных съёмок	61

2.4	Тестовые фрагменты общедоступных цифровых моделей рельефа	66
2.5	Эталонные данные многолучевого эхолотирования	77
2.5.1	Оценка неопределенности эталонных данных	84
2.5.2	Оценка точности эталонных данных	86
2.5.3	Артефакты в эталонных цифровых моделях рельефа	90
	Выводы по главе 2	91
Глава 3 Оценка точности данных, по которым строятся батиметрические цифровые модели рельефа		
	батиметрические цифровые модели рельефа	92
3.1	Алгоритм расчета матрицы разности между значениями глубин в разнородных батиметрических цифровых моделях рельефа	92
3.2	Способ оценки точности исходных данных батиметрических цифровых моделей рельефа	94
3.3	Апробация способа оценки точности исходных данных	96
3.4	Результаты апробации	97
	Выводы по главе 3.....	105
Глава 4 Оценка точности батиметрических цифровых моделей рельефа		
	рельефа	106
4.1	Способ оценки точности батиметрических цифровых моделей рельефа	106
4.2	Апробация способа оценки точности батиметрических цифровых моделей рельефа	107
4.3	Результаты апробации	108
	Выводы по главе 4	124
Глава 5 Оценка точности интерполяции значений глубин в батиметрических цифровых моделях рельефа		
	батиметрических цифровых моделях рельефа	125
5.1	Способ оценки точности интерполяции значений глубин	125
5.2	Апробация способа оценки точности интерполяции	127
5.3	Результаты апробации	129
	Выводы по главе 5	137

Глава 6 Артефакты в батиметрических цифровых моделях рельефа	138
6.1 Общие сведения	138
6.2 Визуальный анализ как способ выявления артефактов в батиметрических цифровых моделях рельефа	139
6.3 Классификация артефактов батиметрических цифровых моделей рельефа	141
Выводы по главе 6	154
Глава 7 Оценка степени выраженности артефактов в батиметрических цифровых моделях рельефа	155
7.1 Метод оценки степени выраженности артефактов в батиметрических цифровых моделях рельефа	155
7.2 Апробация метода оценки степени выраженности артефактов	160
7.3 Результаты апробации	165
Выводы по главе 7	169
Заключение	170
Список литературы	172
Приложение А Параметры гидрографического оборудования научно-исследовательского судна <i>Академик Николай Страхов</i>	196

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БД	база данных
ГЕБКО	Генеральная батиметрическая карта океанов
ГИН РАН	Геологический институт РАН
ГИС	геоинформационная система
ГУНиО МО РФ	Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации
ЗВИД	зона влияния исходных данных
ЗИИ	зона истинной изменчивости
ИИ	истинная изменчивость
ИЛ	исследовательский ледокол
МЛЭ	многолучевое эхолотирование
НИС	научно-исследовательское судно
СПН	суммарная перенесенная неопределенность
ССТ	сетка сфероидических трапеций
ЦБМ	цифровая батиметрическая модель
ЦМР	цифровая модель рельефа
ЦМРД	цифровая модель рельефа дна
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BODC	British Oceanographic Data Centre
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CCOM/JHC	Center for Coastal and Ocean Mapping / Joint Hydrographic Center
CHS	Canadian Hydrographic Service
DBM	digital bathymetric model
DCDB	Data Centre for Digital Bathymetry
DEM	digital elevation model

DSM	digital surface model
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
GINA	Geographic Information Network of Alaska
GT	Global Topography
GMRT	Global Multi-Resolution Topography
GMT	Generic Mapping Tools
GPS	Global Positioning System
IBCAO	International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean
IBCSO	International Bathymetric Chart of the South Ocean
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IHB	International Hydrographic Bureau
JAMSTEC	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
KMS	Kort & Matrikelstyrelsen
LDEO	Lamont Doherty Earth Observatory
MGDS	Marine Geoscience Data System
NAVO	Naval Oceanographic Office
NERC	Natural Environment Research Council
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NGDC	National Geophysical Data Center
NHS	Norwegian Hydrographic Service
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOS	National Ocean Service
NPD	Norwegian Petroleum Directorate
NRL	Naval Research Laboratory
NSF	National Science Foundation
RDANH	Royal Danish Administration of Navigation and Hydrography
RuBCAO	Russian Bathymetric Chart of the Arctic Ocean
SCICEX	SCientific ICe EXercise program
SIO	Scripps Institution of Oceanography

SOEST	School of Ocean and Earth Science and Technology
SOHO	Swedish Hydrographic Office
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TPU	total propagated uncertainty
UKHO	UK Hydrographic Office
UNH	University of New Hampshire
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution
3D	трехмерный
D_o	значение глубины в ячейке ЦМР, основанное на измерениях
max	минимальное значение
min	максимальное значение
S	коэффициент корреляции между высокочастотными компонентами батиметрии и гравитационных аномалий
\bar{x}	среднее арифметическое
∇^2	Лапласиан
σ	стандартное отклонение

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Математико-картографическое цифровое моделирование рельефа дна морей и океанов лежит в основе батиметрического картографирования и применяется при проведении морских геоморфологических [187, 35, 98, 202; 30], геолого-геофизических [21, 22, 48–50, 34] и биологических [230, 71, 94, 199] исследований. Список задач, решение которых невозможно без знания рельефа дна, включает определение границ континентального шельфа, обеспечение безопасности навигации, изучение и разведку минеральных и биологических ресурсов, планирование подводных инженерных работ, управление рыболовством, моделирование воздействия цунами и др.

Современными носителями информации о рельефе дна морей и океанов являются батиметрические цифровые модели рельефа (ЦМР)¹. Для их создания используются результаты однолучевого и многолучевого эхолотирования (МЛЭ) с надводных и подводных управляемых и автономных платформ, оцифрованные разномасштабные навигационные и батиметрические карты, результаты обработки данных спутниковой альтиметрии, а для мелководных зон – материалы воздушной лидарной съемки. Начат международный проект Nippon Foundation – GEBCO Seabed 2030 по созданию глобальной батиметрической ЦМР высокого разрешения и точности [186].

Общедоступные (и потому востребованные) батиметрические ЦМР являются компиляцией разнородных данных, для которых характерна нерегулярная плотность распределения точек промеров глубин и существенные различия в пространственном разрешении и точности. Кроме

¹ В научной литературе используются термины-синонимы: ЦМР дна (ЦМРД), ЦМР морского дна, цифровая модель поверхности дна, батиметрическая ЦМР, цифровая батиметрическая модель (ЦБМ), bathymetric model, gridded bathymetric model, digital bathymetric model (DBM).

того, информация о точности, качестве и достоверности общедоступных батиметрических ЦМР весьма ограничена, что осложняет их выбор и использование.

Арктика является зоной стратегических интересов Российской Федерации. При этом до сих пор окончательно не решен вопрос обоснования внешней границы континентального шельфа России в Арктике [38–40, 60–62, 56, 24]. В этой связи особый интерес и важность представляет математико-картографическое моделирование рельефа дна Северного Ледовитого океана. Учитывая военно-политическую специфику региона, значение именно общедоступных батиметрических ЦМР для исследований Арктики сложно переоценить.

Степень разработанности проблемы

Математико-картографическое цифровое моделирование² рельефа (геоморфометрия) сегодня является фактически самостоятельной научной дисциплиной с развитой физико-математической теорией и мощным алгоритмическим аппаратом, которые широко используются для решения задач гидрологии, геоморфологии, почвоведения, геоботаники, геологии, гляциологии и других наук о Земле [106, 166, 193, 229, 206, 175, 184, 139, 58, 114, 116, 117, 190, 228]. Интенсивно развивается морская геоморфометрия [170, 118, 221].

Точность и качество любой ЦМР зависит от ряда факторов: точности, плотности и пространственного распределения исходных данных, типа и сложности моделируемого рельефа, разрешения модели и использованного метода интерполяции [172, 113, 116]. При этом точность и качество ЦМР не

² «Под математико-картографическим моделированием понимается системное сочетание математических и картографических моделей для создания новых карт и расширения области их применения в исследовательских целях» [20].

могут быть измерены или определены каким-то одним параметром и характеризуются пространственной вариабельностью [219, 82].

Вопросам точности и качества моделирования рельефа суши посвящены десятки работ [189, 172, 167, 108, 173, 201, 144, 96, 232, 113, 219, 145, 176, 178, 115, 72, 87, 110, 162, 165, 76, 85, 133, 119, 120 и др.]. При этом исследования точности и качества моделирования рельефа морского дна затрагивают лишь частные аспекты этой проблемы [208, 134, 148, 181, 182, 135, 43, 74, 19, 23, 171, 112]. Важнейшими факторами, влияющими на точность и качество батиметрических ЦМР, являются: 1) нерегулярность сеток исходных измерений глубин, проводимых с различной точностью и разрешением; 2) проблематичность результатов интерполяции ЦМР в районах, где измерения глубин не проводились; и 3) наличие артефактов в ЦМР, что значительно снижает их качество и ограничивает возможность их дальнейшего использования [138, 170, 171].

Рельеф дна Северного Ледовитого океана изучается на протяжении десятилетий [158, 224, 225, 28, 46, 37, 42, 59, 61, 62, 150, 155, 8, 23, 25, 44, 57]. Существует ряд общедоступных глобальных и региональных ЦМР, которые с той или иной степенью точности, детальности и достоверности отображают рельеф дна этого океана. К ним относятся серия ЦМР ETOPO [105, 104, 103], 19 версий ЦМР Global Topography (GT) [211], ЦМР GINA [177], 5 версий ЦМР GEBCO [124–128, 223], 11 версий ЦМР SRTM30_Plus [81], 2 версии ЦМР SRTM15_Plus [196, 217] и 4 версии ЦМР IBCAO [149, 152, 154, 156].

Цель и задачи исследования

Цель исследования: разработать комплексную методику оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. Определить критерии точности и качества батиметрических ЦМР.

2. Разработать способ оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР.

3. Разработать способ оценки точности батиметрических ЦМР.

4. Разработать способ оценки точности интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок.

5. Разработать классификацию артефактов батиметрических ЦМР.

6. Разработать метод оценки степени выраженности артефактов в батиметрических ЦМР.

7. Апробировать разработанную методику, используя фрагменты общедоступных батиметрических ЦМР Арктического региона и независимые эталонные батиметрические ЦМР высокого разрешения и точности.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является рельеф дна океана. Предметом исследования является точность и качество математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана.

Научная новизна исследования

Разработана комплексная методика оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана. Комплексная методика состоит из трех основных частей:

1. Методика оценки точности батиметрических ЦМР, а также данных, по которым строятся батиметрические ЦМР, на основе расчета, статистического анализа и картографирования матриц ошибок, т.е. матриц разности между значениями глубин в тестируемых моделях и в независимых эталонных ЦМР высокой точности и разрешения, полученных с помощью МЛЭ.

2. Способ оценки точности интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР (в зависимости от степени покрытия данными

батиметрических съемок) на основе расчета, статистического анализа и картографирования матриц ошибок и матриц расстояний от данной ячейки тестируемой ЦМР до ближайшей ячейки с измеренным значением глубины.

3. Методика выявления батиметрических артефактов на основе классификации батиметрических артефактов, картографической визуализации батиметрических ЦМР, а также оценки степени выраженности артефактов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии разделов теории картометрии и математико-картографического моделирования, посвященных оценке точности и качества карт и картографических материалов.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной комплексной методики для оценки точности и качества существующих и вновь создаваемых батиметрических ЦМР и карт. Разработанная методика систематически применяется в Геологическом институте РАН (ГИН РАН) для оценки точности и качества батиметрических ЦМР Арктического региона.

Методология и методы исследования

В ходе работы использовались методы МЛЭ, цифровой картографии, геоморфометрии, геоинформатики и математической статистики.

МЛЭ проводилось ГИН РАН с борта научно-исследовательского судна (НИС) *Академик Николай Страхов*, оснащенного глубоководным (RESON Seabat 7150) и мелководным (RESON Seabat 8111) комплексами МЛЭ с навигационной системой динамического позиционирования POS MV.

Для обработки материалов МЛЭ с целью получения эталонных ЦМР высокой точности и разрешения применялось программное обеспечение RESON PDS2000, CARIS HIPS & SIPS 6.1 и 7.0, Golden Software Surfer. Для реализации разработанной методики и картографирования результатов

исследования применялись программы Generic Mapping Tools (GMT), IVS Fledermaus 3D, MathWorks MATLAB, ESRI ArcMap 10.0 и Global Mapper.

Для апробации разработанной методики в работе использовались следующие общедоступные глобальные и региональные ЦМР: IBCAO 2.23, GEBCO_08, GT 13.1, SRTM30_Plus 6.0, GEBCO 1 minute 2.0, ETOPO1.

Защищаемые положения

На защиту выносятся комплексная методика оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана, включающая в себя:

1. Способ оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР.
2. Способ оценки точности батиметрических ЦМР.
3. Способ оценки точности интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР.
4. Классификацию артефактов батиметрических ЦМР.
5. Метод оценки степени выраженности артефактов в батиметрических ЦМР.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.33 – Картография по п. 12: «Использование карт в науке и практике, картометрия, математико-картографическое моделирование, точность и надежность исследований по картам».

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность полученных результатов определяется:

- 1) использованием современного высокоточного гидрографического оборудования; 2) использованием общедоступных батиметрических ЦМР и высокоточных материалов МЛЭ; 3) корректным применением методов

гидрографии, цифровой картографии, геоинформатики, научной визуализации, математической статистики и геоморфометрии; 4) применением современного специализированного программного обеспечения.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: 5th, 6th и 8th Annual GEBCO Bathymetric Science Days (Lima, Peru, 15 Sept. 2010; La Jolla, USA, 4 Oct. 2011; Venice, Italy, 8 Oct. 2013); American Geophysical Union 2012 Fall Meeting (San Francisco, USA, 3–7 Dec. 2012); XLII и LI Тектонические совещания (Москва, 3–6 фев. 2009 и 29 янв. – 2 фев. 2019); 7th International Conference on Cartography & GIS (Созопол, Болгария, 18–23 июня 2018); Международная молодежная научная конференция по геодезии, гляциологии, гидрологии и геофизике полярных регионов (Санкт-Петербург, 17–19 мая 2018); 12-ая Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» ИОИ-2018 (Gaeta, Italy, 8–13 Oct. 2018); Национальная картографическая конференция – 2018 (Москва, 16–19 окт. 2018).

Личный вклад

Соискатель лично разработал все элементы защищаемой методики и провел ее апробацию.

Соискатель принимал участие в 1) планировании и проведении батиметрических съемок МЛЭ; 2) обработке данных МЛЭ и составлении ЦМР участков дна Северного Ледовитого океана на основе данных МЛЭ; 3) геоморфологической и геологической интерпретации батиметрических данных. Работы выполнялись соискателем в составе следующих экспедиций: НИС *Академик Николай Страхов* (авг. – окт. 2006, июль – окт. 2007, июль – сент. 2013), рейсы 24, 25 и 30 (геофизика, геология, батиметрия Норвежско-Гренландского и Баренцева морей); НИС *Polarstern* (авг. – окт. 2009), рейс ARK XXIV-3 (изучение тектоники и ледниковой истории шельфа и континентальной окраины Гренландского моря); НИС *Академик Трешников*

(июль – окт. 2014), экспедиция «Кара – лето 2014» (съемка рельефа дна в морях Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское).

Соискатель является членом технического подкомитета GEBCO по созданию технического руководства по цифровой батиметрии “GEBCO Cook Book” (2012– по настоящее время).

Соискатель являлся исполнителем проектов РФФИ № 18-07-00223 «Система морфометрического моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана» (2018–2020), № 18-35-20060 «Рельеф и геоморфологические процессы районов ресурсного освоения южной части Баренцевоморского шельфа» (2018–2020), № 18-05-70040 «Эволюция литосферы западной Арктики: процессы и механизмы, направленность развития, природные ресурсы и геологические опасности» (2018–2020), № 16-35-00591 «Использование данных дистанционного исследования дна (гидроакустических и видеосъемки) и пробоотбора для ландшафтного районирования на участках площадных съемок в Южной части Баренцева моря (район свода Федынского по данным 28 рейса НИС *Академик Николай Страхов*)» (2016–2017), № 15-05-05888 «Влияние геодинамического состояния коры и верхней мантии на рельеф дна, деформации осадочного чехла, процессы дегазации и опасные геологические явления в западной Арктике и экваториальной части Атлантического океана» (2015–2017).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК. Из них – 6 статей в журналах, индексируемых в Web of Science (Science Citation Index Expanded) и/или Scopus.

Структура и объем

Работа включает в себя введение, 7 глав, заключение, список литературы (236 наименований) и приложение. Общий объем: 196 страниц, в том числе

91 рисунок и 14 таблиц.

Благодарности

Данная работа стала возможной благодаря поддержке, советам и конструктивному вкладу многих моих коллег. Я выражаю искреннюю благодарность моему научному руководителю И.В. Флоринскому (ИМПБ РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), моим коллегам из Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов ГИН РАН: С.Ю. Соколову, А.О. Мазаровичу, Г.В. Агаповой, Н.Н. Турко, В.Г. Захарову, Ю.А. Зарайской, К.О. Добролюбовой, Е.А. Морозу; коллегам из Университета Нью-Хемпшира (UNH): D. Monahan, B. Calder, T. Lippmann, L. Mayer, S. Pe'eri (CCOM/JHC), M. Routhier (GIS/RS Research Laboratory), J. Pringle, M. Boettcher (Earth Sciences Department), студентам UNH/CCOM: A. Jaggarwal, A. Franzheim, G. Masetti, M. Malik, O. Fadahunsi, C. Azuke, M. Wolfson. Также автор благодарит D. Sandwell (Scripps Institution of Oceanography, UCSD), P. Weatherall (British Oceanographic Data Centre), M. Jakobsson (Stockholm University), K. Marks (NOAA Laboratory for Satellite Altimetry), B. Eakins (National Geophysical Data Center), P. Elmore (US Naval Research Laboratory) и организации GEBCO и Nippon Foundation.

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ И ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА ОКЕАНОВ

В главе рассмотрены история и современное состояние картографирования и цифрового моделирования подводного рельефа. В разд. 1.1 обозначены основные этапы истории развития инструментов и методов измерения глубин, соответствующие этапы изученности рельефа Мирового океана, история картографического отображения рельефа морского дна: от карт изобат к цифровым базам данных (БД) и построенным по ним батиметрическим ЦМР. В разд. 1.2 охарактеризованы основные методы получения данных, по которым строятся батиметрические ЦМР дна океанов. Однолучевое и многолучевое эхолотирование описаны в подразд. 1.2.1 и 1.2.2, а в разд. 1.2.3 – метод спутниковой альтиметрии. В разд. 1.3 рассмотрена проблема точности и качества в математико-картографическом моделировании рельефа морского дна. В разд. 1.4 приведены основные критерии оценки точности и качества батиметрических ЦМР.

1.1 История развития морского картографирования

Рельеф является важнейшим компонентом географической оболочки Земли, одним из основных элементов естественных и антропогенных геосистем, каркасом ландшафта. Систематическое картографирование рельефа суши ведется в течение нескольких столетий. Это привело к получению глобальной детальной картины рельефа суши и пониманию его морфологии. Действительно, квази-глобальные ЦМР суши, построенные по данным радиолокационной съемки с борта Шаттла (SRTM DEM) [107], а также по стереоснимкам с бортов космических аппаратов Terra (ASTER GDEM) [121] и ALOS (AW3D30 DSM) [216] имеют пространственное разрешение 1" (~30 м на экваторе) и вертикальную точность порядка нескольких метров. Национальные и региональные ЦМР имеют еще более высокий уровень детальности и точности [131, 141].

С познанием подводного рельефа сложилась иная ситуация. Систематическое картографирование дна океанов ведется на протяжении лишь нескольких десятков лет. Затухание электромагнитных волн в воде ограничивает использование методов дистанционного зондирования измерением глубин в мелководных прибрежных районах [168]; наиболее популярным из таких методов является лидарная съемка [122]. Для картографирования глубоководья (глубины больше нескольких сотен метров) единственным способом измерения глубин являются промеры корабельными системами: в 1920-е гг. на смену ручным лотам пришли однолучевые эхолоты, а им, в свою очередь, на смену пришли многолучевые эхолоты, которые используются на протяжении последних 30 лет. Хотя измерения глубин ручным лотом с борта судов велись на протяжении нескольких веков, только измерения последних десятилетий, произведенные с помощью эхолотирования и спутниковых систем навигации, имеют точность, необходимую для адекватного моделирования рельефа дна океана [137].

Все еще существуют обширные участки Мирового океана, особенно в его удаленных районах, где не было произведено ни одного измерения глубин с борта судна. По оптимистическим оценкам, только около 10% глубин дна океана измерены современными методами с пространственным разрешением 1' [81]. В глубоководных районах океана, и особенно в труднодоступных регионах, таких как Северный Ледовитый океан и южные моря, участки площадью до 10 000 км² не покрыты ни одним судовым измерением [181] (рис. 1.1). Информация об оставшихся 90% океанского дна получена с помощью косвенных методов измерений, таких как спутниковая альтиметрия.

Даже при современной высокой точности и эффективности измерительных эхолокационных систем, съемка рельефа дна всех океанов и морей с высоким пространственным разрешением может занять несколько десятилетий и остается весьма далекой целью. По оценкам специалистов, потребуется около 120 корабельных лет, чтобы осуществить съемку всего

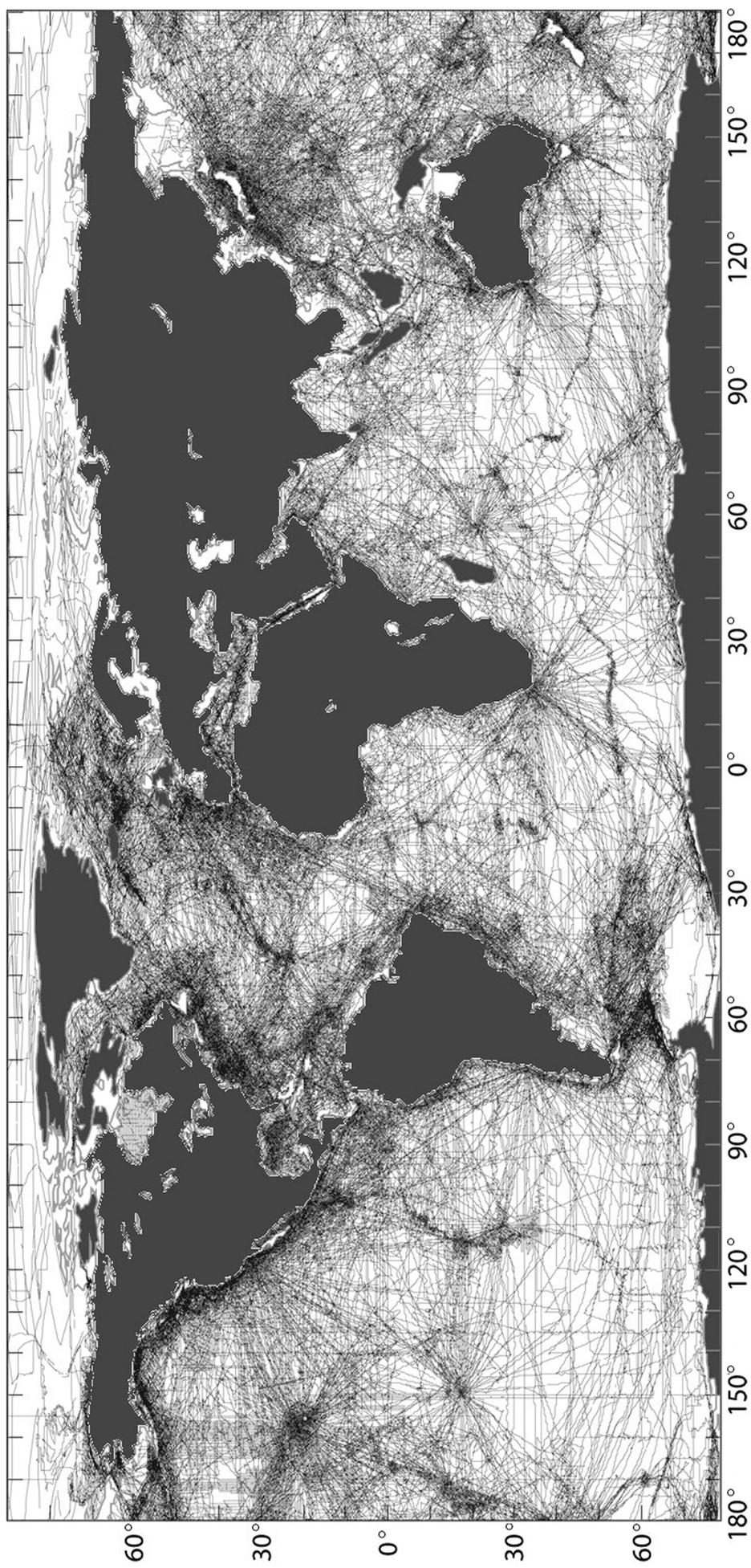


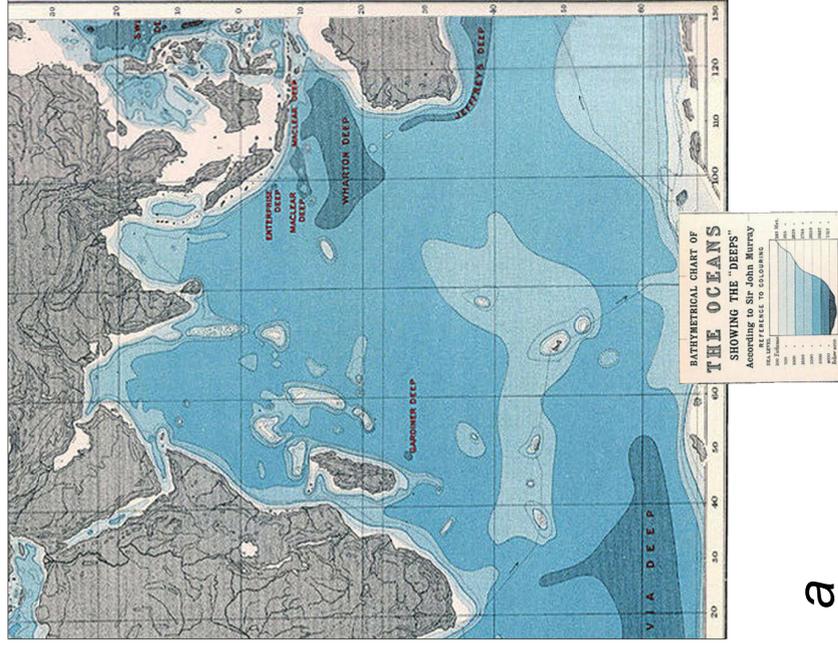
Рисунок 1.1 – Карта изученности подводного рельефа по БД GEODAS. Показаны профили батиметрических, гравиметрических и магнитометрических съемок [180]

Мирового океана на глубинах, превышающих 500 м, с доступным на сегодняшний момент оборудованием при пространственном разрешении 100 м [81]. Оценочная стоимость этих работ – 16 млрд. долл. США [220]. В настоящее время запущен международный проект Nippon Foundation – GEBCO Seabed 2030 [186] по созданию к 2030 г. глобальной батиметрической ЦМР высокого разрешения и точности.

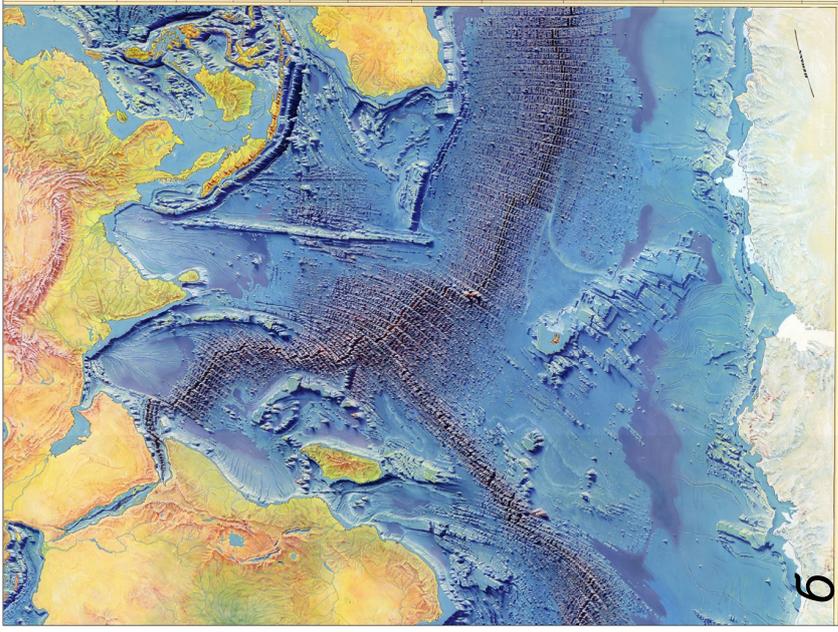
В настоящее время только сочетание всех доступных данных – как исторических, так и современных – может предоставить нам глобальную картину морского дна максимально полно (рис. 1.2). В районах, где нет доступных судовых измерений, для получения ориентировочных значений глубин может использоваться метод спутниковой альтиметрии [209]. Однако этот метод имеет ограничения по пространственному разрешению и точности (см. разд. 1.2.3).

В развитии картографирования рельефа океанов большую роль сыграли геологические экспедиционные исследования отечественных и зарубежных научных организаций. История картографирования развивалась параллельно с историей новых морских геологических открытий, с созданием батиметрических и тематических карт отдельных акваторий и всего Мирового океана, которые были опубликованы в разные периоды (изданы отдельно или вошли в атласы). Среди них карты из собрания Лаборатории геоморфологии и тектоники дна океанов ГИН РАН, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Центрального картографического производства Главного управления навигации и океанографии (ГУНиО) Министерства обороны (МО) РФ, Международного гидрографического бюро, Отдела картографии Российской государственной библиотеки, Института океанографии Скриппса (SIO), Геологической обсерватории Ламонт-Доэрти (LDEO), Британского океанографического института и др. [7].

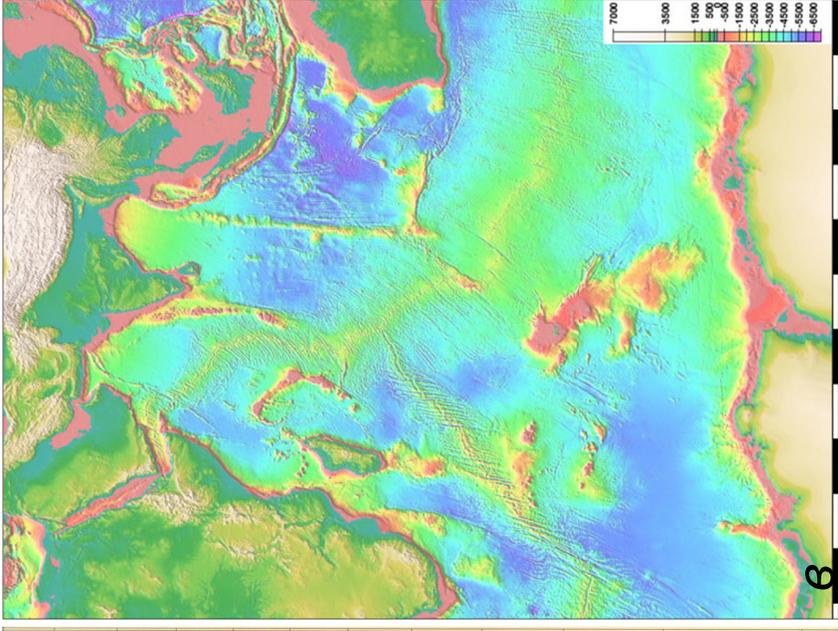
Яркими примерами отечественных и международных атласов могут служить, например, фундаментальное картографическое издание по общей и физической географии океанов и морей – Морской атлас в трех томах [36],



a



b



в

Рисунок 1.2 – Сравнение трех карт, соответствующих трем эпохам батиметрического картографирования (на примере

Индийского океана): *a* – фрагмент карты 1899 г. [194]: структура подводного рельефа весьма далека от

действительности; *б* – фрагмент карты 1977 г. [234]: основные структуры подводного рельефа расположены корректно,

но изображение морфологии срединно-океанических хребтов является скорее художественным вымыслом; *в* – фрагмент

карты 1997 г. с предсказанным по спутниковой альтиметрии подводным рельефом [211]: четко прослеживаются

морфологические особенности тектонических структур

Атлас океанов [9–11], Международные геолого-геофизические атласы Индийского, Атлантического и Тихого океанов [31–33] и Национальный атлас Арктики [41].

Детальный обзор истории развития морской картографии в доцифровую эпоху выходит за рамки данной главы. Для разных периодов отечественной и международной науки она отображена в многочисленных работах [13–16, 51, 47, 59, 231, 17].

Работы по составлению первой серии глобальных батиметрических карт начались с создания в 1903 г. организации ГЕБКО. *Carte générale bathymétrique des océans* – General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) – Генеральная батиметрическая карта океанов (ГЕБКО) изображала рельеф Мирового океана на 24 листах в масштабе 1 : 10 000 000 с отображением рельефа изобатами с высотой сечения рельефа 500 м [88, 6, 7]. Первая карта была основана на 18 400 измерениях глубин. ГЕБКО пережила пять изданий [89–93].

Цифровая батиметрическая БД DBDB-5 [99], выпущенная Гидрографической службой ВМС США в начале 1980-х гг., была первой глобальной ЦМР морского дна с пространственным разрешением 5' (~10 км на экваторе). Позднее DBDB-5 была трансформирована в цифровую БД высот и глубин ETOPO5 [99]. Эта ЦМР включала в себя внушительный объем батиметрических данных из многочисленных источников. На основании батиметрических данных были рассчитаны изобаты и проведена интерполяция на регулярную сетку с пространственным разрешением 5'. При построении модели использовался метод интерполяции сплайнов с минимальной кривизной [84]. Интерполяция по изобатам привела к появлению серьезных артефактов (в частности, искусственных террас) и статистическому смещению в распределении глубин. По этим причинам DBDB-5 имело ограниченное использование в научных целях [208].

К 1990-м гг. накопился большой объем данных, полученных с помощью многолучевых эхолотов. Помимо этого, компьютерные технологии доросли

до способности обрабатывать большие объемы информации. Вместе с этим были рассекречены спутниковые данные радиолокационного альтиметра Geosat [211]. В связи с этим было выпущено несколько цифровых батиметрических БД. Центр данных по цифровой батиметрии Международной гидрографической организации (МГО – ИНО DCDB) был создан в 1990 г. для хранения всех открытых батиметрических данных, полученных в гидрографических и океанографических экспедициях. Объем хранящихся данных включает сотни миллионов измерений глубин. Центр МГО находится в ведении Национального управления океанографии и атмосферы США (NOAA). Центр свободно и без ограничений архивирует и передает батиметрические данные. Данные, хранящиеся в этом Центре, являются основой для составления глобальных цифровых батиметрических моделей, в частности ЦМР GEBCO.

В 1993 г. Центр данных по цифровой батиметрии МГО выпустил БД GEODAS, содержащий всемирную коллекцию акустических и геофизических данных [130, 180] (рис. 1.1). В 1994 г. вышел Цифровой атлас ГЕБКО [123], содержащий все исходные батиметрические данные: промеры глубин, цифровую береговую линию и оцифрованные изобаты [159].

В 1996 г. Смит и Сэндвелл [211] выпустили первую глобальную батиметрическую ЦМР GT, в основе которой лежал рельеф, предсказанный по данным спутниковой альтиметрии (миссии Geosat, ERS-1 и Topex / Poseidon), откалиброванный по доступным акустическим измерениям. ЦМР GT детализировала формы мегарельефа дна Мирового океана (Рис. 1.2*в*), за исключением районов высоких широт. Предсказанный рельеф, представленный в ЦМР GT, был на тот момент совершенно новым и непроверенным продуктом [160]. Несмотря на различные ограничения и допущения (см. разд. 1.2.3), которые лежат в основе ЦМР GT [210–212], становится все более очевидным, что метод предсказанного рельефа по данным спутниковой альтиметрии является единственным источником для картографирования глобальной картины рельефа дна Мирового океана.

Большинство глобальных ЦМР используют ЦМР GT для заполнения пробелов данных эхолотирования.

В настоящее время существует несколько семейств общедоступных глобальных и региональных ЦМР, которые с той или иной степенью точности, детальности и достоверности отображают рельеф дна Мирового океана. К ним относятся серия ЦМР ETOPO [105, 104, 103] (рис. 1.3), 19 версий ЦМР GT [211] (рис. 1.4), 5 версий ЦМР GEBCO [124–128, 223] (рис. 1.5), 11 версий ЦМР SRTM30_Plus [81] (рис. 1.6), 2 версии ЦМР SRTM15_Plus [196, 217], ЦМР GMRT [203], 2 версии ЦМР IBCSO [77, 78] и 4 версии ЦМР IBCAO [149, 152, 154, 156] (рис. 1.7).

1.2 Типы батиметрических данных, по которым строятся цифровые модели рельефа дна океанов

Существует два основных метода получения данных, по которым строятся батиметрические ЦМР: эхолотирование и спутниковая альтиметрия. Технический прогресс в области эхолотирования и системе геопозиционирования судов около трех десятилетий назад привел к революции в области картографирования морского дна. В настоящее время доступны два вида акустических данных: данные однолучевой съемки по профилям (и в некоторых случаях точечные измерения) и двумерные данные многолучевых съемок.

1.2.1 Однолучевое эхолотирование

Большая часть данных о глубинах в глубоководной части океана представлены измерениями однолучевым эхолотом по линейным профилям съемки. Однолучевые эхолоты – относительно небольшие устройства, они недороги и просты в эксплуатации.

Эхозондирование для измерения глубины воды является активным методом гидролокации. Эхолот, установленный на съемочном судне, многократно передает акустические сигналы под известным углом к

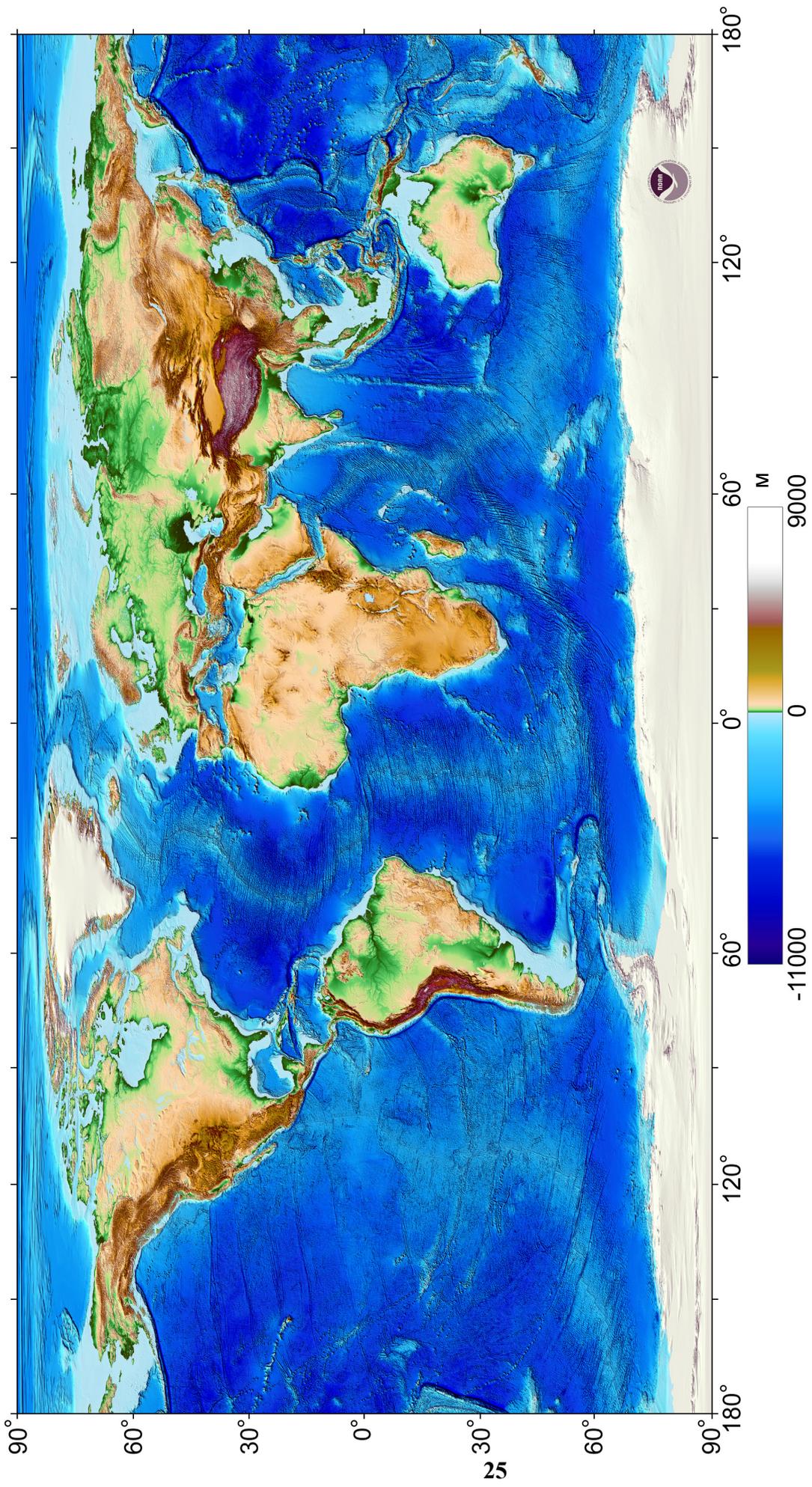


Рисунок 1.3 – ЦМР ЕТОРО1 [73]

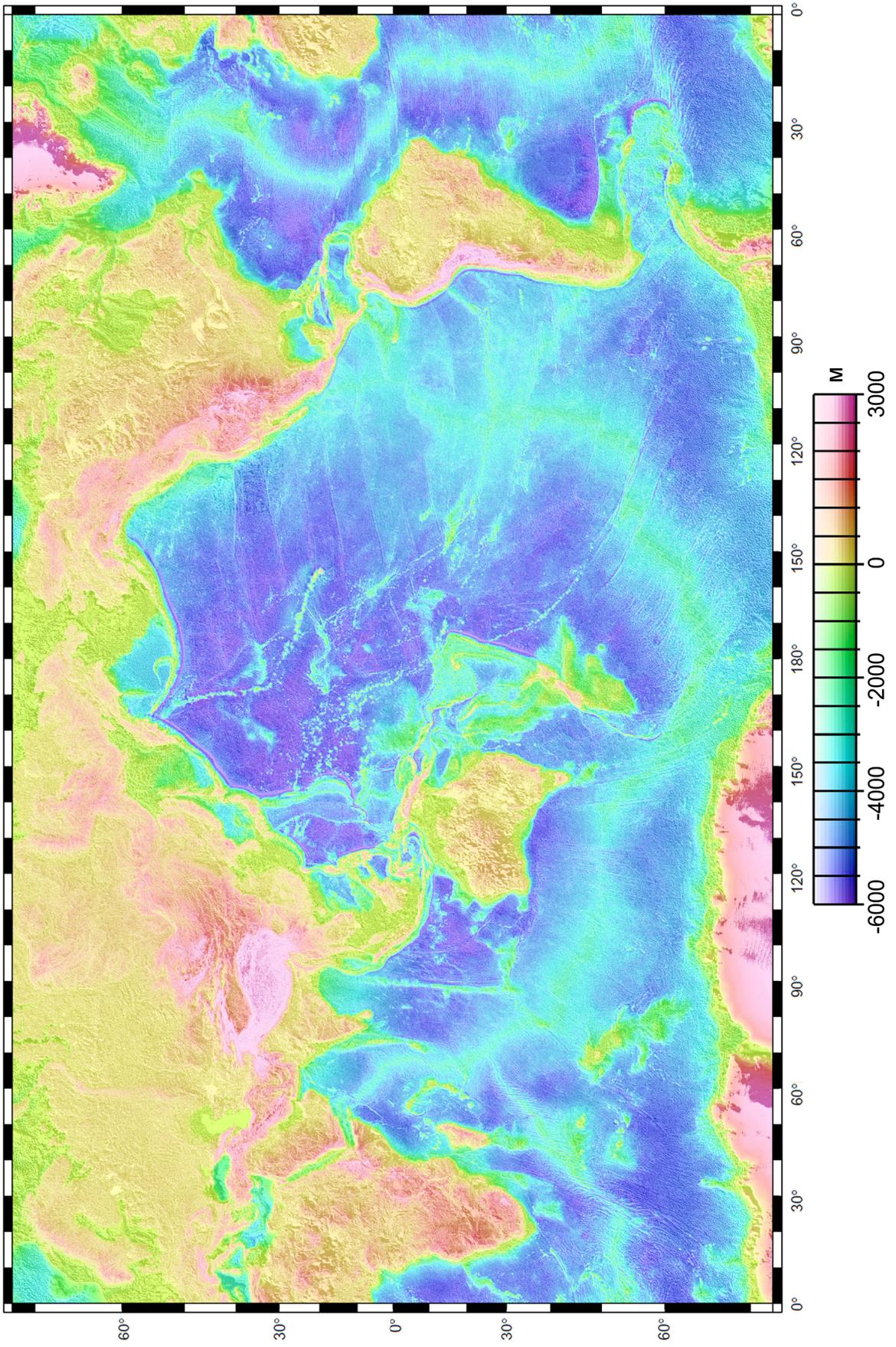


Рисунок 1.4 – ЦМР ГТ [211]

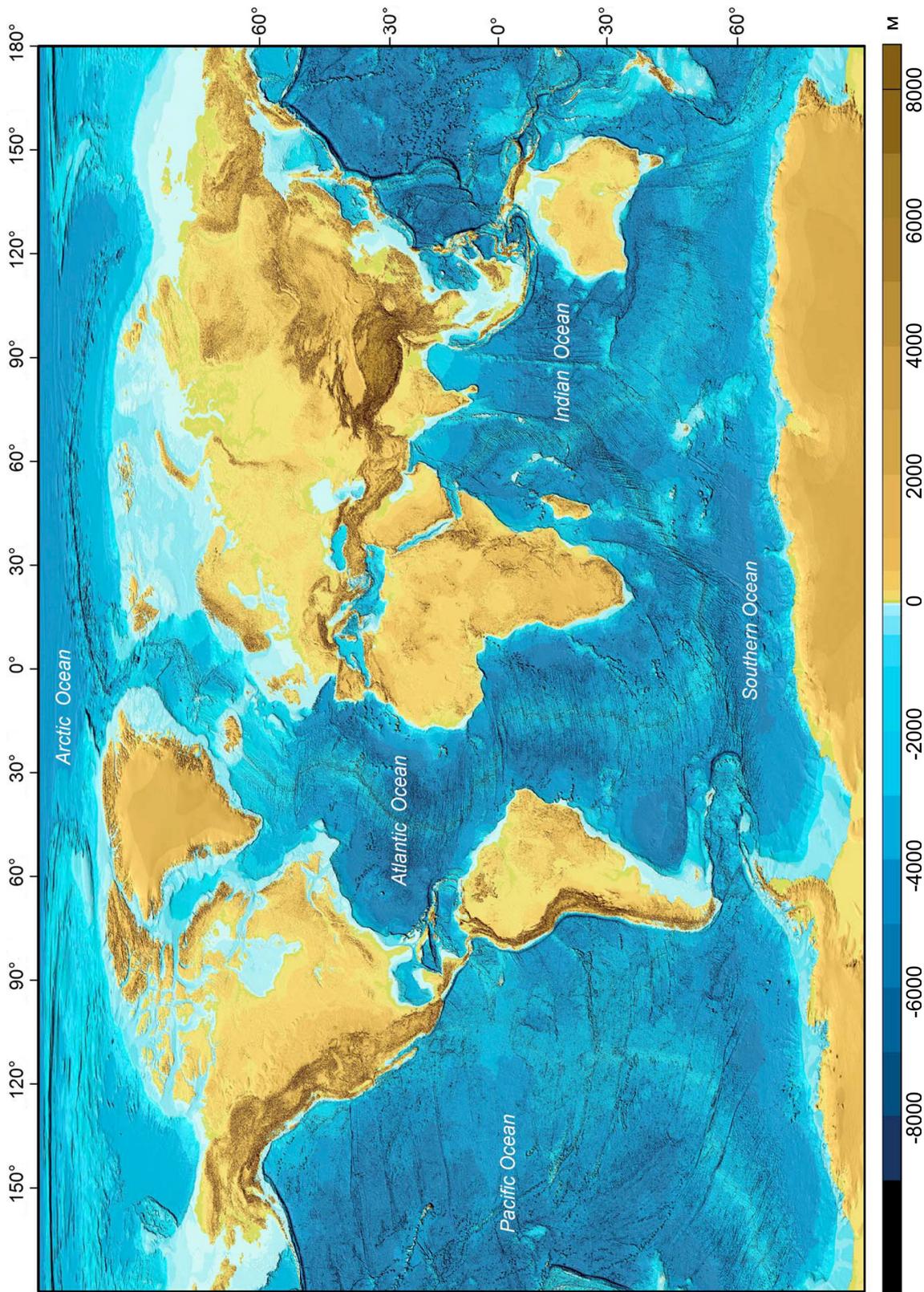


Рисунок 1.5 – ЦМР GEBCO_2014 [223]

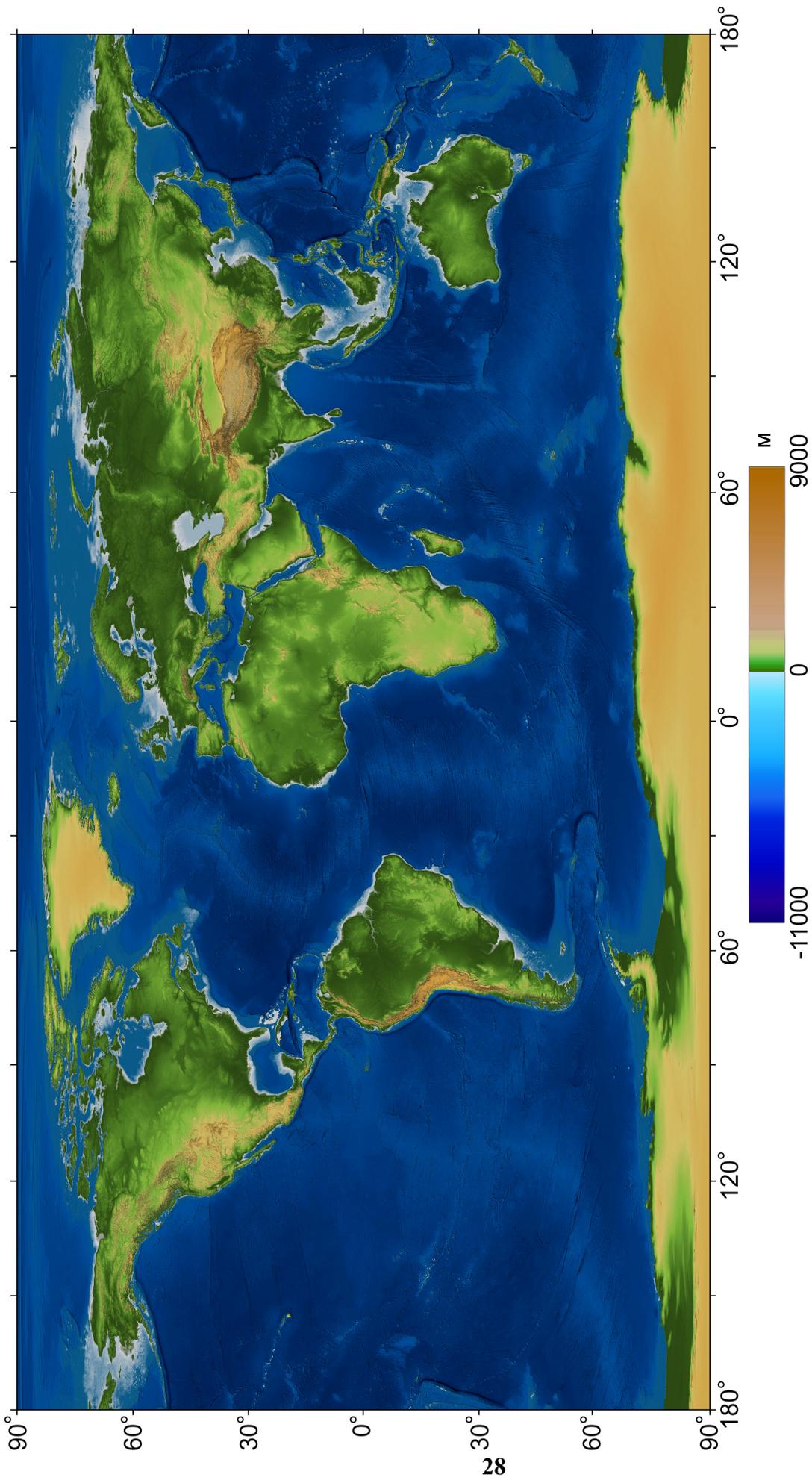


Рисунок 1.6 – ЦМР SRTM30_Plus [81]

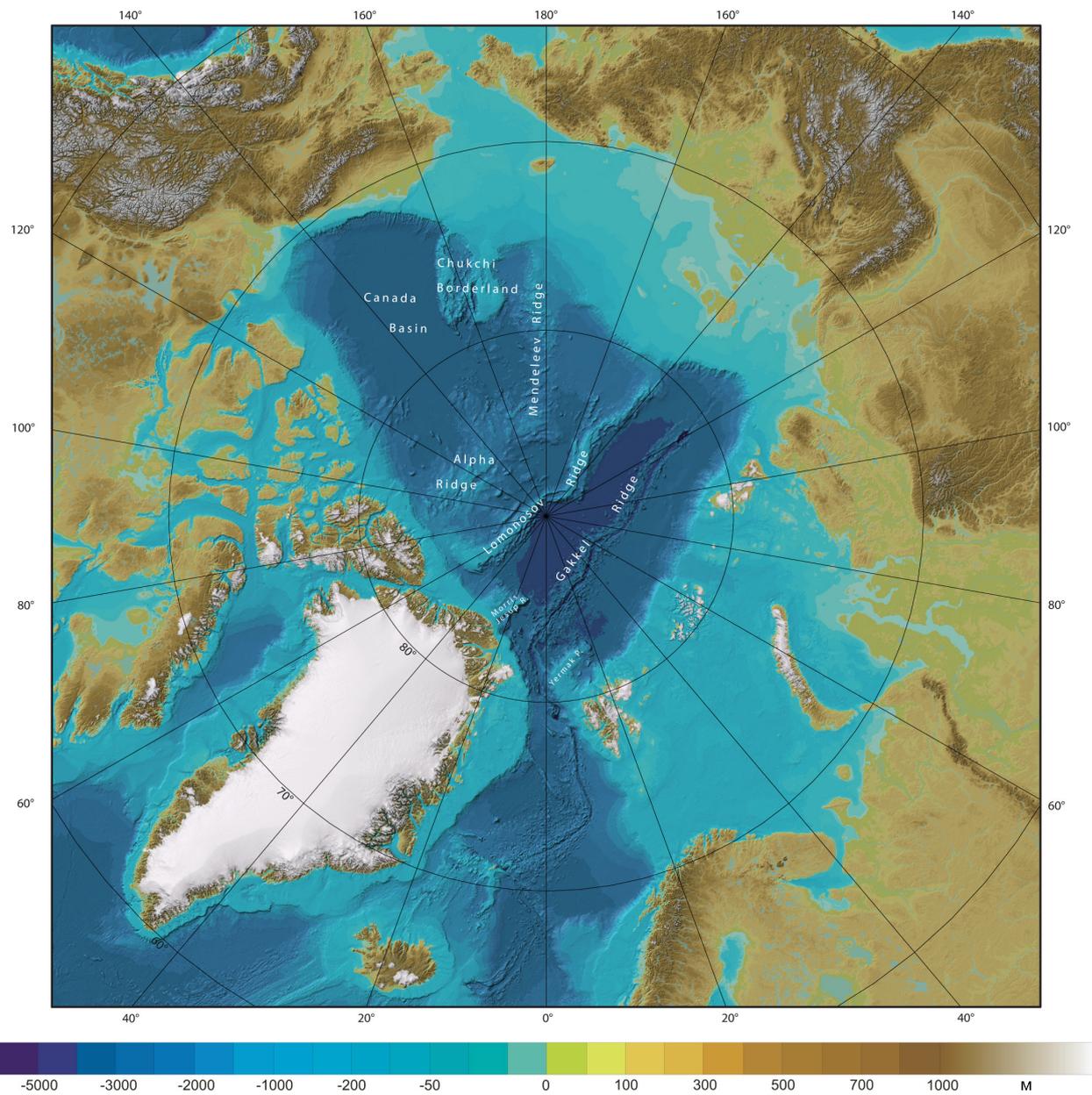


Рисунок 1.7 – ЦМР ІВСАО 2.23 [152]

морскому дну и измеряет время возвращения сигнала от морского дна. Измеренное время прохождения в двух направлениях называется «пробегом сигнала» [136]. Соответствующее значение глубины дна получается путем умножения пробега сигнала на скорость звука в воде, разделенное на два. Обычно скорость звука различается вниз по разрезу водной толщи, а также переменна в пространстве, так как зависит от температуры, солености и давления. Для соленой воды типичные значения скорости звука варьируют от 1400 до 1600 м/с. Среднее гармоническое скорости звука достаточно для преобразования времени в глубину, когда производятся вертикальные измерения глубины. Если сигнал передается под углом, эффект преломления требует техники трассировки сигнала для определения бокового расстояния [179]. Истинные местные профили скорости звука могут быть измерены (что делается для большинства многолучевых съемок), или может быть применено среднее гармоническое значение скорости звука (напр., 1500 м/с применяется при однолучевой съемке), либо эту информацию берут в региональных океанографических таблицах средних скоростей звука, в зависимости от требований к точности измерений [напр., 65].

Первый эхолот был установлен на немецком исследовательском судне *Метеор* в начале 1920-х гг. С помощью первых эхолотов проводились единичные точечные измерения. Эти измерения были более эффективными по сравнению с измерениями с помощью лота и привели к важным результатам, таким как открытие Срединно-Атлантического хребта во время экспедиции на судне *Метеор* в 1925–1927 гг. [214]. Технологии эхолотирования и геопозиционирования судов с тех пор значительно изменились. С помощью однолучевого эхолота стало возможным картографирование непрерывного профиля дна вдоль линии движения судна (рис. 1.8). В связи с этим, были выполнены важнейшие открытия в неизведанных частях Мирового океана, особенно в 1960–1970-х гг., когда торговые суда стали оснащаться эхолотами и, соответственно, производили съемку по всему пути регулярных маршрутов.

Съемка однолучевым эхолотом достигло своего пика в 1972 г. [208] – за десятилетие до того, как стала доступна высокоточная спутниковая навигация. Основные данные однолучевого эхолотирования получены в 1965–1980 гг. [208] и были собраны во время более или менее непрерывных съемок. В результате съемок последних десятилетий большая часть океана была закартографирована по отдельным профилям измерений глубин. Поскольку измерения в основном проводились попутно, структура галсов промеров имеет случайный характер. Основной недостаток измерений однолучевым эхолотом – высокая плотность измерений только вдоль движения судна и отсутствие данных между профилями съемки. Особенно в удаленных областях океана, таких как Южный океан, сотни или тысячи квадратных километров морского дна остаются неотснятыми. Но даже в океане с относительно высокой изученностью существуют значительные участки без каких-либо измерений (рис. 1.9).

Во времена активных однолучевых съемок, помимо проблемы степени изученности, существовала проблема точности геопозиционирования. Астрономическая наземная навигация в сочетании с методом счисления координат давала неопределенность в определении местоположения в несколько километров; первая глобальная радионавигационная система OMEGA характеризовалась неопределенностью в 7300 м [79]. Новейшая радионавигационная система LORAN обычно обеспечивает неопределенность в 300 м. Кроме того, при однолучевом эхолотировании сигнал имеет форму конуса с углом раскрытия в несколько градусов, который охватывает большой (в зависимости от глубины) участок морского дна, что приводит к низкому пространственному разрешению съемки.

1.2.2 Съемка рельефа морского дна с помощью многолучевого эхолота

В настоящее время съемка дна океана производится преимущественно с помощью МЛЭ, которое обеспечивает сплошное покрытие полосы дна,

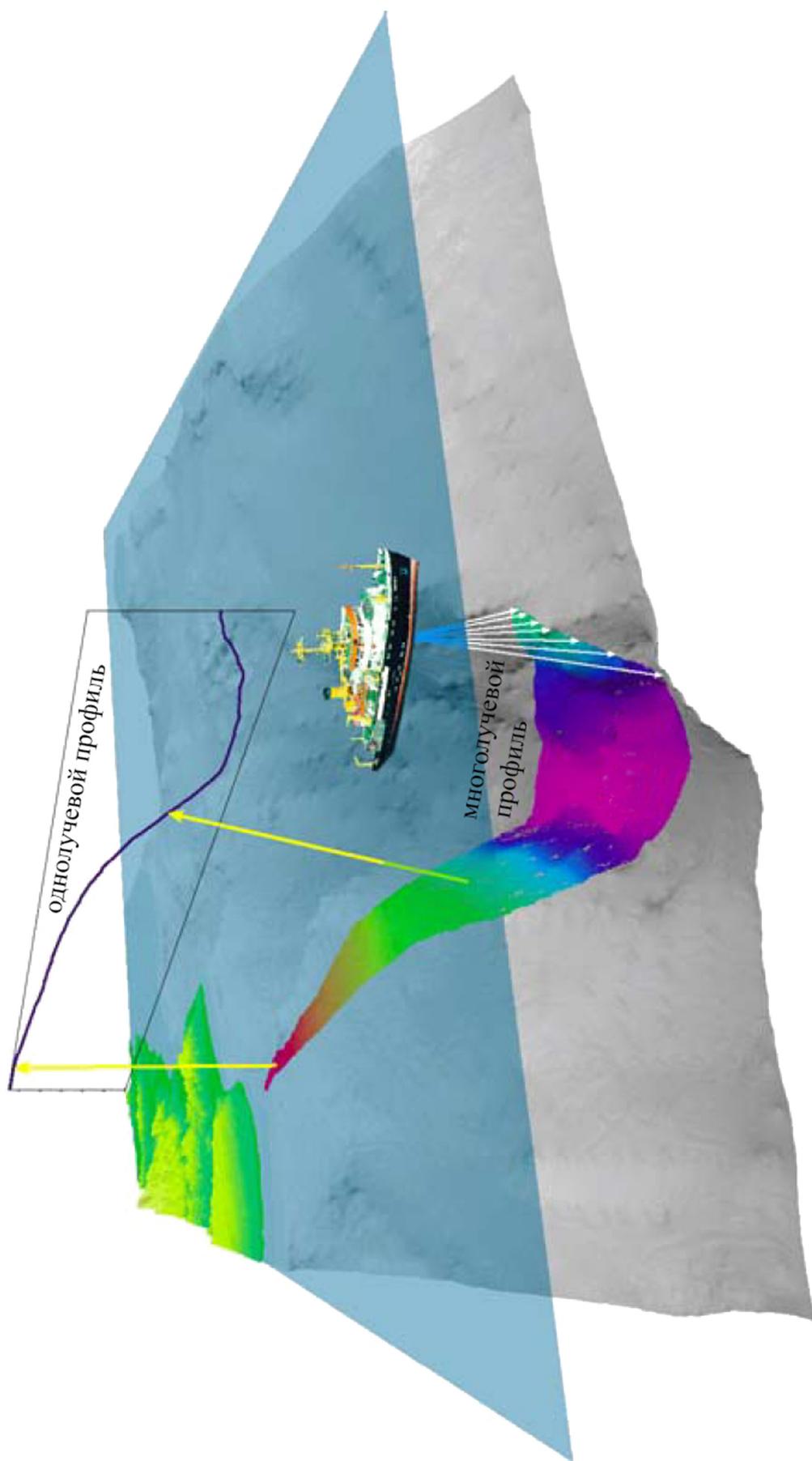


Рисунок 1.8 – Принципы эхолотирования: однолучевые эхолоты измеряют глубину по профилю вдоль траектории движения судна, обеспечивая покрытие узкой одномерной полосы морского дна. Многолучевые эхолоты обеспечивают покрытие широкой полосы морского дна вдоль траектории движения судна [136]

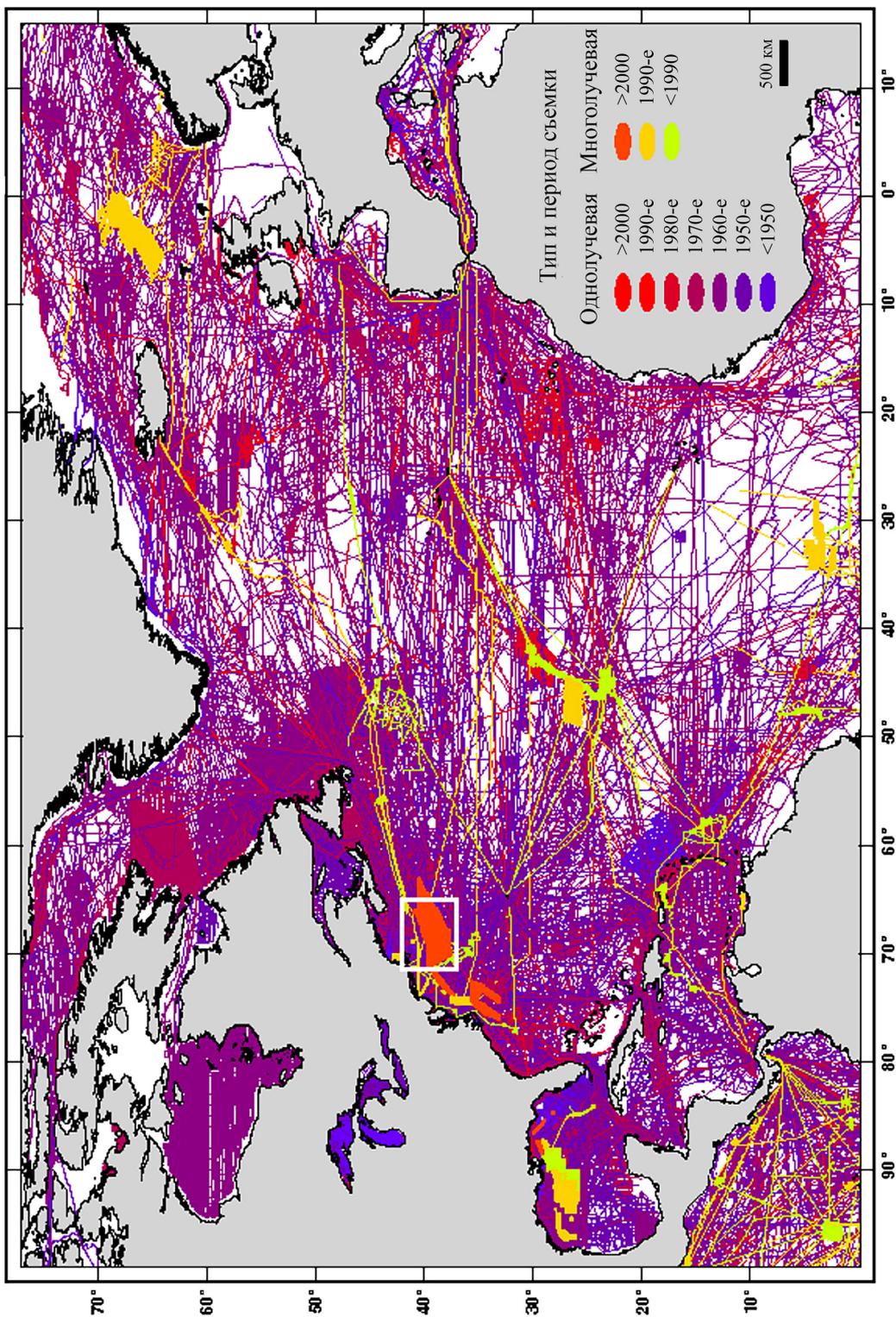


Рисунок 1.9 – Данные батиметрических съемок Северной Атлантики в открытом доступе (в основном БД NGDC, NOS, USGS). Галсы однолучевой съемки показаны градиентами синих и красных цветов, многолучевой съемки – желтым и оранжевым. Новейшие съемки и съемки МЛЭ показаны поверх более старых галсов и однолучевых съемок [136]

перпендикулярной направлению движения судна. Принцип МЛЭ заключается в формировании антенной сонара направленного пучка узких лучей в плоскости, перпендикулярной движению судна, и за мере времени и направления возвращения каждого луча. Ширина полосы сканирования кратна глубине и составляет от 3 до 7 глубин под бортом (рис. 1.8). Съемка по параллельным галсам обеспечивает сплошную площадную съемку морского дна с высоким пространственным разрешением и точностью [5, 53, 138, 64]. Технология МЛЭ предоставила беспрецедентные возможности для исследования рельефа морского дна, и по революционности была сравнима с первыми аэрофотоснимками и спутниковыми изображениями суши (рис. 1.10) [185].

Первый многолучевой эхолот был установлен на французском НИС *Jean Charcot* в 1977 г., но широкое применение в гражданских целях многолучевые эхолоты получили с 1990-х гг. Наступление эры МЛЭ стало возможно только при параллельной революции в спутниковом геопозиционировании, а именно после появления Системы глобального позиционирования (GPS) и ГЛОНАСС, а также в связи с широким распространением мощных компьютеров, необходимых для обработки больших объемов данных [197, 185]. Для сравнения объемов информации, полученных с помощью однолучевого эхолотирования и МЛЭ: за один час съемки однолучевым эхолотом глубина может быть измерена в 72 000 точках, а МЛЭ с 240 лучами – в 17 280 000 точках [55].

Рабочая частота эхолотов для измерения глубин составляет от 12 кГц до 500 кГц. Чем короче длина волны сигнала, тем выше пространственное и временное разрешение измерений [137]. Однако затухание акустических волн также зависит от квадрата частоты сигнала. Таким образом, необходимо соотносить проникающую способность сигнала, вероятный выход энергии и необходимое пространственное разрешение съемки. Как правило, для съемки глубоководного рельефа используются многолучевые эхолоты, работающие на частотах в 12 кГц или 30 кГц. Для достижения высокого

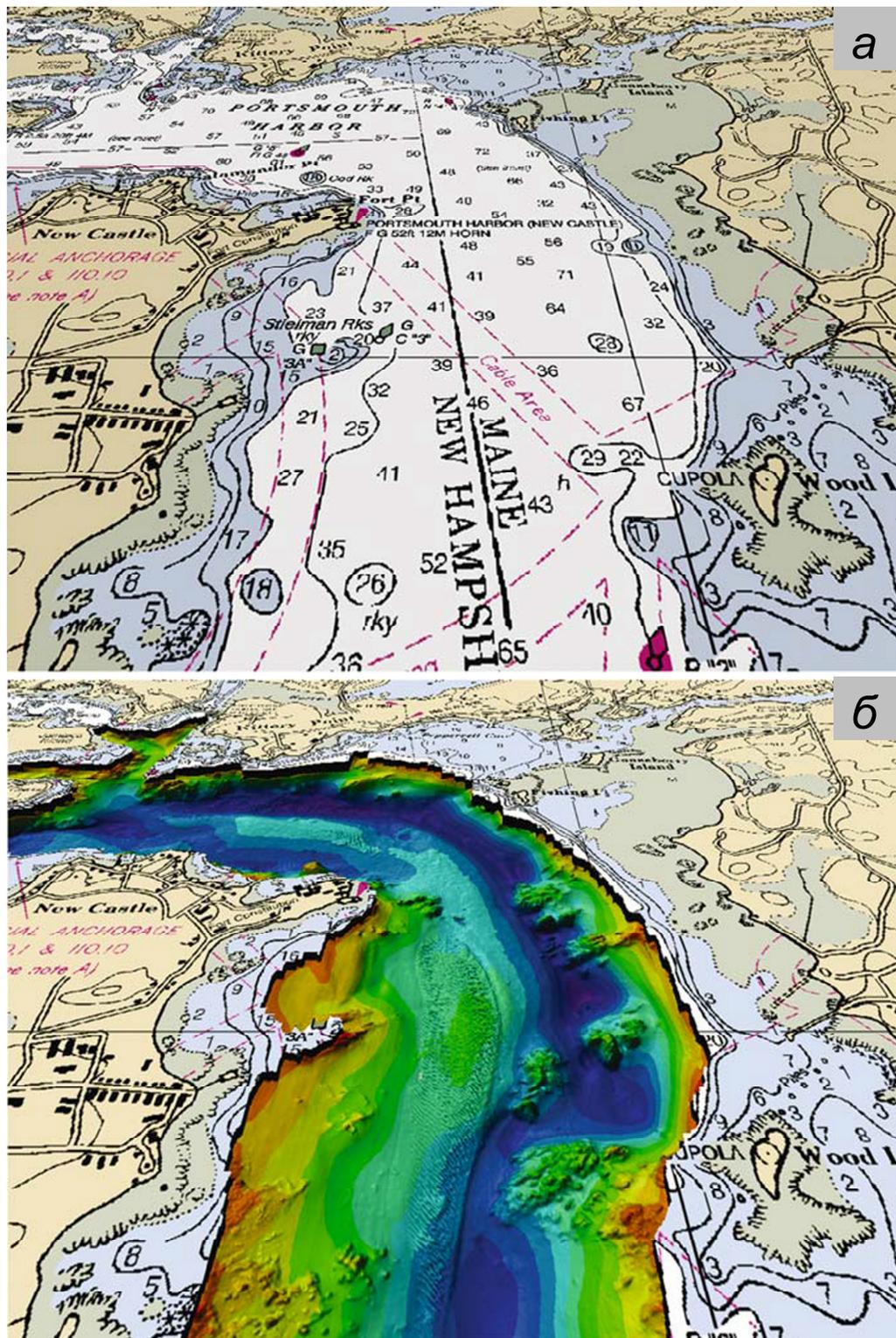


Рисунок 1.10 – Сравнение возможностей одно- и многолучевого эхолотирования [185]: *а* – однолучевое эхолотирование позволяет создать традиционную гидрографическую карту, на которой показаны отдельные отметки глубин и интерполированные изобаты; *б* – МЛЭ позволяет провести площадную съемку подводного рельефа и создать детальную батиметрическую ЦМР

пространственного разрешения направленные пучки лучей должны иметь ширину от $0,5^\circ$ до 4° . Для обеспечения такого пространственного разрешения требуется передающая и приемная антенны длиной в несколько метров. Размеры датчиков эхолота и сложность установки в днище корпуса судна делают глубоководное картографирование дорогостоящим мероприятием.

В данных МЛЭ всегда присутствуют ошибки и артефакты. Во-первых данные МЛЭ получают с постоянно движущихся надводных платформ, которые подвержены таким воздействиям окружающей среды, как волны и ветер. Во-вторых, данные МЛЭ являются результатом дистанционного зондирования через водную толщу, в которой переменной является профиль скорости звука. В-третьих, необходим учет ошибок всех элементов гидрографического оборудования и их взаимное расположение в пределах судна: многолучевой эхолот располагается в днище судна, а навигационное оборудование – на палубе; то есть, плановые координаты измерений глубины определяются с учетом значений смещения датчиков.

К факторам, которые вносят ошибки в измерения глубины при МЛЭ, относятся: угол падения луча на дно, угловая ширина излученного и принятого лучей, точность определения крена и дифферента, вертикального перемещения, алгоритм детекции дна и изменения в профиле скорости звука через водную толщу [54]. Большинство систематических ошибок удаляется калибровкой эхолота, которая проводится перед каждой съемкой. Калибровка направлена на определение углов крена, дифферента и рыскания, вертикального перемещения и запаздывания поступления навигационной информации о местоположении. Угловые смещения измерений, вызванные креном, дифферентом и рысканьем, влияют на точность планового положения глубин [143, 142]. При угловом смещении соответственно смещается пятно облучения на дне. В результате неучтенных углов обнаруживается относительное смещение одного и того же донного объекта по встречным галсам съемки.

Временные и пространственные изменения скорости звука вносят

наибольший вклад в ошибки получаемых глубин (до 10% глубины). В связи с этим во время МЛЭ-съемок проводятся замеры профиля скорости звука. Замеры производятся тем чаще, чем сильнее наблюдается пространственная вариация профиля скорости звука. Профиль скорости звука особенно влияет на определение глубины, полученной боковыми лучами. Ошибки, связанные с профилем скорости звука, относятся к ошибкам преломления (рефракции) боковых лучей [143, 161, 142, 86, 235, 80, 109, 192]. Эффект от ошибочного профиля скорости звука проявляется в виде выпуклого либо корытообразного профиля рельефа дна поперек движения судна, с опущенными либо приподнятыми по глубине краевыми лучами (см. подразд. 2.5.3).

1.2.3 Предсказанный рельеф морского дна по данным спутниковой альтиметрии

Для решения фундаментальной проблемы полного покрытия Мирового океана батиметрическими измерениями [220] может быть полезен один из методов дистанционного зондирования – спутниковая радарная альтиметрия.

Идея получения значений глубин воды косвенным способом из гравитационных измерений была впервые выдвинута Сименсом в 1876 г. [207]. Первый радиолокационный альтиметр Seasat был запущен в 1978 г. [83], то есть потребовалось столетие, чтобы предложенный метод был воплощен в жизнь. Метод предсказанного рельефа, построенного по измерениям спутниковой альтиметрии [210], основан на получении значений глубины воды из наблюдений превышения уровня морской поверхности над геоидом или референц-эллипсоидом (рис. 1.11).

Изменения высоты морской поверхности вызываются несколькими причинами: коротковолновые вариации могут быть связаны с ветрами, но доминирующим фактором является гравитационное воздействие, связанное с подводным рельефом и, в меньшей степени, с подповерхностными геологическими структурами. Помимо этого, течения, в особенности течения

западного переноса [132], приливы и атмосферное давление также влияют на высоту морской поверхности. После внесения поправок за перечисленные факторы, остается эквипотенциальная поверхность постоянной силы тяжести, а изменения высоты морской поверхности могут быть преобразованы в гравитационные аномалии. Значения изменений высоты поверхности моря имеют порядок дециметров и могут быть измерены со спутников радиолокационными альтиметрами.

Глубина может быть определена с помощью достаточно сложного метода инверсии [100, 211]. Поскольку плотности горных пород, расположенных под поверхностью морского дна, в основном, неизвестны и, следовательно, не могут быть компенсированы, метод инверсии не является точным и на практике результаты его применения должны быть откалиброваны измеренными данными глубин для получения более высокой точности.

Метод спутниковой альтиметрии для картографирования рельефа дна океана имеет несколько недостатков [136]: 1) Пространственное разрешение моделей предсказанного рельефа морского дна составляет не менее 10 км [204, 211], что определяется измерениями в дальней зоне (как правило, спутники работают на орбитах с высотой 800 км), шириной радиолокационного луча, практическим ограничением количества повторных циклов, а также уровнем шумов. 2) В районах с высокой мощностью чехла, особенно в районах шельфа, точность инверсии, и, следовательно, предсказанных глубин – ниже. 3) Артефакты типа эффекта «апельсиновой корки» (см. гл. 6) в предсказанном рельефе морского дна являются результатом шума в альтиметрических измерениях. 4) Спутники, оснащенные альтиметрами, не обеспечивают покрытия центральной части Северного Ледовитого океана и некоторых южных частей Южного океана из-за наклона их орбиты. 5) Дополнительные ограничения для спутниковой альтиметрии создает ледовый покров полярных морей [169].

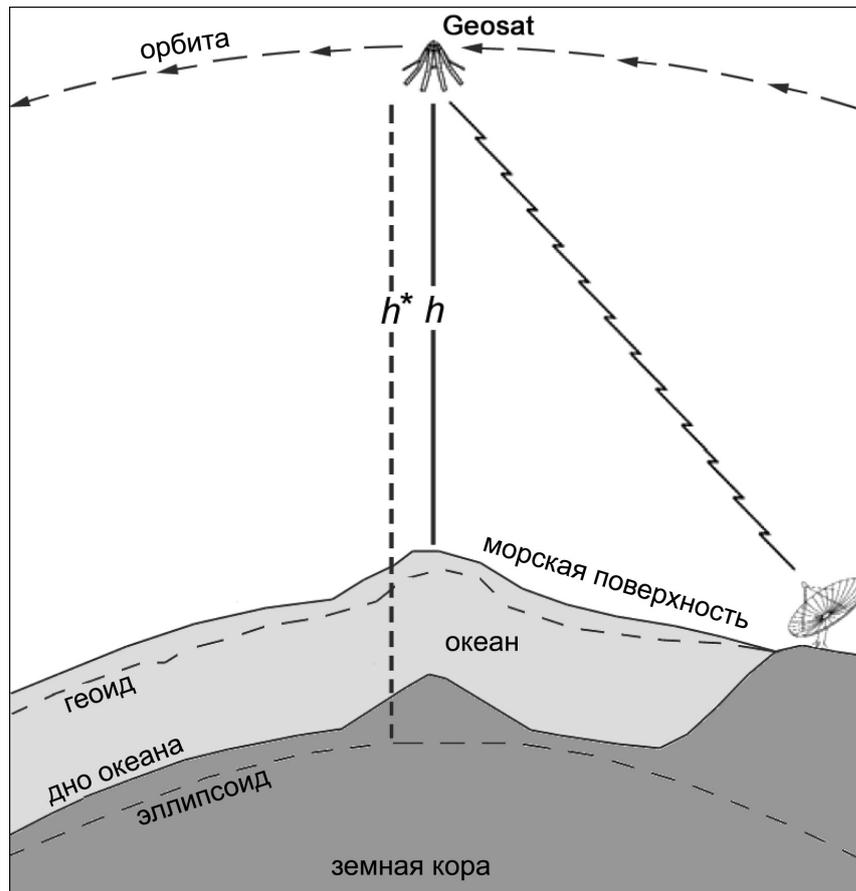


Рисунок 1.11 – Предсказание подводного рельефа по данным спутниковой радарной альтиметрии [204]: установленный на спутнике альтиметр измеряет расстояние h между антенной и морской поверхностью по время возврата импульса. Высота альтиметра над поверхностью референц-эллипсоида h^* определяется по вычислениям с использованием метода инверсии. Высота морской поверхности над эллипсоидом равна разнице между h^* и h (подробности см. текст)

1.3 Проблема точности и качества в математико-картографическом моделировании рельефа морского дна

Различные аспекты оценки точности и качества картографических произведений неоднократно обсуждались в литературе [12, 47, 29]. Необходимость специального исследования точности и качества батиметрических ЦМР определяется большим количеством и важностью практических приложений математико-картографического моделирования рельефа дна океанов (в частности, для определения внешних границ

континентального шельфа), а также предстоящим получением больших объемов новых батиметрических данных высокого разрешения и точности в связи с началом реализации проекта GEBCO Seabed 2030 [186].

Выбор конкретной батиметрической ЦМР для математико-картографического моделирования осложнен ограниченной вспомогательной информацией о точности и качестве ЦМР. Точность и качество любой ЦМР не может быть охарактеризовано или измерено какой-либо одной универсальной величиной или статистической характеристикой. Кроме того, точность и качество ЦМР пространственно изменчивы, как и факторы, которые их определяют [219, 82]. Точность и качество любой ЦМР зависит, в частности, от следующих факторов [172]:

- точности, плотности, распределения и пространственного разрешения данных, по которым строится ЦМР;
- сложности моделируемого рельефа;
- выбранного разрешения ЦМР;
- выбранного метода интерполяции исходных данных, построенных по нерегулярной сетке измерений, на регулярную сетку ЦМР.

Таким образом, важной вспомогательной информацией к ЦМР служит карта покрытия исходными данными, а также информация о точности и достоверности этих данных. При этом, например для ЦМР ИВСаО 2.23 информация об изученности представлена не в цифровом виде, а в виде изображения, на котором цветом указаны типы исходных данных и уровень их точности. Такой формат осложняет понимание уровня надежности карты. Крайне необходимо сопровождение любой батиметрической ЦМР картой покрытия исходными данными в цифровом формате, уровнем их неопределенности, а также матрицей неопределенности конечной батиметрической модели, в которой учитывается неопределенность алгоритма интерполяции [226, 174, 175]. В идеале в сопровождении к батиметрической ЦМР необходимо предоставлять «матрицу надежности» [148].

Следует отметить существующие подходы учета уровня неопределенностей, накопленных в исходных батиметрических данных [134, 148, 102], а также подходы к оценке неопределенности алгоритма интерполяции [135, 74]. Несмотря на наличие таких подходов, в ближайшем будущем батиметрические ЦМР, по всей видимости, не будут сопровождаться полной «матрицей надежности», так как для этого требуются: 1) хорошо задокументированные метаданные по каждому источнику данных; и 2) большие вычислительные ресурсы, особенно в глобальном масштабе, связанные с использованием оригинальных акустических данных. Исторические данные, которые составляют большую часть исходных данных, не имеют адекватных метаданных [148]. Минимально необходимая информация, которая нужна для оценки неопределенности ЦМР, включает: год сбора данных, тип гидрографического и навигационного оборудования, наличие поправок за скорость звука. Поиск такого рода информации является трудоемкой задачей.

Вопросам точности и качества цифрового моделирования рельефа суши посвящены десятки разносторонних работ [189, 172, 167, 108, 173, 201, 144, 96, 232, 113, 219, 145, 176, 178, 115, 72, 87, 110, 162, 165, 76, 85, 133, 119, 120 и др.]. За несколько десятилетий исследователями выработаны два наиболее часто используемых и масштабно независимых подхода к оценке точности ЦМР суши:

1. Точность ЦМР оценивается с использованием наземных контрольных точек, плановые координаты и высоты которых известны с высокой точностью. В качестве таких точек обычно используют опорные пункты геодезических сетей. Мерой точности в этом случае является ошибка³ ЦМР, представляемая в виде набора ее статистических

³ Автор использует в диссертации термин «ошибка» (а не «погрешность») в связи с его традиционностью и распространенностью в картографо-геодезической литературе [26, 27, 52].

характеристик: максимального (\max) и минимального (\min) значения, среднего арифметического (\bar{x}), стандартного отклонения (σ), среднеквадратического отклонения и др. Важно подчеркнуть, что этот набор статистик описывает точность всей рассматриваемой ЦМР.

Так как пространственное распределение факторов, вызывающих случайные ошибки, и самих ошибок в ЦМР неравномерно, а количество контрольных точек ограничено, указанный подход может удовлетворить потребителя лишь в первом приближении. Чем больше территория, охватываемая ЦМР, тем менее релевантным оказывается этот подход.

2. Точность ЦМР оценивается с использованием эталонной ЦМР. В этом случае рассчитывается матрица разности двух ЦМР. Для оценки точности ЦМР также может использоваться набор статистических характеристик разности (то есть, ошибки), причем рассчитывается она по всем точкам матрицы разности двух ЦМР, а не по ограниченному количеству контрольных точек. Но основным документом оценки точности является карта ошибок ЦМР, которая строится по матрице разности.

Очевидным минусом этого подхода является необходимость иметь в наличии ЦМР такого высокого качества и разрешения (основанного на измерениях, а не на интерполяции данных), чтобы ее можно было бы использовать в качестве эталона для данной территории. До последнего времени это требование существенно затрудняло использование второго подхода, но благодаря развитию технологии авиационного лазерного сканирования в настоящее время этот подход оценки точности ЦМР начинает все шире использоваться на практике [120].

В отличие от моделирования рельефа суши, исследования точности и качества цифрового моделирования рельефа морского дна затрагивают лишь отдельные частные аспекты этой проблемы [208, 134, 148, 181, 182, 135, 43, 74, 19, 23, 171, 112]. В частности, в статье [112], помимо подходов, применяемых автором в этой диссертации (описательная статистика, гистограммы распределений, матрицы разности ЦМР), показана возможность

применения для оценки точности батиметрических ЦМР корреляционного и регрессионного анализа тестируемой и эталонной ЦМР.

Из скудной открытой информации⁴ о российской ЦМР дна Северного Ледовитого океана (RuVCAO) известно, что при ее создании для поиска и учета систематических невязок между результатами батиметрических съемок с разным уровнем достоверности используется вычитание ЦМР одной съемки из ЦМР другой. Получаемая матрица невязок проверяется на нормальность распределения по критериям χ^2 или Стьюдента, выбросы выявляются по критерию Диксона, после чего определяются участки с систематическими невязками и вычисляется систематическая ошибка, равная средней ошибке на данном участке, которая вводится как качество поправки в данные съемки с худшей достоверностью [23, 19].

Для ЦМР морского дна характерны артефакты, вызванные недостатком покрытия батиметрическими данными и, особенно, большими межгалсовыми пространствами [138]. Главным отличием батиметрических ЦМР от ЦМР суши является ярко выраженная нерегулярность и неравномерная плотность сетки исходных измерений глубины разного разрешения и точности, недостаточных для большинства морских приложений [170]. Все рабочие группы, вовлеченные в цифровое батиметрическое моделирование, изучают оптимальные методы построения регулярной сетки батиметрических данных, при которых минимизируются артефакты, вызванные интерполяцией в районах недостатка и нерегулярности исходных данных [208, 211, 138, 154].

Смит [208] рассмотрел основные проблемы составления регулярной сетки ЦМР на основе изобат и ошибок в ЦМР, вызванных систематическими ошибками в однолучевых данных. Маркс и Смит [181] рассмотрели ошибки батиметрии в шести общедоступных глобальных ЦМР, в частности –

⁴ ЦМР RuVCAO отсутствует в открытом свободном доступе в сети Интернет и поэтому не может быть использована для независимого контроля ее точности и качества.

некоторые артефакты интерполяции («террасирование» склонов, видимые следы данных эхолотирования на фоне более сглаженного предсказанного рельефа, эффект сшивания данных из разных источников) и ошибки неправильной регистрации. Для ЦМР, построенных по данным МЛЭ, характерны высокочастотные артефакты, связанные с систематическими ошибками съемки, которые не удалось удалить в процессе обработки данных. Артефакты ЦМР, вызванные с многолучевой съемкой, обсуждаются в многочисленных работах [97, 143, 161, 142, 86, 235, 236, 80, 54, 109, 170, 171, 192]. Известны исследования по устранению таких артефактов [142, 171].

Между тем, все еще не существует систематического обзора и классификации артефактов, которые могут быть встречены в глобальных и региональных батиметрических ЦМР.

1.4 Основные критерии оценки точности и качества батиметрических цифровых моделей рельефа

В ходе исследований автора диссертации [66–70, 1–4] был выработан комплексный подход к оценке точности и качества батиметрических ЦМР по следующим критериям:

1. Точность данных, по которым строятся батиметрические ЦМР. Для оценки их точности используется эталонная ЦМР высокой точности и разрешения. Основным результатом такой оценки является карта ошибок исходных данных, а также набор статистических характеристик ошибки исходных данных.

2. Точность батиметрических ЦМР. Для оценки их точности используется эталонная ЦМР высокой точности и разрешения. Основным результатом такой оценки является карта ошибок ЦМР, а также набор статистических характеристик ошибки ЦМР.

3. Точность интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок. Для оценки точности используется эталонная ЦМР высокой точности и

разрешения. Основным результатом такой оценки является карта расстояний от данной ячейки ЦМР до ближайшей ячейки с измеренным значением глубины, а также график зависимости ошибок ЦМР от этих расстояний.

4. Наличие артефактов в батиметрических ЦМР. Для поиска и выявления артефактов используется авторская классификация батиметрических артефактов и картографическая визуализация батиметрических ЦМР. Основным результатом такого анализа являются выявленные в ЦМР артефакты.

5. Степень выраженности артефактов в батиметрических ЦМР. Для оценки их выраженности используется расчет изменчивости глубин в ЦМР, для чего модель сканируется узким крестообразным скользящим окном с целью поиска значений глубин, превышающих некоторое пороговое значение. Основным результатом такой оценки является гистограмма распределения значений изменчивости глубин.

Этот подход реализован автором в виде разработанной им комплексной методики оценки точности и качества батиметрических ЦМР, которая подробно изложена в следующих главах диссертации. На рис. 1.12 представлена схема основных этапов получения, обработки и использования данных в математико-картографическом цифровом моделировании рельефа морского дна и место в нем разработанной автором комплексной методики.

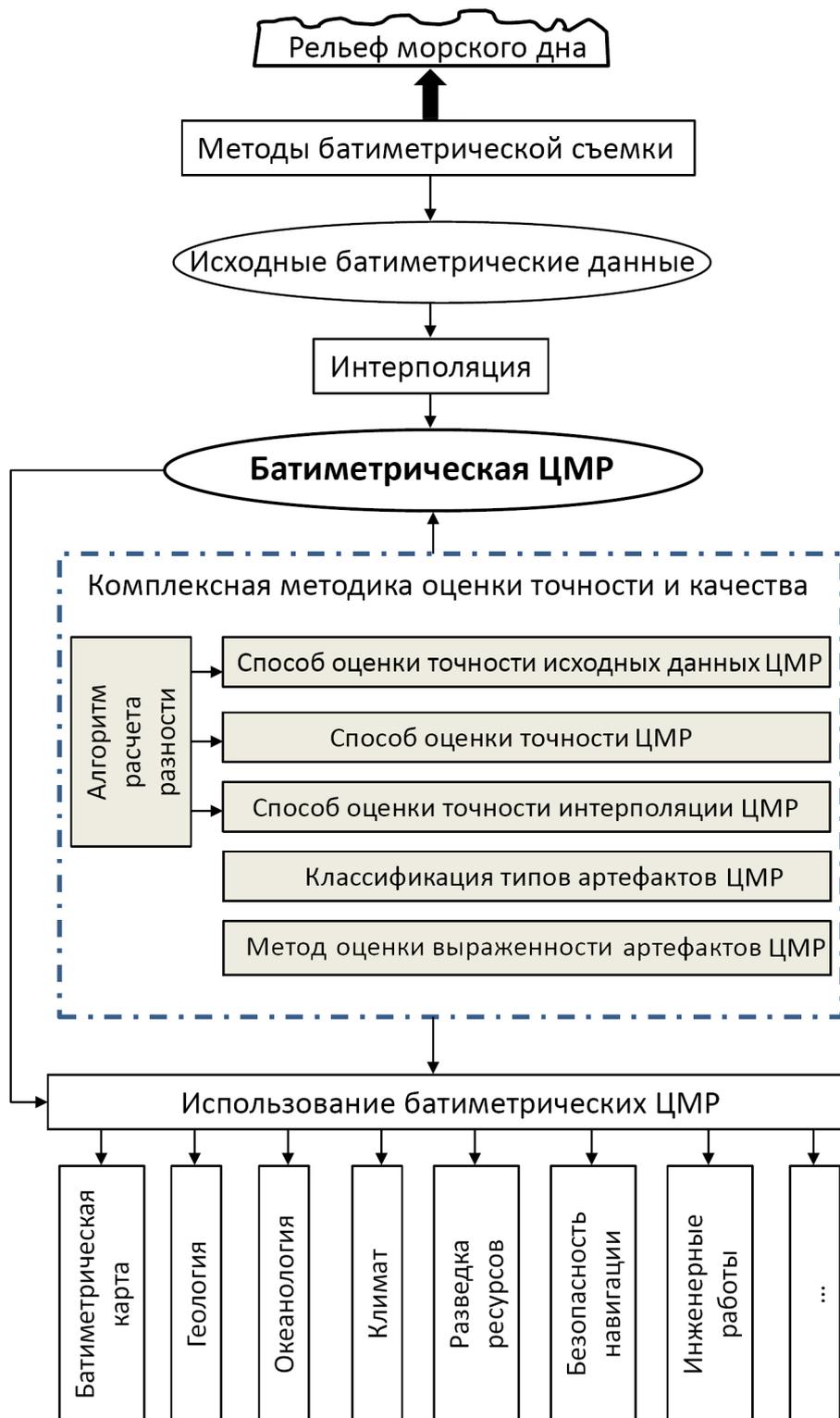


Рисунок 1.12 – Блок-схема основных этапов получения, обработки и использования данных в математико-картографическом цифровом моделировании рельефа морского дна. Заливкой обозначена область исследования данной работы

Выводы по главе 1

Существуют обширные участки Мирового океана, где не было произведено ни одного измерения глубин с борта судна. Только около 10% глубин дна океана измерены современными методами с пространственным разрешением 1'. Информация об оставшихся 90% дна океана получена с помощью косвенных методов измерений, таких как спутниковая альтиметрия.

Исходными данными, по которым строятся ЦМР морского дна, являются результаты съемок многолучевым и однолучевым эхолотированием с надводных и подводных носителей, локальные детальные ЦМР, оцифрованные разномасштабные навигационные и батиметрические карты и планшеты, а также результаты обработки данных спутниковой альтиметрии.

Даже при современной высокой точности и эффективности измерительных эхолокационных систем, съемка всех океанов и морей с высоким пространственным разрешением займет несколько десятилетий. Между тем, запущен международный проект GEBCO Seabed 2030 по координации сбора и обработки многолучевых данных и создания глобальной батиметрической ЦМР высокой точности и разрешения.

Точность и качество любой ЦМР зависит от ряда факторов: точности, плотности и пространственного распределения исходных данных, типа и сложности моделируемого рельефа, разрешения модели и использованного метода интерполяции. При этом точность и качество ЦМР не могут быть измерены каким-то одним параметром и характеризуются пространственной вариабельностью. Выбор батиметрической ЦМР для моделирования осложнен ограниченной информацией о точности и качестве ЦМР.

Автором разработана комплексная методика оценки точности и качества батиметрических ЦМР по следующим критериям: точность данных, по которым строятся ЦМР; точность собственно ЦМР; точность интерполяции значений глубин в ЦМР; наличие артефактов в ЦМР; степень выраженности артефактов в ЦМР.

ГЛАВА 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

В главе описаны ЦМР Арктического региона, использованные при разработке и апробации комплексной методики оценки точности и качества батиметрических ЦМР. Раздел 2.1 посвящен типам сеток и основным алгоритмам интерполяции батиметрических ЦМР. В разд. 2.2 дана общая характеристика батиметрических ЦМР и разделение их на два типа. В подразд. 2.2.1 представлены основные этапы построения ЦМР по данным эхолотирования. В подразд. 2.2.2 описаны основные этапы построения ЦМР по данным эхолотирования и спутниковой альтиметрии. В разд. 2.3 охарактеризованы полигоны, на которых проводились эталонные съемки. В разд. 2.4 описаны тестовые фрагменты общедоступных ЦМР, выбранные для апробации разработанной методики. В разд. 2.5 представлены высокоточные эталонные ЦМР, полученные по данным МЛЭ. Подразделы 2.5.1 и 2.5.2. посвящены оценке неопределенности и точности эталонных данных. В подразд. 2.5.3 рассмотрен вопрос наличия артефактов в эталонных ЦМР.

2.1 Типы сеток и алгоритмы интерполяции батиметрических цифровых моделей рельефа

Под ЦМР обычно понимают дискретную двумерную функцию высоты (глубины), которая описывает непрерывную топографическую (батиметрическую) поверхность конечным числом значений высот или глубин, измеренных или рассчитанных в узлах некоторой сетки. Наибольшее распространение в науках о Земле получили регулярные сетки. Известны два основных типа регулярных сеток: квадратная сетка и сетка сфероидических трапеций (ССТ), т.е. сетка с равным угловым шагом по широте и долготе, образуемая точками пересечения параллелей и меридианов [116].

Во избежание путаницы и недоразумений, следует отметить следующее: Из определения ССТ очевидно следует, что при создании ЦМР, построенной

по ССТ, картографические проекции не используются. Иными словами, глобальные и региональные ЦМР, построенные на ССТ, не основаны ни на одной картографической проекции, так как представляют собой виртуально замкнутые (в случае глобальной ЦМР) или незамкнутые (в случае региональной ЦМР) сфероидические матрицы высот/глубин. В геоинформационных системах (ГИС) карта, полученная на основе такой ЦМР, может быть представлена в любой желаемой проекции. Однако в ГИС такие ЦМР по умолчанию визуализируются в равнопромежуточной цилиндрической проекции (иногда неверно называемой «географической»).

Все анализируемые в этой работе батиметрические ЦМР доступны в формате пакета программ GMT и обрабатывались автором преимущественно в этом пакете. GMT представляет собой набор программ с открытым кодом для конвертации, импорта, обработки (фильтрации, интерполяции и др.) и визуализации пространственных батиметрических данных [227, 129]. Форматы сетки GMT описаны ниже.

Ячейка сетки ЦМР определяется декартовыми или географическими координатами x и y . Данные хранятся в столбцах, идущих сверху (север) вниз (юг), а данные внутри каждой строки хранятся слева (запад) направо (восток). Угловые координаты – это координаты верхнего левого угла; они определяют начальную точку, откуда упорядочены данные. Расстояние между пересечениями по осям X и Y определяет размер ячейки сетки и, следовательно, разрешение ЦМР. Ячейка сетки имеет одно значение, которое представляет собой среднее значение по ячейке. Способ регистрации определяет, какую площадь представляет каждая точка данных: при сеточной регистрации узлы расположены на пересечении сетки, а при пиксельной регистрации – в центре каждой ячейки сетки (рис. 2.1) [227].

Значения в ЦМР, построенной по регулярной сетке, обычно получают на основе нерегулярно распределенных исходных данных глубин с использованием некоторого алгоритма интерполяции. На рис. 2.2 показаны точки абстрактных данных, по которым рассчитывается регулярная ЦМР в

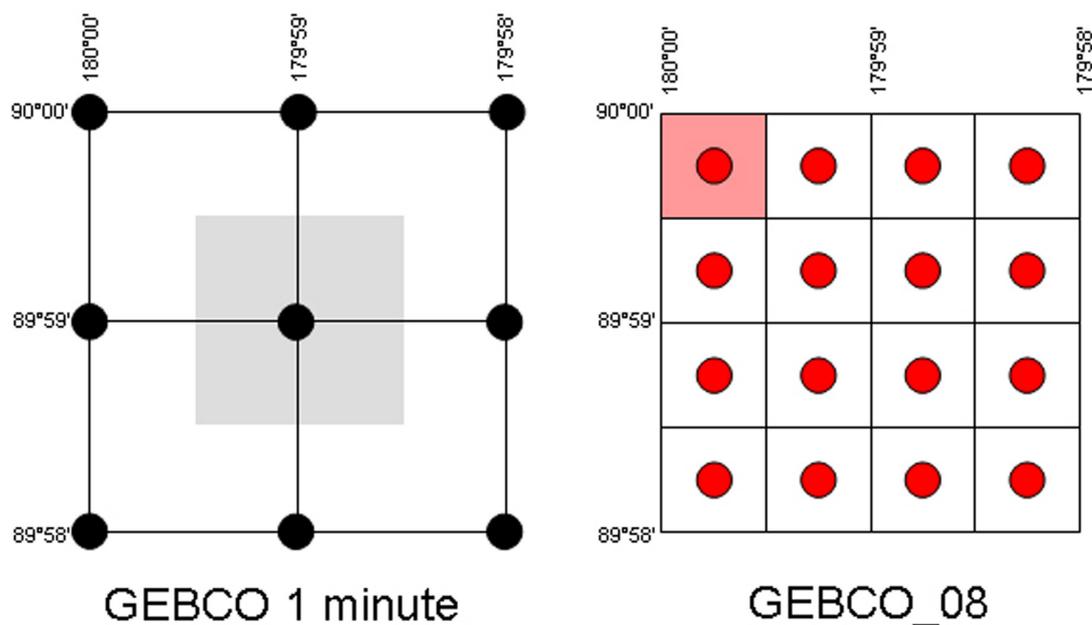


Рисунок 2.1 – Иллюстрация различий между сеточной регистрацией в ЦМР GEBCO 1 minute и пиксельной регистрацией в ЦМР GEBCO_08

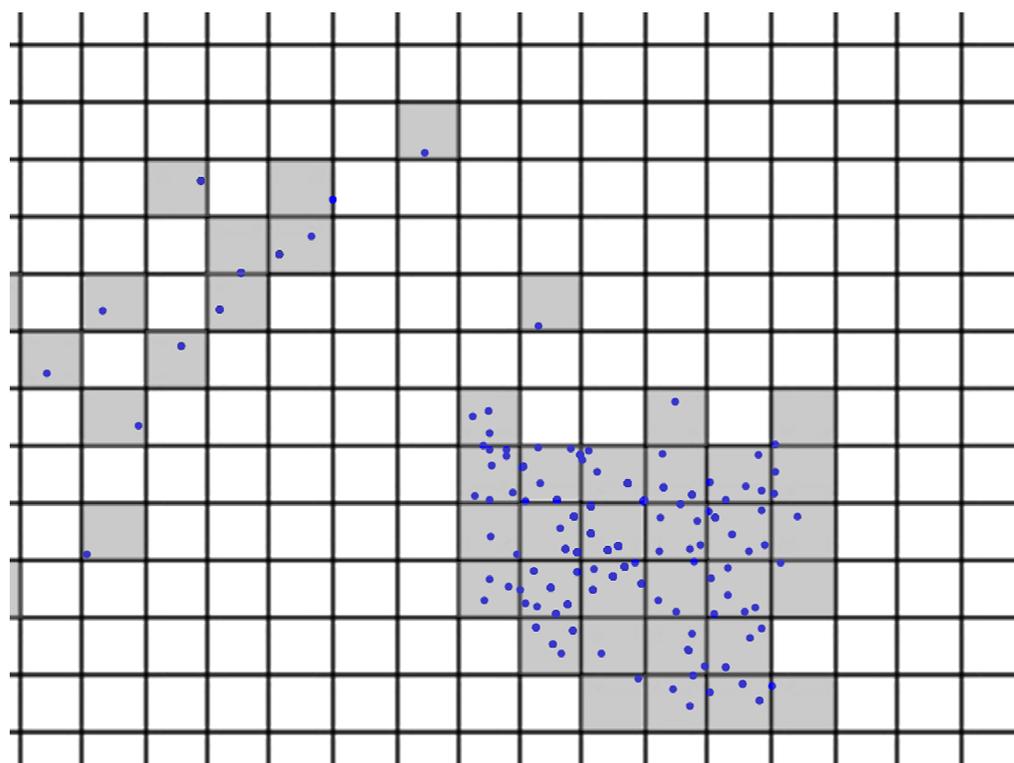


Рисунок 2.2 – Пример нерегулярного распределения исходных данных (синие точки) и наложенной регулярной сетки. Серым цветом обозначены ячейки, значения которых рассчитываются по медианному значению исходных данных; белые ячейки заполняются интерполяцией

соответствии с выбранным разрешением. Ячейкам регулярной сетки, в которые попадает несколько точек с измеренными глубинами, присваивается одно медианное значение глубины по ячейке. Процедура прореживания данных важна для того, чтобы исключить ошибочные значения, избежать наложения сигнала и сократить время вычислений [213, 160]. Ячейки сетки, в которых отсутствуют данные, заполняются интерполированными значениями глубин.

Интерполяция широко используется в математико-картографическом моделировании [222, 191]. При обработке исходных нерегулярных батиметрических данных одним из наиболее часто используемых алгоритмов интерполяции является метод бикубического сплайна Бриггса [84], который обеспечивает построение гладкой поверхности с непрерывными вторыми производными и минимальной кривизной. Вместе с тем, применение этого метода может приводить к артефактам интерполяции из-за явления Гиббса (всплески функции в точках разрыва) [115]. Для устранения этой проблемы Смит и Вессел [213] модифицировали метод Бриггса, введя в него возможность регулировать натяжение создаваемой поверхности.

Метод Смита–Вессела – точный интерполятор, в котором создаваемая поверхность с непрерывными вторыми производными и общим квадратом кривизны, определяемым коэффициентом натяжения, точно проходит через исходные значения. Интерполированные значения глубин в регулярной ЦМР вычисляются по взвешенному среднему близлежащих значений глубин. Параметр натяжения определяет вес, придаваемый окружающим точкам данных: чем выше значение натяжения, тем больше веса придается значениям близлежащих точек данных. Значение натяжения определяет кривизну поверхности: чем ниже это значение, тем больше точек данных будут влиять на результат вычисления в каждой ячейке регулярной ЦМР.

Сплайны с натяжением используются при построении батиметрических ЦМР в различных вариациях. Например, ЦМР GEBCO_08 построена по акустическим данным с применением сглаженного сплайна с натяжением

(подробности см. подразд. 2.2.1).

Альтернативный метод заполнения пробелов данных в батиметрии был предложен Смитом и Сэндвеллом [211]. В этом методе пробелы заполняются глубинами, предсказанными по данным спутниковой альтиметрии (см. подразд. 2.2.2). Разница между значениями исходных измеренных и предсказанных глубин в соседних ячейках сетки сглаживается сплайном с натяжением [211, 81]. В этом случае эффект от использования сплайн-интерполяции (например, в ЦМР семейства GT) можно наблюдать только вблизи точек исходных данных.

2.2 Основные характеристики общедоступных цифровых моделей рельефа, описывающих подводный рельеф Арктики

Анализируемые в работе ЦМР имеют ряд различий: метод построения, регион покрытия, формат, пространственное разрешение, проекцию, основные источники данных (табл. 2.1). Необходимо также выделять:

- различия в ЦМР, возникшие в процессе их компиляции;
- различие методов постобработки, применяемых к исходным данным, включая коррекцию ошибок и внесение поправок за скорость звука;
- различие методов прореживания данных;
- ошибки регистрации, внедренные путем перепроектирования и передискретизации (для ЦМР, основанных на перепроектировании данных, ранее построенных на регулярной сетке).

По типу исходных данных модели были разделены на два типа:

- ЦМР типа А: ЦМР IBCAO 2.23 [152] и GEBCO_08 [125] (севернее 64° с.ш.) основаны на акустических данных и построены по БД IBCAO в разных картографических проекциях, на разных типах сеток, и с различным разрешением (табл. 2.1). Пробелы между измеренными глубинами заполнены сплайн-интерполяцией оцифрованных изобат.

- ЦМР типа Б: ЦМР GT 13.1 [211] и SRTM30_Plus 6.0 [81] основаны на акустических данных, комбинированных с рельефом, предсказанным по

Таблица 2.1 – Основные характеристики общедоступных глобальных и региональных ЦМР, анализируемых в работе

ЦМР, версия, ссылка	Район покрытия	Разрешение	Формат	Проекция / тип сетки; система координат	Формат регистрации	Источники исходных данных
IBCAO 2.23 [152] (рис. 1.7)	64°–90° с.ш.	2 км / 1'	netCDF, ESRI ASCII, geotiff	полярная стереографическая; квадратная сетка; WGS 1984 / ССТ; WGS 1984	сетка / пиксель	БД NGDC, NRL, CHS, RDANH, SCISEX, НИС <i>Polarstern, Oden</i> ; изобаты карт ГУНиО МО РФ, NRL; цифровой атлас GEBCO
GEBCO 1 minute 2.00 [124]	глобальное	1'	netCDF	ССТ; WGS 1984	сетка	БД BSH, UKHO, SOHO, IBCAO; международные и национальные навигационные и batimетрические карты
GEBCO_08 [125] (рис. 1.5)	глобальное	30"	netCDF	ССТ; WGS 1984	пиксель	БД GEBCO, IBCAO, INB, NGA, NOAA, NAVO, SIO, NERC; предсказанный рельеф из SRTM30_Plus

ETOPO 1 [73] (рис. 1.3)	глобальное	1'	netCDF, grd, bin, xyz, geotiff	ССТ; WGS 1984	сетка / пиксель	БД JODC, NGDC, CEP, CIESM, IBCAO; модель гравитационного поля Земли версия 18.1 [211]
GT 13.1 [211] (рис. 1.4)	80,738° ю.ш. – 80,738° с.ш.	1' по меридиану	bin	Проекция Меркатора GMT (сферическая модель Земли)	пиксель	БД NGDC, MGDC, GEOMAR, NSF, SOEST, WHOI, SIO, NGA, JAMSTEC, NOAA, IFREMER, CCOM, GEBCO, NAVO, IBCAO; модель гравитационного поля Земли версия 18.1 [211]
SRTM30_+ Plus 6.0 [81] (рис. 1.6)	глобальное	30"	netCDF, spl, grd, xyz	ССТ; WGS 1984	пиксель	то же

Примечание: во всех указанных общедоступных ЦМР за нулевую отметку глубин принят средний уровень моря (кроме некоторых мелководных прибрежных участков). Вопросы гармонизации значений глубин [218] при компиляции общедоступных ЦМР автором не рассматриваются.

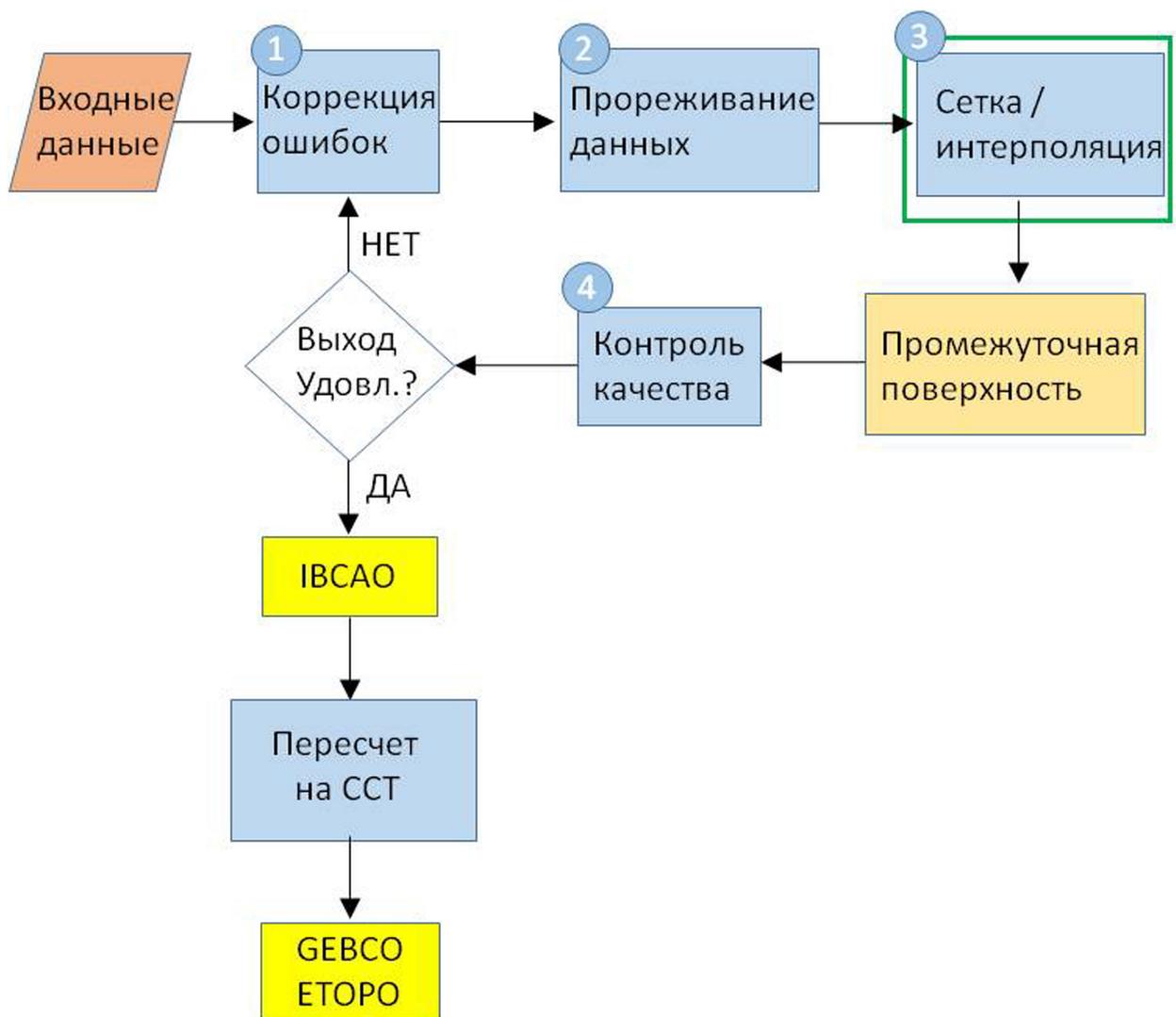


Рисунок 2.3 – Блок-схема основных этапов построения ЦМР типа А ([160] с дополнениями)

гравитационным аномалиям. Эти ЦМР имеют практически единую БД и построены в разных картографических проекциях, на разных типах сеток, и с различным разрешением (табл. 2.1). Между значениями измеренных и предсказанных глубин используется сглаживание с помощью алгоритма «сплайн с натяжением».

ЦМР ИВСаО 2.23 в полярной стереографической проекции является первичной регулярной сеткой, созданной по исходным данным (рис. 2.3). ЦМР GEBCO 1 minute [124], GEBCO_08 и ETOPO1 [73] являются пересчитанными на ССТ версиями ЦМР ИВСаО.

Поскольку ЦМР GEBCO_08 и ETOPO1 были независимо

воспроизведены из ЦМР IBCAO 2.23, эти модели могут несколько отличаться из-за возможных различий в методах перепроецирования. ЦМР GEBCO_08 была выбрана для использования в данной работе в качестве ЦМР типа А с максимальным пространственным разрешением.

ЦМР GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 имеют сходные источники данных, но построены в различных проекциях: ЦМР GT 13.1 построена в проекции Меркатора GMT (сферическая модель Земли) с разрешением 1' по меридиану [211], а ЦМР SRTM30_Plus 6.0 построена на ССТ с разрешением 30" [81]. Кроме того, SRTM30_Plus 6.0 является глобальной ЦМР и включает в себя значения из ЦМР IBCAO 2.23 к северу от 80,7° с.ш., а ЦМР GT 13.1 обеспечивает покрытие только до 80,7° с.ш.

Анализируемые в работе ЦМР представлены в нескольких форматах (табл. 2.1). В качестве примера можно привести ЦМР IBCAO 2.23, представленную в двух различных проекциях и форматах: 1) в полярной стереографической проекции с разрешением 2 км, и 2) на ССТ с разрешением 1'; каждая в форматах GMT netCDF и ESRI ASCII [152]. Основное различие между этими форматами заключается в способе регистрации (см. разд. 2.1).

Преобразование из одного формата в другой обычно приводит к небольшим различиям и ошибке регистрации. Например, преобразование из формата netCDF с сеточной регистрацией в формат ESRI ASCII с пиксельной регистрацией, приведет к сглаживанию данных и может вызвать проблемы с масштабированием из-за уменьшения размера сетки на один пиксель.

2.2.1 Методика построения батиметрических цифровых моделей рельефа по данным эхолотирования

Семейство батиметрических ЦМР IBCAO является оригинальной моделью, на которой основаны другие ЦМР типа А в Арктическом регионе. БД IBCAO представляет собой совокупность всех общедоступных батиметрических источников для Северного Ледовитого океана к северу от 64° с.ш. Источники включают данные однолучевых и многолучевых съемок,

рассекреченные измерения глубин с подводных лодок, исторические точечные данные глубин, полученные с полярных дрейфующих станций и с оцифрованных морских навигационных карт, локальные регулярные ЦМР, а также оцифрованные изобаты [149]. Большая часть источников содержит данные однолучевой съемки, полученные из следующих архивов: Национального центра геофизических данных США (US NGDC), Лаборатории военно-морских исследований США (US NRL), Геологической службы США (USGS), Норвежской гидрографической службы (NHS) и Датского королевского управления навигации и гидрографии (RDANN) (табл. 2.1) [152]. Многолучевые данные охватывают примерно 6% площади ЦМР ИВСаО 2.23. В районах за пределами доступных многолучевых съемок используются оцифрованные изобаты из батиметрических карт ГУНиО МО РФ [63], а также изобаты из Цифрового атласа ГЕБКО [123].

Создание ЦМР ИВСаО 2.23 включало основные следующие этапы (рис. 2.3) [151]:

1) Коррекция ошибок: анализ каждого источника данных на предмет систематических ошибок, внесение поправок за скорость звука, анализ расхождения глубин в местах пересечения нескольких источников данных, корректировка оцифрованных изобат в соответствии с измерениями глубин.

2) Прореживание данных: производится прореживание измеренных глубин вдоль следования судна, производится осреднение исходных данных по размеру ячейки сетки.

3) Пересчет исходных прореженных данных на регулярную сетку: расчет значений глубин для всех узлов сетки с помощью алгоритма *Surface* пакета GMT и параметром «непрерывный сплайн» с натяжением 0,35 [213].

4) Контроль качества: промежуточная поверхность проверяется на наличие артефактов; выделяются несоответствия между исходными данными и рассчитанной поверхностью. Обнаруженные систематические ошибки исправляются. В некоторых областях добавляется дополнительная информация, например, опорные контуры.

5) Пересчет регулярной сетки по исправленным исходным данным. Шаги 1–4 повторяются до тех пор, пока ошибки в финальной поверхности не будут сведены к минимуму.

6) Окончательное сглаживание ЦМР с помощью средневзвешенного фильтра.

2.2.2 Методика построения батиметрических цифровых моделей рельефа по данным эхолотирования и спутниковой альтиметрии

Семейство ЦМР GT представляет собой глобальную батиметрическую ЦМР, которая основана на акустических данных, комбинированных с предсказанным по гравитационным аномалиям рельефом. Гравитационная модель основана на данных об рельефе морской поверхности, полученных с помощью радарных альтиметров со спутников Geosat, ERS-1 и Topex/Poseidon [211, 212]. Акустические исходные данные включают данные однолучевых и многолучевых съемок, измерения с навигационных карт и локальные регулярные ЦМР, основанные на многолучевых съемках. Основными источниками являются БД NGDC, LDEO, SIO и другие (табл. 2.1) [81].

При определенных геофизических предположениях и геологических условиях существует корреляция между гравитационными аномалиями и элементами подводного рельефа с характерными размерами от 20 до 160 км [210, 212]. По этой корреляции определяется региональный коэффициент, применяемый к гравиметрии для получения предсказанной батиметрии. Предсказанный по гравитационным аномалиям рельеф комбинируется с акустическими батиметрическими данными. Таким образом, пробелы в данных заполняются значениями глубин из альтернативных источников данных. На последнем этапе компиляции ЦМР GT исходные измеренные значения глубин восстанавливаются в поверхность предсказанного рельефа. Более подробное описание метода можно найти в работах [210–212].

Ниже приводится краткое описание этапов построения ЦМР типа Б (рис.

2.4) [210–212, 81]:

1) Коррекция ошибок: поверхность предсказанного рельефа предыдущей версии ЦМР используется для идентификации основных ошибок и для выявления систематических ошибок в исходных данных.

2) Прореживание данных: осреднение данных по ячейке 500×500 м. На этом шаге основные ошибочные значения глубин заменяются медианным значением глубины в ячейке.

3) Создание поверхности предсказанного рельефа на регулярной сетке:

a. Рассчитывается регулярная ЦМР из откорректированных и прореженных исходных данных.

b. Рассчитываются регулярные модели отдельно для высокочастотных и низкочастотных компонент рельефа (длина волны ≤ 160 км и > 160 км, соответственно).

c. Рассчитывается коэффициент корреляции S между высокочастотной компонентой батиметрии и высокочастотной компонентой гравитационных аномалий для каждого региона Земного шара размером 160×160 км.

d. Для областей, в которых наблюдается сильная корреляция, высокочастотная компонента гравитационных аномалий масштабируется по коэффициенту корреляции S .

e. Поверхность предсказанного рельефа на регулярной сетке получается путем сложения поверхности, полученной на предыдущем шаге, и длинноволновой составляющей батиметрии.

4) Коррекция ошибок 2: созданная поверхность предсказанного рельефа используется для автоматического сравнения с исходными данными, исправления ошибок там, где это возможно, а также для пометки подозрительных галсов. Помеченные галсы не используются в следующей итерации создания предсказанной батиметрии. Шаги 2 и 3 повторяются.

5) Значения не помеченных галсов восстанавливаются в поверхность предсказанной батиметрии.

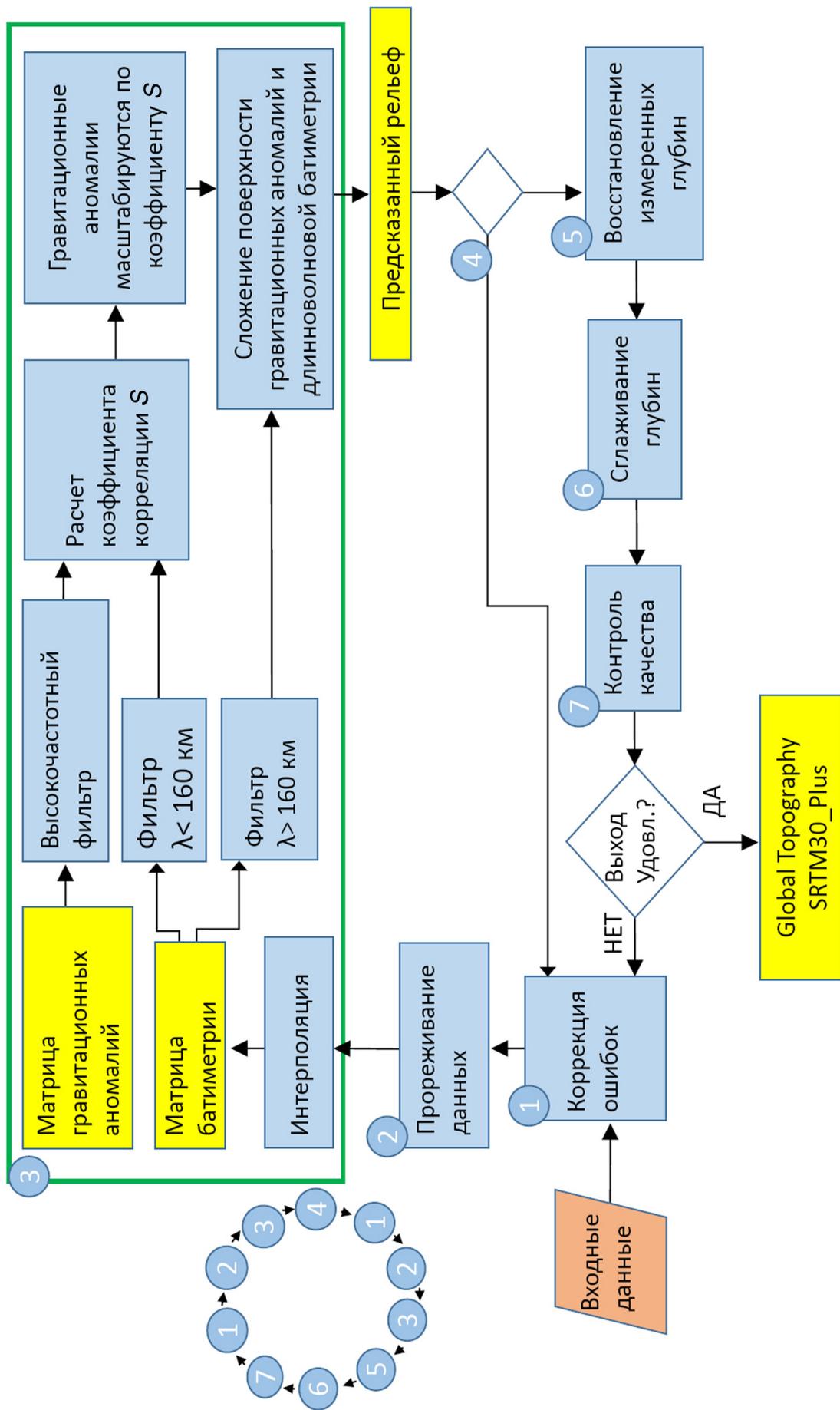


Рисунок 2.4 – Блок-схема основных этапов построения ЦМР типа Б. Зеленой рамкой обозначен этап интерполяции (для сравнения с рис. 2.3)

6) Сглаживание предсказанной батиметрической поверхности. Переход между предсказанной поверхностью и измеренными значениями глубин осуществляется методом «полировки» [211]. Разница между значениями измеренных глубин и предсказанных глубин в соседних ячейках сетки сглаживается с использованием алгоритма «сплайн с натяжением»; параметр натяжения составляет 0,75 [212, 81].

7) Контроль качества. На этом этапе производится проверка на наличие ошибок и подозрительных галсов. Ошибочные галсы выявляются путем вычисления отклонений от поверхности предсказанной батиметрии и измеренными глубинами для каждого индивидуального галса. Если отклонение слишком велико, то галс отмечается как ошибочный, если нет возможности определить источники ошибок и исправить их [211].

8) Все галсы, отмеченные как ошибочные, исключаются из расчета поверхности, и весь процесс, начиная с шага 1, повторяется заново.

Таким образом, определены шесть этапов процесса построения батиметрических ЦМР: 1) коррекция ошибок в исходных данных; 2) прореживание исходных данных; 3) интерполяция по регулярной сетке; 4) контроль качества получаемой ЦМР; 5) повторение шагов 1–4 без ошибочных измерений; 6) создание финальной ЦМР. Из рис. 2.3 и 2.4 видно, что при создании обоих типов ЦМР выполняются одинаковые шаги построения. Внутри каждого шага различия существенны для этапов коррекции ошибок и интерполяции (зеленая рамка на рис. 2.3 и 2.4).

2.3 Характеристика полигонов эталонных съемок

Для проведения апробации разработанной комплексной методики автором были выбраны шесть полигонов в Норвежско-Гренландском и Баренцевом морях (рис. 2.5). В пределах полигонов представлены участки морского дна с разными глубинами и морфологическими типами рельефа (табл. 2.2): срединно-океанический хребет Книповича (полигоны 1 и 2), абиссальная равнина Норвежского бассейна (полигон 3), шельфовая равнина

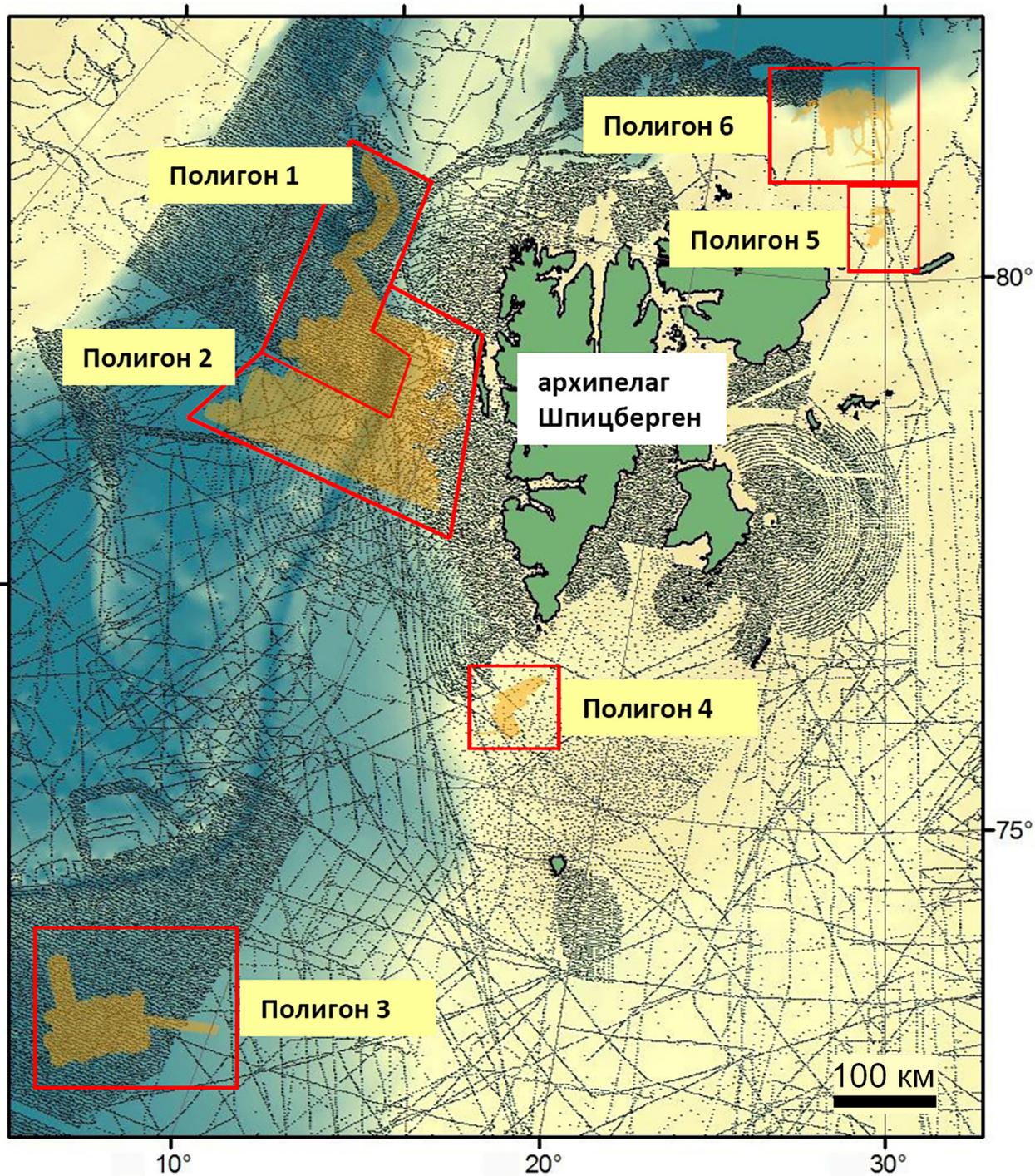


Рисунок 2.5 – Местоположение съемок МЛЭ (оранжевая заливка) в пределах полигонов эталонных съемок. Черными линиями и точками показано покрытие исходными данными ЦМР ИВСАО 2.23

Таблица 2.2 – Полигоны: основные физико-географические характеристики, параметры эталонных ЦМР и исходные данные, использованные для создания тестовых фрагментов ЦМР GEVCO_08 и GT 13.1 в пределах полигонов

Полигон	Физико-географическая характеристика			Тестовые фрагменты ЦМР (рис. 2.6–2.15)		Эталонные ЦМР (рис. 2.17–2.21)	
	Глубины (м)	Морфология	Расчлененность	Исходные данные	Плотность покрытия	Система координат	Разрешение (м)
1	–1200 – –5400	срединно- океанический хребет	сильно расчлененный	ЦМР на основе МЛЭ с НИС <i>Polarstern</i>	плотное	UTM 32N	100
2	–110 – –3600	срединно- океанический хребет	сильно расчлененный	Данные NHS и однолучевых съемок NGDC, <i>изобаты</i>	относительно плотное	UTM 32N	100
3	–1700 – –3000	абиссальная равнина	слабо расчлененный	Данные МЛЭ NPD	плотное	UTM 32N	100

4	-150 – -400	шельф (трог)	слабо расчлененный	Данные NHS	нерегулярные единичные промеры	UTM 37N	50
5	-50 – -500	шельф (трог)	расчлененный	Изобаты, МЛЭ, данные NHS, данные однолучевых съемок NGA, МЛЭ	точечное	UTM 37N	10
6	-60 – -2900	континентальный склон	слабо расчлененный	изобаты, МЛЭ, данные NHS, МЛЭ	нерегулярные единичные промеры	UTM 37N	50

Примечание: синим шрифтом указаны источники данных, которые вошли только в GEBCO_08, красным шрифтом – только в GT 13.1

Баренцева моря: Баренцевоморский трог (полигон 4) и трог Орла (полигон 5), а также Арктический континентальный склон (полигон 6).

Эти полигоны характеризуются: а) разной степенью расчлененности рельефа; б) разной степенью корреляции между рельефом и гравитационным полем, что отражается на точности тестируемых ЦМР; в) разным типом исходных данных, использованных для создания тестируемых ЦМР (см. разд. 2.4); и г) разной степенью покрытия этими данными (табл. 2.2).

На континентальном шельфе (рис. 2.5: полигоны 4 и 5) исходными данными для создания тестовых фрагментов ЦМР в основном являются данные однолучевой съемки и точечные данные национальных гидрографических промеров. Для 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 [211].

На абиссальной равнине (рис. 2.5: полигон 3) исходными данными для построения тестовых фрагментов ЦМР являются, в основном, данные однолучевой съемки и редкие галсовые проходы многолучевой съемкой. Для этой морфологической провинции в целом характерна низкая степень корреляции между рельефом и гравитационным полем по причине высокой мощности осадков.

На срединно-океаническом хребте (рис. 2.5: полигоны 1 и 2) исходными данными для построения тестовых фрагментов ЦМР являются площадные съемки многолучевым эхолотом, в сочетании с проходами однолучевым эхолотом и точечными данными национальных гидрографических промеров. Для провинции срединно-океанического хребта в целом характерна высокая степень корреляции между рельефом и гравитационным полем из-за низкой мощности осадочного чехла.

Зона эталонной МЛЭ-съемки срединно-океанического хребта разделена

автором на два полигона 1 и 2 (рис. 2.5) для последующего анализа систематической ошибки в исходных данных ЦМР GT 13.1, допущенной при обработке результатов батиметрической съемки территории полигона 1 в рейсах НИС *Polarstern* в 1984–1997 гг. (см. разд. 3.4).

Выбранные для исследования полигоны репрезентативны с точки зрения; а) морфологии подводного рельефа Северного Ледовитого океана; б) исходных данных, по которым были построены общедоступные батиметрические ЦМР (разд. 2.4); и в) изучения типичных ошибок в общедоступных ЦМР Арктического бассейна (гл. 4 и 5).

2.4 Тестовые фрагменты общедоступных цифровых моделей рельефа

Для проведения апробации разработанной автором комплексной методики оценки точности и качества батиметрических ЦМР, из общедоступных ЦМР (разд. 2.2), были выделены тестовые фрагменты для шести полигонов (разд. 2.3). На рис. 2.6–2.10 представлены тестовые фрагменты, выделенные из ЦМР GEBCO_08 (ЦМР типа А), а также распределение исходных данных, использованных для построения этой ЦМР в пределах полигонов 1–6. На рис. 2.11–2.14 представлены тестовые фрагменты, выделенные из ЦМР GT 13.1 (ЦМР типа Б), а также распределение исходных данных, использованных для построения этой ЦМР в пределах полигонов 1–5. Так как полигон 6 расположен за пределами покрытия ЦМР GT 13.1, тестовый фрагмент для этого полигона был выделен из другой ЦМР типа Б: SRTM30_Plus 6.0 (рис. 2.15). На рис. 2.15 также представлено распределение исходных данных, использованных для построения этой ЦМР в пределах полигона 6.

Выбор для апробации разработанной методики прежних версий общедоступных ЦМР GEBCO_08, GT 13.1, IBCAO 2.23 и SRTM30_Plus 6.0 связан с тем, что в эти версии общедоступных ЦМР не вошли данные эталонных ЦМР (см. разд. 2.5). Вместе с тем, эталонные ЦМР вошли в более

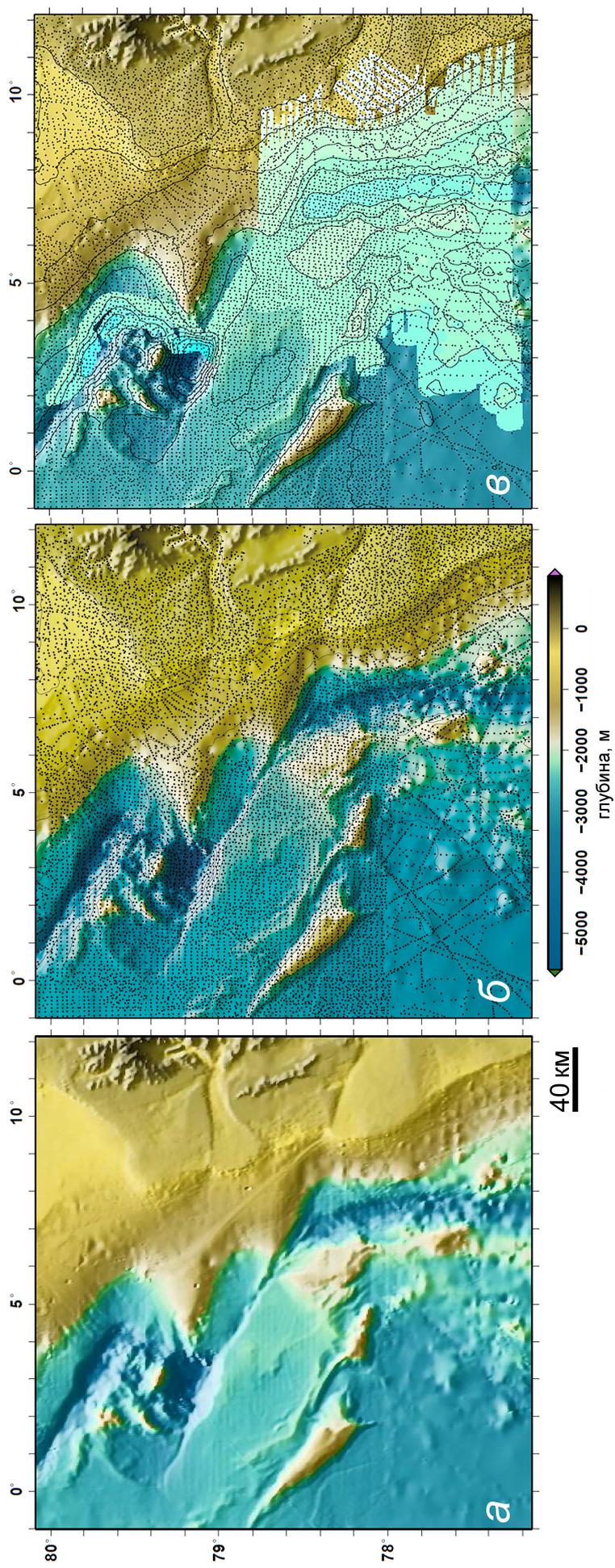


Рисунок 2.6 – Район полигонов 1 и 2: *а* – батиметрия, построенная по ЦМР GEVSCO_08; *б* – покрытие исходными данными ЦМР GEVSCO_08 (черные точки) на фоне батиметрии ЦМР GEVSCO_08; *в* – площадь покрытия эталонных ЦМР (голубая заливка); показаны изобаты ЦМР ИВСАО 2.23

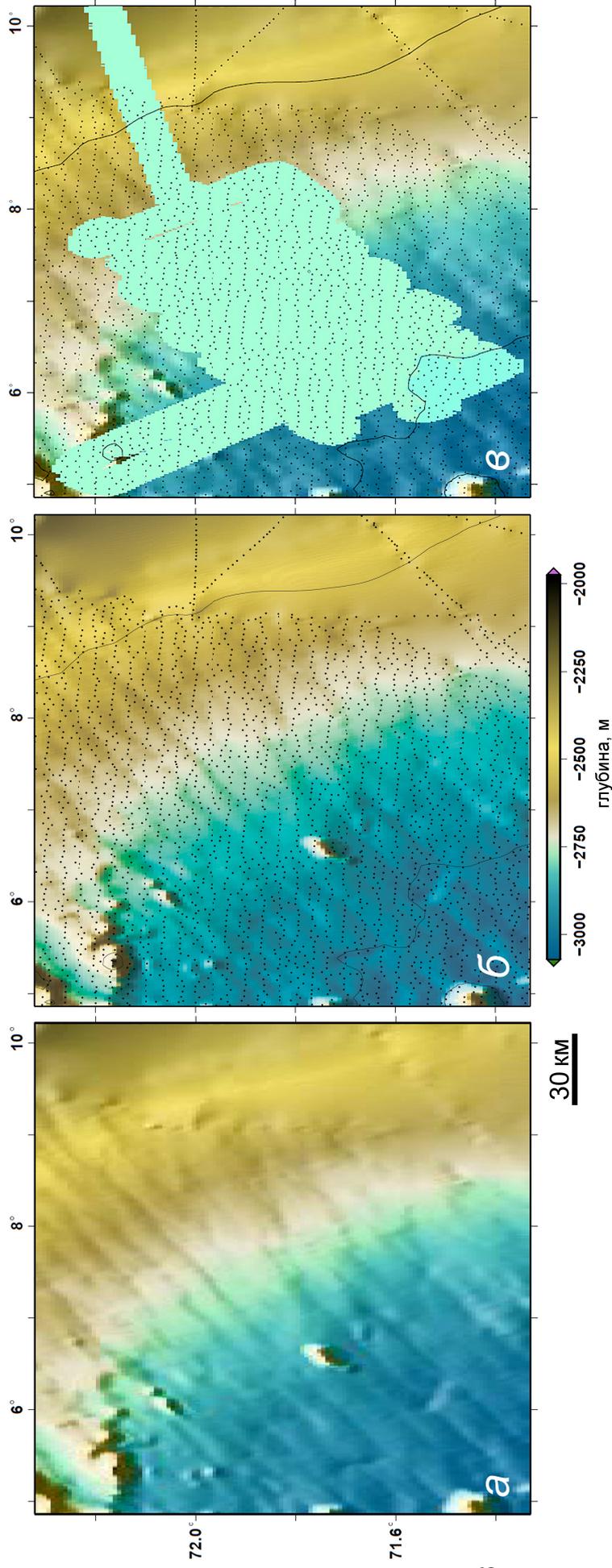


Рисунок 2.7 – Район полигона 3: а – батиметрия, построенная по ЦМР GEVCO_08; б – покрытие исходными данными ЦМР GEVCO_08 (черные точки) и изобаты ЦМР IVSAO 2.23, на фоне батиметрии ЦМР GEVCO_08; в – площадь покрытия эталонной ЦМР (голубая заливка)

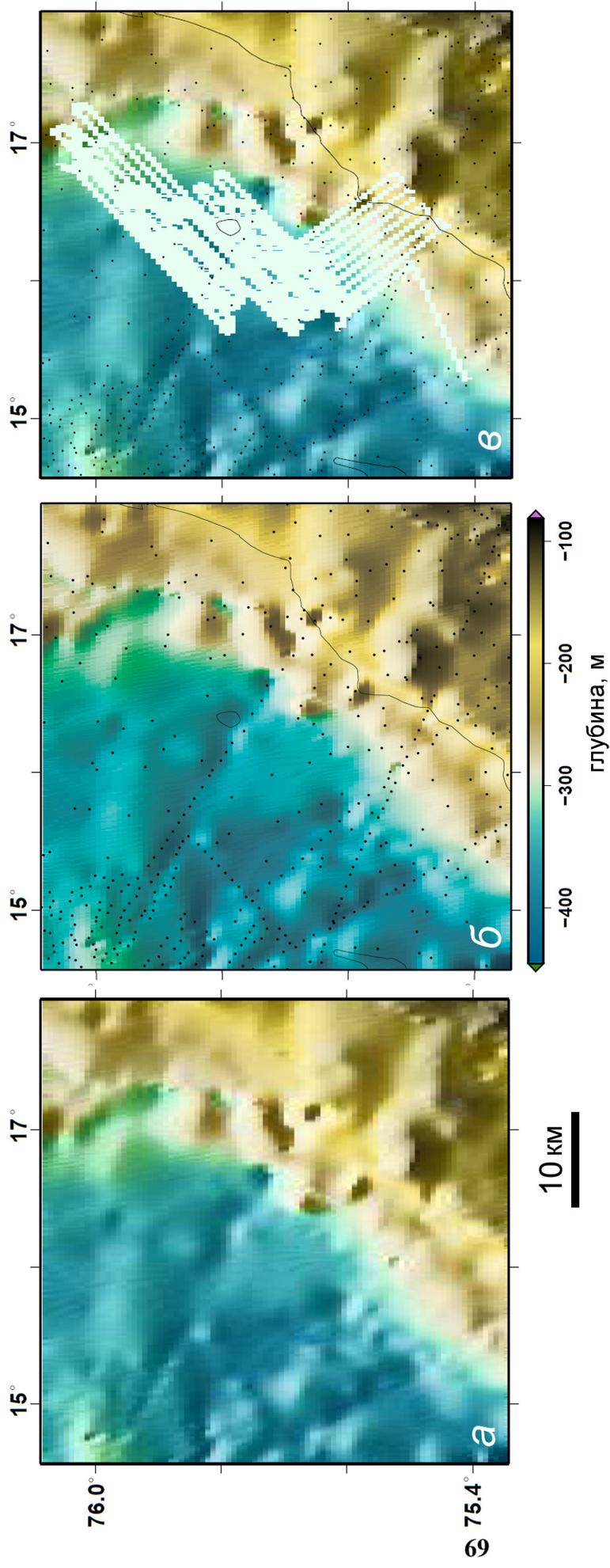


Рисунок 2.8 – Район полигона 4: *а* – батиметрия, построенная по ЦМР GEVSCO_08; *б* – покрытие исходными данными ЦМР GEVSCO_08 (черные точки) и изобаты ЦМР IBСАО 2.23, на фоне батиметрии ЦМР GEVSCO_08; *в* – площадь покрытия эталонной ЦМР (бледно-голубая заливка)

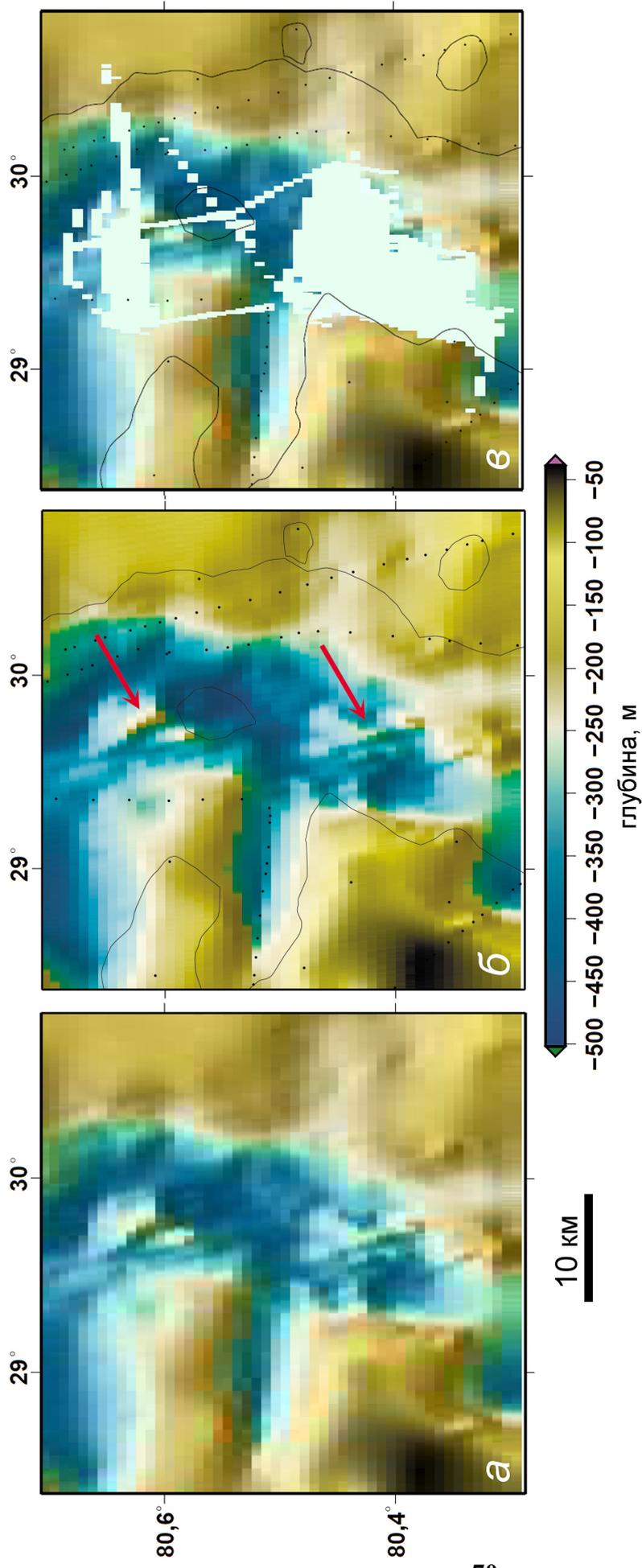


Рисунок 2.9 – Район полигона 5: *а* – батиметрия, построенная по ЦМР GEVSCO_08; *б* – покрытие исходными данными ЦМР GEVSCO_08 (черные точки) и изобаты ЦМР ИВСАО 2.23, на фоне батиметрии ЦМР GEVSCO_08. Красные стрелки указывают элементы рельефа, информация о которых есть в ЦМР GEVSCO_08, но отсутствует в ее исходных данных (см. разд. 3.3); *в* – площадь покрытия эталонной ЦМР (бледно-голубая заливка)

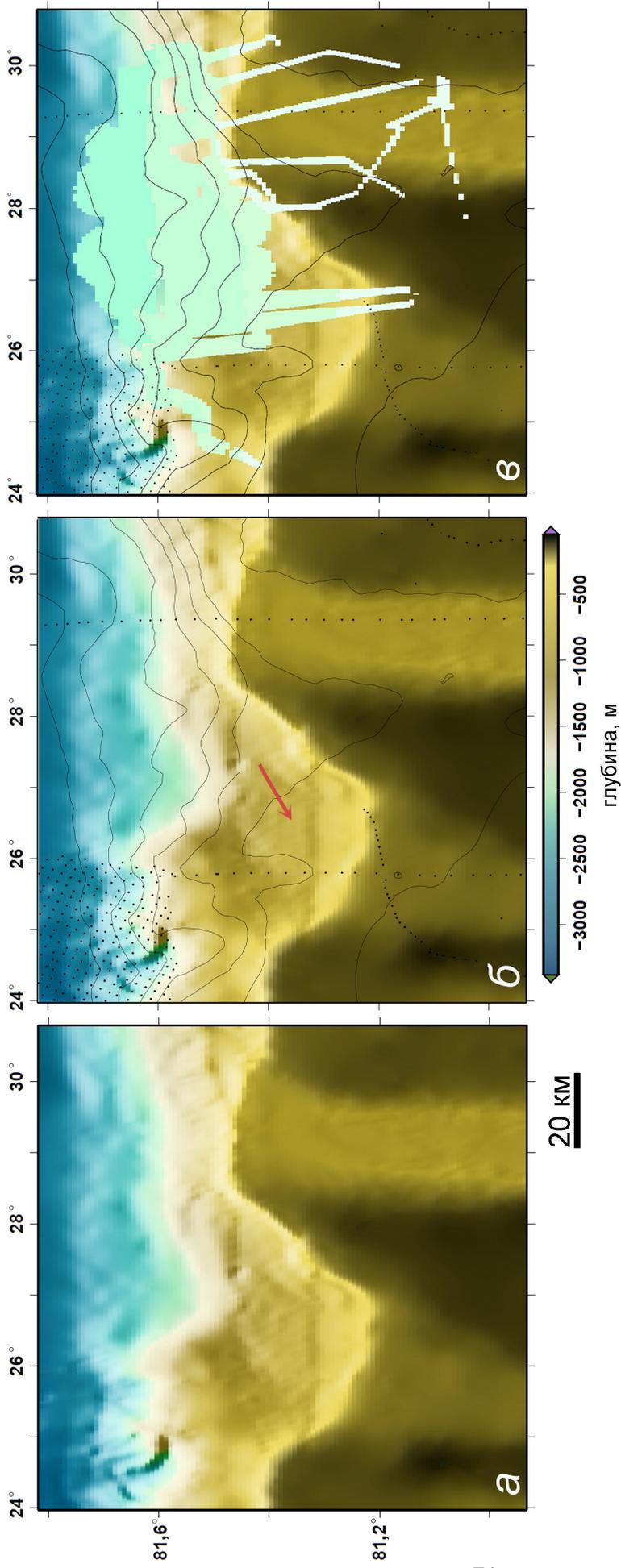


Рисунок 2.10 – Район полигона б: а – батиметрия, построенная по ЦМР GEVCO_08; б – покрытие исходными данными ЦМР GEVCO_08 (черные точки) и изобаты ЦМР ИВСАО 2.23, на фоне батиметрии ЦМР GEVCO_08. Красная стрелка указывает элементы рельефа, информация о которых есть в ЦМР GEVCO_08, но отсутствует в ее исходных данных (см. разд. 3.3); в – площадь покрытия эталонной ЦМР (голубая заливка)

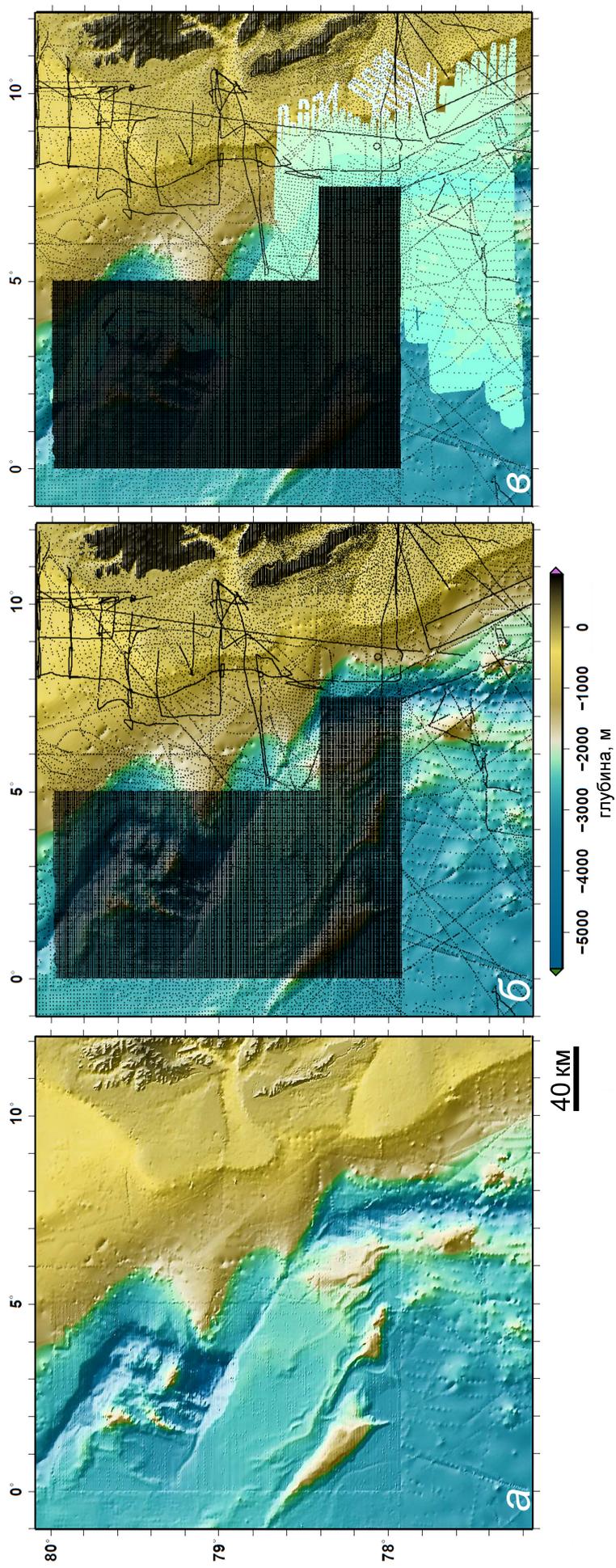


Рисунок 2.11 – Район полигонов 1 и 2: *a* – батиметрия, построенная по ЦМР GT 13.1; *б* – покрытие исходными данными (черные точки) на фоне батиметрии ЦМР GT 13.1. Многоугольник с плотной сеткой исходных данных – ЦМР по данным МЛЭ НИС *Polarstern* (см. разд. 3.3); *в* – площадь покрытия эталонных ЦМР (голубая заливка)

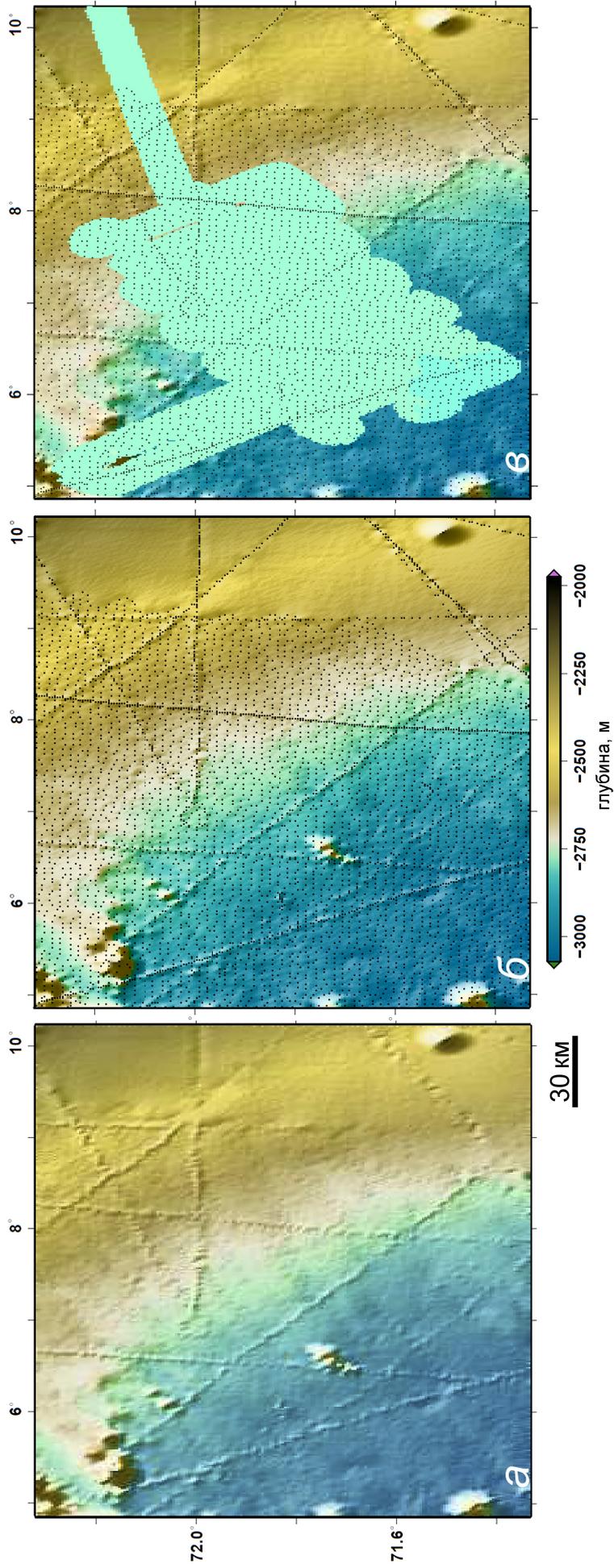


Рисунок 2.12 – Район полигона 3: *а* – батиметрия, построенная по ЦМР GT 13.1; *б* – покрытие исходными данными (черные точки) на фоне батиметрии ЦМР GT 13.1; *в* – площадь покрытия эталонной ЦМР (голубая заливка)

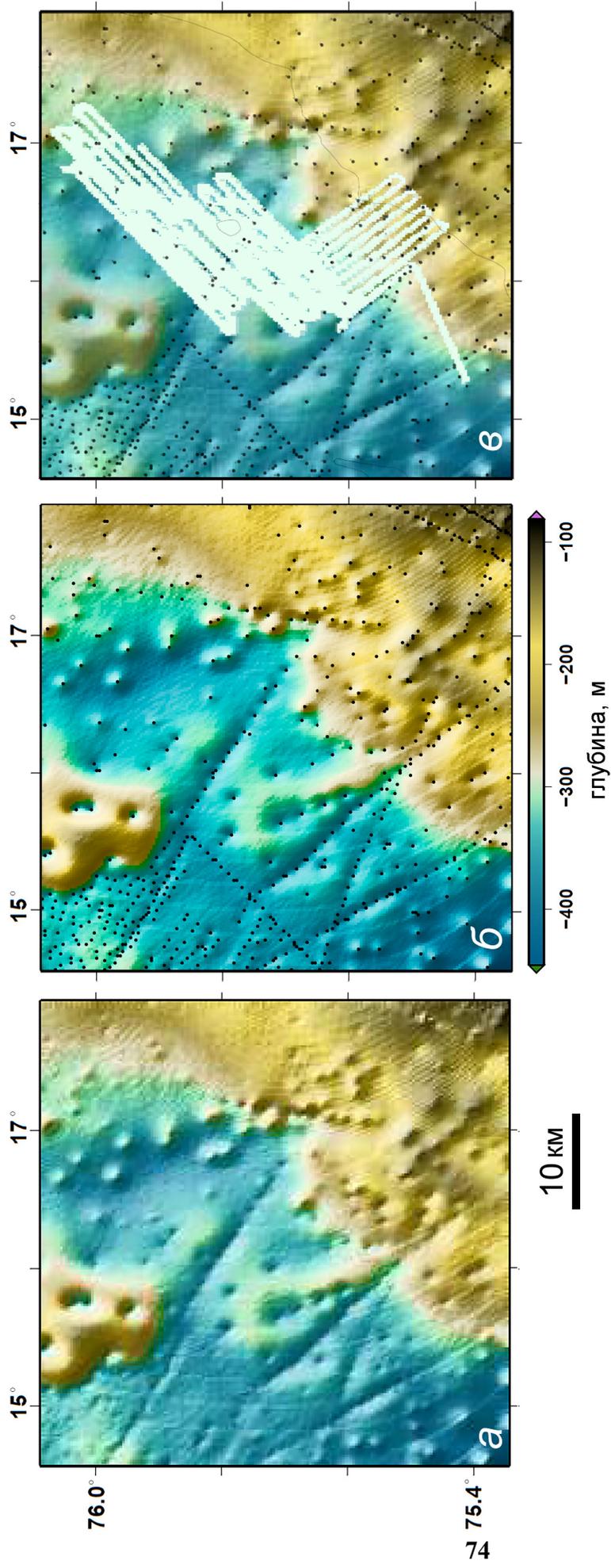


Рисунок 2.13 – Район полигона 4: *a* – батиметрия, построенная по ЦМР GT 13.1; *б* – покрытие исходными данными (черные точки) на фоне батиметрии ЦМР GT 13.1; *в* – площадь покрытия эталонной ЦМР (бледно-голубая заливка)

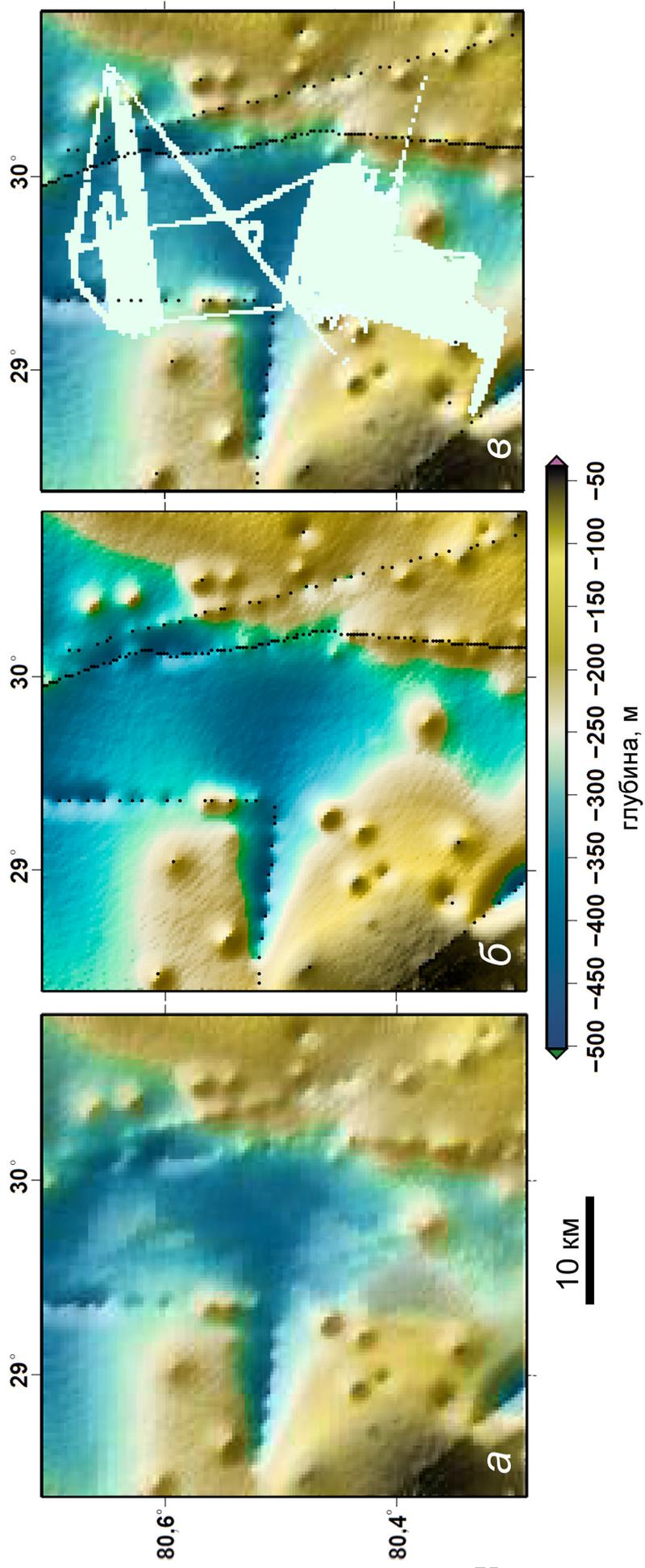


Рисунок 2.14 – Район полигона 5: *а* – батиметрия, построенная по ЦМР GT 13.1; *б* – покрытие исходными данными (черные точки) на фоне батиметрии ЦМР GT 13.1; *в* – площадь покрытия эталонной ЦМР (бледно-голубая заливка)

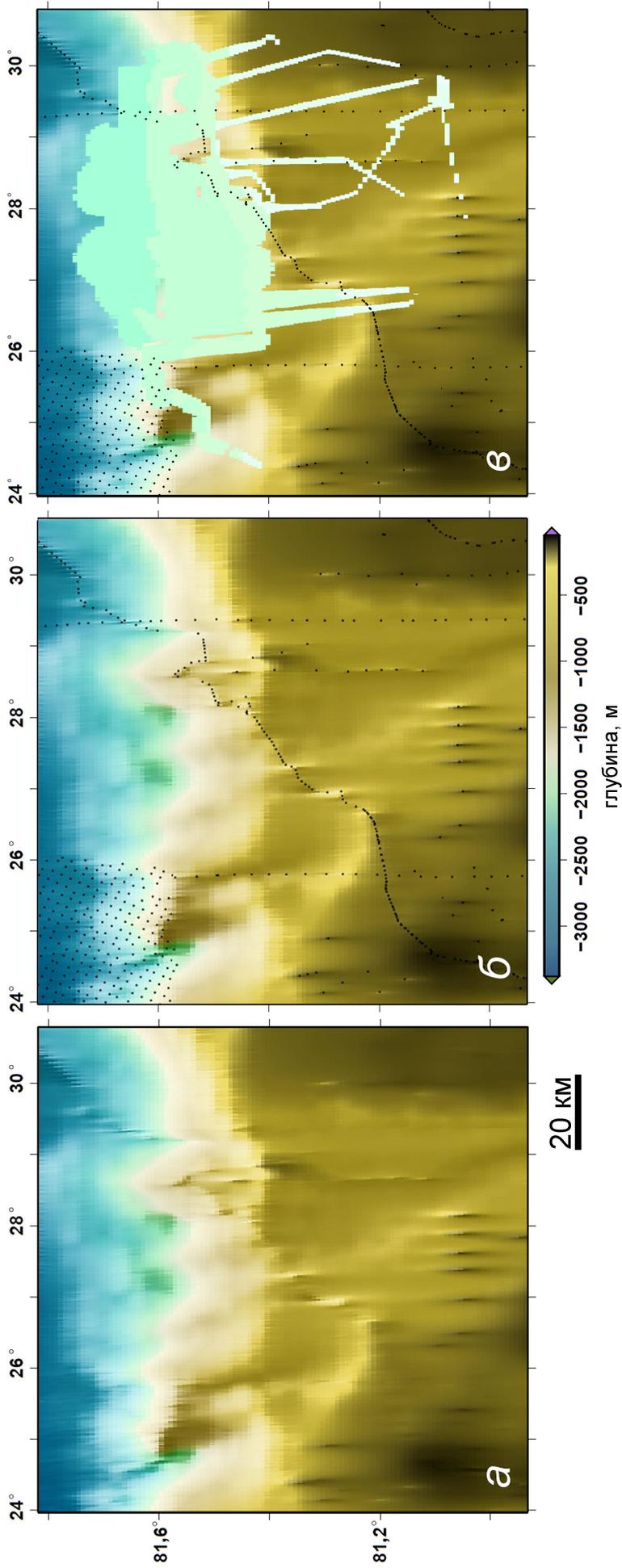


Рисунок 2.15 – Район полигона б: а – батиметрия, построенная по ЦМР SRTM30_Plus 6.0; б – покрытие исходными данными (черные точки) на фоне батиметрии ЦМР SRTM30_Plus 6.0; в – площадь покрытия эталонной ЦМР (голубая заливка)

поздние версии ЦМР GEBCO, GT, IBCAO и SRTM30_Plus. Таким образом, фрагменты более поздних версий общедоступных ЦМР нельзя (точнее – не имеет смысла) использовать для апробации разработанной методики, так как в этом случае выделенные фрагменты общедоступных ЦМР будут не просто зависимы от эталонных ЦМР, а практически идентичны.

Применение для апробации разработанной методики фрагментов прежних версий общедоступных глобальных ЦМР оправдано и в техническом отношении. Способ составления и структура всех версий ЦМР каждого из семейств моделей – GEBCO, IBCAO, GT, SRTM30_Plus – являются однотипными. В их новых версиях могут меняться (уточняться) только значения глубин в тех или иных ячейках сетки, использоваться более точные и вычислительно эффективные методы интерполяции исходных нерегулярных данных, а также может сгущаться регулярная сетка (повышаться пространственное разрешение) ЦМР. Однако такие различия не требуют дополнительной доработки или адаптации разработанной автором комплексной методики оценки точности и качества батиметрических ЦМР.

2.5 Эталонные данные многолучевого эхолотирования

В качестве эталонных автором использованы шесть ЦМР морского дна высокого разрешения и точности. Эталонные ЦМР были получены в результате МЛЭ-съемки шести полигонов (разд. 2.3), расположенных в Норвежско-Гренландском и Баренцевом морях (рис. 2.16), в ходе 24–26-го рейсов НИС *Академик Николай Страхов*, при непосредственном участии автора [21, 22, 45].

Эталонные ЦМР (рис. 2.17–2.21) являются независимыми данными, так как они не использовались при создании общедоступных ЦМР, использованных для апробации разработанной методики (разд. 2.4).

МЛЭ проводилось с помощью гидроакустической системы RESON [200], включающей: глубоководный (SeaBat-7150, 12 кГц) и мелководный эхолоты (SeaBat-8111, 100 кГц), GPS-приемник Trimble DSM132, сенсоры

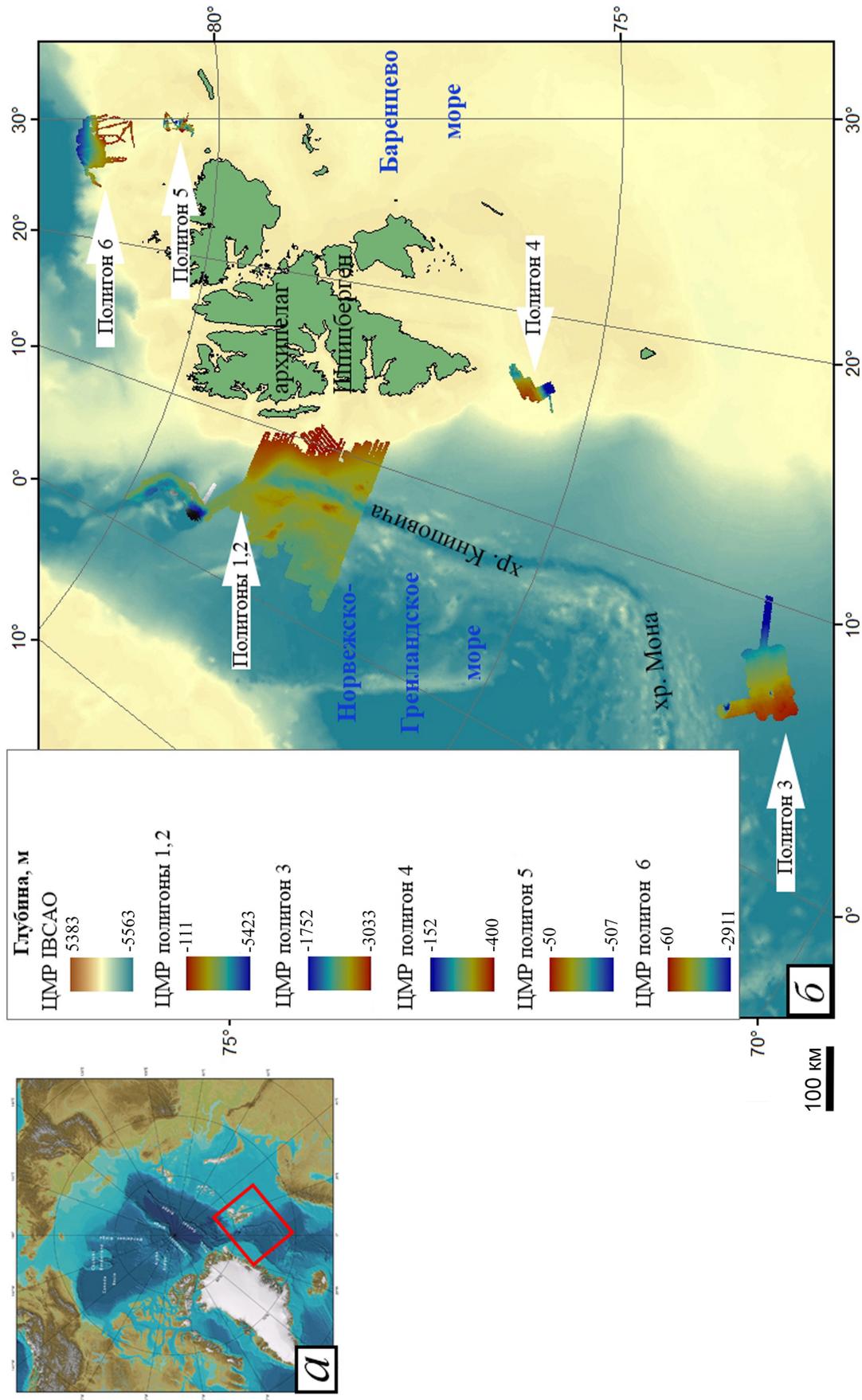


Рисунок 2.16 – Полигоны и эталонные ЦМР: а – географическое положение района исследования на карте ИВСаО; б – расположение полигонов и эталонных ЦМР. Рельеф построен по ЦМР ИВСаО 2.23 и эталонным ЦМР

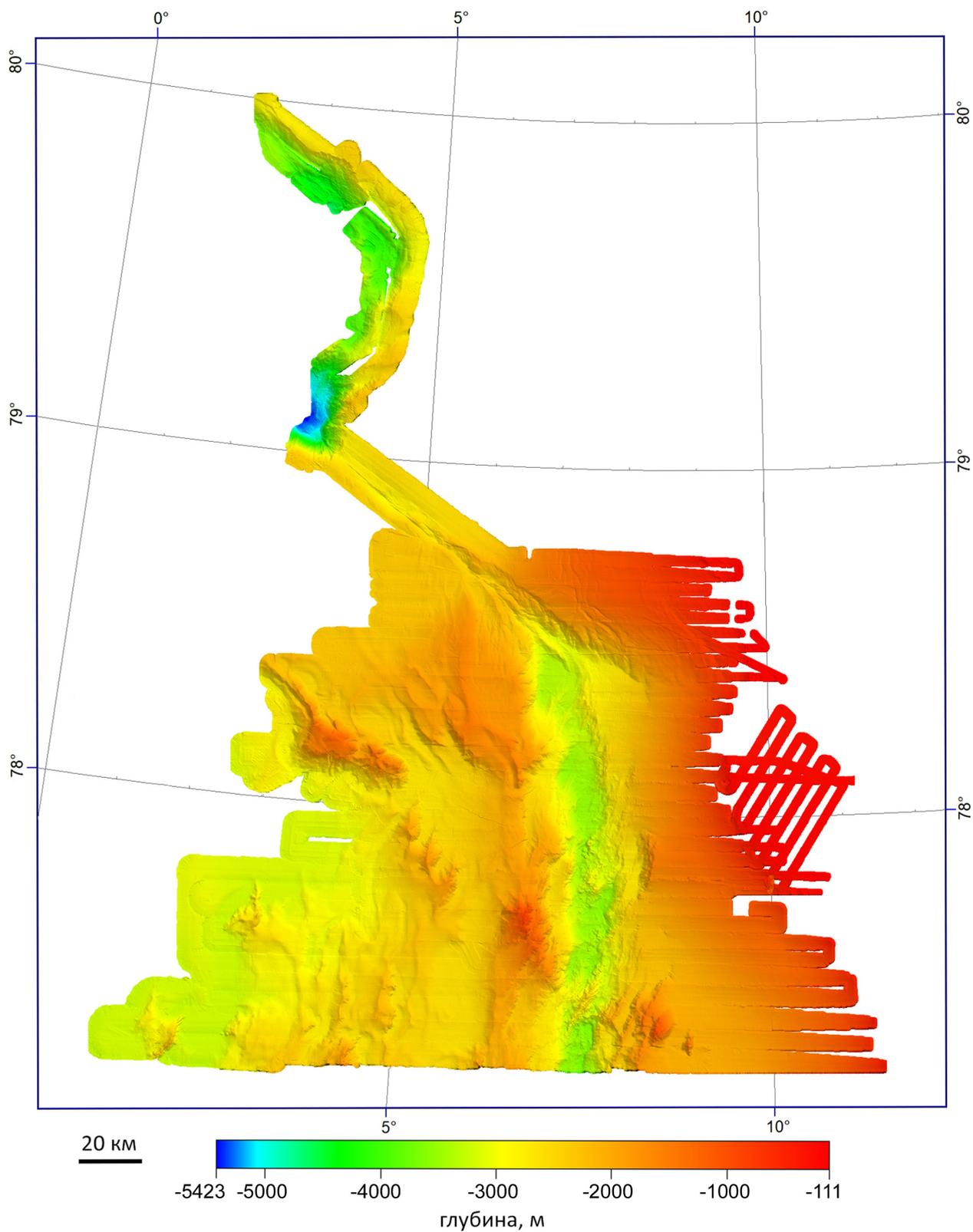


Рисунок 2.17 – Эталонная ЦМР полигонов 1 и 2

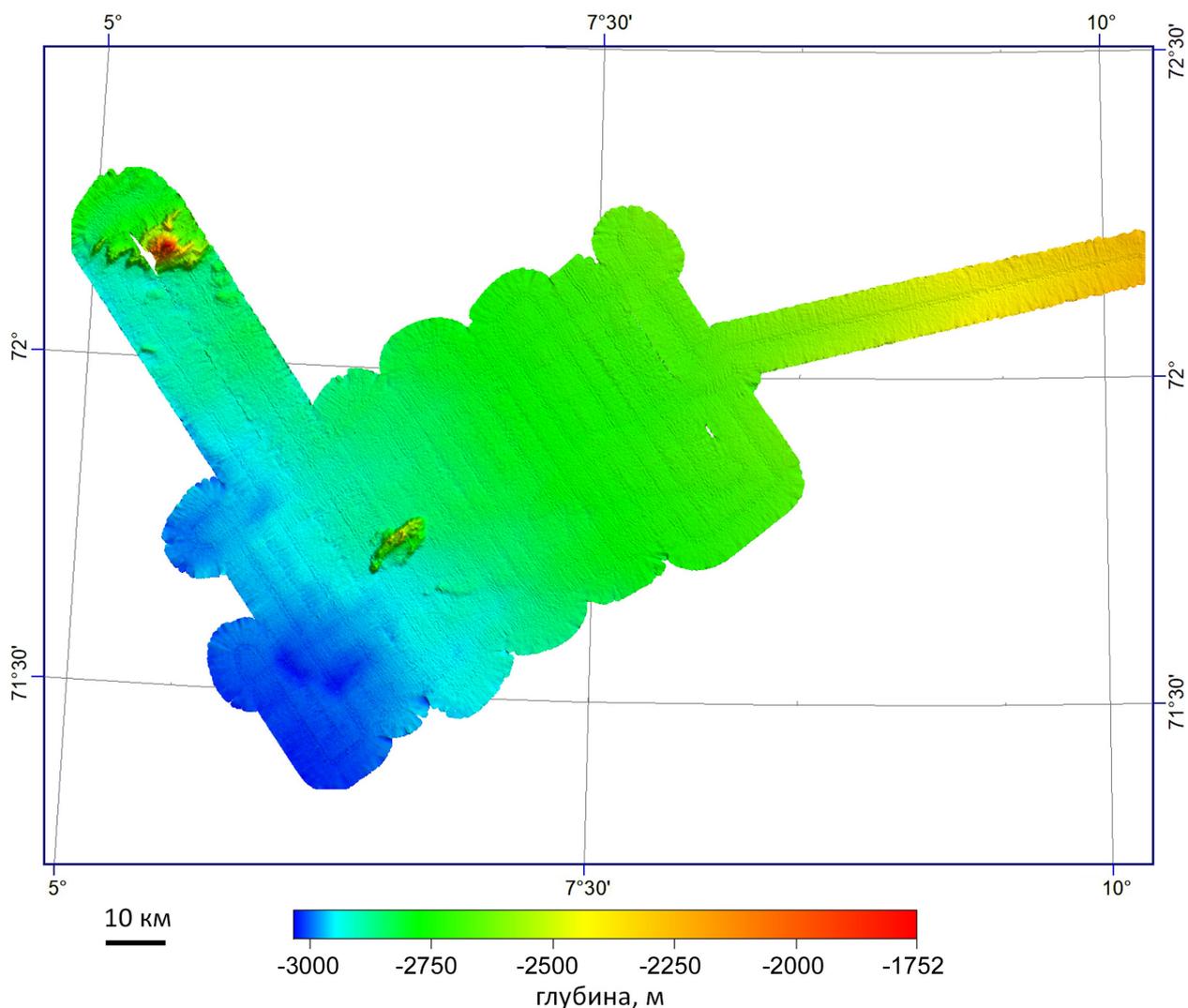


Рисунок 2.18⁵ – Эталонная ЦМР полигона 3

⁵ На рис. 2.17–2.21 (как и на ряде других рисунков диссертации) применяются нетрадиционные для картографирования батиметрии шкалы. Это связано с желанием автора максимально детально и наглядно отобразить особенности подводного рельефа, представленного как в эталонных, так и тестируемых батиметрических ЦМР. Применение традиционных и рекомендуемых батиметрических шкал с использованием одного или нескольких холодных цветовых тонов (голубого, бирюзового, зелено-голубого, синего, сине-фиолетового) [18] далеко не всегда позволяет достичь желаемого результата.

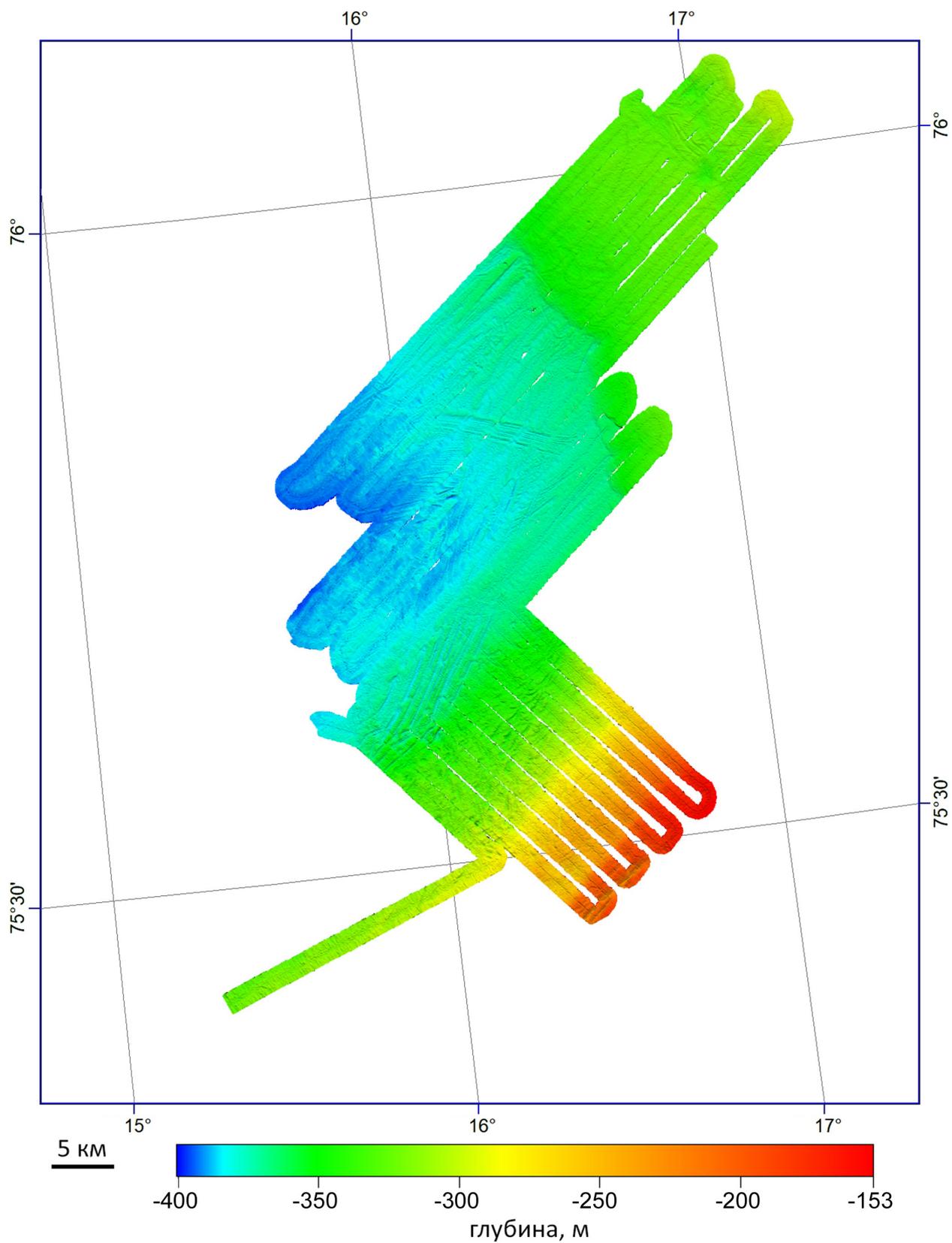


Рисунок 2.19 – Эталонная ЦМР полигона 4

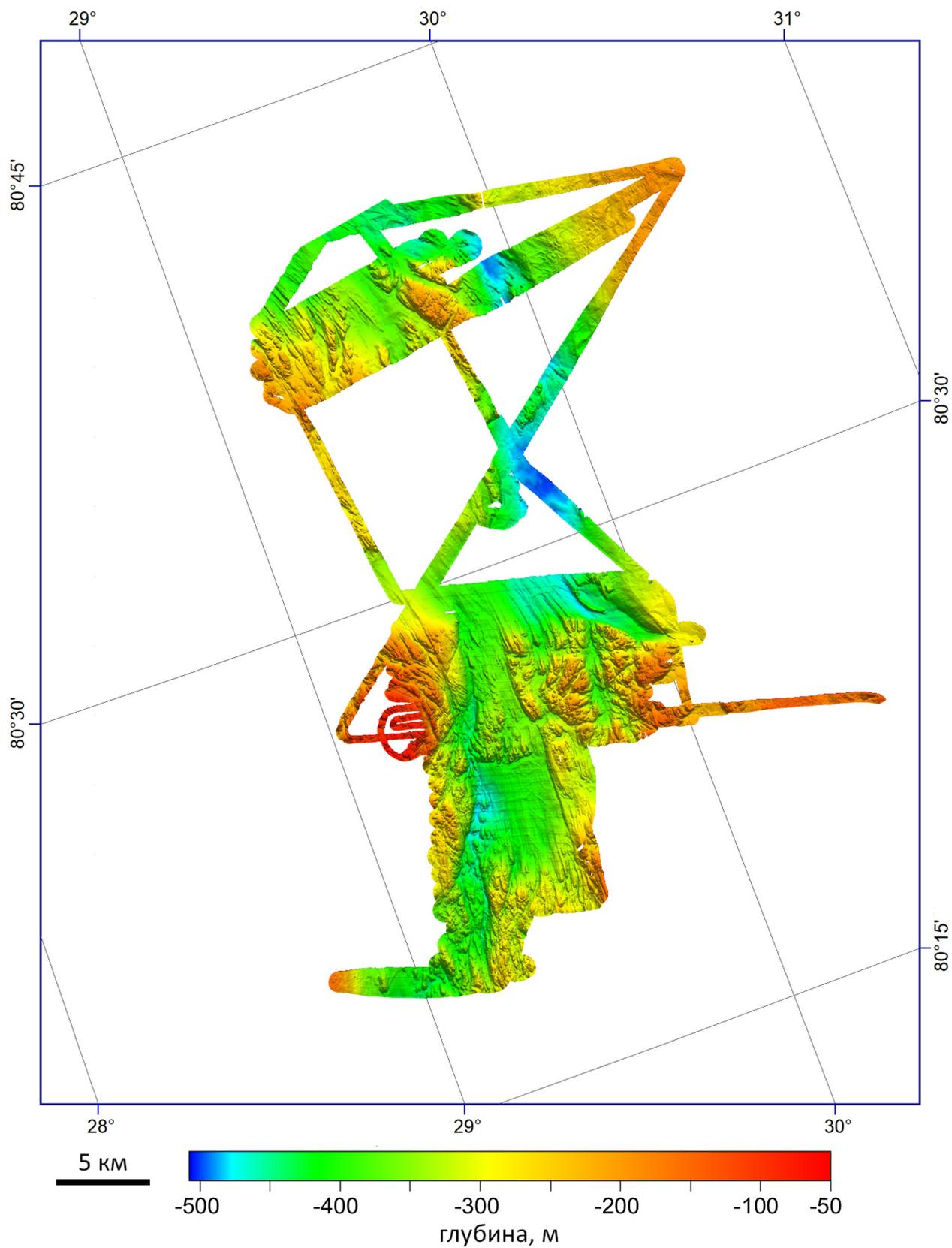


Рисунок 2.20 – Эталонная ЦМР полигона 5

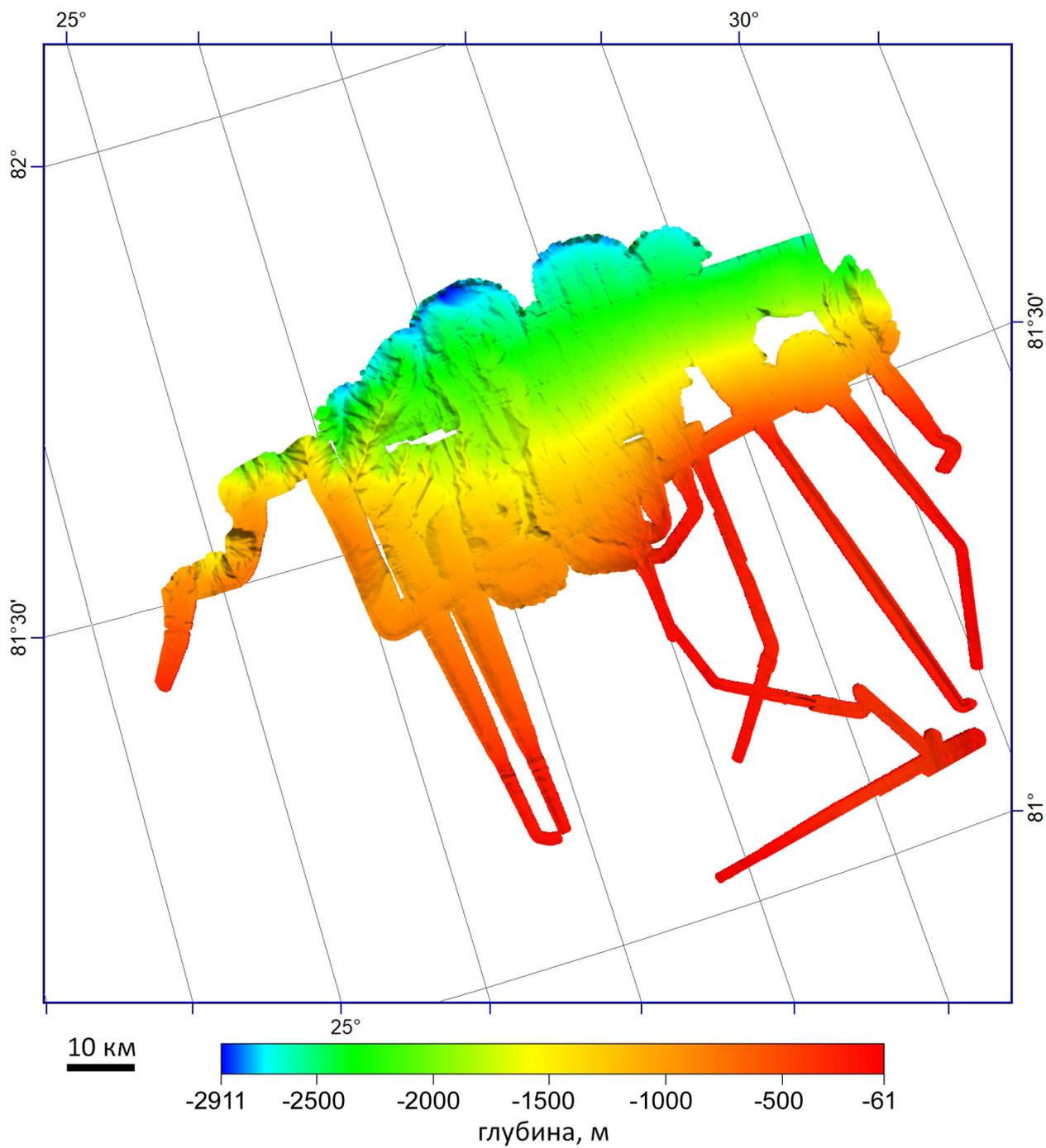


Рисунок 2.21 – Эталонная ЦМР полигона 6

движения и гирокомпас, объединенные в приборе IXSEA OCTANS III, датчик скорости звука у антенн эхолотов SVP-70, и пакет программ RESON PDS2000 [198]. Заявленная точность съемки системой RESON соответствует классу «2» стандартов МГО [146, 147]. Однако рассчитанная максимальная допустимая неопределенность определения места и глубины показала, что проведенная съемка является более точной (см. подразд. 2.5.1).

Обработка данных МЛЭ включала удаление грубых ошибок и боковых лучей, внесение поправок за скорость звука и визуальный контроль качества. За нулевую отметку глубин был принят средний уровень моря. На основе обработанных данных с помощью интерполяции с использованием алгоритма взвешенного среднего [222] были построены шесть эталонных ЦМР. Разрешение эталонной ЦМР зависит от полигона (табл. 2.2). Для интерполяции ЦМР применялся пакет Golden Software Surfer [215].

2.5.1 Оценка неопределенности эталонных данных

Для определения значимости ошибок, или допустимого расхождения глубин между тестируемыми и эталонными ЦМР, была проведена оценка неопределенности независимых данных МЛЭ. Неопределенность – термин, введенный в 5-й редакции стандарта гидрографических съемок S-44 [146]. Этим термином был заменен термин «ошибка» в связи с тем, что «ошибка представляет собой разность между измеренным значением и истинным значением. Раз истинное значение никогда не известно, следовательно, и сама ошибка не может быть известна. Неопределенность является статистической оценкой вероятной величины ошибки» [146].

Неопределенность глубин в регулярной ЦМР зависит от вертикальной и плановой компоненты неопределенности каждой измеренной глубины, а также от уклона рельефа. В качестве показателя уровня неопределенности эталонных ЦМР используется суммарная перенесенная неопределенность (СПН), total propagated uncertainty (TPU) данных [146, 147]. СПН МЛЭ-данных была рассчитана по формуле [134, 146]:

$$TPU = \sqrt{TPU_{ver}^2 + TPU_{hor}^2 \operatorname{tg}^2 G}, \quad (2.1)$$

где TPU_{ver} – суммарная вертикальная неопределенность глубины, TPU_{hor} – суммарная плановая неопределенность местоположения, и G – значение локального уклона.

Неопределенность глубин в регулярных эталонных ЦМР в работе не оценивалась. Вместо этого была проведена оценка неопределенности МЛЭ-данных ГИН РАН с помощью адаптированного метода Харе [134]. Для оценки СПН МЛЭ-данных были использованы сырые данные МЛЭ. Было отобрано 16 подгрупп МЛЭ-профилей по средней глубине от 380 м до 5100 м, состоящих из 15-ти профилей МЛЭ-съемки каждая (рис. 2.22). Сырые данные МЛЭ были импортированы и обработаны в программном пакете CARIS HIPS & SIPS [140]. Необходимые для вычисления СПН значения смещения датчиков и значения неопределенностей были взяты из отчетов НИС *Академик Николай Страхов* и технического описания инструментов (прил. А), и были затем внесены в программу CARIS HIPS & SIPS. Для каждой измеренной глубины были рассчитаны TPU_{ver} и TPU_{hor} . Из 256 лучей одного профиля съемки МЛЭ, в расчетах использовались данные лучей № 60–190, так как внешние лучи имеют самую высокую неопределенность (рис. 2.23). Каждый обрезанный профиль съемки состоит примерно из 130 лучей (то есть, содержит 130 измерений глубин).

Для оценки углов наклона рельефа в пределах шести изучаемых полигонов были построены карты уклонов, а также рассчитаны средние углы наклона для каждого полигона. Каждый полигон характеризуется различным распределением углов наклона рельефа: от 0° и до 45° в нескольких областях сильно расчлененной морфологии (полигоны 1 и 5).

Средний уклон рельефа по полигонам варьирует от $0,06^\circ$ (полигон 4) до $5,2^\circ$ (полигон 5). Таким образом, для оценки максимальной неопределенности эталонных данных использован максимальный уклон рельефа в 45° .

На рис. 2.23 и 2.24 показаны значения СПН, рассчитанные для каждой

измеренной глубины в пределах выборки 16 подгрупп без учета угла уклона рельефа и исходя из максимального угла наклона дна 45° . Как видно из рис. 2.24, максимальное значение СПН характерно для боковых лучей МЛЭ и составляет 1,85% глубины с 95% доверительной вероятностью. Для сравнения: СПН, рассчитанная для угла наклона дна $5,2^\circ$ (средний для полигона 5), имеет максимальное значение 1,05% глубины. Таким образом, значение максимальной СПН является сильно завышенным.

В качестве оценки СПН глубин в регулярных эталонных ЦМР было принято максимальное значение СПН сырых данных.

2.5.2 Оценка точности эталонных данных

Для проверки эталонных ЦМР на предмет наличия систематических ошибок автором был проведен анализ невязок (расчет разности глубин) с независимыми данными МЛЭ из рейсов исследовательских ледоколов (ИЛ) *Healy* и *Oden* в местах пересечения съемок со съемками ГИН РАН.

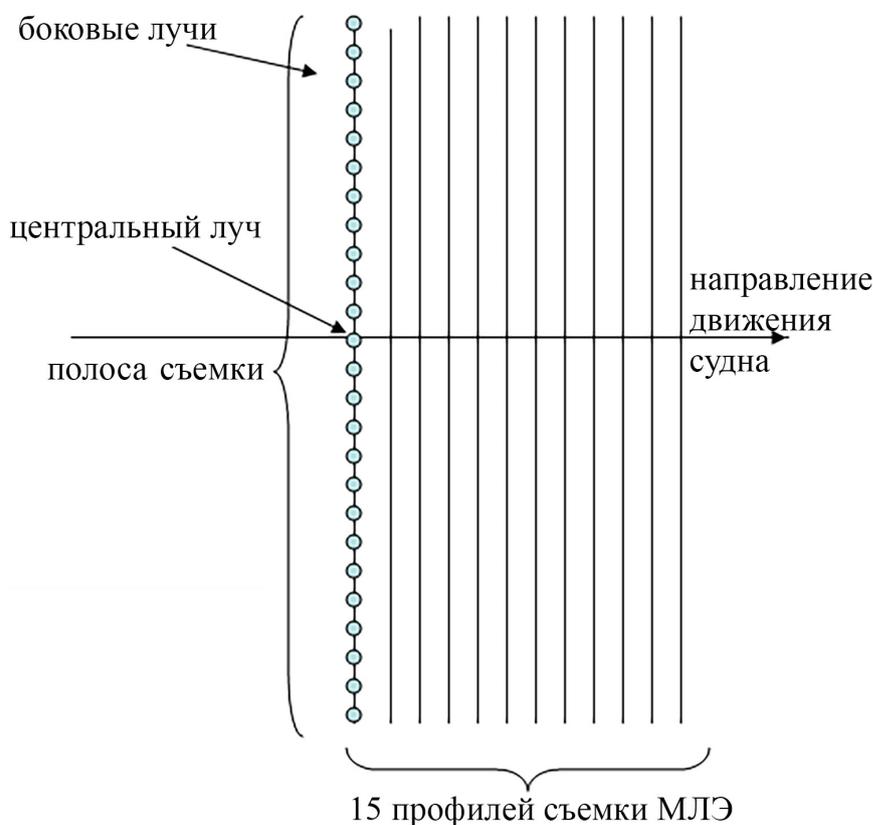


Рисунок 2.22 – Схема подгруппы из 15 профилей съемки

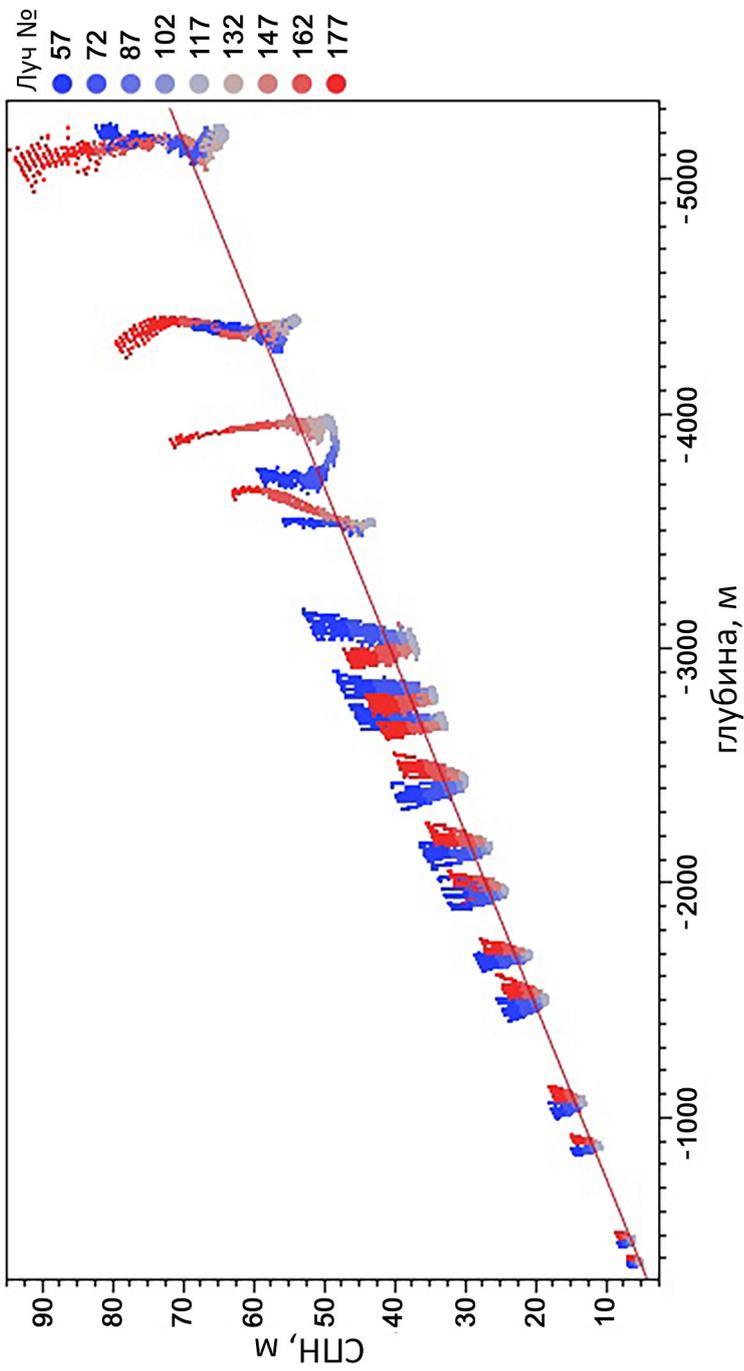


Рисунок 2.23 – Значения СПН, рассчитанные для каждого измерения глубин МЛЭ без учета угла уклона. Отображены значения СПН для 16-ти подгрупп глубин, состоящих из 15 профилей съемки каждая. Крайние лучи имеют СПН значительно выше центральных лучей съемки

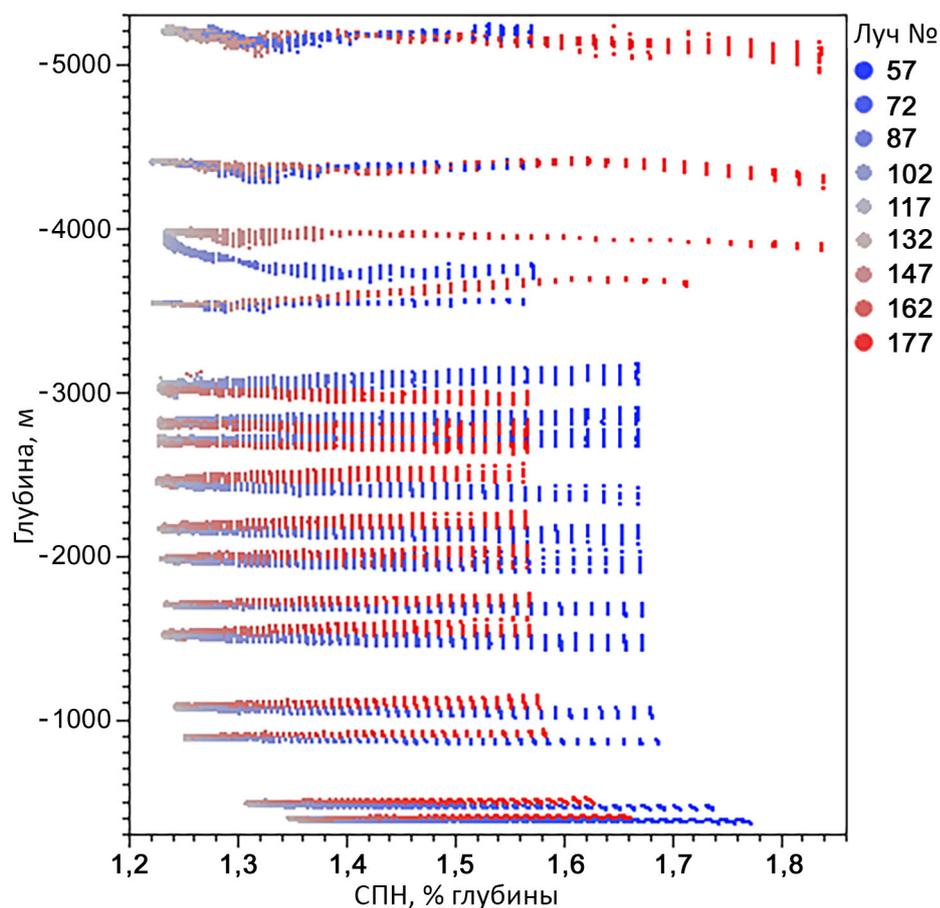


Рисунок 2.24 – Значения СПН (% глубины), рассчитанные для каждого измерения МЛЭ для угла уклона 45° для 16-ти подгрупп глубин, состоящих из 15-ти профилей съемки каждая

Данные ИЛ *Healy* (рейс HLY0503, август–сентябрь 2005 г.) были получены из БД NGDC. Данные были доступны в виде необработанных файлов SeaBeam с предварительной фильтрацией от грубых ошибок в пакете программ MBsystem [95]. Несколько линий съемки МЛЭ, которые пересекались с линиями съемки ГИН РАН, были импортированы и обработаны в программе CARIS HIPS & SIPS [140]. Для корректировки скорости звука использовались профили скорости звука ГИН РАН, доступные для этого района съемки. Обработанные данные МЛЭ *Healy* были пересчитаны в регулярную ЦМР с разрешением 20 м.

Маршруты МЛЭ-съемки *Oden* из рейсов LOMROG2007 [153, 157] и SAT0809 также пересекались с местами съемок ГИН РАН. Данные МЛЭ были скачаны из Oden Mapping Data Repository (Стокгольмский

университет). ЦМР были доступны в равнопромежуточной цилиндрической (рейс LOMROG2007) и полярной стереографической (рейс SAT0809) проекциях и были перепроецированы в UTM 32N.

Был проведен расчет матриц разности между значениями глубин в независимых ЦМР *Healy* и *Oden* и эталонных ЦМР. Основные статистические характеристики результатов представлены в табл. 2.3. Систематических расхождений между моделями выявлено не было. Значения статистических характеристик разности глубин находятся в пределах СПН для МЛЭ-данных ГИН РАН (подразд. 2.5.1). Расчеты проводились в пакете IVS Fledermaus 3D [111].

Таблица 2.3 – Характеристика матриц разности между значениями глубин в независимых ЦМР *Healy* и *Oden* и эталонных ЦМР

ИЛ, рейс	Диапазон глубин съёмки (м)	Описательная статистика			Разрешение (м)	Проекция и система координат
		Объем выборки	\bar{x} (м)	σ (м)		
<i>Oden</i> SAT0809	-2500 – -5300	853 600	6,1	18,1	29,4	Равнопромежуточная цилиндрическая, WGS84
<i>Oden</i> SAT0809	-1100 – -2600	7 114 800	8,2	68,8	30,4	то же
<i>Oden</i> LOMROG 2007	-300 – -900	2 205 189	-0,2	14,9	100	Полярная стереографическая, WGS84
<i>Healy</i> HLY0503	-2000 – -3400	5 114 700	-3,7	36,4	20	UTM 32N, WGS84

2.5.3 Артефакты в эталонных цифровых моделях рельефа

В эталонных ЦМР, полученных по результатам МЛЭ (рис. 2.17–2.21), наблюдаются несколько видов артефактов вдоль оси движения судна. На стыках соседних галсов наблюдаются артефакты, связанные с рефракцией боковых лучей (см. подразд. 1.2.2). Боковые лучи можно удалять в ходе обработки сырых данных эхолота. Однако обычно обрезаются далеко не все боковые лучи. Это делается для обеспечения перекрытия площади съемки соседними галсами, учитывая дороговизну судового времени и ограниченность бюджета экспедиций.

Вертикальная выраженность наблюдаемых на рис. 2.17–2.21 артефактов в среднем составляет около 0,4% глубины (10 м при глубине 2400 м). Эти значения находятся в пределах заявленной инструментальной неопределенности (точности определения) глубин в соответствии с классом «2» стандартов МГО [146, 147]. Особенно сильно эти артефакты проявляются на континентальном склоне (восточная часть рис. 2.17), где происходит быстрая перемена скорости звука в водной толще.

Второй вид артефактов присутствует на границе центральных и боковых лучей. Этот вид артефактов связан с акустическими свойствами сигнала эхолота: он возникает на границе амплитудного и фазового определения глубины [54]. Эти артефакты сложно распознаваемы после построения регулярной ЦМР по данным МЛЭ, а по размерам не превышают сантиметрового уровня.

Поскольку в данной работе эталонные ЦМР пересчитываются на регулярную сетку с разрешением тестируемых ЦМР (см. разд. 3.1), обсуждаемые артефакты сглаживаются в процессе осреднения глубин по ячейке тестируемой ЦМР. Таким образом, предельные величины наблюдаемых артефактов в эталонных ЦМР ничтожно малы по сравнению с пространственным разрешением тестируемых ЦМР и эти артефакты не оказывают влияния на результаты апробации разработанной методики.

Выводы по главе 2

Общедоступные батиметрические ЦМР разделены автором на два типа: А) ЦМР, основанные исключительно на акустических данных, с заполнением пробелов в измерениях интерполяцией, в том числе по оцифрованным изобатам; и Б) ЦМР, основанные на акустических данных в сочетании с предсказанным рельефом, полученным по данным спутниковой альтиметрии.

С точки зрения структуры и способов составления, версии общедоступных ЦМР GEBCO, IBCAO, GT и SRTM_Plus являются однотипными. Во вновь создаваемых версиях этих ЦМР могут лишь уточняться значения глубин, использоваться более точные методы интерполяции исходных данных, а также сгущаться регулярная сетка ЦМР.

На выбранных для исследования полигонах представлены участки морского дна с разной морфологией рельефа: срединно-океанический хребет, абиссальная равнина, шельфовая равнина и континентальный склон. Полигоны характеризуются разной степенью расчлененности рельефа, разным уровнем корреляции между рельефом и гравитационным полем, разным типом исходных данных, использованных для создания тестируемых ЦМР, и разной степенью покрытия этими данными.

В качестве эталонных используются независимые ЦМР морского дна высокого разрешения и точности, полученные в результате МЛЭ в Норвежско-Гренландском и Баренцевом морях. По результатам расчета СПН этих данных, максимальная СПН составляет 1,85% глубины для уклона 45°. Средняя рассчитанная СПН составила 1,05% глубины для уклона 5°. По результатам сравнения эталонных ЦМР и данных МЛЭ ИЛ *Healy* и *Oden* в местах их пересечения не было обнаружено значительных расхождений в значениях глубин; значения статистических характеристик разности глубин находятся в пределах максимальной СПН. Присутствующие в эталонных ЦМР артефакты из-за рефракции звуковых волн не могут оказать существенного влияния на результаты апробации разработанной методики.

ГЛАВА 3

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ДАННЫХ, ПО КОТОРЫМ СТРОЯТСЯ БАТИМЕТРИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Глава посвящена оценке точности данных, по которым строятся батиметрических ЦМР. В разд. 3.1 описан алгоритм расчета матриц разности между значениями глубин в ЦМР, которые построены в разных картографических проекциях и с несовпадающими по размерам и ориентации ячейками сеток. В разд. 3.2 рассмотрен способ оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР. В разд. 3.3 описана апробация способа, а в разд. 3.4 приведены и обсуждаются полученные результаты. Материалы главы представлены в работах автора [69, 70, 3].

3.1 Алгоритм расчета матрицы разности между значениями глубин в разнородных батиметрических цифровых моделях рельефа

Тестируемые и эталонные ЦМР обычно построены в разных картографических проекциях, с различным пространственным разрешением и с несовпадающими по размерам и ориентации ячейками (табл. 2.1 и 2.2), что делает невозможным их непосредственное сравнение или проведение над ними совместных математических операций (напр., вычитание) без дополнительных преобразований.

Для расчета матрицы разности между значениями глубин в двух разнородных ЦМР автором предложен алгоритм, направленный на сохранение значений глубин в тестируемых ЦМР неизменными, то есть без применения дополнительной интерполяции, которая вносила бы в тестируемые ЦМР неизбежные дополнительные ошибки.

Алгоритм расчета матрицы разности между значениями глубин в тестируемой и эталонной разнородных батиметрических ЦМР включает в себя следующие основные шаги (рис. 3.1 и 3.2):

- 1) Координаты и значения глубины каждой ячейки эталонной ЦМР перепроецируются в проекцию тестируемой ЦМР.

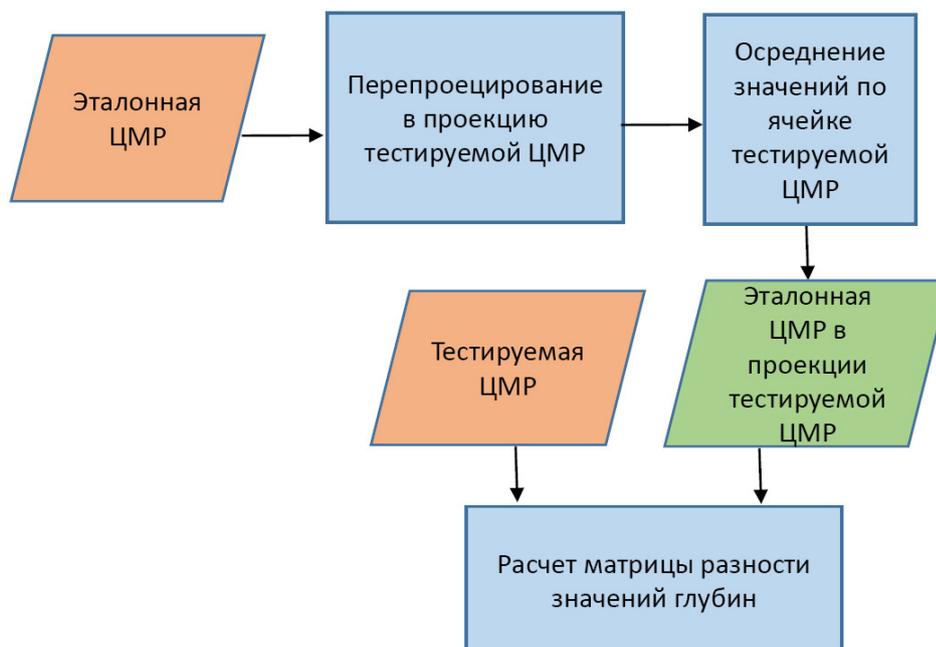


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма расчета матрицы разности между значениями глубин в ЦМР, которые построены в разных картографических проекциях и с несовпадающими по размерам и ориентации ячейками сеток

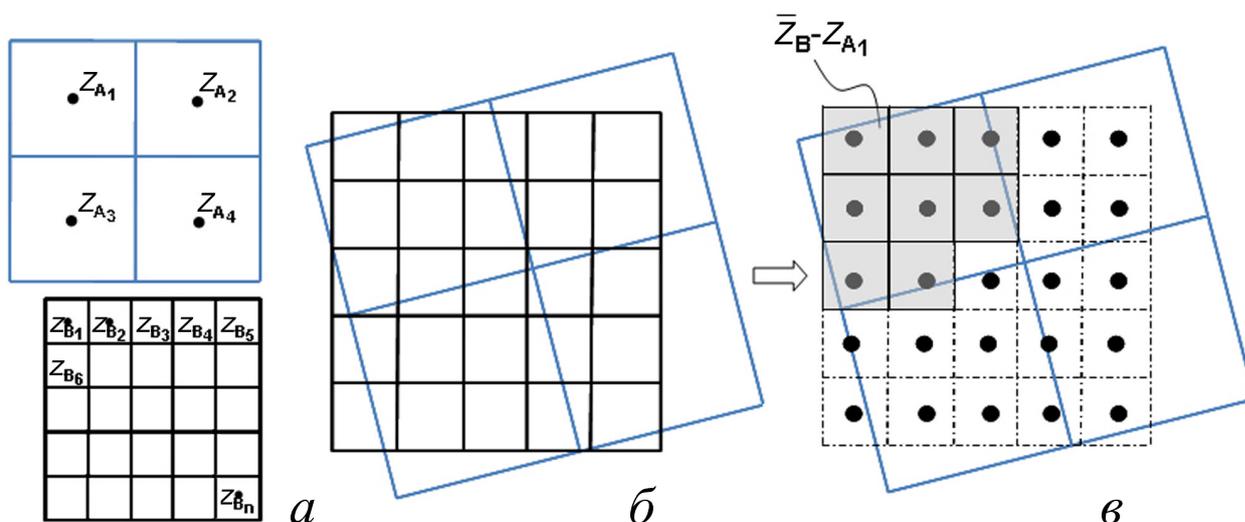


Рисунок 3.2 – Схема расчета матрицы разности между значениями глубин в двух ЦМР, построенных в разных проекциях и с несовпадающими сетками: *a* – две регулярных ЦМР А и В; *б* – наложение сеток и несовпадение ячеек; *в* – значения глубин Z_{B_i} в ЦМР В перепроецируются в проекцию ЦМР А. Значения Z_{B_i} осредняются по ячейке сетки ЦМР А; каждому значению в сетке ЦМР А приписывается осредненное значение \bar{Z}_B . Матрица разности между значениями глубин в двух разнородных ЦМР вычисляется как $\bar{Z}_B - Z_{A_i}$

2) Каждому значению глубины в тестируемой ЦМР соотносится осредненное значение глубины из эталонной ЦМР.

3) Значения глубин эталонной ЦМР осредняются по ячейкам тестируемой ЦМР в соответствующей проекции.

4) Рассчитывается разность значений глубин для каждой ячейки тестируемой ЦМР.

Алгоритм реализован в пакете GMT.

3.2 Способ оценки точности исходных данных батиметрических цифровых моделей рельефа

Разработанный способ оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР, основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матрицы разности между значениями глубин в исходных данных тестируемой ЦМР и в эталонной ЦМР. Разность значений глубин интерпретируется как ошибка исходных данных.

Точность исходных данных может быть оценена по статистическим характеристикам разности значений (ошибок) глубин, в частности – по значениям их \bar{x} и σ . Однако пространственное распределение ошибок в любых картографических данных и цифровых моделях неравномерно [144, 87, 110]. Поэтому результаты оценки точности исходных данных батиметрической ЦМР целесообразно представлять не только как набор статистик, но и в виде карты разности значений глубин, то есть – карты ошибок исходных данных.

Для проведения оценки точности исходных данных обрабатываются два массива данных: 1) значения глубин в эталонной ЦМР; и 2) осредненные по ячейке ЦМР значения глубин в исходных данных тестируемой ЦМР.

Способ включает следующие основные этапы (рис. 3.3):

1) Получение максимальной информации об исходных данных, формате карты покрытия и способа извлечения, а также способа разделения на основные типы исходных данных (например, для случая ЦМР GT –

извлечение карты покрытия с помощью инструмента *img2grd* пакета GMT).

2) Построение карты покрытия исходных данных, наложенных на карту рельефа, для сравнения полноты карты исходных данных.

3) Расчет матрицы разности между значениями глубин в эталонной ЦМР и в исходных данных с помощью алгоритма, описанного в разд. 3.1.

4) Построение карты разности значений глубин (карты ошибок исходных данных).

5) Расчет статистических характеристик ошибок исходных данных (\min , \max , \bar{x} , σ).

6) Построение гистограммы распределения ошибок исходных данных.

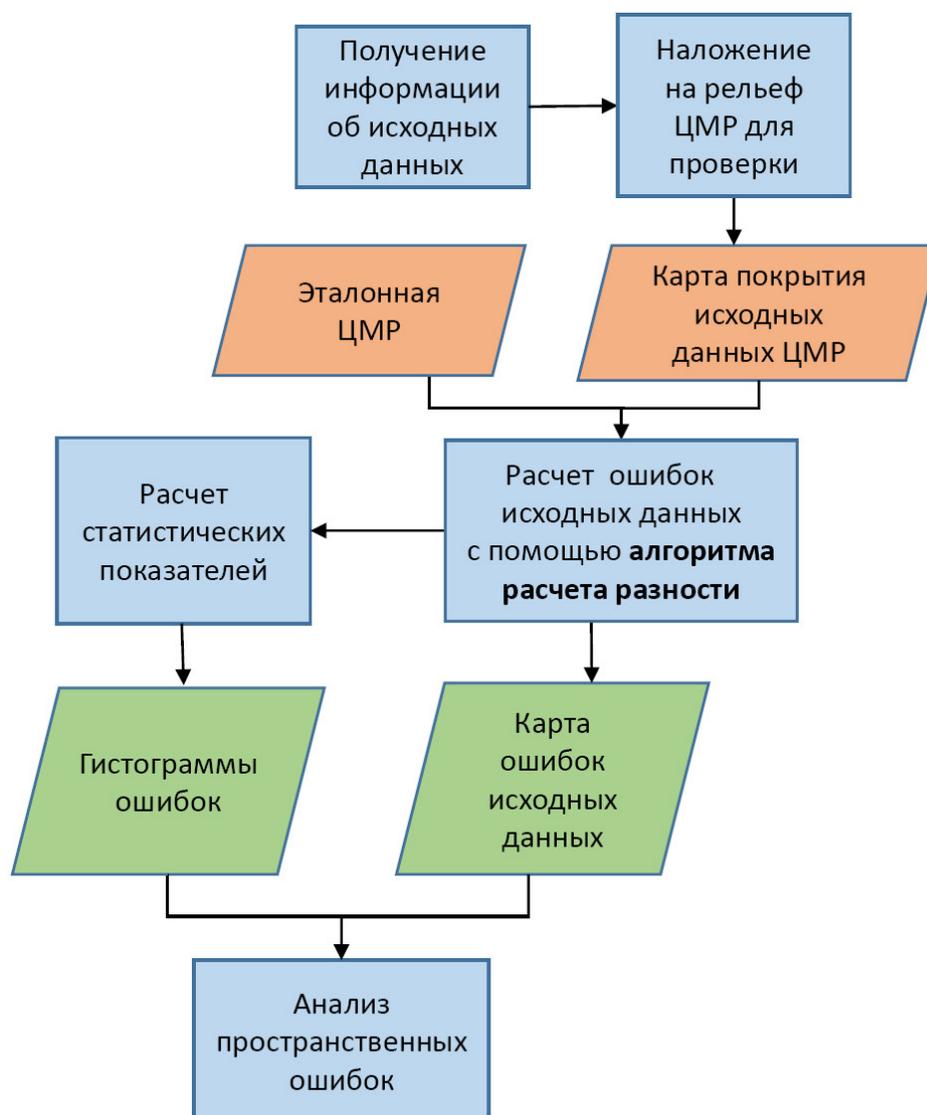


Рисунок 3.3 – Блок-схема способа оценки точности исходных данных

7) Если доступна информация по типам исходных данных, проведение анализа пространственных ошибок в исходных данных по их типам, используя карту ошибок и гистограммы.

3.3 Апробация способа оценки точности исходных данных

Для апробации разработанного способа использовались эталонные ЦМР, описанные в разд. 2.5. Информация об источниках исходных данных тестовых фрагментов ЦМР была собрана из документации ЦМР, публикаций и переписки с авторами ЦМР. ЦМР GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 имеют общую БД, а ЦМР GEBCO_08 построена по БД IBCAO [152] (исключения выделены в табл. 2.2). БД ЦМР IBCAO 2.23 была предоставлена Д. Сэндвеллом (Калифорнийский университет Сан-Диего) в виде осредненных значений глубины по ячейкам сетки IBCAO (кроме полигонов 5 и 6, см. ниже). Исходные данные для ЦМР GT 13.1 закодированы в виде нечетных значений глубин в этой ЦМР. Таким образом, оценивалась точность осредненных значений исходных данных.

Предоставленная Д. Сэндвеллом БД, на которой основана ЦМР IBCAO 2.23, оказалась неполной для полигонов 5 и 6 (рис. 2.9а и 2.10б). Из переписки с М. Якобссоном выяснилось, что некоторые данные были получены из частных источников и, в этой связи, не были отображены на карте исходных данных. Из-за неполноты исходных данных для полигонов 5 и 6 точность исходных данных оценивалась только для полигонов 1–4.

Для каждого полигона использовались один или несколько типов исходных данных [148, 152] (рис. 3.4). Для построения ЦМР IBCAO 2.23 и GT 13.1 использованы ЦМР, построенная по данным МЛЭ-съемки в ходе рейсов НИС *Polarstern* [163] (полигон 1), данные однолучевых съемок из БД NGDC, данные NHS (полигон 2) [148], данные МЛЭ-съемки Норвежского нефтяного директората (NPD) [152] (полигон 3) и точечные промеры NHS (полигон 4) (рис. 3.4). Кроме того, при построении ЦМР IBCAO 2.23 в пределах полигонов 2, 5 и 6 были использованы оцифрованные изобаты

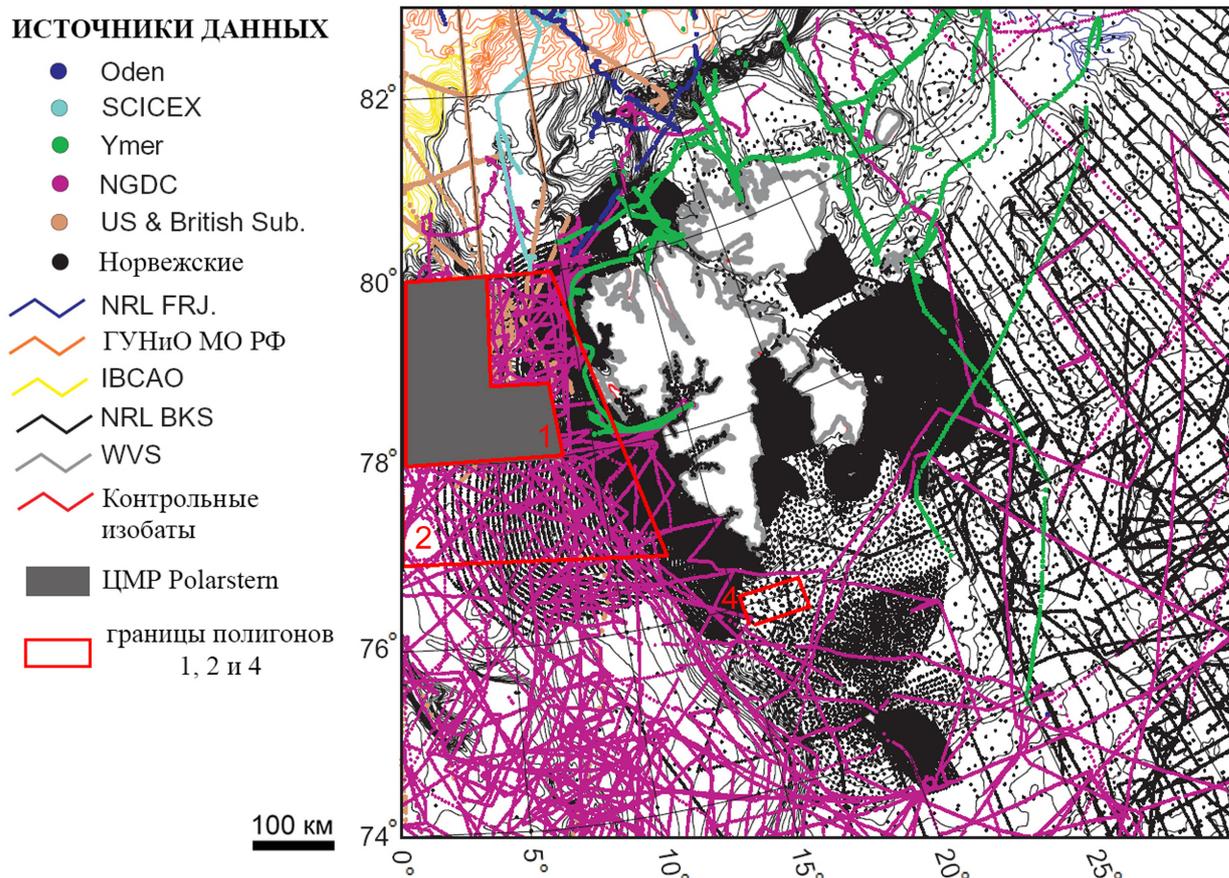


Рисунок 3.4 – Карта исходных данных ЦМР IBCAO 1.0 [148]

карты «Центральный Арктический бассейн» [63]. Обобщенное описание типов исходных данных приведено в табл. 2.2.

Апробация способа проведена с использованием программного обеспечения GMT.

3.4 Результаты апробации

Основные статистические характеристики ошибок исходных данных, по которым построены ЦМР IBCAO 2.23 и GT 13.1, приведены в табл. 3.1 и 3.2. На рис. 3.5 представлены гистограммы распределения ошибок исходных данных этих ЦМР для четырех полигонов. Карты ошибок исходных данных ЦМР IBCAO 2.23 приведены на рис. 3.6–3.8, а ЦМР GT 13.1 – на рис. 3.9–3.11.

Карты ошибок исходных данных батиметрических ЦМР (рис. 3.6–3.11)

позволяют наглядно отображать пространственное распределение этого типа ошибок. Их визуальный анализ, совместно с гистограммами (рис. 3.5) и описательной статистикой (табл. 3.1 и 3.2) позволил получить следующую информацию о тестируемых ЦМР:

- Наблюдается систематическая ошибка в 50 м между значениями эталонной ЦМР и исходными данными ЦМР GT 13.1 на полигоне 1 (рис. 3.9). На этом полигоне в обеих моделях исходными данными является ЦМР по данным МЛЭ в ходе рейсов НИС *Polarstern* в 1984–1997 гг. [163, 164] (рис. 2.11б). На рис. 3.6 и 3.9 приведены карты распределения исходных данных и их ошибки для ЦМР ИВСаО 2.23 и GT 13.1 на полигонах 1 и 2. Как

Таблица 3.1 – Описательная статистика ошибок исходных данных ЦМР ИВСаО 2.23. Гистограммы распределения см. рис. 3.5

Полигон	Объем выборки	min (м)	max (м)	\bar{x} (м)	σ (м)
1	1 638	-236,8	371,6	0,4	48,2
2	2 641	-495,7	634,7	-18,2	57,4
3	1 151	-110,7	206,0	-4,6	12,3
4	36	-59,9	-3,7	-21,9	11,0

Таблица 3.2 – Описательная статистика ошибок исходных данных ЦМР GT 13.1. Гистограммы распределения см. рис. 3.5

Полигон	Объем выборки	min (м)	max (м)	\bar{x} (м)	σ (м)
1	54 866	-527,9	587,3	51,9	45,0
2	6 172	-551,9	652,7	-8,4	56,2
3	2 137	-355,2	174,6	-5,9	16,9
4	44	-57,9	25,9	-17,7	13,3

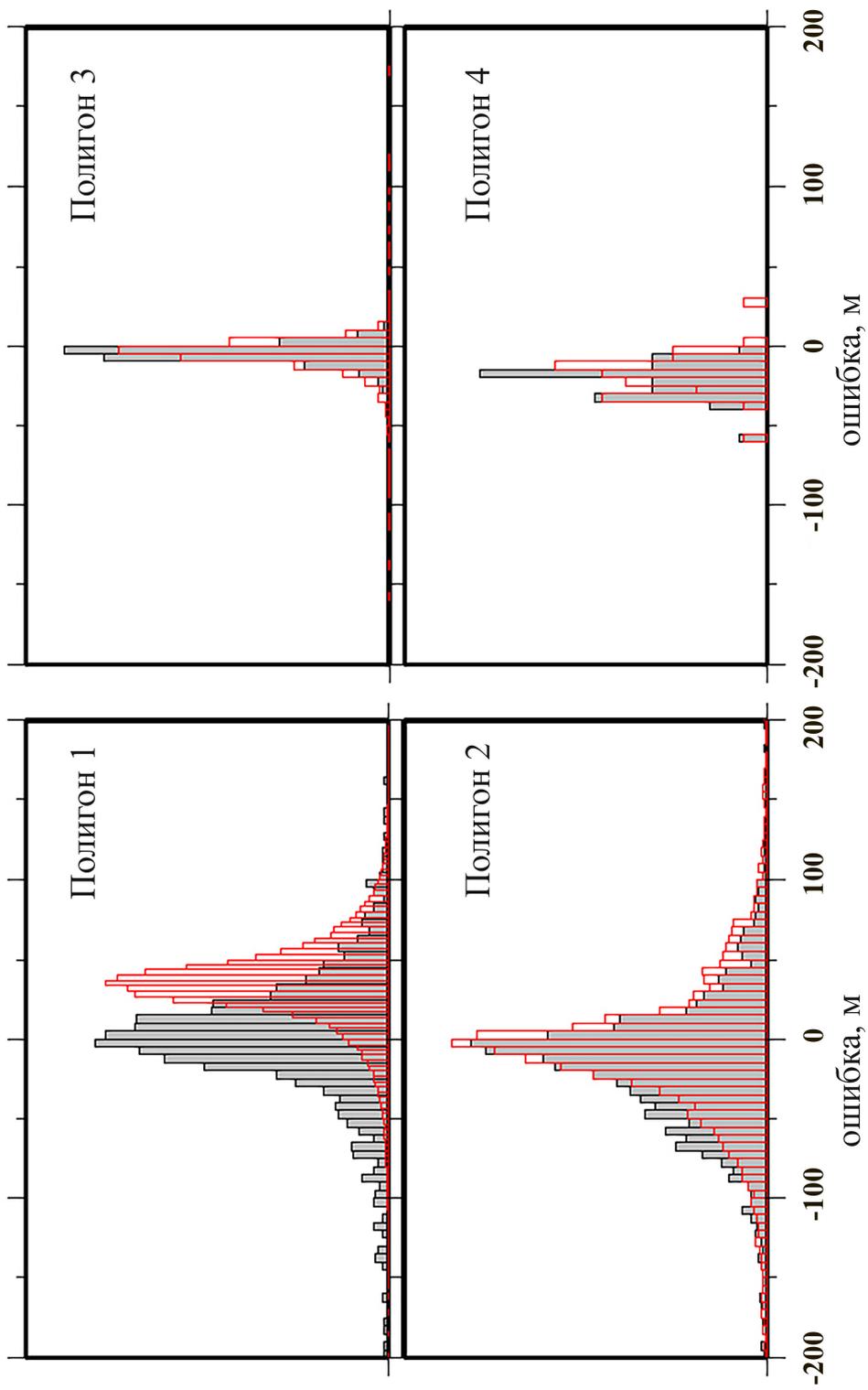


Рисунок 3.5 – Распределение ошибок исходных данных ЦМР ИВСаО 2.23 (серый цвет) и ГТ 13.1 (красный цвет).

Описательную статистику см. табл. 3.1 и 3.2

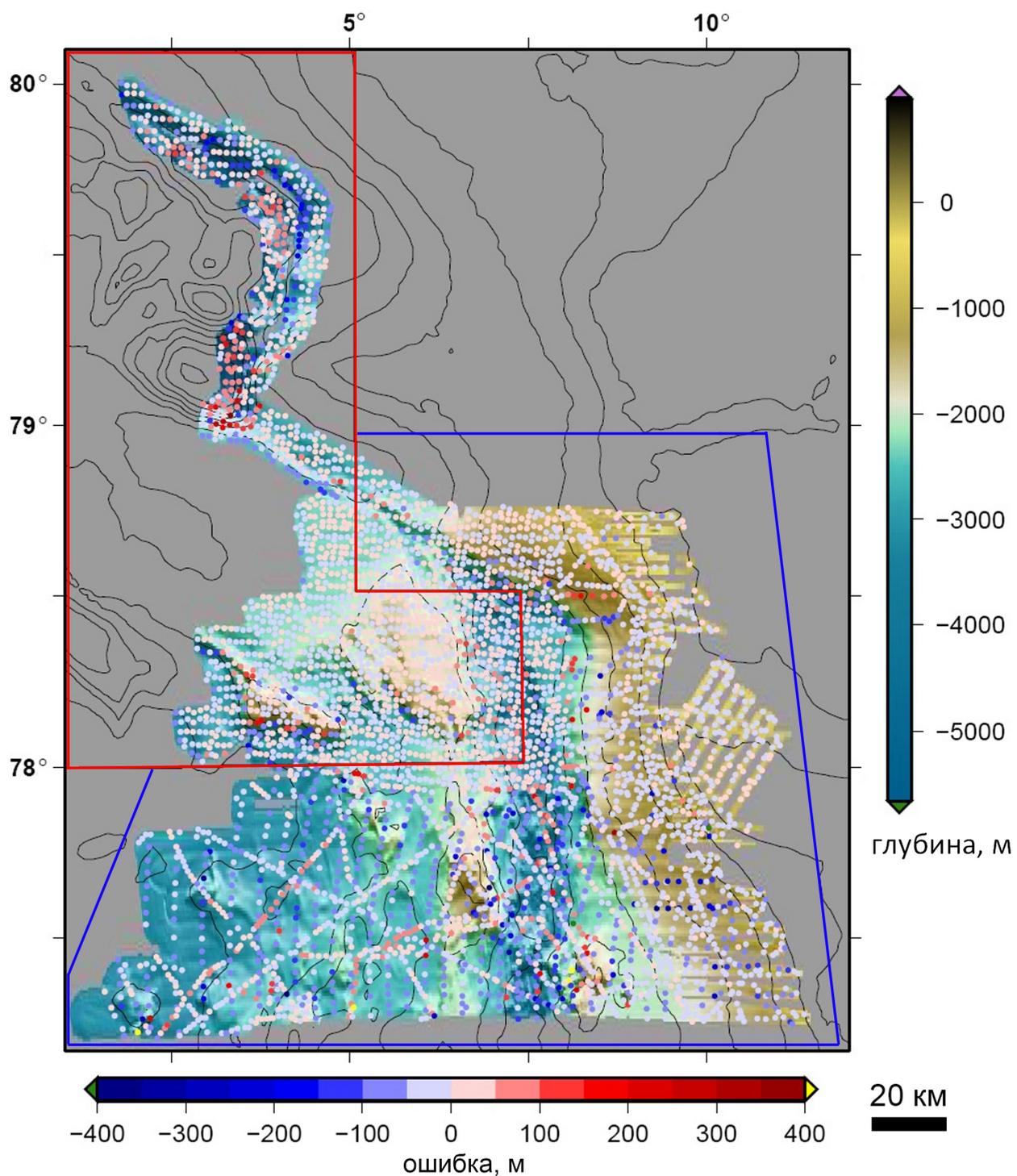


Рисунок 3.6 – Карта ошибок исходных данных ЦМР ИВСаО 2.23 на полигонах 1 и 2. Слой ошибок наложен на батиметрию, построенную по эталонной ЦМР. Показаны изобаты ЦМР ИВСаО 2.23. Границы полигонов 1 и 2 обозначены красной и синей рамками, соответственно

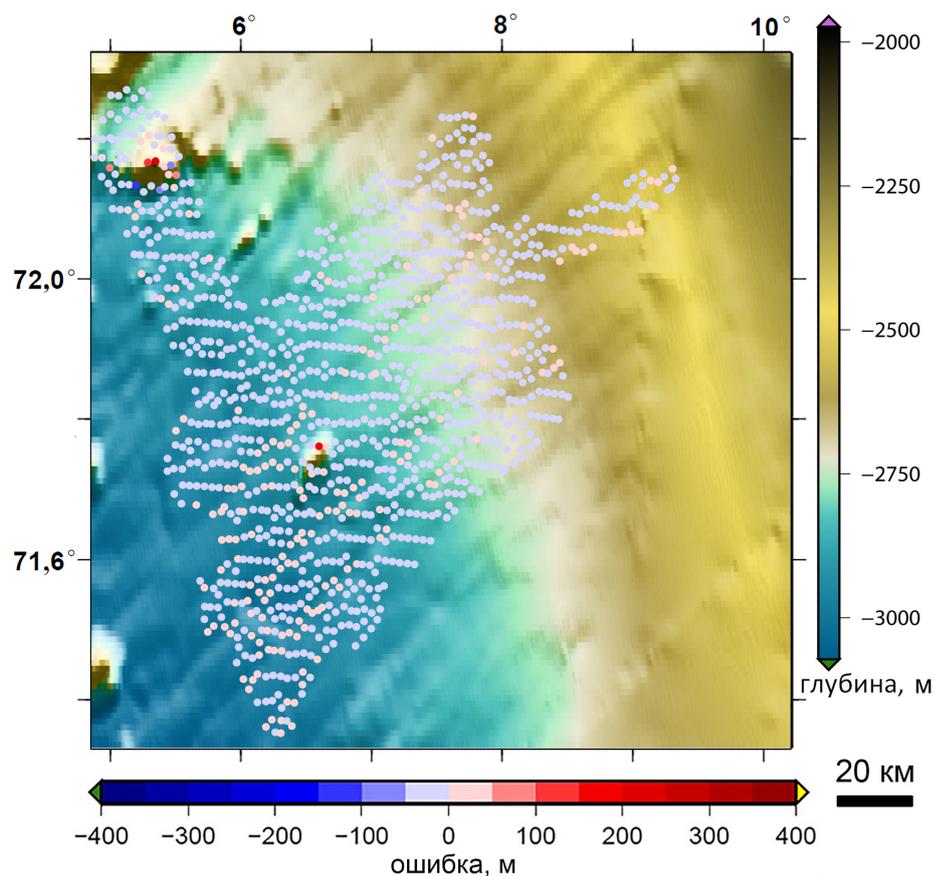


Рисунок 3.7 – Карта ошибок исходных данных ЦМР ИВСАО 2.23 на полигоне 3. Слой ошибок наложен на батиметрию, построенную по ЦМР ИВСАО 2.23

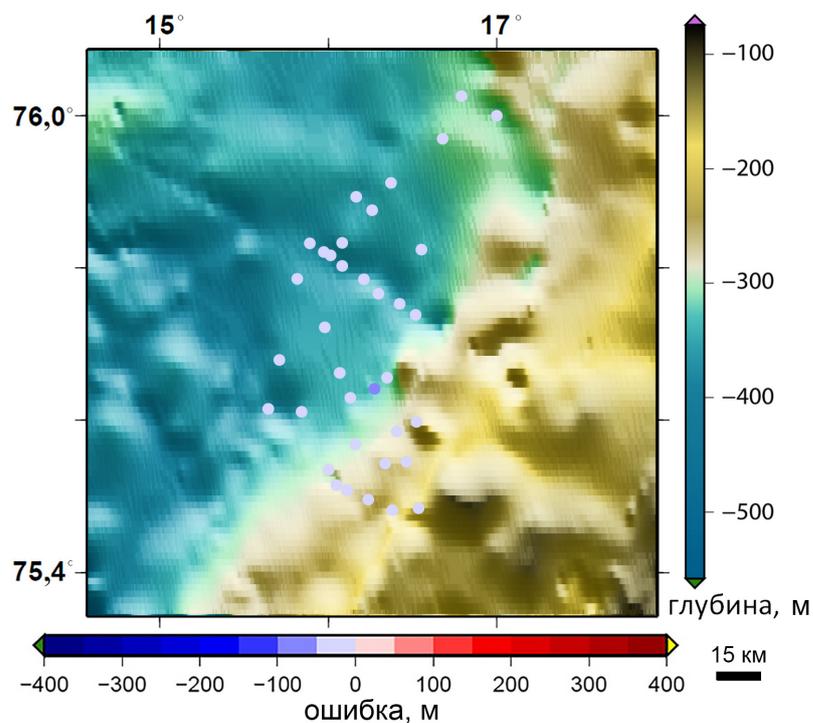


Рисунок 3.8 – Карта ошибок исходных данных ЦМР ИВСАО 2.23 на полигоне 4. Слой ошибок наложен на батиметрию, построенную по ЦМР ИВСАО 2.23

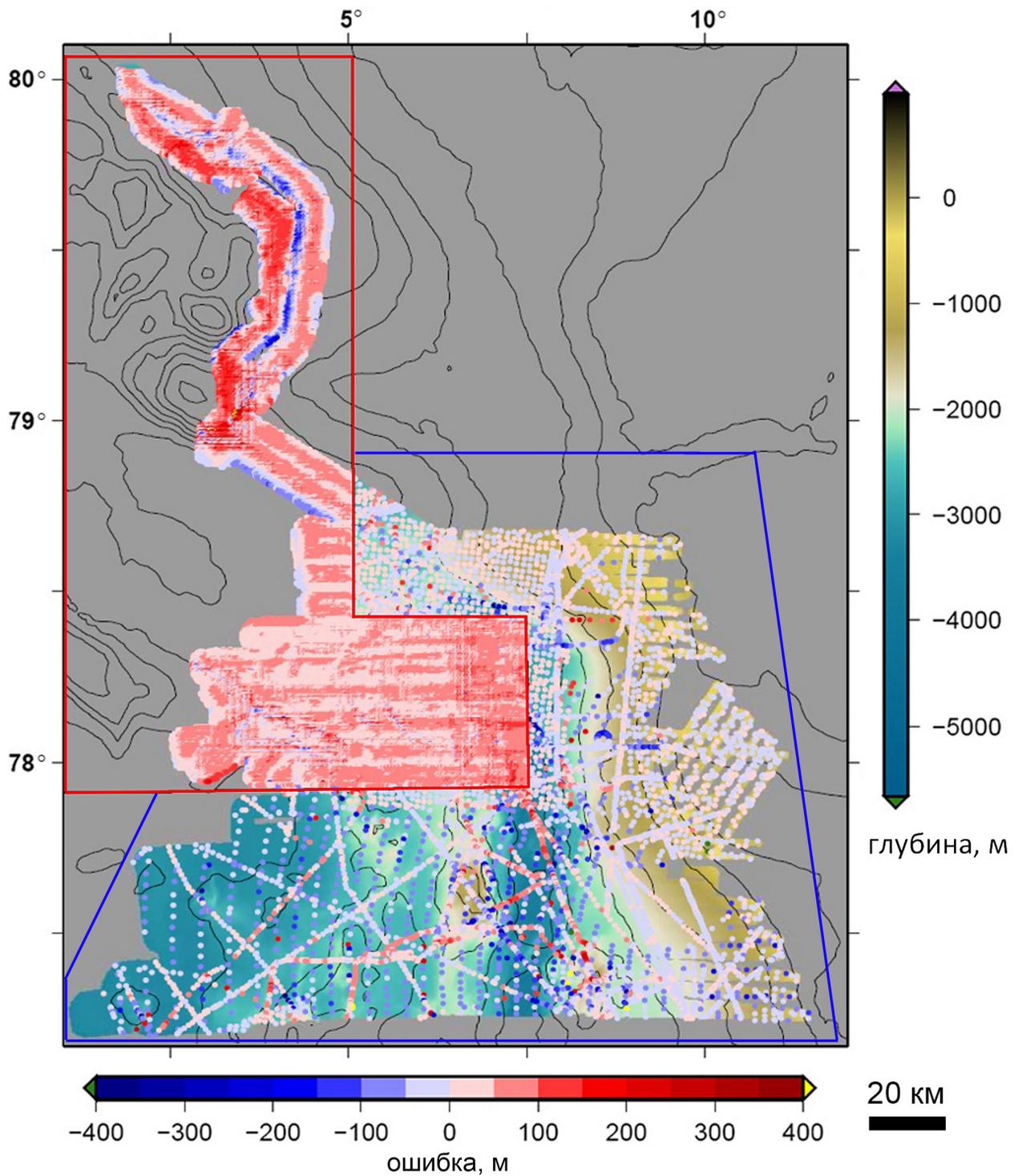


Рисунок 3.9 – Карта ошибок исходных данных ЦМР GT 13.1 на полигонах 1 и 2. Слой ошибок наложен на батиметрию, построенную по эталонной ЦМР. Показаны изобаты ЦМР ИВСаО 2.23. Границы полигонов 1 и 2 обозначены красной и синей рамками, соответственно

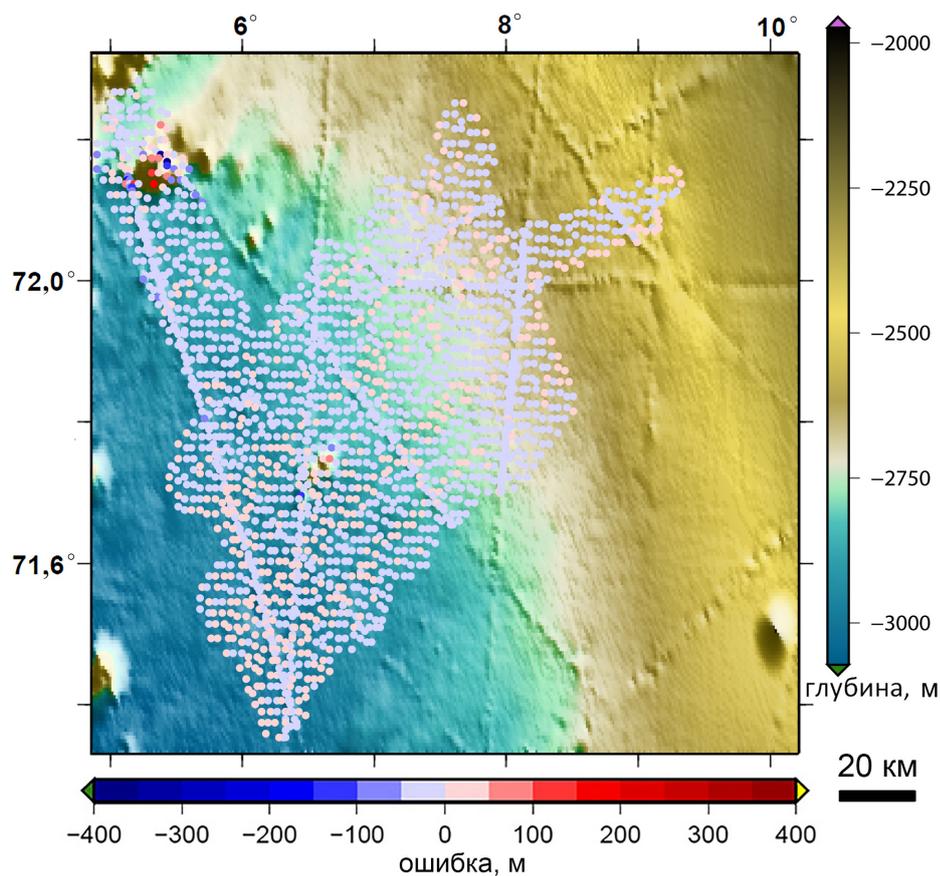


Рисунок 3.10 – Карта ошибок исходных данных ЦМР GT 13.1 на полигоне 3. Слой ошибок наложен на батиметрию, построенную по ЦМР GT 13.1

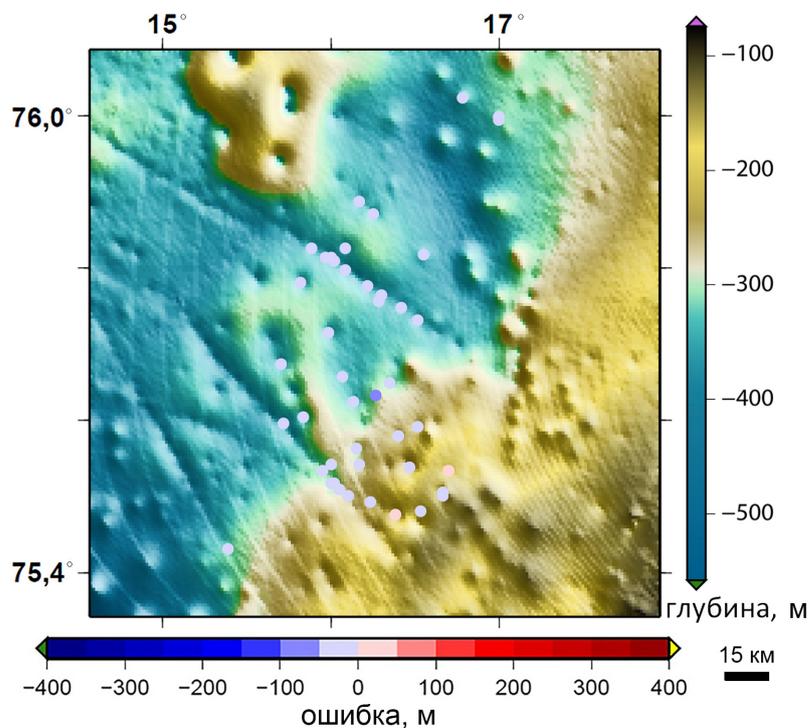


Рисунок 3.11 – Карта ошибок исходных данных ЦМР GT 13.1 на полигоне 4. Слой ошибок наложен на батиметрию, построенную по ЦМР GT 13.1

видно из рис. 3.7, в пределах полигона 1 в исходных данных ЦМР GT 13.1 наблюдается систематическая ошибка около 50 м (розовая область; значения глубин в исходных данных примерно на 50 м превышают глубины в эталонной ЦМР). Такая систематическая ошибка отсутствует в ЦМР IBСАО 2.23 (рис. 3.6). Это объясняется тем, что при построении ЦМР IBСАО 2.23, в ЦМР *Polarstern* была внесена поправка за скорость звука. В то же время, при построении ЦМР GT 13.1, ЦМР *Polarstern* была использована без коррекции. Для построения ЦМР *Polarstern* использовалось осредненное значение скорости звука 1500 м/с [163], что и привело к преувеличению значений глубин в ЦМР.

- Наблюдаются отрицательные средние ошибки глубины на полигонах 2 и 4 (рис. 3.5). Сравнивая карты типов исходных данных (рис. 3.4) с картами ошибок исходных данных (рис. 3.6–3.11) можно заметить, что в исходных данных NHS представлены меньшие значения глубин, чем в эталонной ЦМР. Преуменьшение глубин, в целом, характерно для гидрографических данных. Этим можно объяснить большое значение средних ошибок глубины для полигона 4 (табл. 3.1, рис. 3.5), где норвежские данные являются единственными исходными данными.

- Как видно из полученных карт (рис. 3.6–3.11), наблюдаются разные значения ошибок глубины для ЦМР GT 13.1 и IBСАО 2.23 для одинаковых источников данных, а именно для галсов однолучевых съемок из NGDC (рис. 3.4). Также наблюдаются незначительные различия в ошибках глубин для исходных данных ЦМР GT 13.1 и IBСАО 2.23 на полигоне 3 (на рис. 3.4 не представлено), где основными исходными данными для обоих ЦМР были МЛЭ-данные NPD. Это свидетельствует о разном подходе к обработке одних и тех же данных до включения их в ЦМР.

Выводы по главе 3

Предложен алгоритм расчета матрицы разности значений глубин в батиметрических ЦМР, построенных в разных картографических проекциях, с различным пространственным разрешением и с несовпадающими по размерам и ориентации сетками. Применение алгоритма позволяет сохранять значения глубин в анализируемых ЦМР неизменными (дополнительная интерполяция не используется).

Разработан способ оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР. Способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матриц разности между значениями глубин в тестируемых исходных данных и в независимой эталонной ЦМР высокой точности и разрешения. Разработанный способ позволяют оценить точность батиметрических данных не только в виде набора статистических характеристик и гистограмм, но и в виде карт ошибок исходных данных ЦМР, которые позволяют наглядно показать пространственное распределение рассматриваемых ошибок.

Разработанный способ успешно апробирован на примере фрагментов двух ЦМР, относящихся к разным типам ЦМР: ИВСаО 2.23 (тип А) и GT 13.1 (тип Б). В частности, на полигоне 1 в исходных данных ЦМР GT 13.1 была установлена систематическая ошибка величиной 50 м, которая была вызвана использованием некорректно построенной ЦМР *Polarstern* (для ее создания было применено среднее значение скорости звука в воде 1500 м/с). Вместе с тем, эта ошибка отсутствует в ЦМР ИВСаО 2.23, при создании которой в ЦМР *Polarstern* была внесена поправка за истинную скорость звука.

ГЛАВА 4

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

Глава посвящена способу оценки точности батиметрических ЦМР. В разд. 4.1 рассмотрен способ оценки точности батиметрических ЦМР. В разд. 4.2 описана апробация этого способа, а в разд. 4.3 приведены и обсуждаются полученные результаты. Материалы главы представлены в работах автора [69, 70, 3].

4.1 Способ оценки точности батиметрических цифровых моделей рельефа

Разработанный способ оценки точности батиметрических ЦМР во многом аналогичен способу оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР (разд. 3.2). Способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матрицы разности между значениями глубин в тестируемой и в эталонной ЦМР. Разность значений глубин интерпретируется как ошибка тестируемой ЦМР.

Как и в случае с оценкой точности исходных данных батиметрических ЦМР (разд. 3.2), точность тестируемой ЦМР может быть оценена по различным статистическим характеристикам ошибок глубин. Однако хорошо известно, что пространственное распределение ошибок в любой ЦМР весьма неравномерно; иными словами – различные участки любой ЦМР могут иметь различную точность [144, 113, 87, 110], в зависимости от типа рельефа, плотности исходных данных, метода их интерполяции и некоторых других факторов. Поэтому результаты оценки точности батиметрической ЦМР целесообразно представлять не только как набор статистических характеристик, а в виде карты ошибок тестируемой ЦМР.

Способ состоит из следующих основных этапов (рис. 4.1):

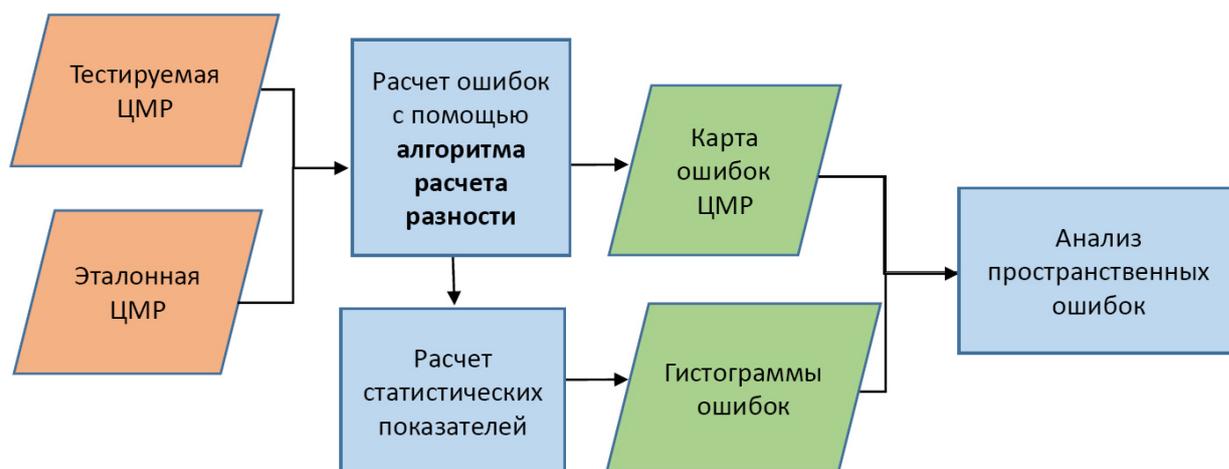


Рисунок 4.1 – Блок-схема способа оценки точности батиметрических ЦМР

1) Построение карты покрытия исходных данных, наложенных на рельеф тестируемой ЦМР для сравнения полноты карты исходных данных.

2) Расчет матрицы разности между значениями глубин в эталонной и тестируемой ЦМР с использованием алгоритма, описанного в разд. 3.1.

3) Построение карты разности глубин (ошибок тестируемой ЦМР).

4) Расчет статистических характеристик ошибок тестируемой ЦМР (\min , \max , \bar{x} , σ).

5) Построение гистограммы распределения ошибок в тестируемой ЦМР.

6) Если доступна информация по типам исходных данных, проводится анализ пространственных ошибок в исходных данных по их типам, используя карту ошибок и гистограммы.

4.2 Апробация способа оценки точности батиметрических цифровых моделей рельефа

Для апробации разработанного способа использовались тестовые фрагменты трех общедоступных глобальных ЦМР GEBCO_08, GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0, а также эталонные ЦМР, которые описаны в разд. 2.4 и 2.5, соответственно. Апробация способа проведена с помощью пакета GMT.

4.3 Результаты апробации

Основные статистические характеристики ошибок тестовых фрагментов ЦМР GEBCO_08, GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 приведены в табл. 4.1–4.3, соответственно, в метрах, а в табл. 4.4–4.6 – в процентах глубины. На рис. 4.2 и 4.3 даны гистограммы распределения ошибок тестовых фрагментов ЦМР для шести полигонов. Распределение этих ошибок в зависимости от глубины приведено на рис. 4.4 и 4.5 для пяти полигонов. Рисунок 4.6 показывает зависимость значений \bar{x} и $\bar{x} + \sigma$ ошибок тестовых фрагментов ЦМР от физико-географических характеристик полигонов, типа данных, по которым строились эти фрагменты общедоступных глобальных ЦМР, а также плотности покрытия ими полигонов. Карты ошибок тестовых фрагментов ЦМР приведены на рис. 4.7–4.16 для каждого полигона.

Картографирование ошибок батиметрических ЦМР (рис. 4.7–4.16) позволяют наглядно отображать их пространственное распределение. Их визуальный анализ, совместно с гистограммами (рис. 4.2 и 4.3), описательной статистикой (табл. 4.1–4.6) и графиками зависимости ошибок от глубины съемки (рис. 4.4 и 4.5), позволил получить следующую информацию о тестируемых ЦМР:

ЦМР GEBCO_08 имеет точность, сопоставимую с ЦМР GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 на полигонах 2 и 3. Различия в точности между батиметрическими ЦМР типа А и Б наблюдаются на полигонах 1, 4, 5 и 6.

Наблюдаемые ошибки в ЦМР типа Б на полигоне 1 связаны с указанной в разд. 3.4 ошибкой в исходных данных ЦМР GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0. Наблюдаемое в ЦМР GT 13.1 смещение \bar{x} значений ошибок в 1,9% глубины можно считать значительным, по сравнению с максимальным значением СПН (1,85% глубины) для эталонных МЛЭ-данных (см. подразд. 2.5.1).

Для всех трех рассмотренных общедоступных ЦМР наблюдается смещение \bar{x} значений ошибок на полигонах 2 (1–1,5% глубины) и 4 (6,7–8,2% глубины), что также связано с указанной в разд. 3.4 ошибкой в исходных данных (табл. 4.1–4.6, рис. 4.2 и 4.3).

Таблица 4.1 – Описательная статистика ошибок тестовых фрагментов ЦМР GEBCO_08. Гистограммы распределения см. рис. 4.2

Полигон	Объем выборки	min (м)	max (м)	\bar{x} (м)	σ (м)
1	54 548	-360,5	472,6	0,8	53,1
2	123 063	-995,4	591,1	-27,6	69,7
3	26 592	-255,8	282,8	-5,7	13,8
4	4 915	-51,9	18,8	-23,5	7,6
5	2 185	-218,6	132,8	-11,9	54,7
6	19 917	-629,4	396,9	7,5	120,4

Таблица 4.2 – Описательная статистика ошибок тестовых фрагментов ЦМР GT 13.1. Гистограммы распределения см. рис. 4.2

Полигон	Объем выборки	min (м)	max (м)	\bar{x} (м)	σ (м)
1	69 653	-527,9	678,6	50,9	47,4
2	148 977	-945,7	666,7	-20,7	70,2
3	21 415	-322,3	266,4	-7,0	15,0
4	5 320	-97,0	64,9	-29,4	35,3
5	3 866	-290,8	115,5	-66,4	83,8

Таблица 4.3 – Описательная статистика ошибок тестовых фрагментов ЦМР SRTM30_Plus 6.0. Гистограммы распределения см. рис. 4.2

Полигон	Объем выборки	min (м)	max (м)	\bar{x} (м)	σ (м)
1	54 548	-288,2	578,6	50,5	52,3
2	123 063	-995,4	672,8	-22,4	67,4
3	26 592	-395,5	249,2	-7,7	15,9
4	4 915	-90,9	45,7	-28,2	26,5
5	2 185	-262,4	225,7	-30,3	82,2
6	19 917	-530,7	907,3	-41,3	203,4

Таблица 4.4 – Описательная статистика ошибок тестовых фрагментов ЦМР GEBCO_08. Гистограммы распределения см. рис. 4.3

Полигон	Объем выборки	min (% глубины)	max (% глубины)	\bar{x} (% глубины)	σ (% глубины)
1	54 548	-19,0	12,1	0,0	1,9
2	123 063	-126,5	73,2	1,3	4,9
3	26 592	-14,2	9,9	0,2	0,6
4	4 915	-11,3	20,2	6,7	2,2
5	2 185	-76,7	57,7	1,9	17,3
6	19 917	-39,3	44,9	0,0	8,5

Таблица 4.5 – Описательная статистика ошибок тестовых фрагментов ЦМР
 GT 13.1. Гистограммы распределения см. рис. 4.3

Полигон	Объем выборки	min (% глубины)	max (% глубины)	\bar{x} (% глубины)	σ (% глубины)
1	69 653	-23,8	15,8	-1,9	1,6
2	148 977	-50,8	69,8	1,0	3,7
3	21 415	-14,6	12,9	0,3	0,6
4	5 320	-19,7	35,7	8,2	10,0
5	3 866	-125,1	74,1	16,0	24,4

Таблица 4.6 – Описательная статистика ошибок тестовых фрагментов ЦМР
 SRTM30_Plus 6.0. Гистограммы распределения см. рис. 4.3

Полигон	Объем выборки	min (% глубины)	max (% глубины)	\bar{x} (% глубины)	σ (% глубины)
1	54 548	-20,6	10,9	-1,9	1,9
2	123 063	-51,5	73,2	1,1	3,5
3	26 592	-12,1	15,0	0,3	0,6
4	4 915	-13,8	30,1	7,9	7,4
5	2 185	-108,4	72,6	7,0	25,0
6	19 917	-328,5	56,8	-1,6	37,3

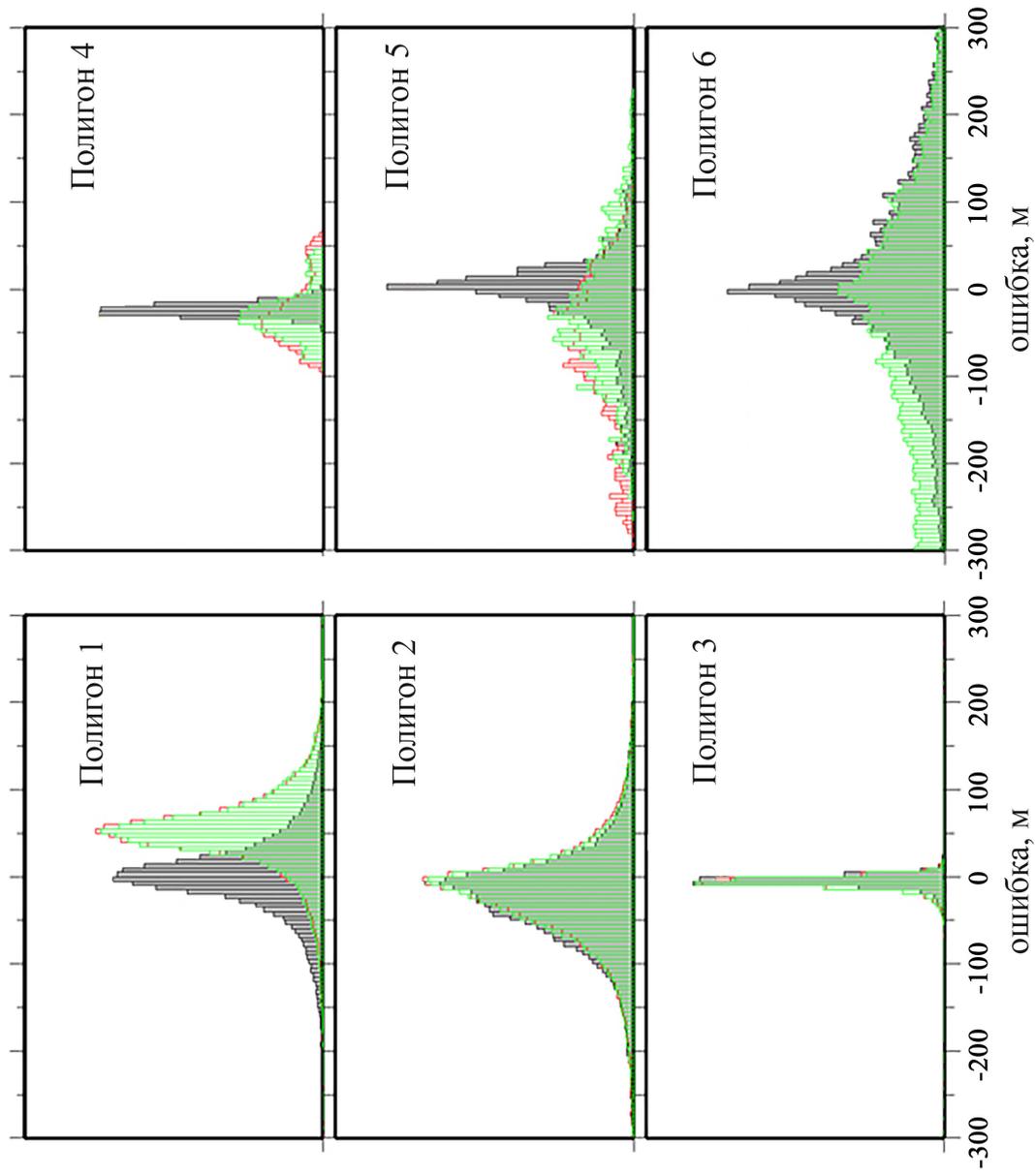


Рисунок 4.2 – Распределение ошибок (м) в тестовых фрагментах ЦМР GEVCO_08 (серый цвет), GT 13.1 (красный цвет) и SRGM30_Plus 6.0 (зеленый цвет). Описательную статистику см. табл. 4.1–4.3

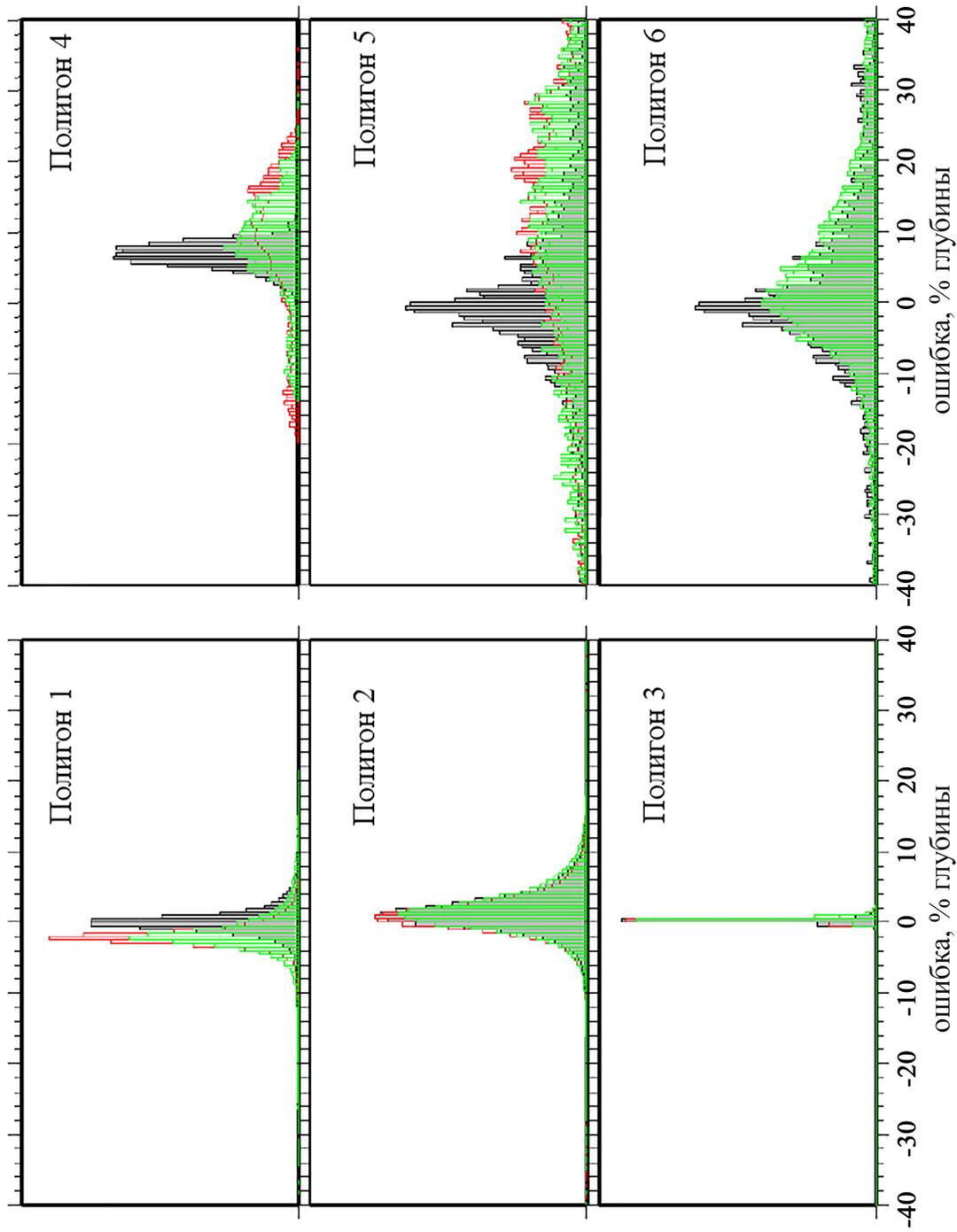


Рисунок 4.3 – Распределение ошибок (% глубины) в тестовых фрагментах ЦМР GEVCO_08 (серый цвет), GT 13.1 (красный цвет) и SRGM30_Plus 6.0 (зеленый цвет) . Описательную статистику см. табл. 4.4–4.6

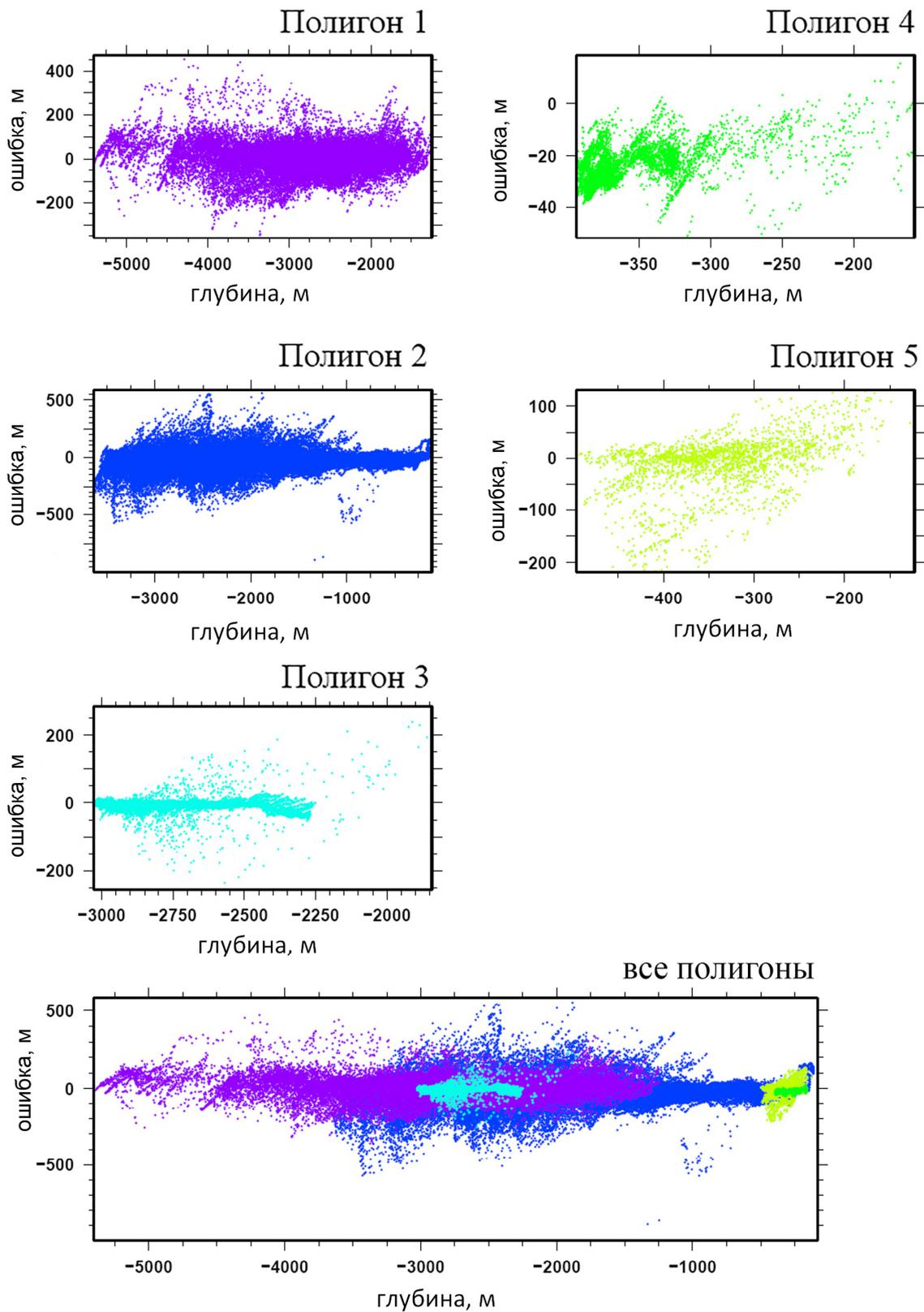


Рисунок 4.4 – Зависимость ошибок в тестовых фрагментах ЦМР GEVCO_08 от глубины

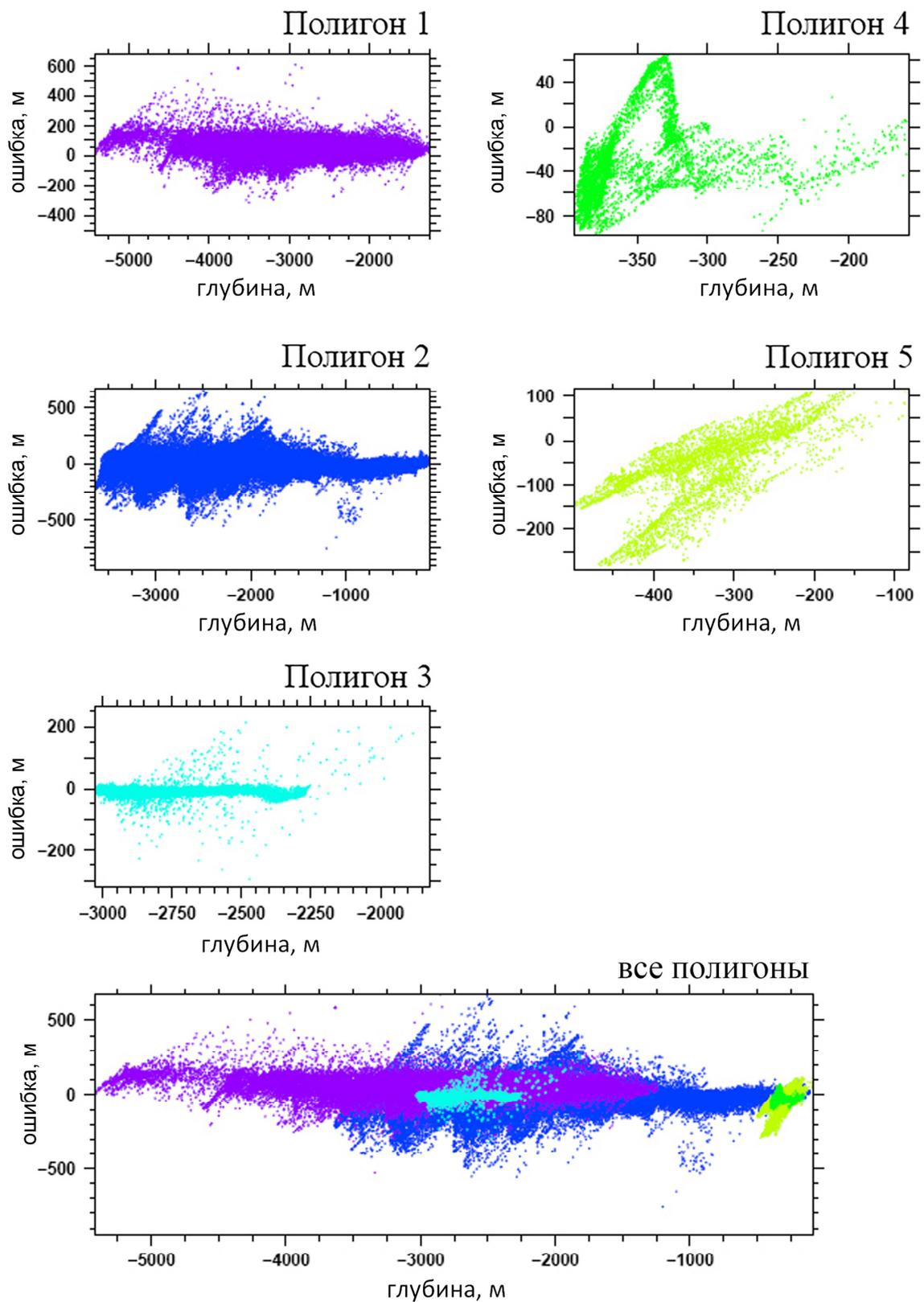


Рисунок 4.5 – Зависимость ошибок в тестовых фрагментах ЦМР GT 13.1 от глубины

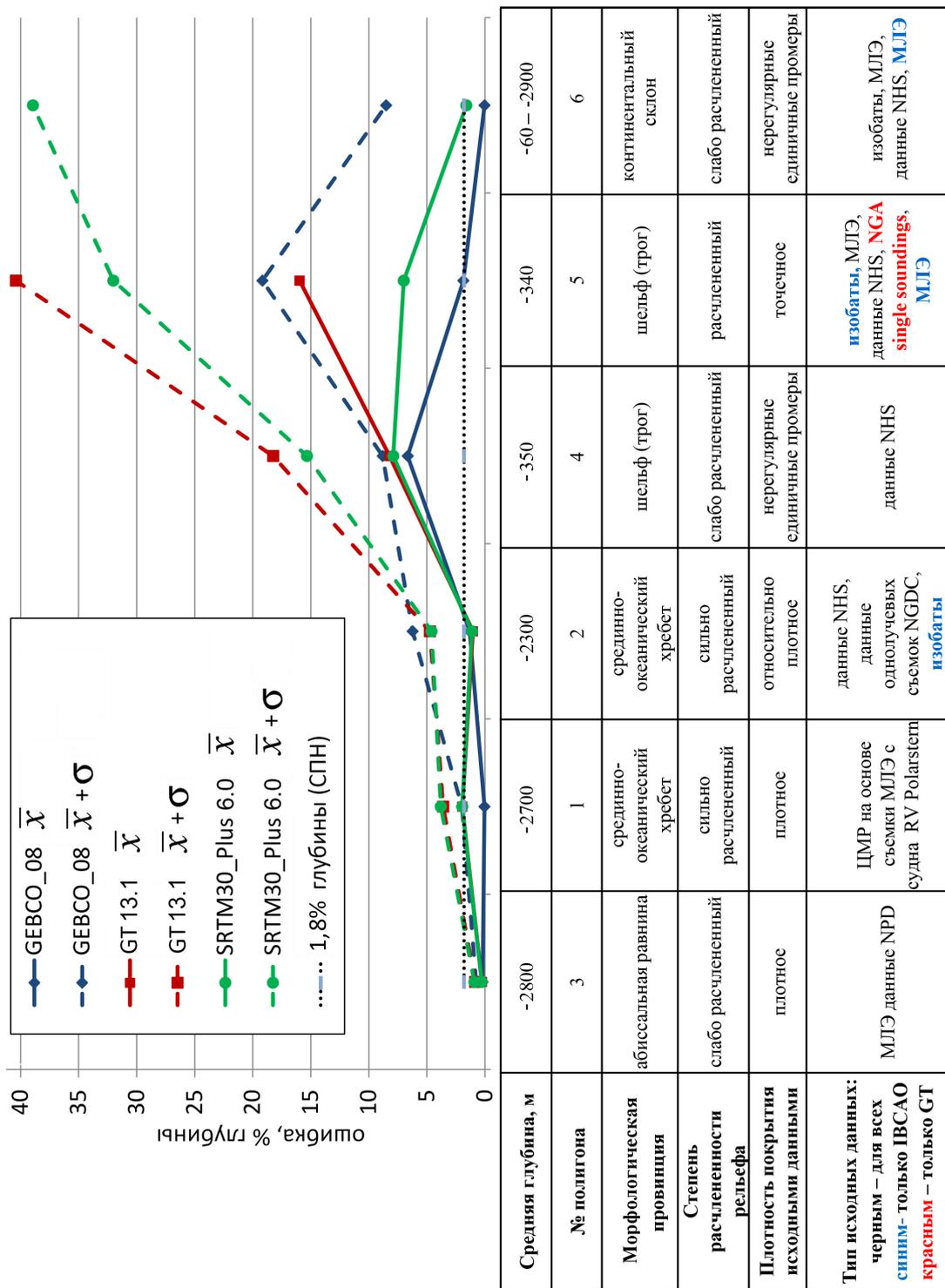


Рисунок 4.6 – Зависимость статистических характеристик точности тестовых фрагментов ЦМР от физико-географических характеристик полигонов, а также типа и плотности покрытия исходными данными (табл. 2.2)

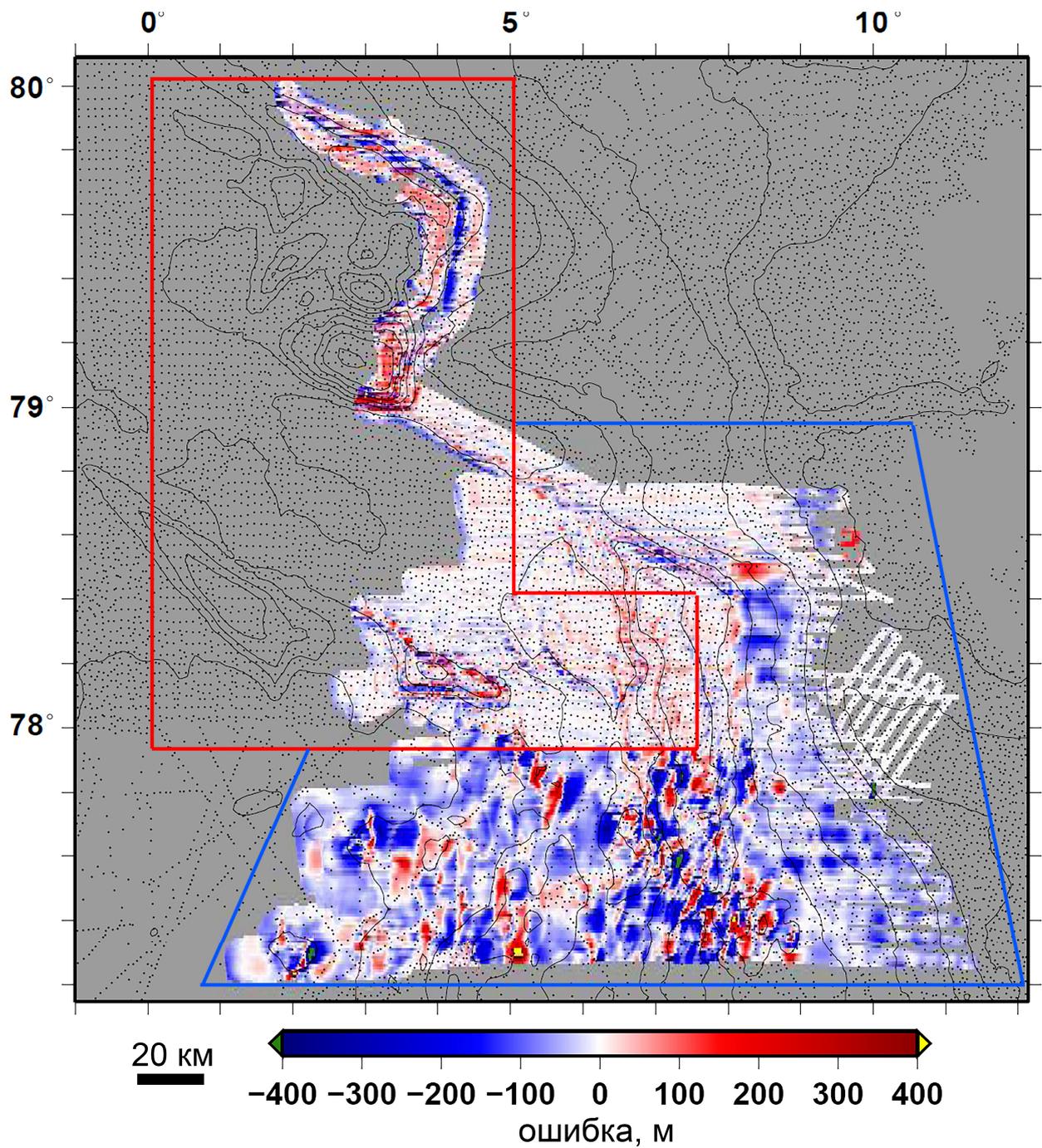


Рисунок 4.7 – Карта ошибок ЦМР GEBCO_08 на полигонах 1 и 2. Точки – покрытие исходными данными; изобаты ЦМР GEBCO_08. Границы полигонов 1 и 2 обозначены красной и синей рамками, соответственно

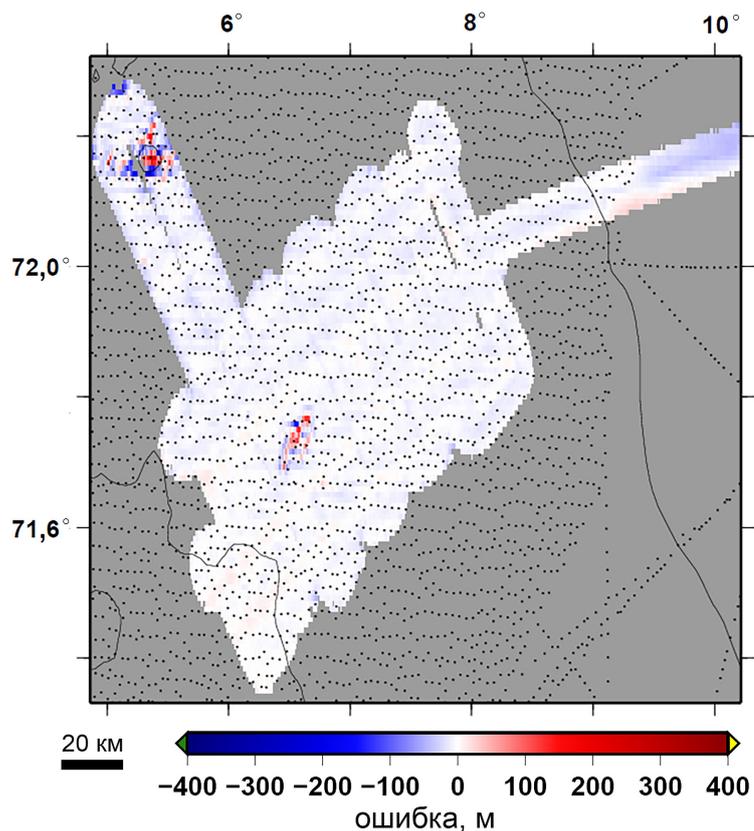


Рисунок 4.8 – Карта ошибок ЦМР GEVCO_08 на полигоне 3. Точки – покрытие исходными данными; изобаты ЦМР GEVCO_08

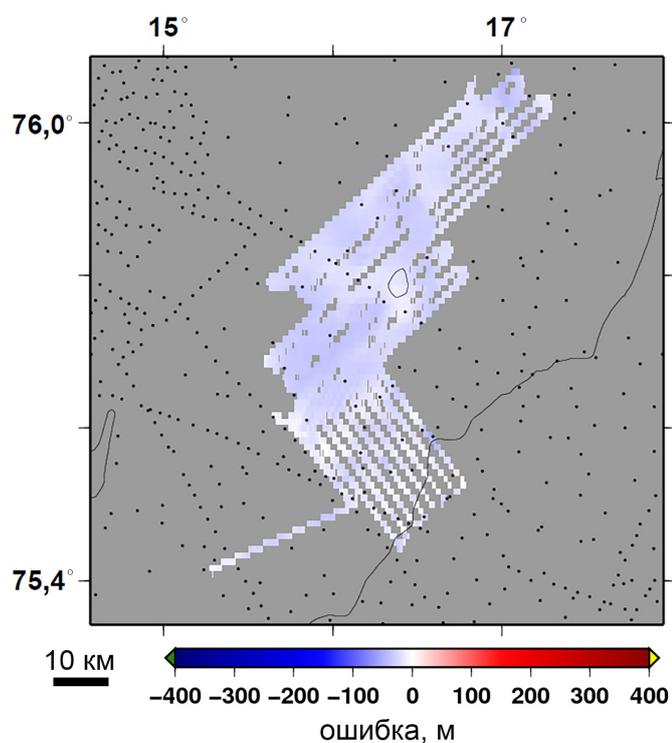


Рисунок 4.9 – Карта ошибок ЦМР GEVCO_08 на полигоне 4. Точки – покрытие исходными данными; изобаты ЦМР GEVCO_08

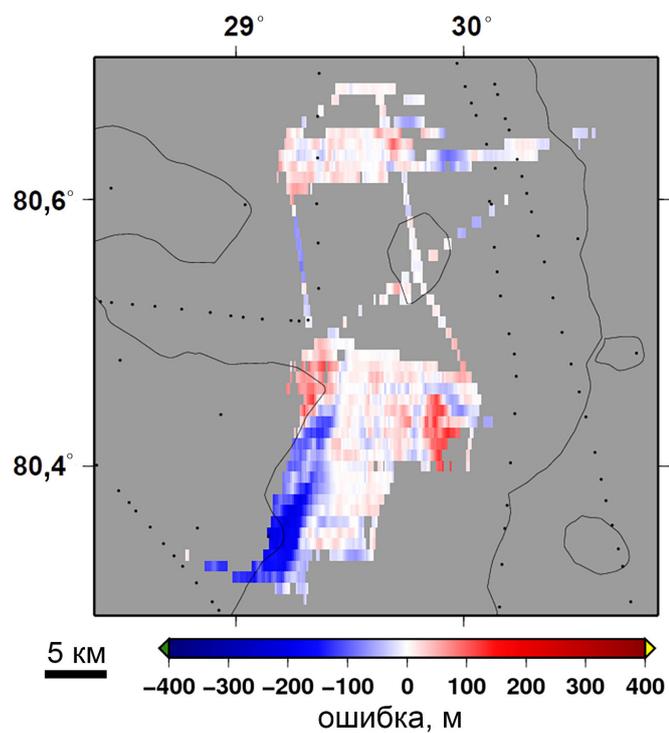


Рисунок 4.10 – Карта ошибок ЦМР GEVCO_08 на полигоне 5. Точки – покрытие исходными данными; изобаты ЦМР GEVCO_08

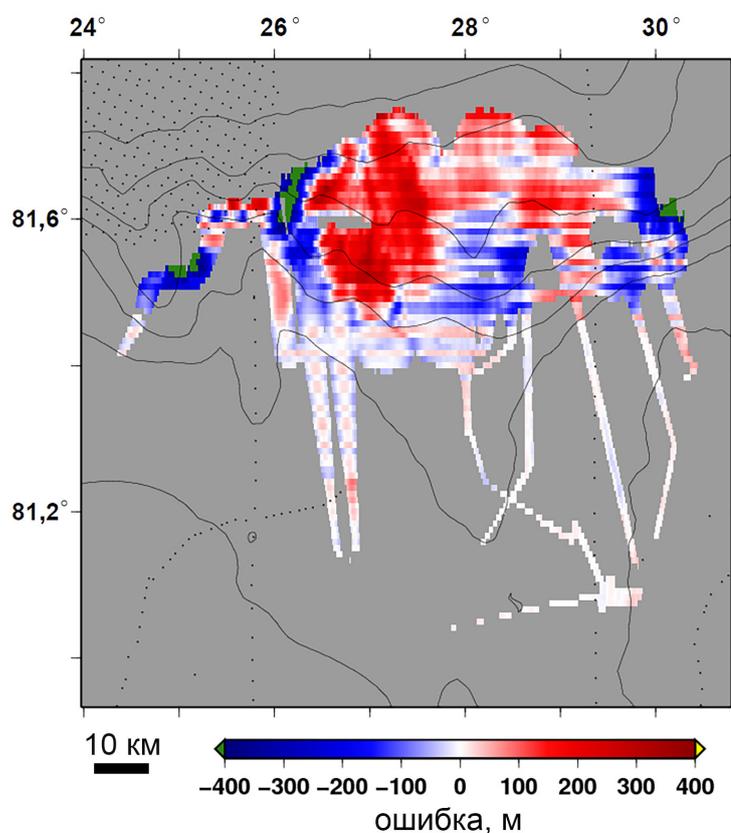


Рисунок 4.11 – Карта ошибок ЦМР GEVCO_08 на полигоне 6. Точки – покрытие исходными данными; изобаты ЦМР GEVCO_08

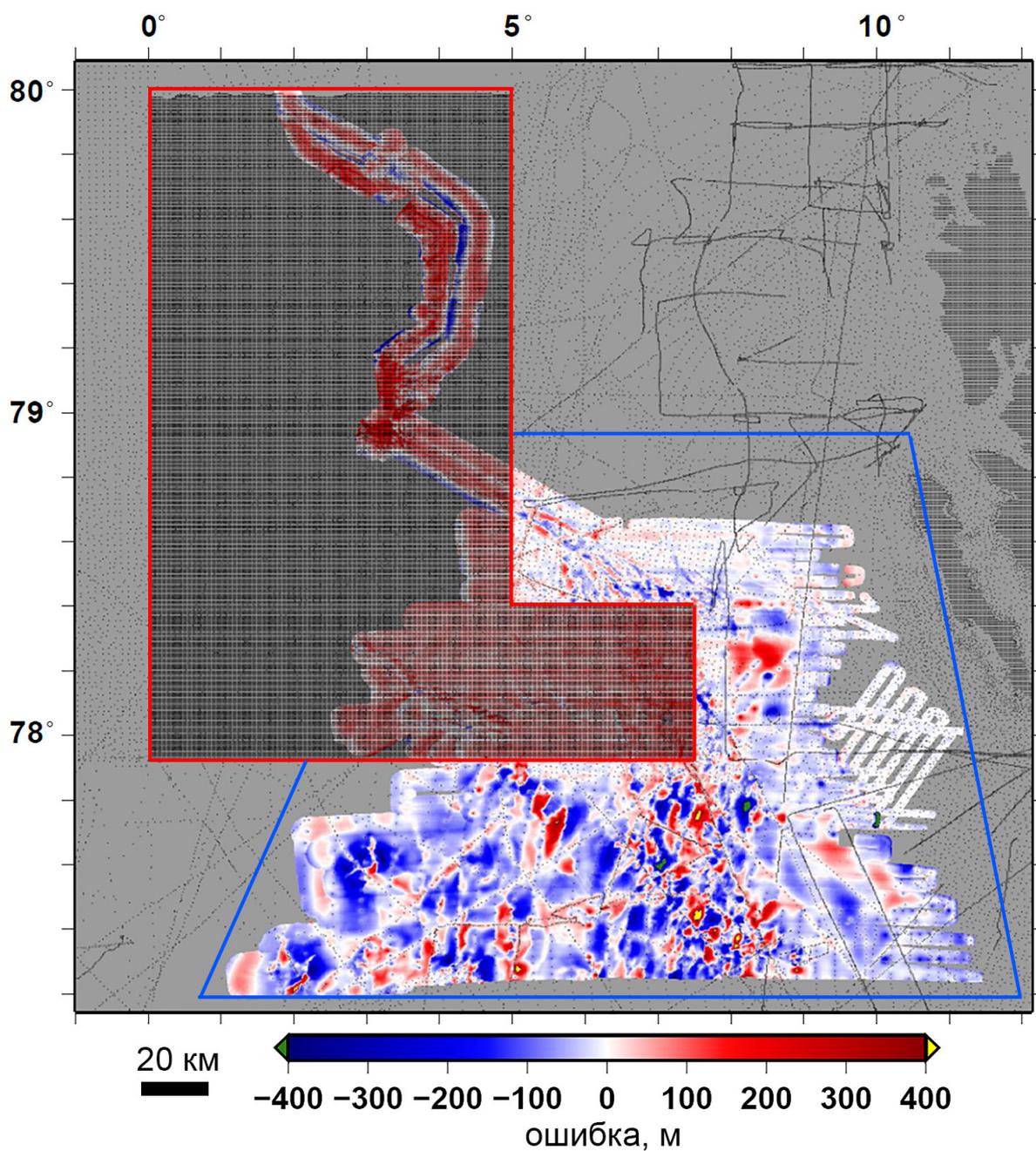


Рисунок 4.12 – Карта ошибок ЦМР GT 13.1 на полигонах 1 и 2. Точки – покрытие исходными данными. Границы полигонов 1 и 2 обозначены красной и синей рамками, соответственно

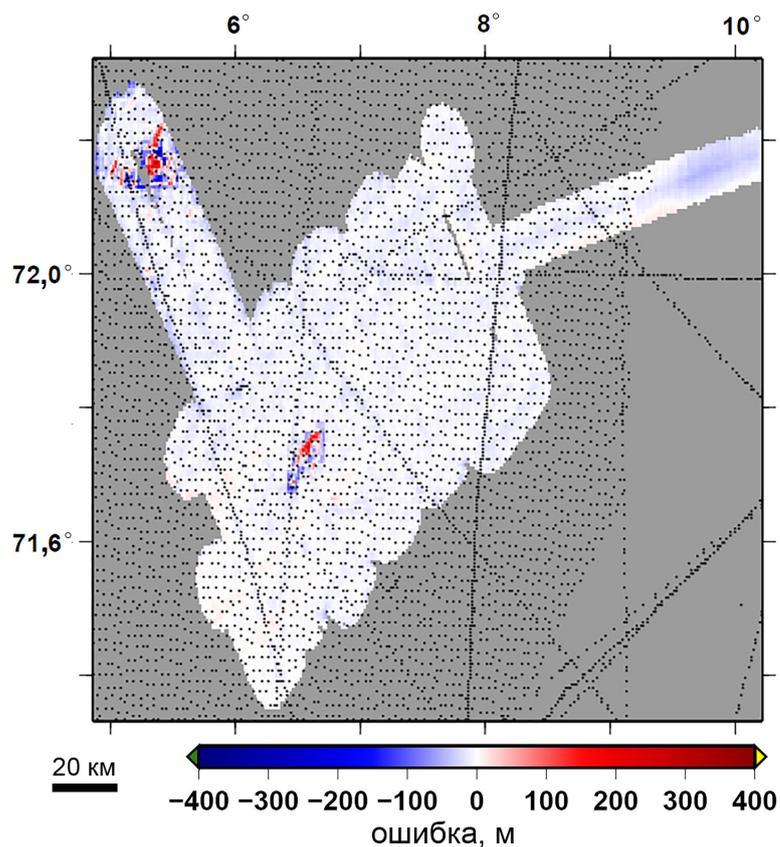


Рисунок 4.13 – Карта ошибок ЦМР GT 13.1 на полигоне 3. Точки – покрытие исходными данными

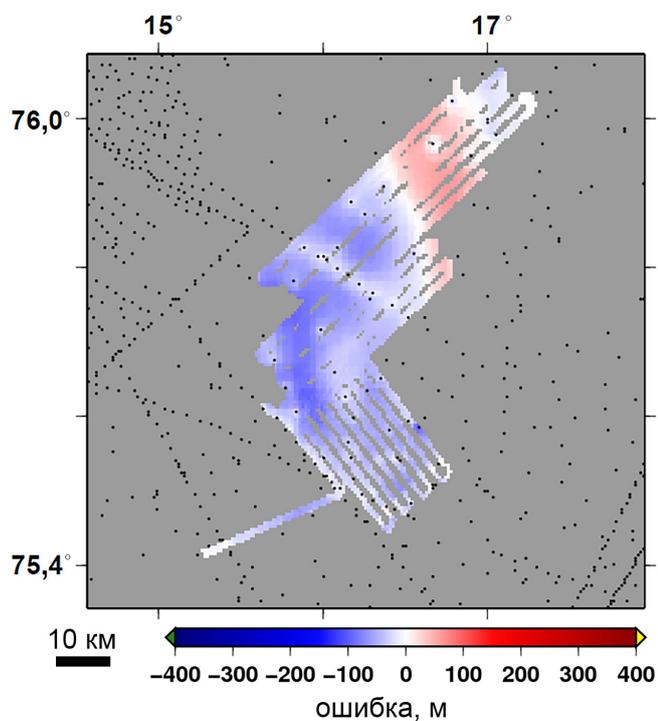


Рисунок 4.14 – Карта ошибок ЦМР GT 13.1 на полигоне 4. Точки – покрытие исходными данными

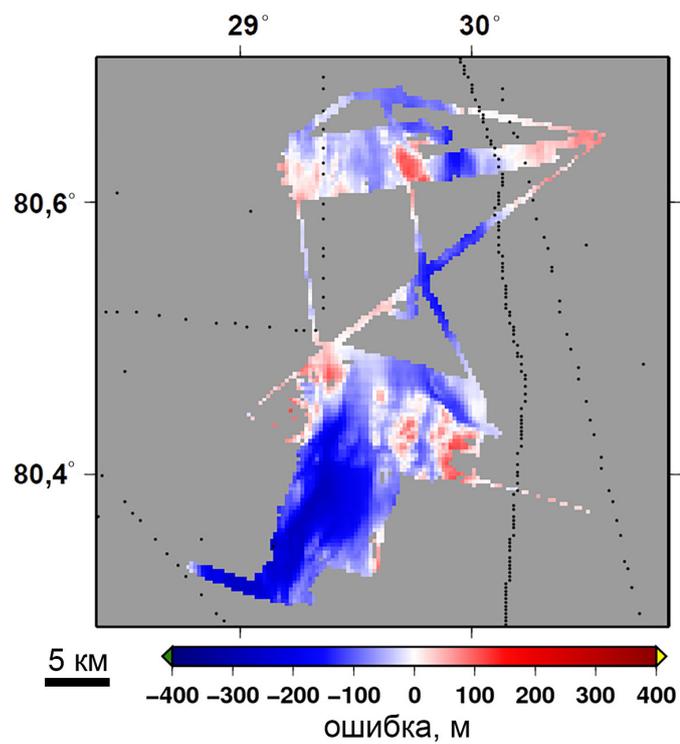


Рисунок 4.15 – Карта ошибок ЦМР GT 13.1 на полигоне 5. Точки – покрытие исходными данными

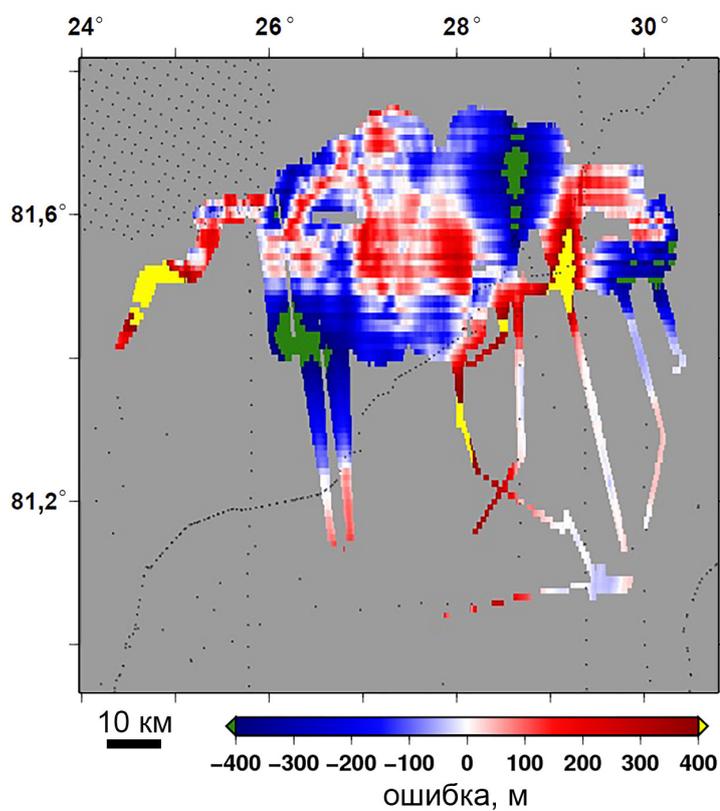


Рисунок 4.16 – Карта ошибок ЦМР SRTM30_Plus 6.0 на полигоне 6. Точки – покрытие исходными данными

Смещение \bar{x} значений ошибок на полигоне 2 не является значительным, по сравнению с максимальной СПН (1,85% глубины) для эталонных МЛЭ-данных (см. подразд. 2.5.1).

Для ЦМР GEBCO_08 наблюдается более узкое распределение ошибок по сравнению с ЦМР типа Б на трех полигонах 4, 5 и 6 (рис. 4.2 и 4.3).

Лучшие показатели ЦМР GEBCO_08 на шельфе (полигон 5) и на континентальном склоне (полигон 6) вызваны наличием дополнительных данных МЛЭ, которые не используются в ЦМР типа Б.

Сравнивая ошибки исходных данных (табл. 3.1 и 3.2, рис. 3.5) с ошибками построенных по ним ЦМР (табл. 4.1–4.6, рис. 4.2 и 4.3), можно видеть значительное ухудшение статистических параметров для ЦМР типа Б на шельфе (полигон 4). Это свидетельствует о внедрении дополнительной ошибки в процессе интерполяции исходных данных, построенных на нерегулярной сетке, в регулярную ЦМР.

Наблюдаются высокие значения σ ошибок у ЦМР типа Б: 25% глубины на полигоне 5 (шельф) и 37% глубины на полигоне 6 (континентальный склон), что говорит об ограничениях метода предсказанных по гравитационным данным глубин для шельфовых участков и высоких широт.

В то же время, для ЦМР типа Б значения σ ошибок на полигонах 1 и 2 немного ниже, чем для ЦМР типа А, что свидетельствует о более высокой точности ЦМР типа Б в районе срединно-океанического хребта, а также в глубоководных районах.

Как уже говорилось в разд. 2.2, ЦМР типа Б – GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 – построены на одной БД, но в различных проекциях, на сетках различного типа и с различным разрешением. Было интересно выяснить различия в точности этих двух ЦМР. Как видно из табл. 4.2, 4.3, 4.5 и 4.6, а также рис. 4.2 и 4.3, на всех полигонах, кроме 2 и 4, наблюдается сходные статистические показатели. На полигонах 4 и 5 в ЦМР SRTM30_Plus 6.0 гистограмма распределения ошибок несколько уже, чем в ЦМР GT 13.1, что, вероятно, связано с более высоким разрешением ЦМР SRTM30_Plus 6.0.

Выводы по главе 4

Разработан способ оценки точности батиметрических ЦМР. Способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матриц разности между значениями глубин в тестируемой ЦМР и в независимой эталонной ЦМР высокой точности и разрешения. Разработанный способ позволяет оценить точность батиметрических ЦМР не только в виде набора статистических характеристик и гистограмм, но и в виде карт ошибок тестируемой ЦМР, которые позволяют наглядно показать пространственное распределение этих ошибок.

Разработанный способ успешно апробирован на примере фрагментов ЦМР, относящихся к разным типам ЦМР: GEBCO_08 (тип А) и GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 (тип Б). В частности, установлено, что ЦМР GEBCO_08 является более точной моделью на четырех из шести полигонов, которые располагаются в районе срединно-океанического хребта, шельфа и континентального склона. Наблюдаемые различия в точности ЦМР связаны с ошибкой в исходных данных в моделях типа Б на полигоне 1, лучшим покрытием исходными данными в ЦМР GEBCO_08 на полигонах 5 и 6, а также низкой точностью метода предсказания глубин по гравитационным данным для ЦМР типа Б на полигонах 4, 5 и 6 (шельф и континентальный склон).

На точность батиметрической ЦМР оказывает влияние сочетание точности исходных данных, плотности покрытия исходными данными, а также метод интерполяции, использованный для перехода от нерегулярной сетки точек исходных данных к регулярной ЦМР.

ГЛАВА 5

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ГЛУБИН В БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ РЕЛЬЕФА

Глава посвящена оценке точности интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР. В разд. 5.1 описан разработанный способ оценки точности интерполяции значений глубин в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок. В разд. 5.2 обсуждается апробация этого способа, а в разд. 5.3 приведены и обсуждаются ее результаты. Материалы главы представлены в работах автора [69, 70, 4].

5.1 Способ оценки точности интерполяции значений глубин в батиметрических цифровых моделях рельефа

Разработанный способ оценки точности интерполяции значений глубин в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок основан на расчете, статистическом анализе и картографировании двух матриц: 1) матрицы разности между значениями глубин в тестируемой и эталонной ЦМР (то есть, матрицы ошибок тестируемой ЦМР); и 2) матрицы расстояний от данной ячейки тестируемой ЦМР до ближайшей ячейки, значение глубины в которой основано на измерениях. Точность интерполяции оценивается по графику зависимости величины ошибок ЦМР от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР с измеренным значением глубины.

Способ состоит из следующих основных этапов (рис. 5.1):

- 1) Расчет матрицы разности между значениями глубин в эталонной и тестируемой ЦМР с помощью алгоритма, описанного в разд. 3.1.
- 2) Построение карты разности значений глубин (то есть, карты ошибок тестируемой ЦМР – см. разд. 4.1).
- 3) Извлечение из БД карты покрытия исходными данными тестируемой ЦМР.
- 4) Расчет матрицы расстояний от данной ячейки тестируемой ЦМР до ближайшей ячейки ЦМР с измеренным значением глубины; применяется

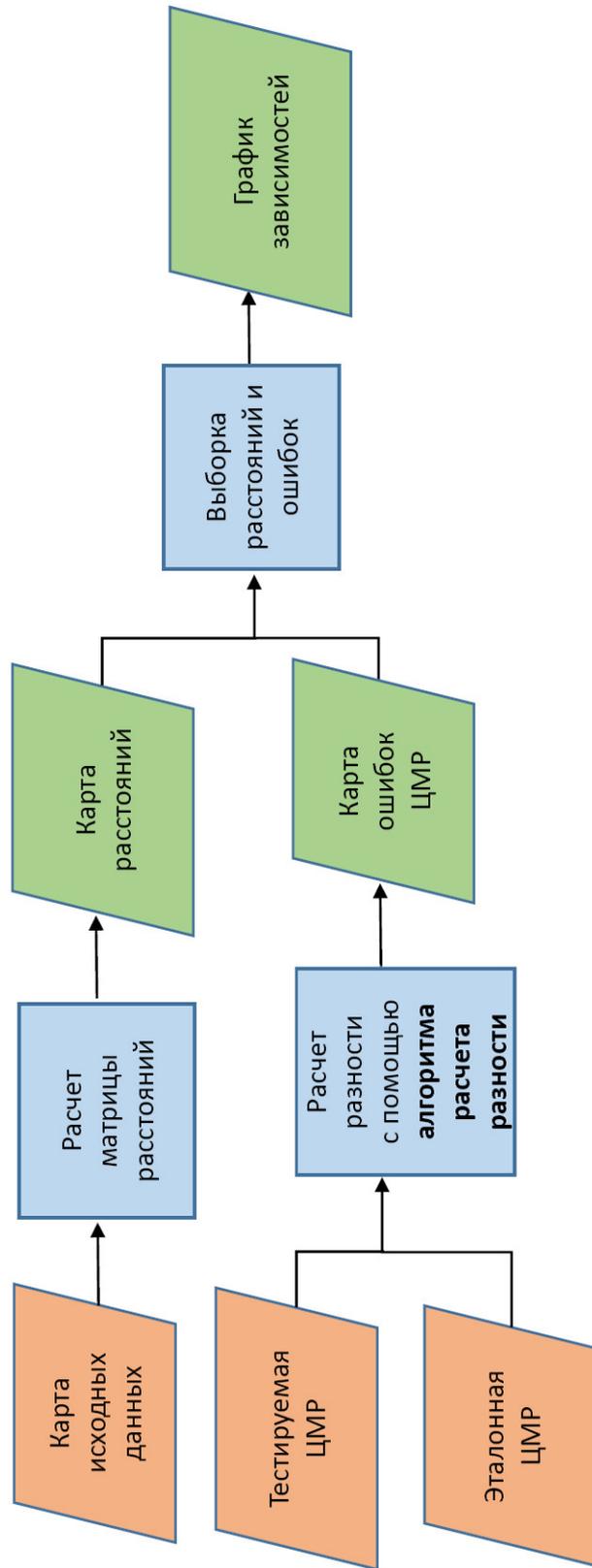


Рисунок 5.1 – Блок-схема способа оценки точности интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР

метод Маркса [182].

5) Построение карты расстояний.

6) Выборка соответствующих значений из матриц расстояний и ошибок для каждой ячейки ЦМР.

7) Построение графика зависимостей между распределением ошибок ЦМР и расстоянием до ближайшей ячейки ЦМР с измеренной глубиной.

5.2 Апробация способа оценки точности интерполяции значений глубин

Для апробации разработанного способа использовались тестовые фрагменты общедоступных ЦМР и эталонные ЦМР, которые описаны в разд. 2.4 и 2.5, соответственно. Из-за неполноты исходных данных для полигонов 5 и 6 (подробности см. разд. 3.3), точность интерполяции значений глубин была оценена для четырех из шести полигонов. Расчет матриц ошибок тестовых фрагментов общедоступных ЦМР описан в разд. 4.2, а соответствующие карты ошибок представлены на рис. 4.7–4.9 и 4.12–4.14.

Тестовые фрагменты общедоступных ЦМР построены в разных проекциях, на разных сетках и с разным разрешением: ЦМР GT 13.1 в проекции Меркатора (сферическая модель Земли) с разрешением 1' по меридиану, а ЦМР GEBCO_08 – на ССТ с разрешением 30" (табл. 2.1). Таким образом, линейные расстояния, покрытые одинаковым количеством ячеек сеток ЦМР GT 13.1 и GEBCO_08, не одинаковы. Для сопоставимости результатов, расстояния до ближайших точек с измеренными глубинами определялись в количестве ячеек ЦМР.

В связи с различием форматов ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1, вычисление матриц расстояний для этих ЦМР была выполнено с помощью несколько различающихся процедур. Матрица расстояний для ЦМР GT 13.1 была построена для каждого полигона при помощи инструмента *grdmath* пакета GMT. Для извлечения местоположения исходных данных для ЦМР GT 13.1 использовался инструмент *img2grd* пакета GMT. Карта изученности была

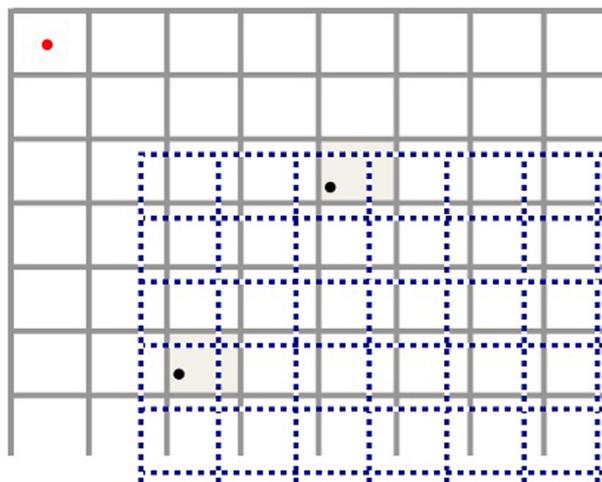


Рисунок 5.2 – Иллюстрация решения проблемы угловых координат. Серая сетка обозначает ЦМР GEBCO_08. Синяя сетка обозначает матрицу расстояний, созданную в ESRI ArcMap на основе исходных точек хуз (черные точки). Для того чтобы обеспечить точное совпадение матрицы расстояний с исходной сеткой, а также для покрытия той же области, в левый верхний угол файла исходных данных хуз была добавлена точка (красного цвета)

извлечена также отдельно для каждого полигона.

Матрица расстояний для ЦМР GEBCO_08 была рассчитана в ESRI ArcMap [75]. Покрытие исходными данными для ЦМР ИВСАО 2.23 и, следовательно, для GEBCO_08 было получено от Д. Сэндвелла. Данные были предоставлены в текстовом формате хуз и извлекались отдельно для каждого полигона с помощью инструмента *gmtselect* пакета GMT. Расчеты проводились с помощью ESRI ArcMap Spatial Analyst Toolbox.

Угловые координаты для сетки ArcMap определяются координатами левого верхнего угла (рис. 5.2). Необходимо точное совпадение ячеек в исходной ЦМР и матрице расстояний. Для точного совпадения ячеек в левый верхний угол (координаты угла полигона) каждого полигона была добавлена точка (рис. 5.2). Таким образом была рассчитана матрица расстояний для каждого полигона с разрешением 30". После этого матрица расстояний экспортировалась в пакет GMT для дальнейших расчетов.

Для выборки соответствующих значений из матриц расстояний и ошибок был использован инструмент *gdtrack* пакета GMT для каждой ячейки ЦМР для последующего построения графика зависимости.

5.3 Результаты апробации

На рис. 5.3–5.10 приведены карты расстояний для четырех полигонов. На рис. 5.11 и 5.12 представлено распределение ошибок в ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1 в зависимости от расстояния до ближайших исходных данных.

Анализ карт расстояний (рис. 5.3–5.10) и графиков зависимости ошибок ЦМР от расстояния до ближайших точек исходных данных (рис. 5.11 и 5.12), позволил получить следующую информацию о тестируемых ЦМР:

Распределение ошибок варьирует в зависимости от полигона из-за различий в плотности данных и количества точек данных внутри каждого полигона. Для распределения ошибок в ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1 характерно сужение диапазона ошибок с увеличением расстояния от ячеек с измеренными значениями глубин на всех полигонах, за исключением полигона 4 для ЦМР GT 13.1. Величина ошибок на нулевом расстоянии соответствует ошибке в исходных данных.

Наблюдаемое распределение ошибок обусловлено интерполяцией с использованием алгоритма «сплайн с натяжением» (разд. 2.1): интерполированная поверхность проходит точно через значения глубин исходных данных ЦМР [213]. Таким образом, алгоритм не сглаживает мелкие (на уровне высокочастотного шума) ошибки в значениях глубин исходных данных. Расстояние, на котором уменьшается ошибка, зависит от параметра натяжения, поскольку именно натяжение определяет расстояние, на котором значения глубин исходных данных ЦМР влияют на интерполированные значения глубин. За пределами определенного расстояния интерполированные значения глубин в меньшей степени зависят от ошибки исходных данных ЦМР, и ошибки интерполированных значений

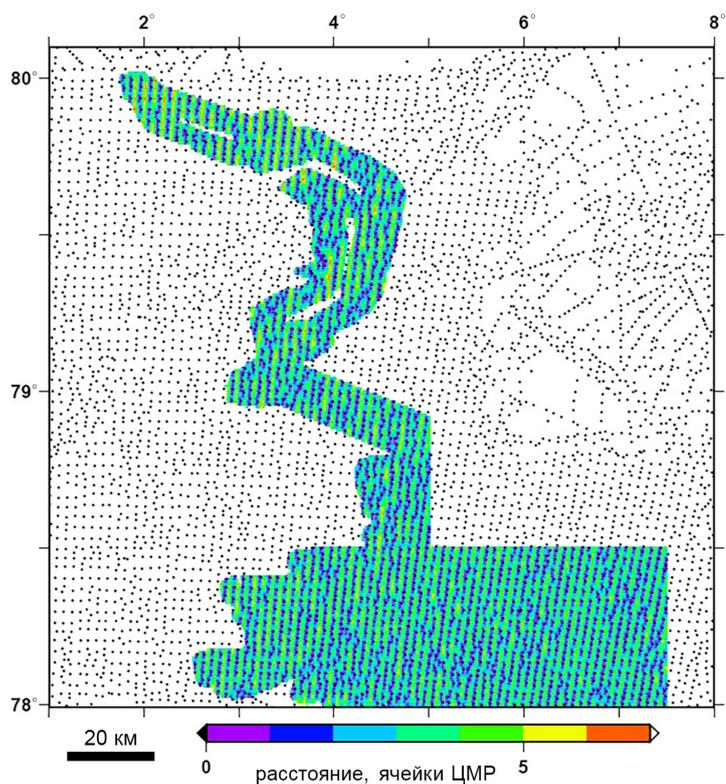


Рисунок 5.3 – Карта расстояний для ЦМР GEBCO_08 на полигоне 1. Точки – покрытие исходными данными

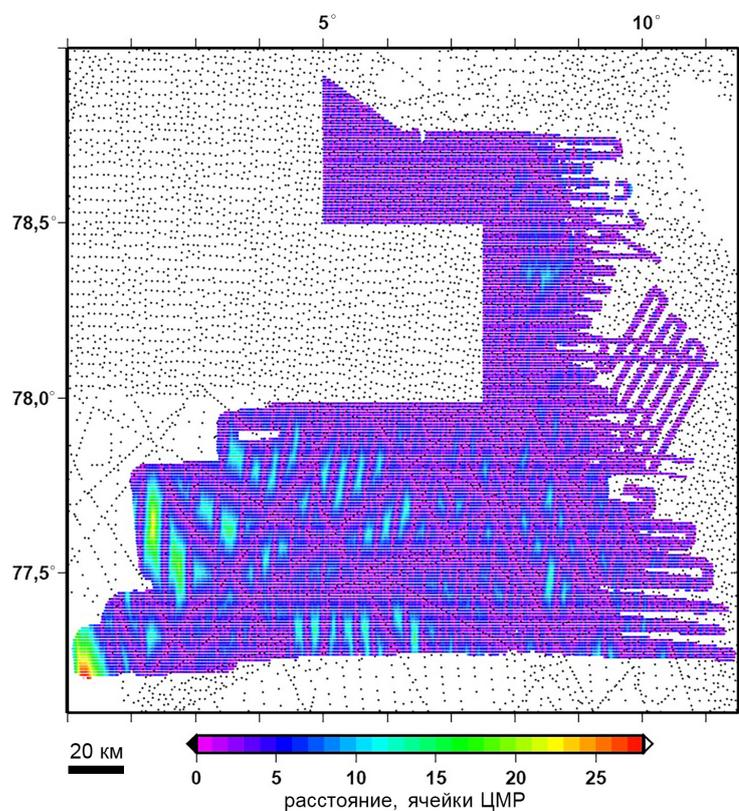


Рисунок 5.4 – Карта расстояний для ЦМР GEBCO_08 на полигоне 2. Точки – покрытие исходными данными

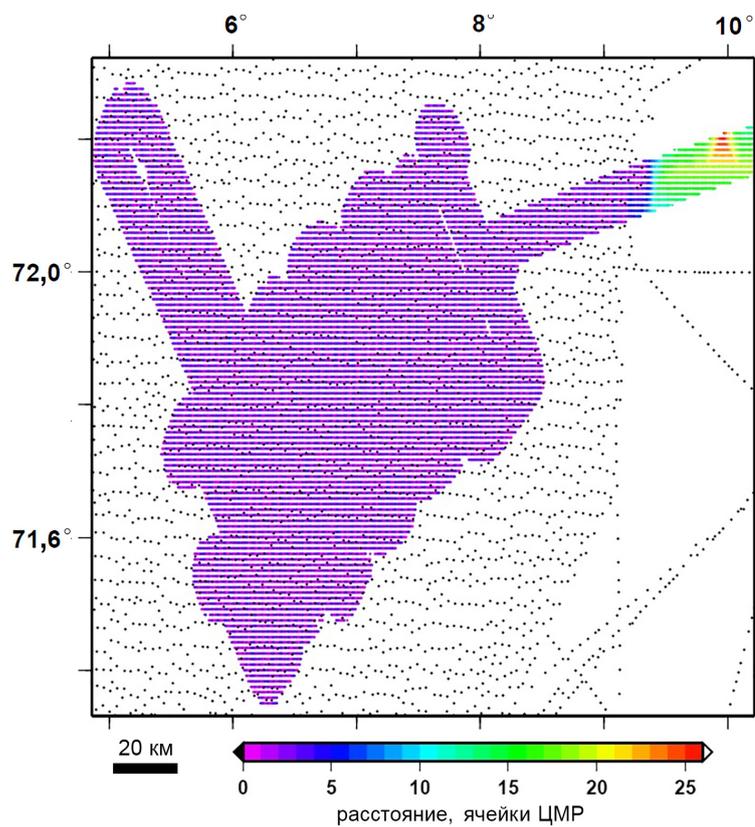


Рисунок 5.5 – Карта расстояний для ЦМР GEVCO_08 на полигоне 3.

Точки – покрытие исходными данными

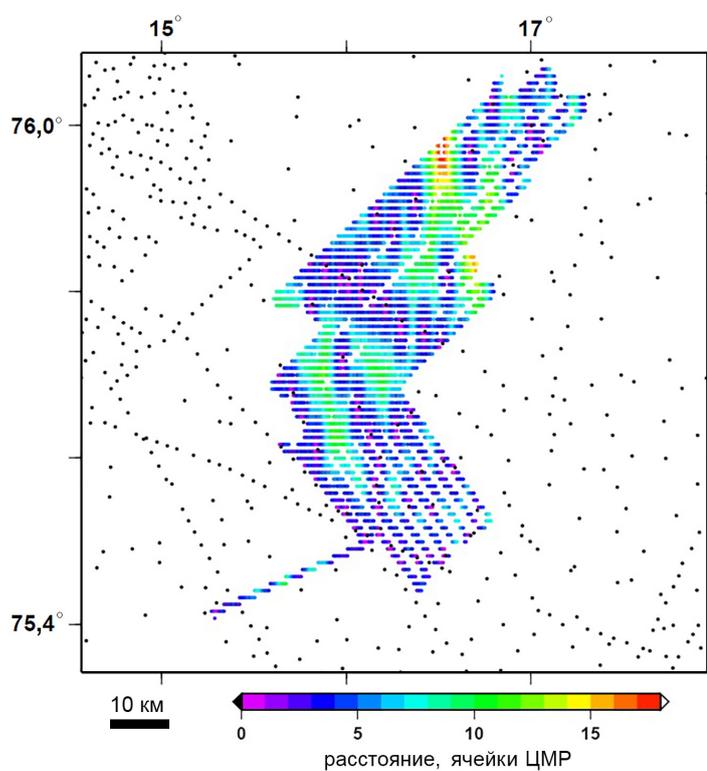


Рисунок 5.6 – Карта расстояний для ЦМР GEVCO_08 на полигоне 4.

Точки – покрытие исходными данными

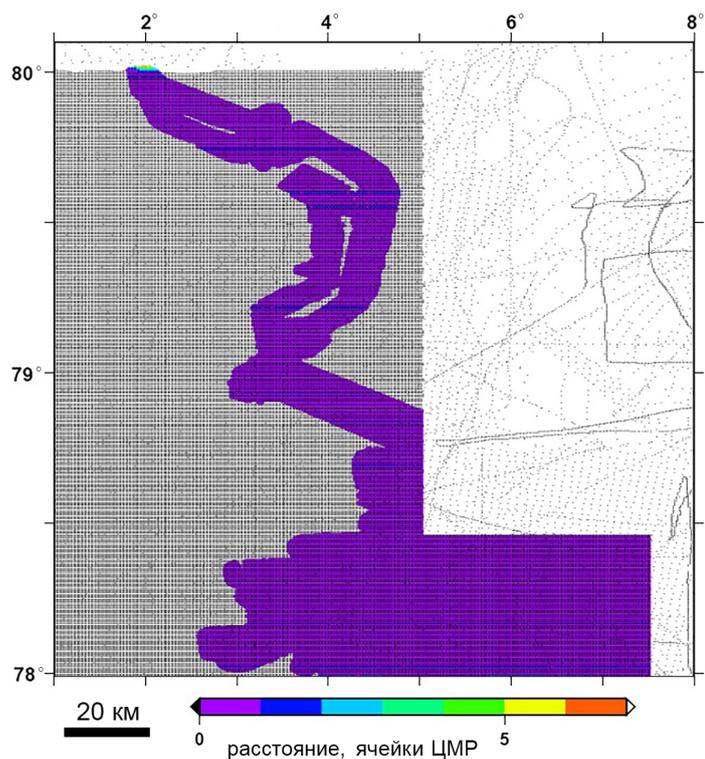


Рисунок 5.7 – Карта расстояний для ЦМР GT 13.1 на полигоне 1. Точки – покрытие исходными данными

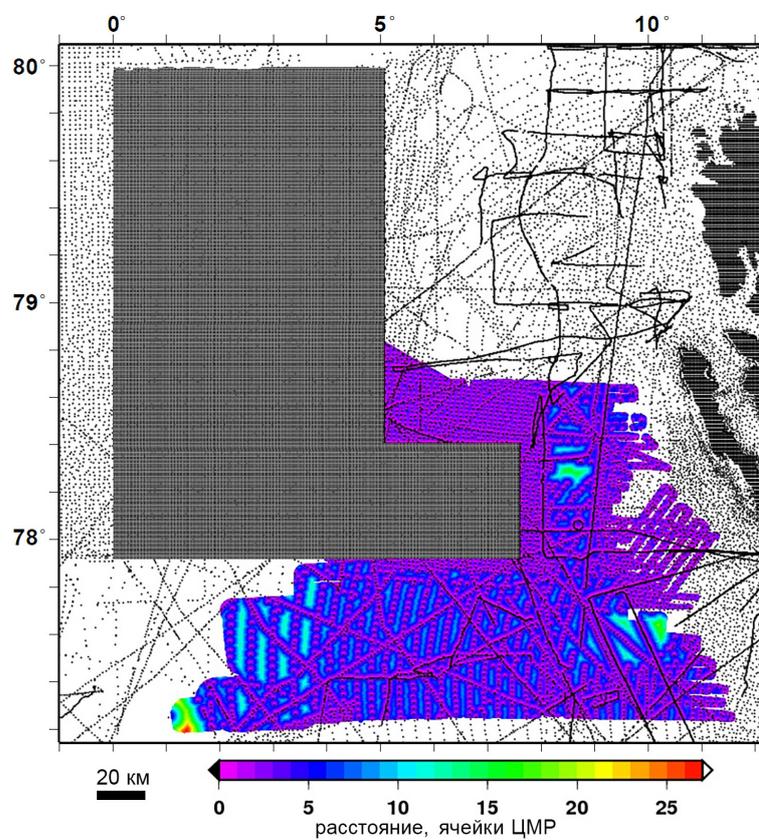


Рисунок 5.8 – Карта расстояний для ЦМР GT 13.1 на полигоне 2. Точки – покрытие исходными данными

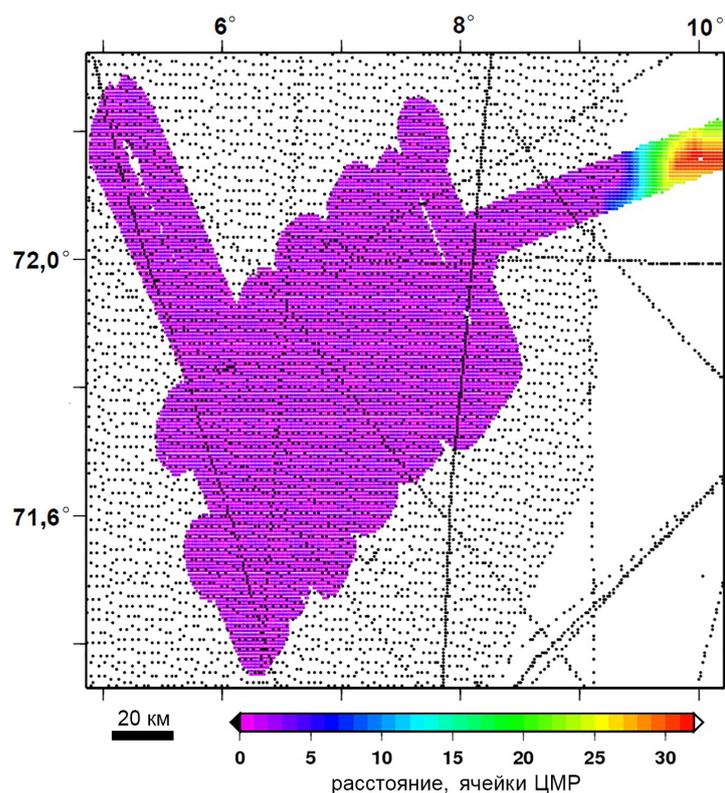


Рисунок 5.9 – Карта расстояний для ЦМР GT 13.1 на полигоне 3. Точки – покрытие исходными данными

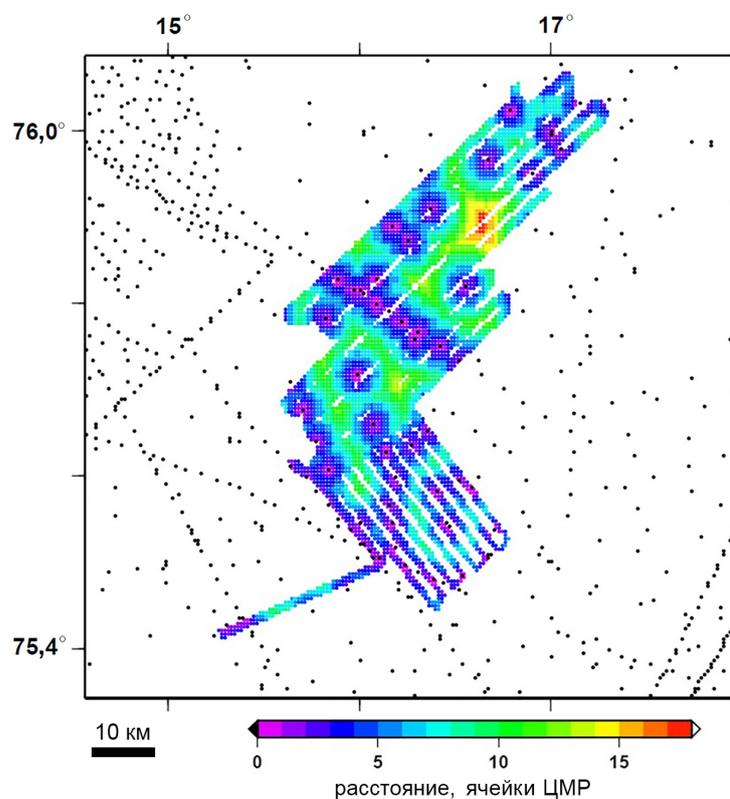


Рисунок 5.10 – Карта расстояний для ЦМР GT 13.1 на полигоне 4. Точки – покрытие исходными данными

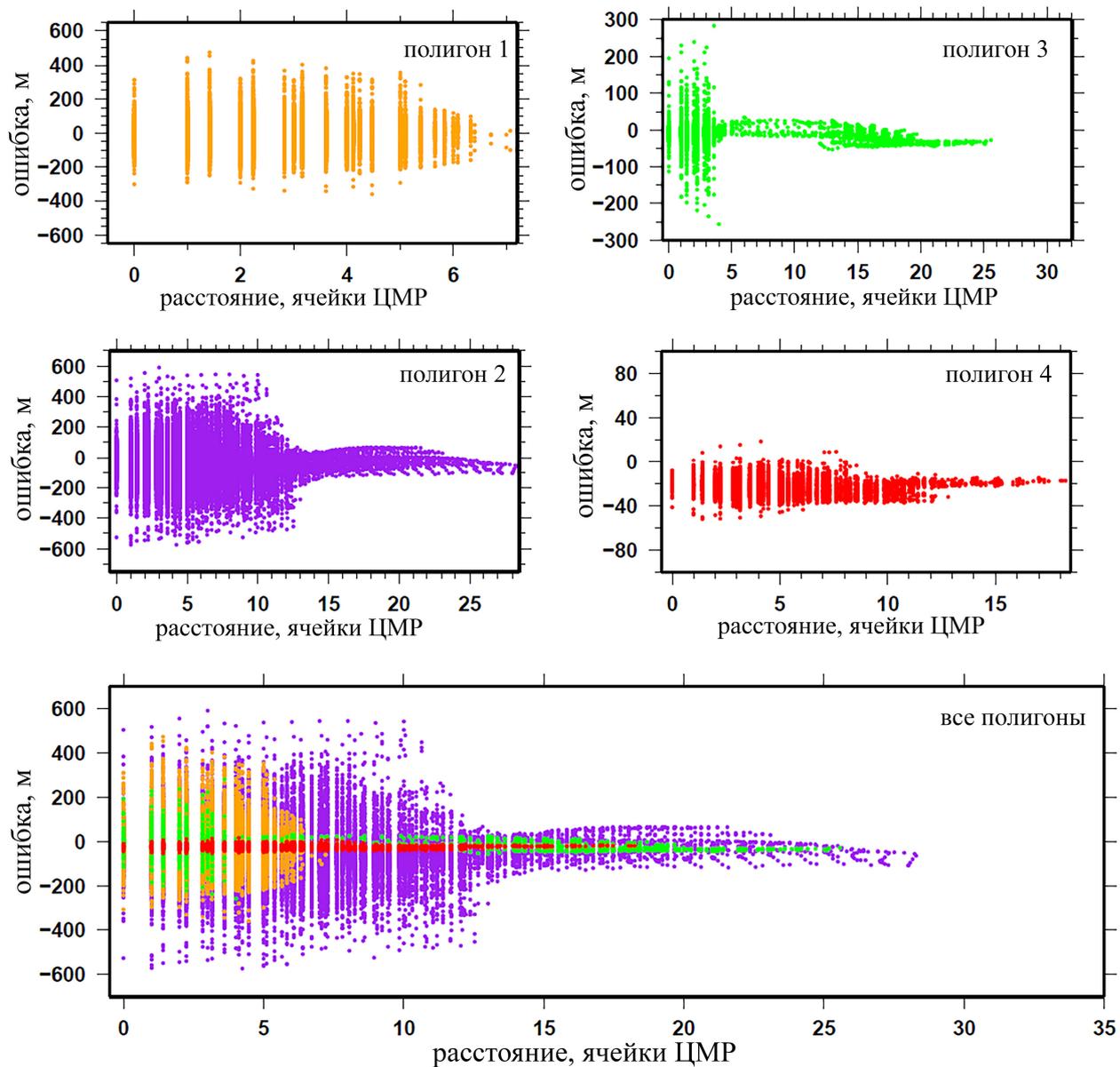


Рисунок 5.11 – Зависимость величины ошибок ЦМР GEBCO_08 от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР с измеренной глубиной

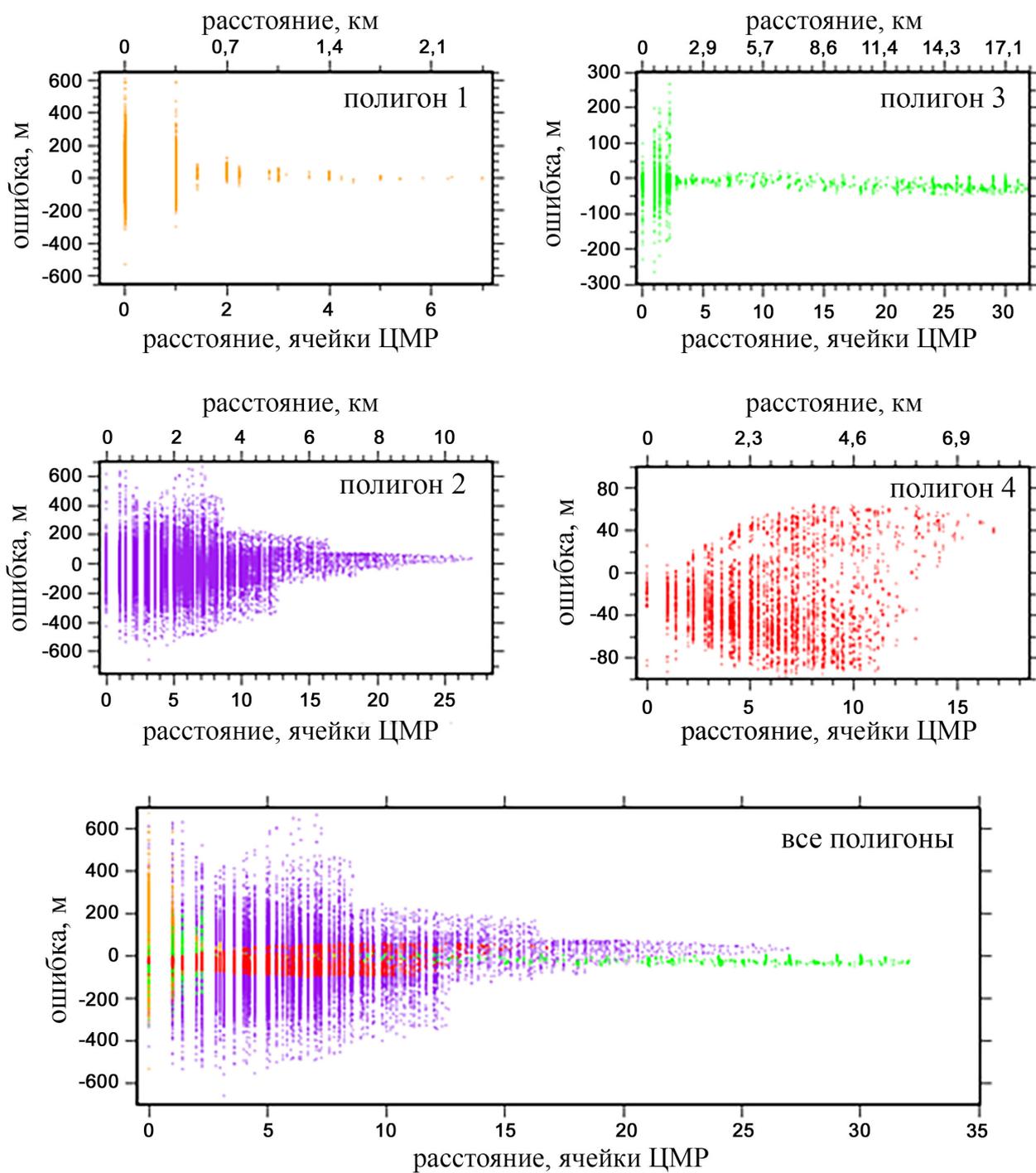


Рисунок 5.12 – Зависимость величины ошибок ЦМР GT 13.1 от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР с измеренной глубиной

глубин сводятся к средней ошибке значений окружающих исходных данных.

Помимо параметра натяжения, на распределение ошибок влияет количество точек исходных данных с измеренными значениями глубин в пределах полигона, а также плотность исходных данных. Как следует из графиков зависимости ошибок интерполяции от расстояния до ближайших ячеек с измеренными значениями глубин (рис. 5.11 и 5.12), чем больше расстояние, тем меньше ошибки. По картам расстояний видно, что области со значительным расстоянием, как правило, очень малы. Таким образом, уменьшение ошибок с увеличением расстояния соответствует уменьшению количества точек с измеренными значениями глубин.

Для оценки точности предсказанного рельефа в ЦМР GT 13.1 расстояние было преобразовано из пикселей в километры (рис. 5.12) в соответствии с приблизительным реальным размером ячеек в зависимости от полигона. Расстояние до точек исходных данных с измеренными значениями глубин в пределах полигонов варьирует от 2 до 10 км, при максимальном расстоянии в 17 км (полигон 3). Характерные размеры предсказанного рельефа составляет 20–160 км [211, 212]. Таким образом, чтобы оценить, насколько хорошо предсказанный по данным альтиметрии рельеф заполняет пробелы исходных данных, требуются площади с максимальным расстоянием до ближайшей точки с измеренными значениями глубин более 20 км.

В распределении ошибок интерполяции значений глубин ЦМР GT 13.1 и GEBCO_08 наблюдается сходство: вблизи точек исходных данных ошибка выше, а вдали от них – ниже. Расстояние, на котором уменьшаются ошибки, контролируется плотностью исходных данных ЦМР, количеством точек данных внутри полигонов, а также параметром натяжения, используемым в алгоритме интерполяции. Плотность распределения исходных данных ЦМР в пределах полигонов относительно высока для оценки точности предсказанного рельефа с заявленными характерными размерами 20–160 км.

Выводы по главе 5

Разработан способ оценки точности интерполяции значений глубин в ЦМР в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок. Способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матрицы ошибок глубины тестируемой ЦМР и матрицы расстояний от данной ячейки тестируемой ЦМР до ближайшей ячейки ЦМР, значение глубины в которой основано на измерениях. Точность интерполяции оценивается по графику зависимости величины ошибок ЦМР от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР с измеренными значениями глубины.

Разработанный способ успешно апробирован на примере фрагментов ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1, построенных с применением различных алгоритмов интерполяции. В частности, установлено:

- В пределах каждого полигона характер распределения ошибок в ЦМР зависит от плотности исходных данных и количества ячеек сетки.
- Ошибки в ячейках ЦМР, где расстояние до точек с измеренными значениями глубин равно нулю, отражают ошибки исходных данных.
- Отмечено резкое уменьшение ошибки на некотором расстоянии от точек с измеренными значениями глубин. Расстояние, на котором уменьшаются ошибки, контролируется параметром натяжения, используемым в алгоритме сплайн-интерполяции Смита–Вессела, плотностью исходных данных, а также количеством точек с измеренными значениями глубин в пределах полигона.

ГЛАВА 6

АРТЕФАКТЫ В БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ РЕЛЬЕФА

Глава посвящена исследованию артефактов, которые характерны для батиметрических ЦМР. В разд. 6.1 дано определение и общие сведения об артефактах в ЦМР. В разд. 6.2 описаны визуальные методы идентификации артефактов в батиметрических ЦМР. В разд. 6.3 приведена классификация артефактов в батиметрических ЦМР и их описание. Материалы главы представлены в работах автора [67–69, 2].

6.1 Общие сведения

Артефактами ЦМР называются «элементы» рельефа, которые не существуют в природе, но присутствуют в ЦМР. Артефакты ЦМР обусловлены либо серьезными случайными или систематическими ошибками в исходных данных, либо внедрены в моделируемую поверхность в результате некорректного применения алгоритма интерполяции [184]. Артефакты значительно снижают качество как ЦМР суши, так и батиметрических ЦМР, а также всех, рассчитываемых по таким ЦМР морфометрическим моделям [115, 116, 171]. Как и случайные ошибки, артефакты могут быть обнаружены в любой ЦМР, но, в зависимости от методики построения ЦМР, они выражены в большей или меньшей степени. Например, квази-глобальная ЦМР суши ASTER GDEM переполнена артефактами типа «холм» и «впадина», которые можно обнаружить на любой территории с любым типом рельефа [119, 120].

Очевидно, что артефакты являются ошибками батиметрических ЦМР и поэтому, с формальной точки зрения, могут быть описаны как ошибки, без выделения в отдельную категорию. Однако «обычные» случайные или систематические ошибки ЦМР в первом приближении, как правило, не заметны для пользователя. Они могут быть выявлены и охарактеризованы

только с помощью процедур оценки точности ЦМР (например, способов, описанных в гл. 4 и 5). Артефакты же зрительный анализатор человека воспринимает как некие элементы рельефа, весьма сходные с реально существующими элементами подводного рельефа. Неподготовленный пользователь, особенно – незнакомый с конкретным регионом, может легко интерпретировать артефакт как реально существующий элемент подводного рельефа. Например, после появления в Google Earth подложки «океан», основанной на батиметрической ЦМР, присутствующие в ней линейные артефакты, связанные с галсами судовых съемок, были восприняты широкой публикой как «улицы затерянного города Атлантис» [195].

Кроме того, для некоторых приложений математико-картографического моделирования рельефа «абсолютная» точность ЦМР не так важна, как отсутствие артефактов и согласованность в относительном изменении значений высот или глубин. Например, для проведения средне- или мелкомасштабных структурно-геоморфологических и геологических (тектонических) исследований наличие в региональных или глобальных ЦМР высокочастотного шума (мелких случайных ошибок) не имеет значения. Вместе с тем, на результаты геоморфологических и геологических интерпретаций может оказать серьезное влияние наличие в таких ЦМР артефактов (например, «террас» вдоль горизонталей, «линеаментов» вдоль галсов судовых маршрутов, «холмов» и «впадин», вызванных одиночными неверными значениям высоты или глубины).

В этой связи изучение артефактов батиметрических ЦМР требует специального подхода; их целесообразно рассматривать и изучать независимо от «обычных» случайных и систематических ошибок ЦМР.

6.2 Визуальный анализ как способ выявления артефактов в батиметрических цифровых моделях рельефа

На примере фрагментов ЦМР IBCAO 2.23, GEBCO_08, GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 автором проведено исследование типичных

батиметрических артефактов для трех морфологических провинций в Норвежско-Гренландском и Баренцевом морях: континентальный шельф, абиссальная равнина и срединно-океанический хребет (рис. 6.1). Подробная характеристика этих провинций дана в разд. 2.3.

Для визуального анализа батиметрии были применены методы картографической визуализации ЦМР и информации о покрытии исходными данными, используемыми для построения ЦМР: трехмерная визуализация подводного рельефа; аналитическая отмывка рельефа при косом освещении; вертикальное преувеличение рельефа; использование шкал с различными интервалами и комбинациями цветов и оттенков; построение профилей; расчет и картографирование экспозиции склонов и др. При анализе использовался пакет IVS Fledermaus 3D.

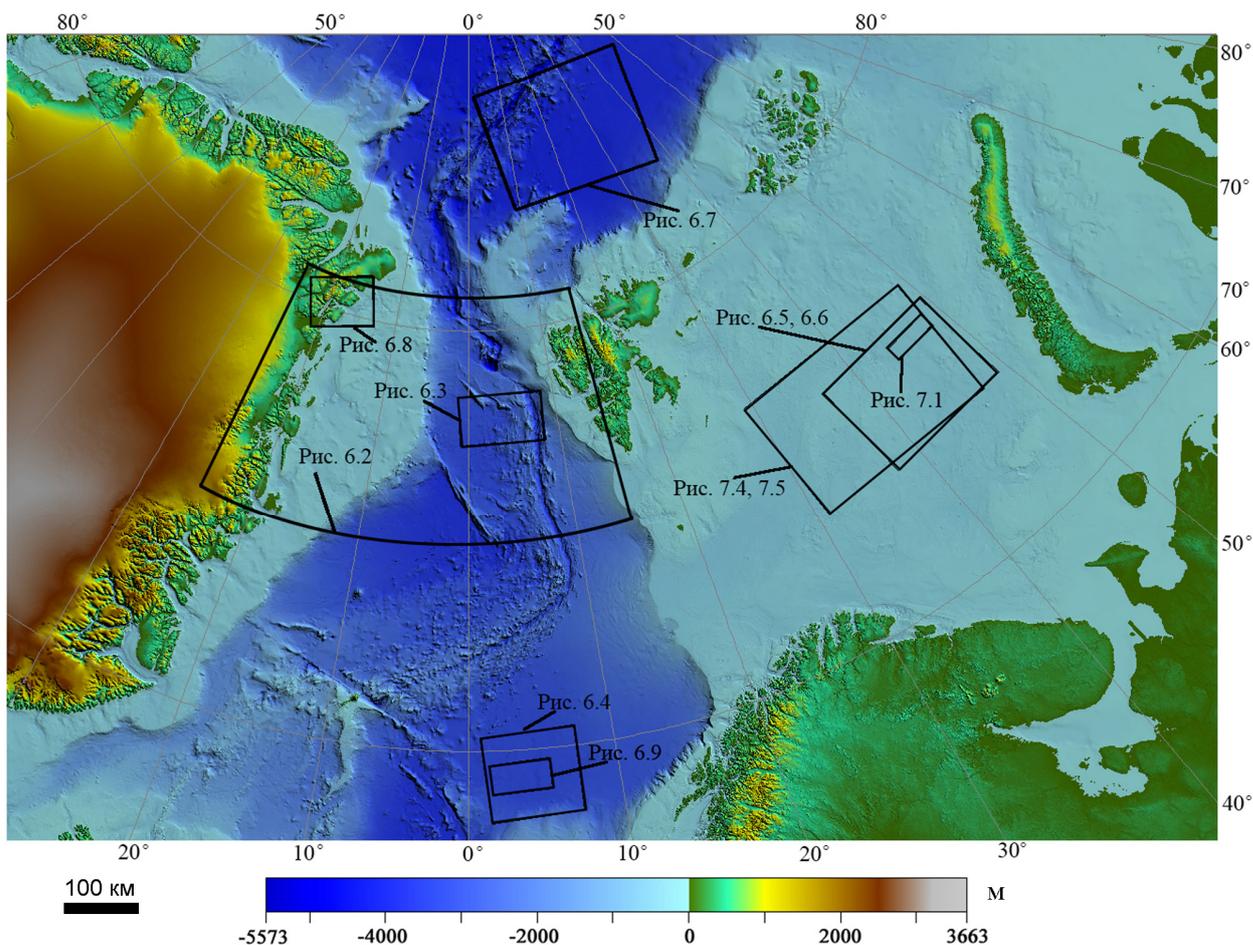


Рисунок 6.1 – Географическое положение участков исследования артефактов в гл. 6 и 7. Рамками обозначены соответствующие рисунки

6.3 Классификация артефактов батиметрических цифровых моделей рельефа

В результате визуального анализа фрагментов четырех ЦМР, наблюдаемые в них артефакты были классифицированы автором в соответствии с источниками и факторами, которые их вызывают. В табл. 6.1 приведена классификация артефактов, типичных для ЦМР морского дна, с описанием характерной для них морфологии, иллюстрацией, а также типа ЦМР, в котором данный артефакт наблюдается. На рис. 6.2–6.9 даны примеры типичных артефактов.

На рис. 6.2 представлен подводный рельеф, построенный на основе анализируемых ЦМР. Видно сходство рельефа в ЦМР типа А (IBCAO 2.23 и GEBCO_08), и в ЦМР типа Б (GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0). Это вызвано единой БД и сходством методик построения ЦМР разных типов (см. подразд. 2.2.1 и 2.2.2). Выделяются артефакты, характерные как для обоих типов батиметрических ЦМР, так и для определенного типа ЦМР (табл. 6.1).

Наиболее характерными для ЦМР дна являются линейные артефакты, соответствующие галсовым промерам однолучевым или многолучевым эхолотом. В особенности они выделяются в ЦМР типа Б из-за особенности построения ЦМР этого типа (см. разд. 2.2.2): измеренные глубины восстанавливаются в поверхность предсказанной батиметрии. Линейные артефакты показаны на рис. 6.3 и 6.4. По морфологии они напоминают искусственные хребты (рис. 6.3: профили 3 и 4) и трог (рис. 6.3: профиль 2; рис. 6.4: профиль 1; рис. 6.5: профиль 4). Они наблюдаются явно вдоль галсов судовых съемок и легко идентифицируются при наложении на карту рельефа местоположение исходных данных (см. также рис. 2.12 и 2.13).

Если исходными данными служат единичные промеры глубин, наблюдаются артефакты типа «холмов» и «впадин». Особенно они выражены в ЦМР типа Б в районах, где значения точечных промеров и однолучевой съемкой не совпадает с предсказанным рельефом (рис. 2.14 и 6.5).

Таблица 6.1 – Классификация артефактов, типичных для батиметрических ЦМР

Источники и факторы, вызывающие артефакты	Морфология артефакта	Пример артефакта	Тип ЦМР, для которого характерен артефакт
Данные МЛЭ	Полосовые артефакты вдоль перекрытий соседних галсов	Рис. 2.17–2.21	А и Б
Данные однолучевого эхолотирования	Линейные артефакты – искусственные хребты и трог	Рис. 6.3: профили 2, 3 и 4; Рис.6.4: профиль 1	А и Б
Точечные промеры глубин	Искусственные холмы и воронки	Рис. 6.5: профили 1, 2, 3 и 4	А и Б
Изобаты	Эффект террасированности склонов и несуществующие формы рельефа в районах, где значения глубин по изобатам не совпадает с окружающими значениями	Рис. 6.6	А

Ошибки интерполяции в районах отсутствия акустических данных	Искусственные равнины или впадины; звездоподобные формы	Рис. 6.7	А
Отсутствие акустических данных в моделях, которые используют предсказанный рельеф	Искусственные депрессии и поднятия в районах, где нет линейной корреляции между подводным рельефом и гравитационным полем	Рис. 6.4: профили 2 и 3; Рис. 6.9	Б
Высокочастотный шум в предсказанном рельефе	Эффект «апельсиновой корки»	Рис. 6.2б, г: красная окружность	Б
Краевые эффекты по границе склеивания ЦМР разной точности и разрешения	Искусственные террасы, полосовые артефакты	Рис. 6.2г: красная стрелка; Рис. 6.3: профиль 1	А и Б
Ошибки отображения береговой линии	Отрицательные и нулевые значения высот на суше, искусственные острова	Рис. 6.2б, г: оранжевая стрелка; Рис. 6.8	А и Б

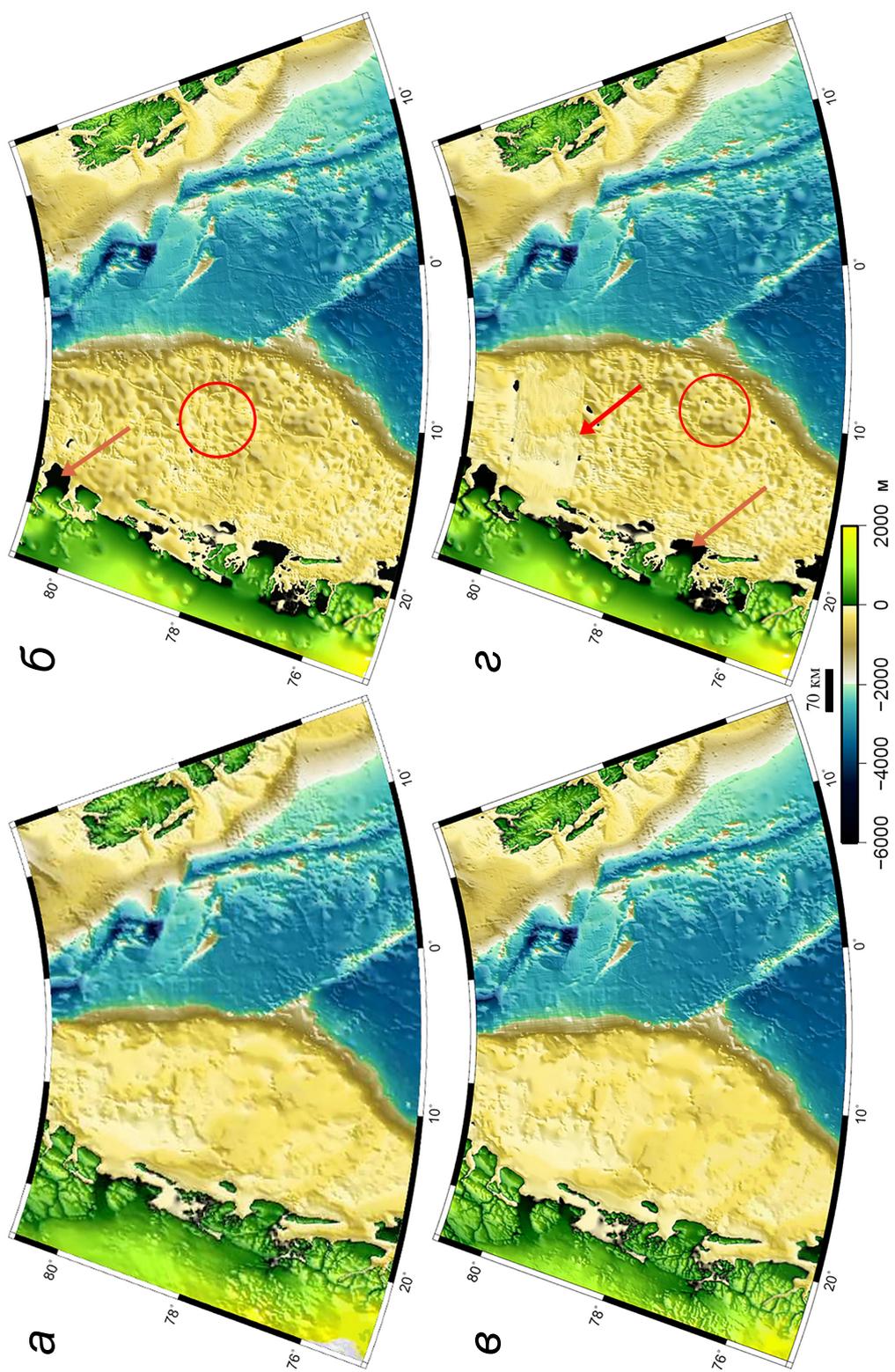


Рисунок 6.2 – Подводный рельеф Норвежско-Гренландского моря, построенный по общедоступным ЦМР: *а* – ИВСАО 2.23; *б* – GT 13.1; *в* – GEBCO_08; *г* – SRTM30_Plus 6.0. Стрелками и окружностями показаны артефакты (см. табл. 6.1). Местоположение см. рис. 6.1

Высокочастотные артефакты, связанные с данными многолучевых съемок (например, полосовые артефакты вдоль перекрытий соседних галсов), описаны в подразд. 2.5.3 и могут быть найдены на рис. 2.17–2.21.

Для ЦМР типа А характерен известный эффект «террассированности» склонов из-за интерполяции ЦМР по оцифрованным изобатам [208, 115]. Пример такого артефакта приведен на рис. 6.6. В цифровом моделировании рельефа суши этот эффект известен с 1980-х гг. [233, 101]. Он возникает при интерполяции регулярной ЦМР по нерегулярным данным, полученным с помощью детальной оцифровки горизонталей топографических карт при отсутствии данных о высотах между горизонталями. Решение проблемы также известно давно: оцифровка горизонталей топографических карт должна проводиться не вдоль горизонталей, а с использованием параллельных трансект: цифруются точки пересечения трансект с горизонталями, а также точки пересечения трансект со структурными линиями рельефа (водоразделами, тальвегами, бровками и подножьями).

Еще несколько классов артефактов, характерных для ЦМР типа А, показаны на рис. 6.7. На рис. 6.7а,в представлена батиметрия в ЦМР ИВСаО 2.23. На рис. 6.7в каждое значение глубины показано случайным цветом, чтобы подчеркнуть артефакты. В местах с сильной нехваткой данных (покрытие исходными данными отображено на рис. 6.7г) наблюдается искусственная равнина (синий цвет на рис. 6.7в) и звездоподобные формы рельефа. Модель экспозиции склонов (рис. 6.7б) подчеркивает звездоподобный и плоский артефакты.

К артефактам, которые характерны для обоих типов ЦМР, относятся ступени в рельефе (рис. 6.3: профиль 1), полосовые артефакты по границе склеивания ЦМР разной точности и разрешения (рис. 6.2: красная стрелка), а также ошибки в береговой линии, такие как сдвиг в береговой линии (рис. 6.2: оранжевая стрелка), отрицательные отметки высот на суше и нулевые или положительные отметки высот в открытом море (рис. 6.8).

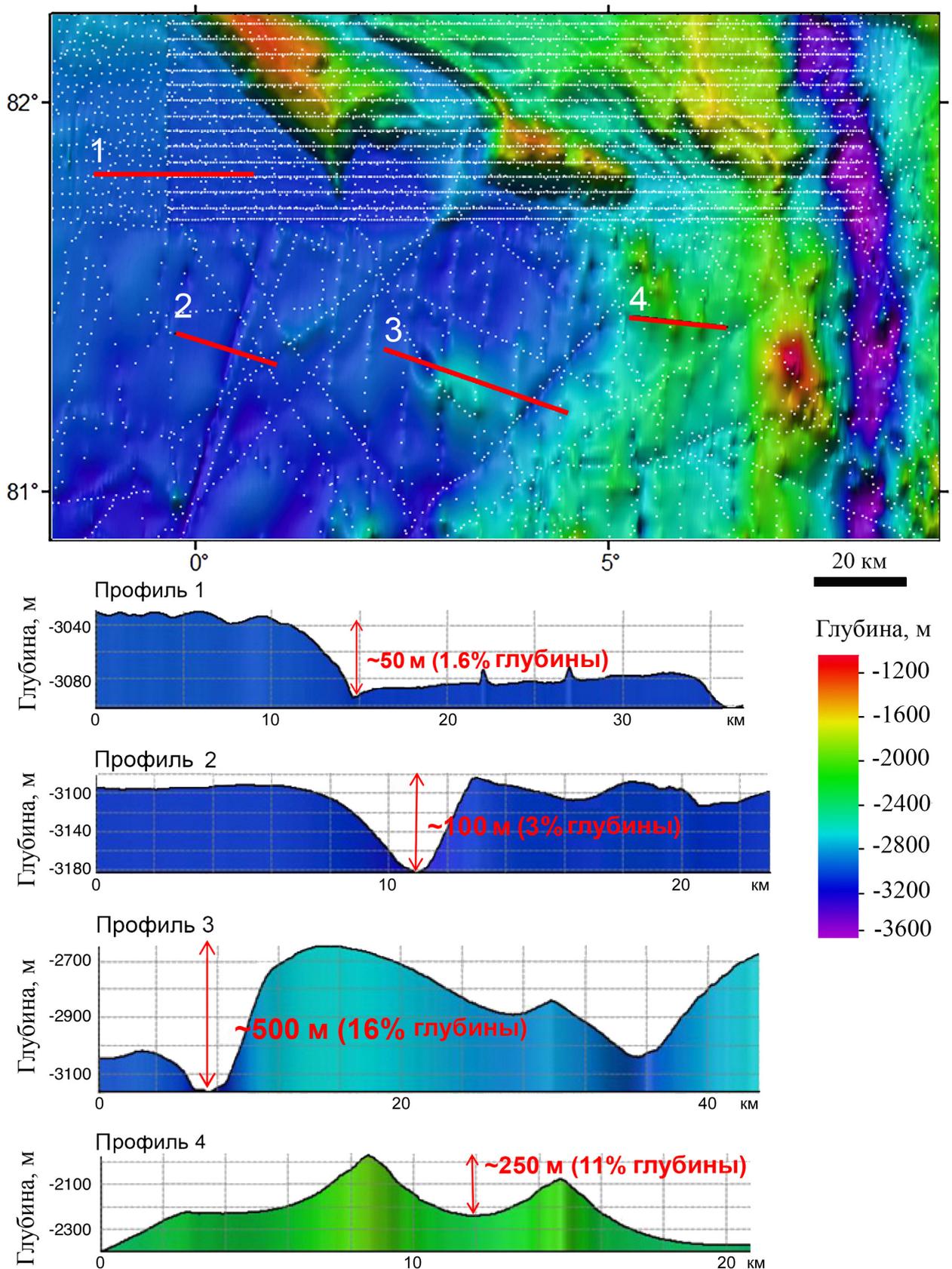


Рисунок 6.3 – Батиметрия в ЦМР GT 13.1 (срединно-океанический хребет; местоположение см. рис. 6.1). Белыми точками показано покрытие исходными данными. Артефакты описаны в тексте

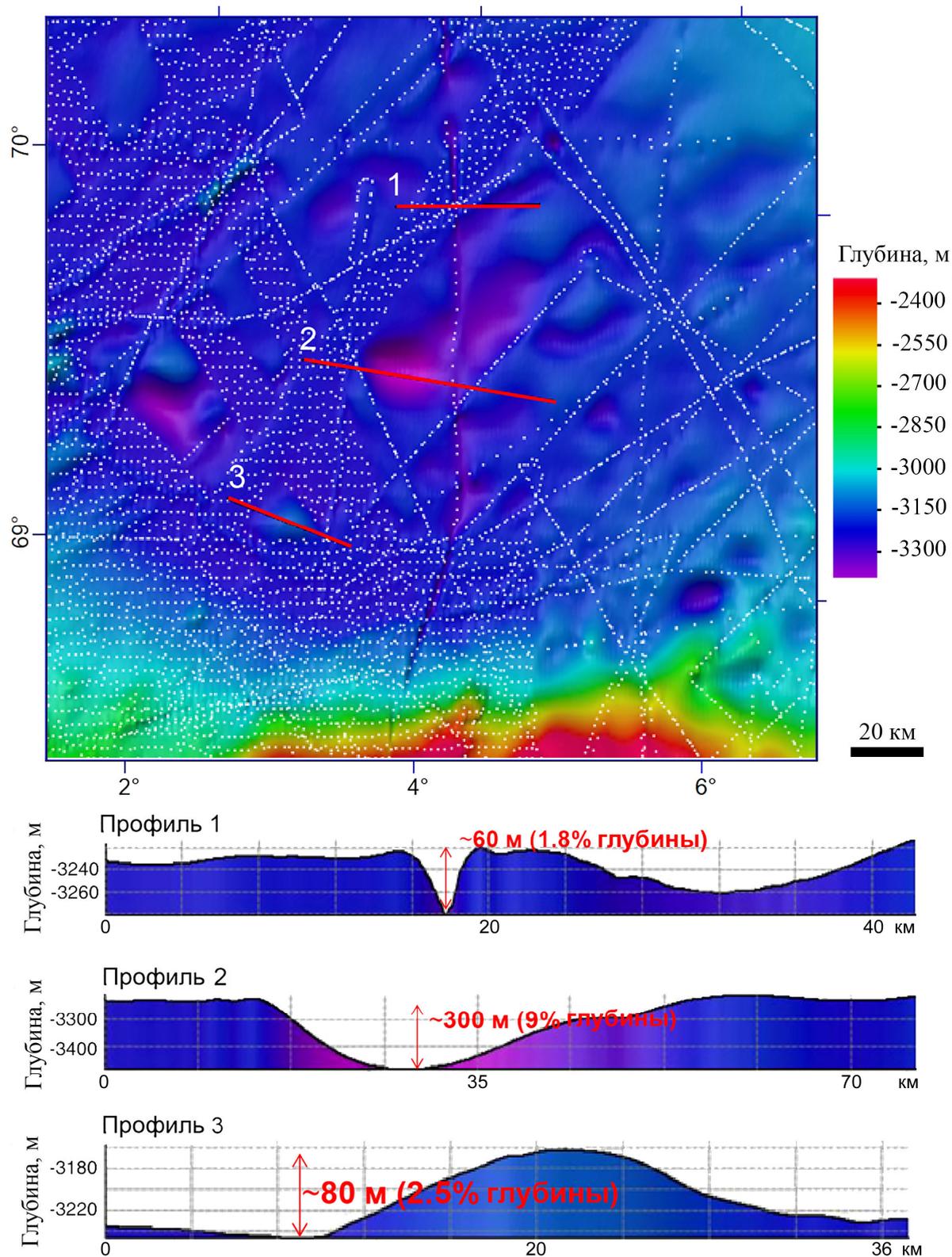


Рисунок 6.4 – Батиметрия в ЦМР SRTM30_Plus 6.0 (абиссальная равнина; местоположение см. рис. 6.1). Белые точки – покрытие исходными данными. Артефакты: «трог», вызванный ошибочным профилем однолучевой съемки (профиль 1); «впадина» и «подняtie», унаследованные из предсказанного рельефа по гравитационным аномалиям (профили 2 и 3). См. рис. 6.9 и текст

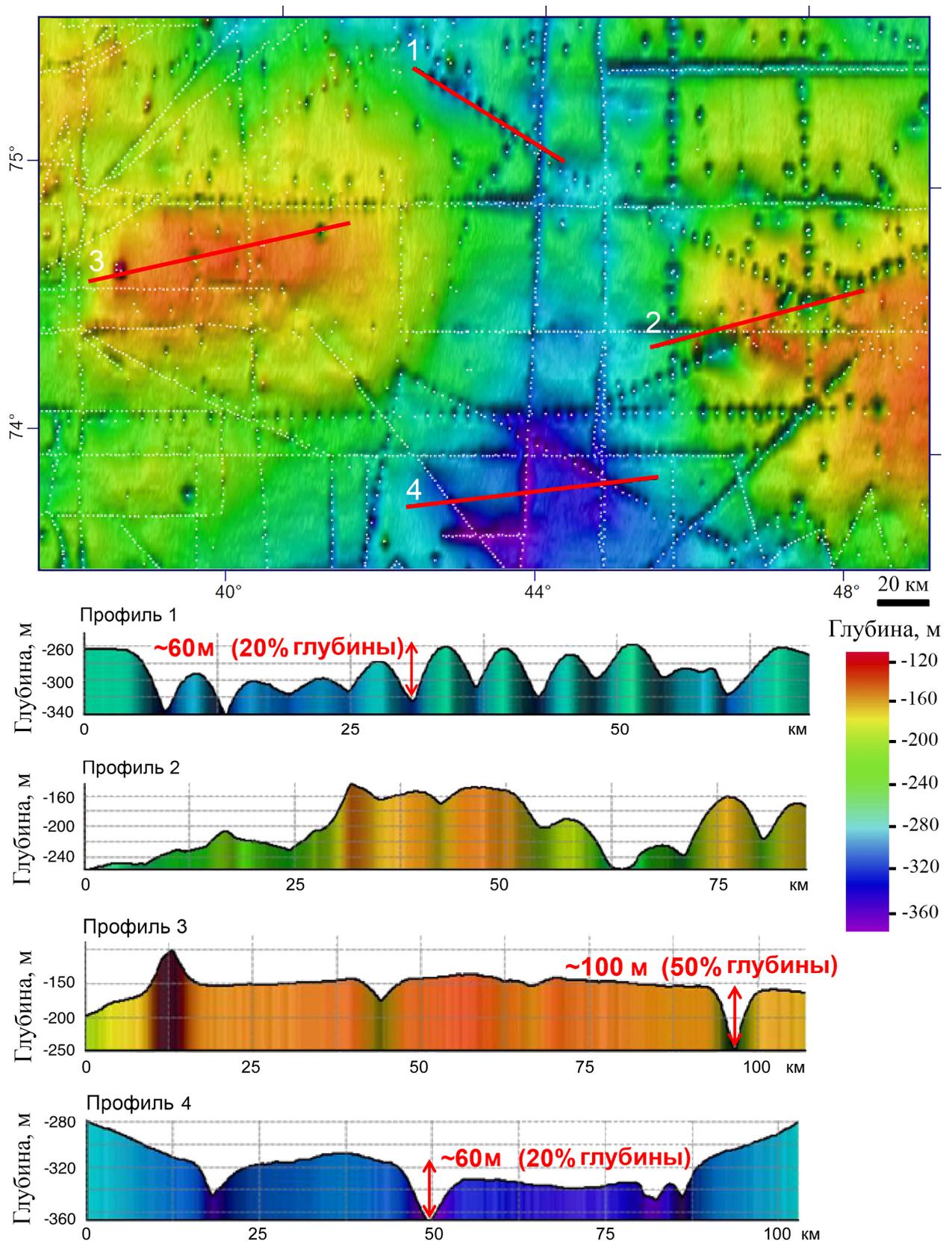


Рисунок 6.5 – Батиметрия в ЦМР GT 13.1 (континентальный шельф; местоположение см. рис. 6.1). Белые точки – покрытие исходными данными.

Артефакты описаны в тексте

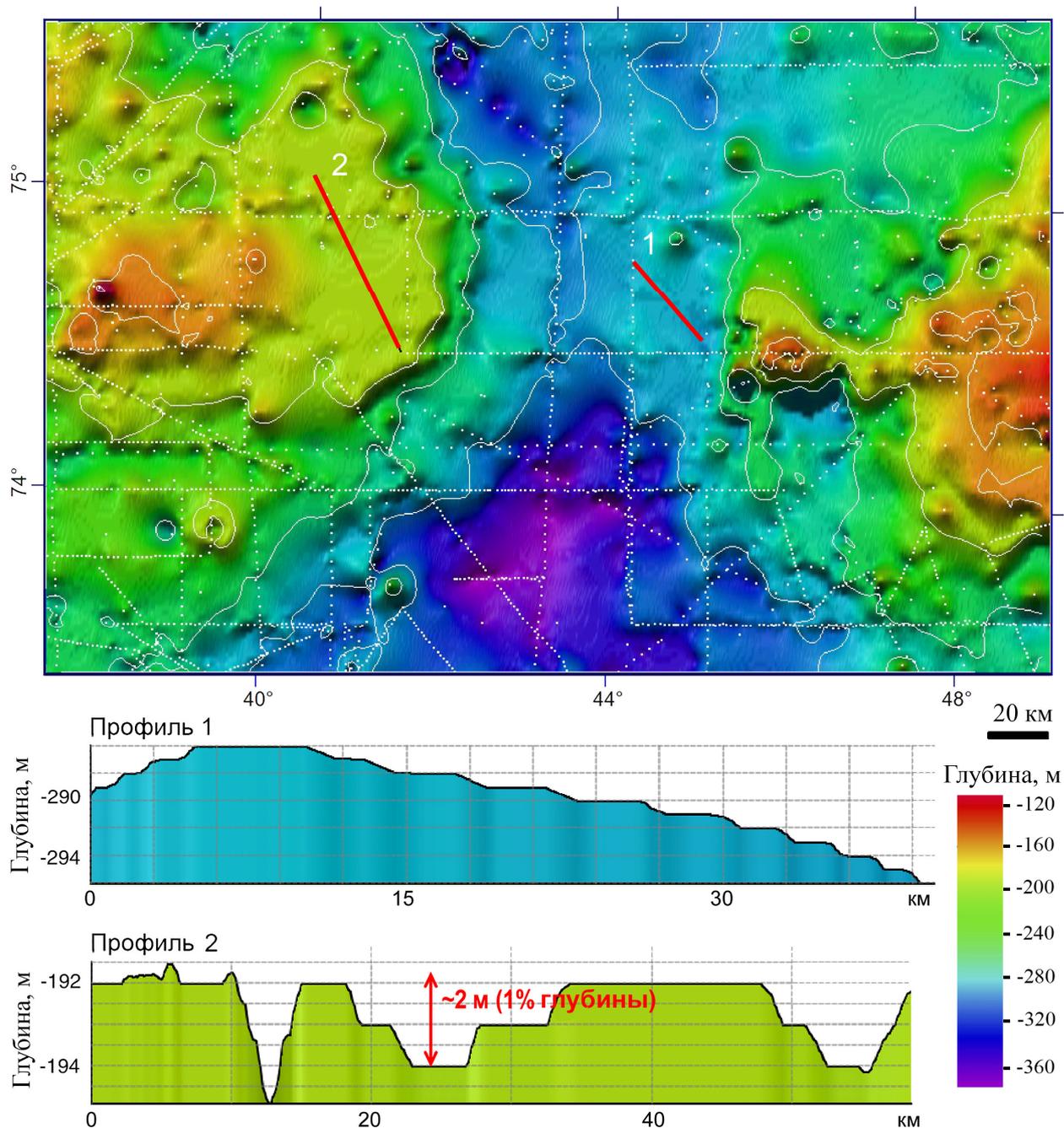


Рисунок 6.6 – Батиметрия в ЦМР GEBSCO_08 (континентальный шельф; местоположение см. рис. 6.1). Белые точки – покрытие исходными данными, белые линии – исходные изобаты. Артефакты: терассированность склонов

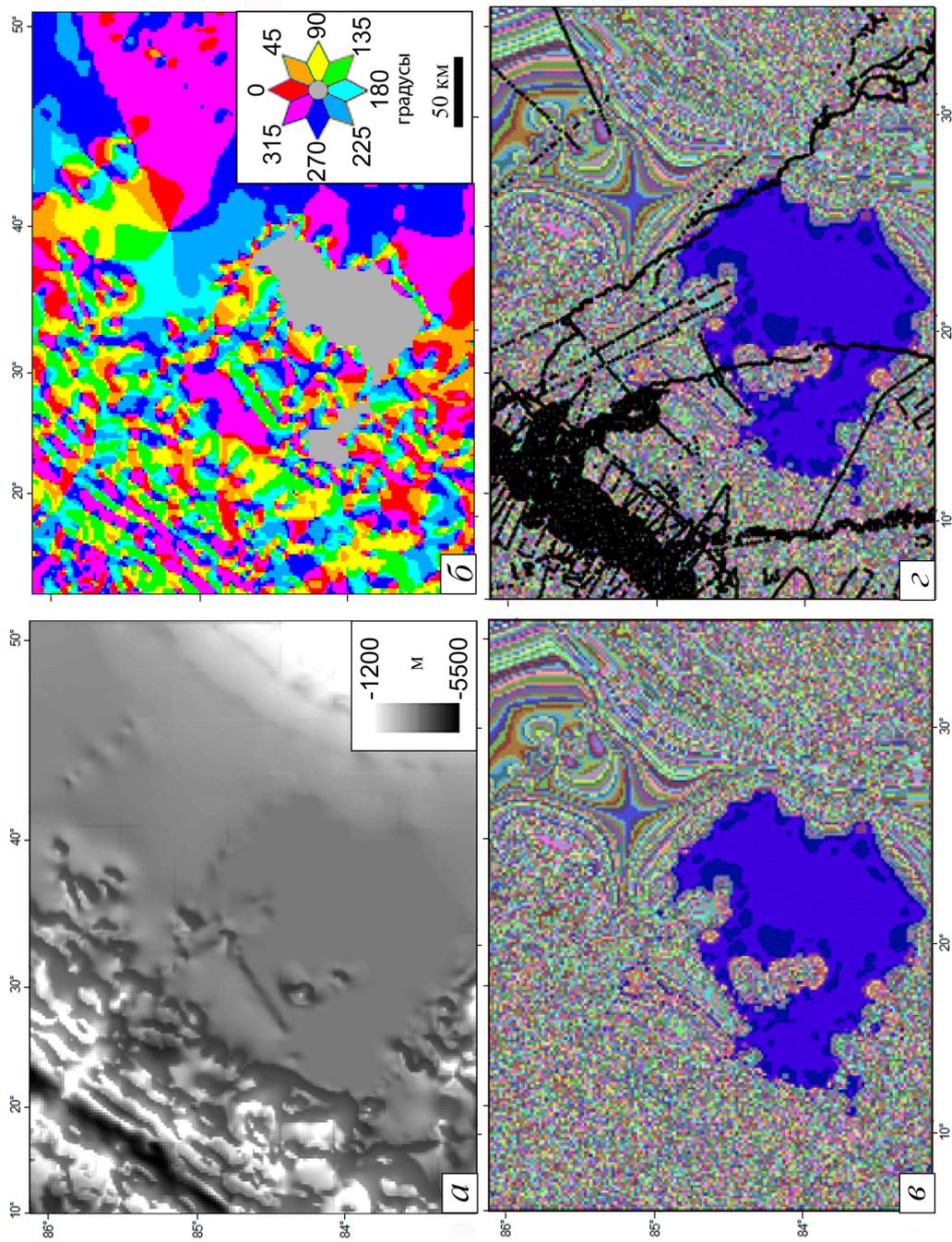


Рисунок 6.7 – Артефакты в ЦМР ИВСаО 2.23: «равнина» и «звезды» (граница абиссальной равнины и срединно-океанического хребта; местоположение см. рис. 6.1): *a* – батиметрия с отмывкой рельефа, *б* – экспозиция склонов, *в* – батиметрия с отображением глубин случайным цветом, *г* – то же с покрытием исходными данными (черным)

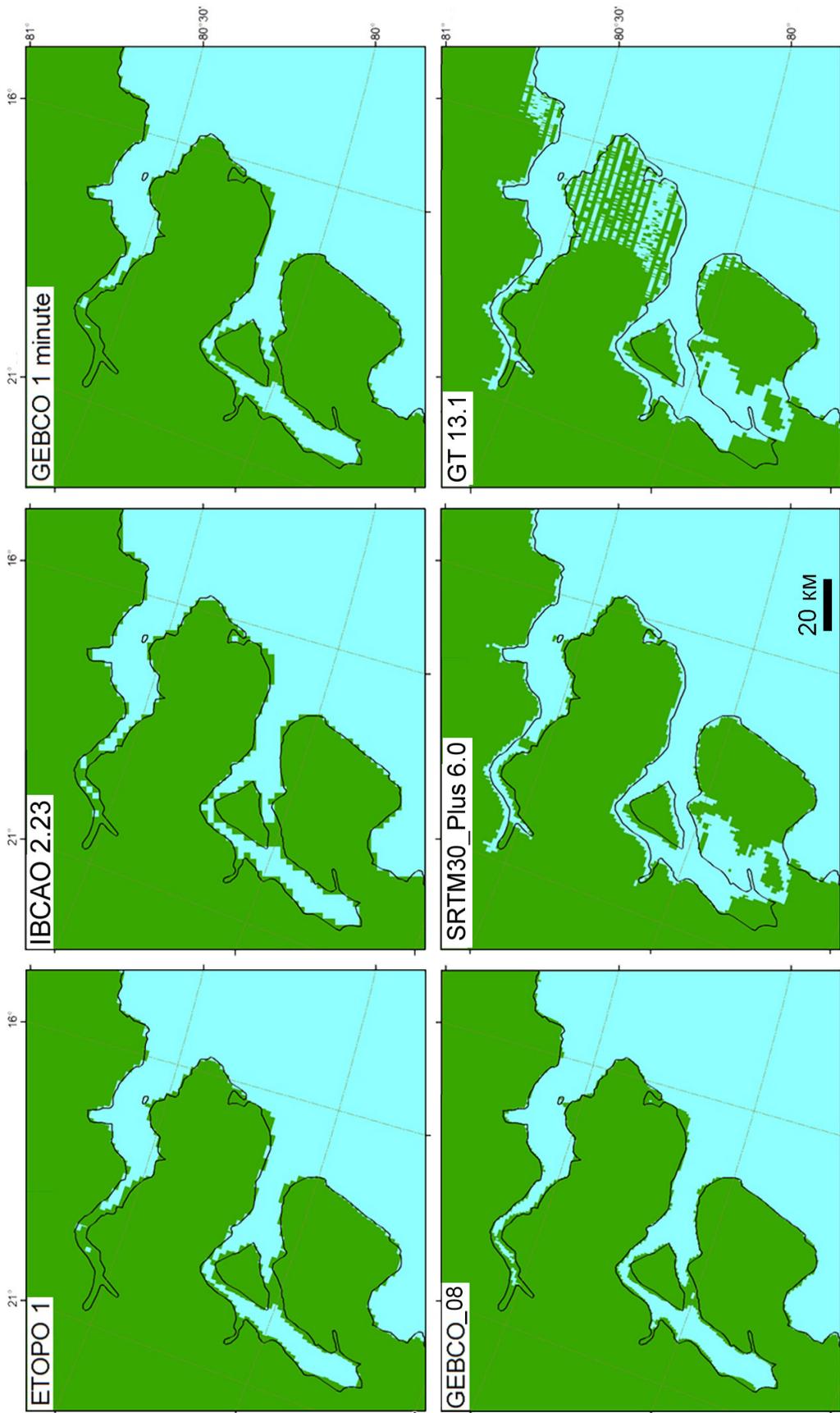


Рисунок 6.8 – Отображение береговой линии восточной Гренландии в общедоступных глобальных и региональных ЦМР (местоположение см. рис. 6.1). Зеленым цветом показаны положительные значения высоты, голубым – отрицательные. Показана береговая линия GEBCO

В ЦМР типа Б наблюдается так называемый эффект «апельсиновой корки» (orange peel) [181] (рис. 6.2: красный овал). Особенно хорошо он виден на шельфе Гренландии, где он сочетается с линейными артефактами, вызванными единичными судовыми проходами.

Еще один тип артефактов, который характерен для ЦМР типа Б – искусственные впадины и холмы в районах, где нет линейной корреляции между подводным рельефом и гравитационным полем (рис. 6.4: профили 2 и 3; рис. 6.9). На рис. 6.9а изображена батиметрия, построенная по ЦМР SRTM30_Plus 6.0 в районе абиссальной равнины с высокой мощностью осадков; точками на карте показано покрытие исходными данными. На рисунке 6.9б дана карта гравитационного поля того же участка, что и 6.9а. При построении ЦМР типа Б (см. подразд. 2.2.2) значения аномального гравитационного поля (рис. 6.9в) [205] по коэффициенту корреляции масштабируется в предсказанный рельеф (рис. 6.9г); на следующем этапе исходные значения глубин восстанавливаются в поверхность предсказанного рельефа (рис. 6.9д). Как видно из рис. 6.9, «впадина»-артефакт (желтая стрелка) в модели SRTM30_Plus 6.0 получена по значениям гравитационного поля в районе, где нет исходных батиметрических данных. Как видно из рис. 6.9г, д, в районе, где есть исходные батиметрические данные (красная стрелка), нет явной корреляции между гравитационным полем и рельефом. Таким образом образуются искусственные впадины и холмы в ЦМР типа Б в районах абиссальных равнин, для которых характерна высокая мощность осадочного чехла и низкая степень корреляции между рельефом и гравитационным полем.

Примененный подход визуальной идентификации артефактов в ЦМР, а также разработанная классификация артефактов (табл. 6.1) могут использоваться для анализа батиметрических ЦМР и составления списков присутствующих в них артефактов с целью дальнейшего редактирования этих ЦМР.

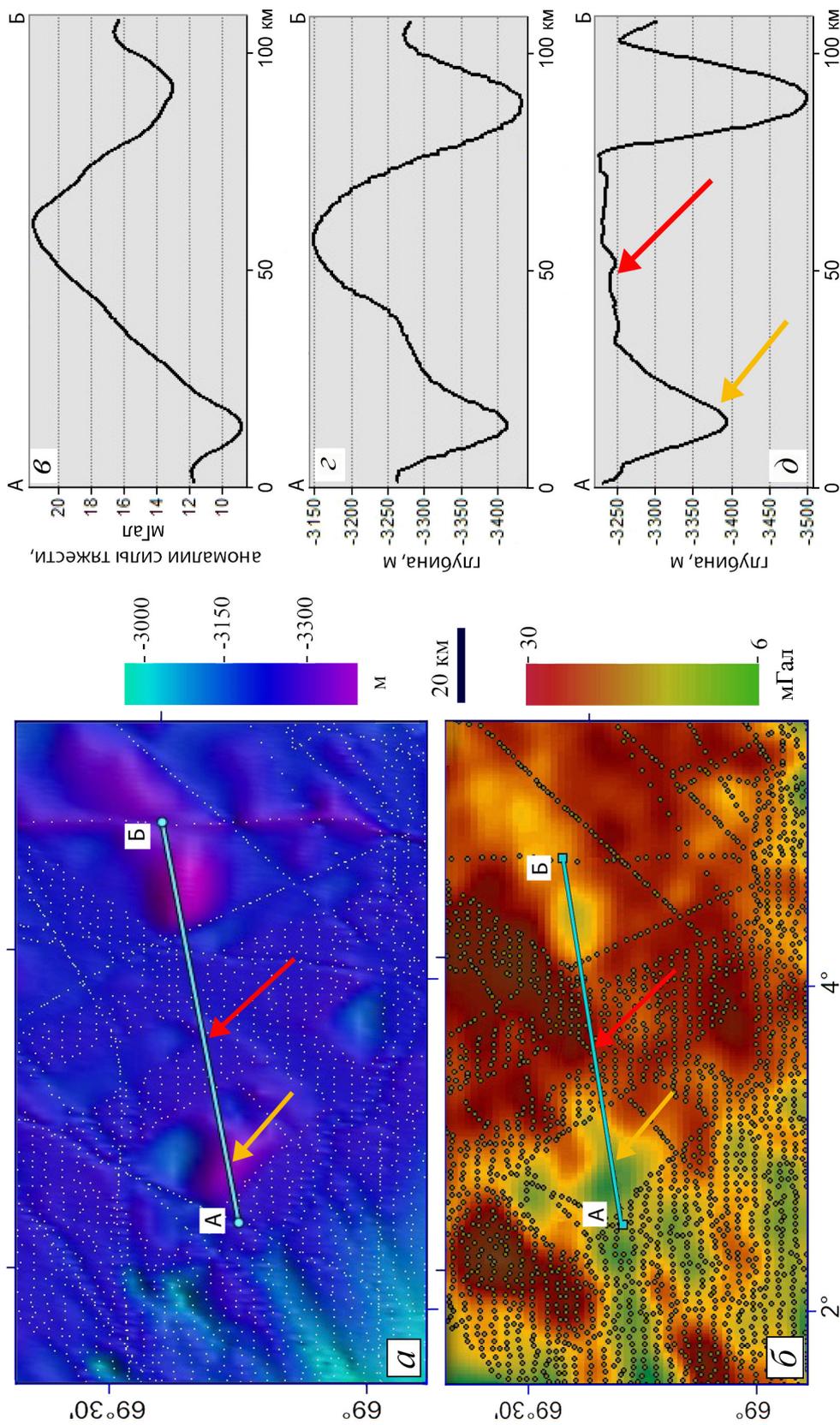


Рисунок 6.9 – Артефакты в районах, где нет линейной корреляции между подводным рельефом и гравитационными аномалиями: *a* – батиметрия, построенная по ЦМР SRTM30_Plus 6.0 (абиссальная равнина; местоположение см. рис. 6.1); точки – покрытие исходными данными; *b* – модель гравитационного поля вер. 18.1; *в* – профиль через модель гравитационного поля; *d* – профиль через ЦМР SRTM30_Plus 6.0. Пояснения см. текст

Выводы по главе 6

Для визуальной идентификации артефактов в батиметрических ЦМР могут применяться методы картографической визуализации ЦМР и информации о покрытии исходными данными, используемыми для построения ЦМР: трехмерная визуализация подводного рельефа; аналитическая отмывка рельефа при косом освещении; вертикальное преувеличение рельефа; использование шкал с различными интервалами и комбинациями цветов и оттенков; построение профилей; расчет и картографирование морфометрических характеристик.

Изучены артефакты, встречающиеся в ЦМР IBCAO 2.23, SRTM30_Plus 6.0, GT 13.1 и GEBCO_08 в трех морфологических провинциях: континентальный шельф, абиссальная равнина и срединно-океанический хребет. Установлено, что артефакты вызываются ошибками в исходных данных, различиями в пространственном разрешении исходных данных, отсутствием исходных данных и некорректным применением интерполяции.

Артефакты классифицированы в соответствии с источниками и факторами, которые их вызывают: данные МЛЭ и однолучевой съемки, точечные промеры глубин, данные спутниковой альтиметрии, оцифрованные изобаты, склеивание разных источников данных, краевые эффекты, ошибки интерполяции в районах отсутствия каких-либо данных и др. Артефакты имеют морфологию, сходную с реальными формами рельефа на различных масштабных уровнях, и включают следующие формы: хребты и трюги, холмы и впадины, плоские поверхности, террасы, звездоподобные формы и др.

Разработанная классификация артефактов совместно с картографической визуализацией батиметрических ЦМР могут использоваться для выявления артефактов в батиметрических ЦМР с целью их дальнейшего редактирования.

ГЛАВА 7

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЫРАЖЕННОСТИ АРТЕФАКТОВ В БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ РЕЛЬЕФА

Глава посвящена оценке степени выраженности артефактов в батиметрических ЦМР. В разд. 7.1. описан метод оценки степени выраженности артефактов. Разд. 7.2 посвящен апробации этого метода на примере ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1. В разд. 7.3 приведены результаты апробации. Материалы главы представлены в работах автора [68–70, 1].

7.1 Метод оценки степени выраженности артефактов в батиметрических цифровых моделях рельефа

Для описания метода оценки степени выраженности артефактов в батиметрических ЦМР введем два термина: согласованность и изменчивость глубин батиметрической поверхности. Согласованностью глубин батиметрической поверхности будем называть отсутствие в ЦМР артефактов, которые могут быть идентифицированы визуально. Изменчивость глубин батиметрической поверхности является мерой согласованности, измеряется в метрах и может быть рассчитана для любой ячейки ЦМР (см. ниже).

Оценка согласованности основана на сравнении изменчивости значений глубины вокруг точек исходных данных со значением «истинной» изменчивости (ИИ) глубины. На примере двух ЦМР разного типа (А и Б) введем еще два понятия: зона истинной изменчивости (ЗИИ) и зона влияния исходных данных (ЗВИД). На рис. 7.1 показана батиметрия участка шельфа Баренцева моря, построенная по ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1, а также покрытие участка исходными данными. Видно, что батиметрическая поверхность, построенная по ЦМР GEBCO_08, более плавно проходит через точки исходных данных (рис. 7.1а), по сравнению с батиметрической поверхностью, построенной по ЦМР GT 13.1 (рис. 7.1б).

Пусть поверхность рельефа вокруг точек исходных данных будет согласованной в пределах некоторой величины «истинной» изменчивости, а

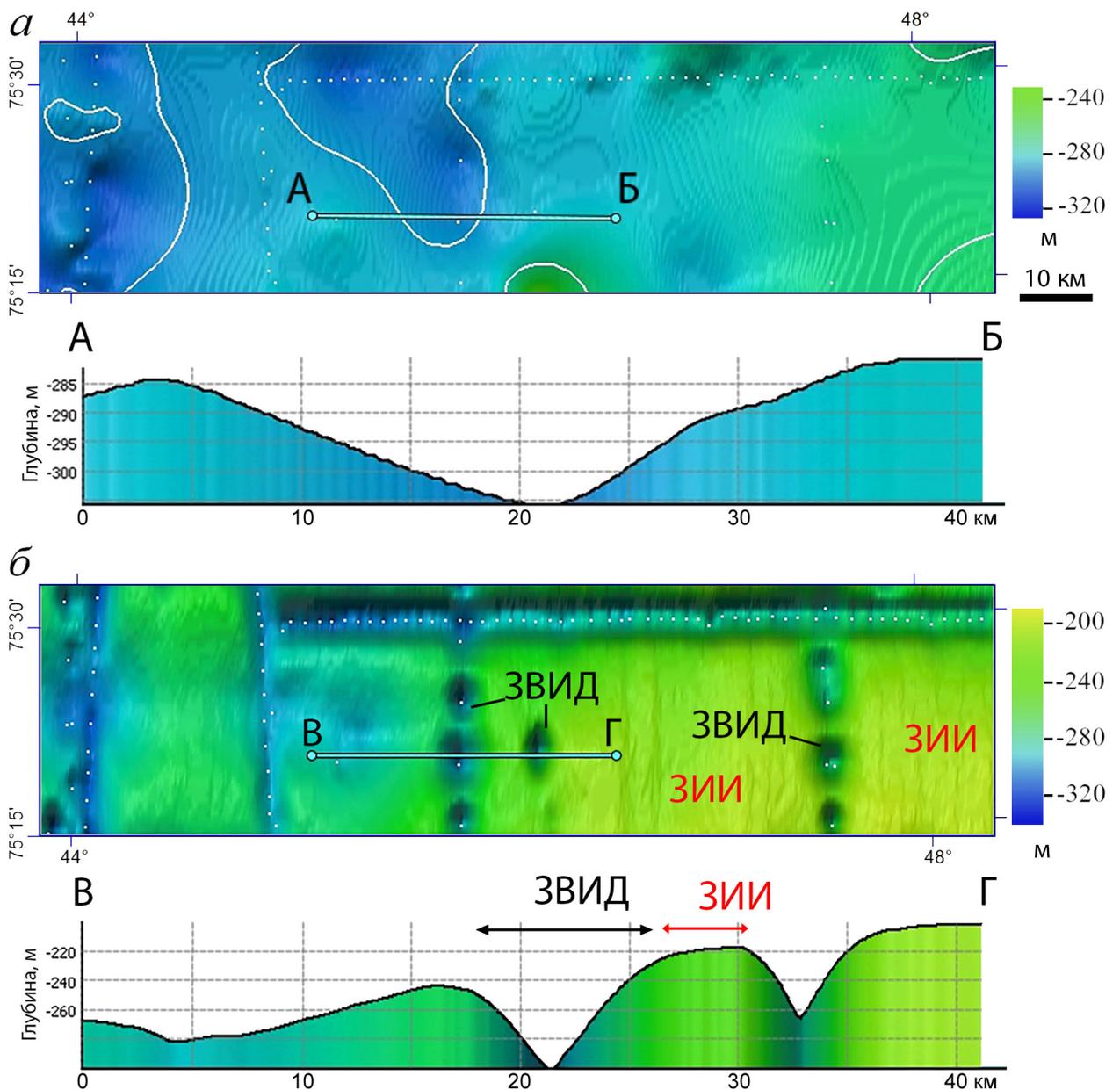


Рисунок 7.1 – Иллюстрация понятий ЗВИД и ЗИИ на примере батиметрии, описываемой ЦМР двух типов: *a* – батиметрия в ЦМР GEBCO_08 (ЦМР типа А). Профиль АБ проходит через точки исходных данных; *б* – батиметрия в ЦМР GT 13.1 (ЦМР типа Б). Профиль ВГ расположен там же, где профиль АБ. Белыми точками и изобатами показано покрытие исходными данными. В ЦМР GEBCO_08 поверхность подводного рельефа плавно проходит через точки исходных данных, а в ЦМР GT 13.1 в точках исходных данных имеются артефакты-«ямы». Местоположение участка см. рис. 6.1

за ее пределами – станет несогласованной. Участки в ЦМР, в пределах которых значения глубин определяются исходными данными, назовем ЗВИД (рис. 7.1б). Участки в ЦМР, где значения глубин основываются на предсказанном по гравитационным аномалиям рельефе, назовем ЗИИ (рис. 7.1б). Принимается, что рельеф, предсказанный по гравитационным аномалиям, отражает ИИ глубин батиметрической поверхности.

Метод оценки степени выраженности артефактов основан на расчете изменчивости глубин в ЦМР. Для этого производится сканирование ЦМР узким крестообразным скользящим окном с целью поиска значений глубин, превышающих некоторое пороговое значение, оцениваемое для каждой точки ЦМР по текущим значениям глубин в ячейках скользящего окна. Метод может быть применен как для нескольких, так и для одной ЦМР, где ЗИИ и ЗВИД расположены на разных участках одной ЦМР (рис. 7.1). Метод может быть также применен без ЗИИ. В этом случае сравнивается распределение изменчивости глубин в пределах ЗВИД.

Ниже приведено описание метода для случая сравнения изменчивости глубин в двух ЦМР (одна ЦМР является эталонной и используется для расчета ИИ глубин, а вторая – тестируемой). Метод включает следующие этапы (рис. 7.2):

- 1) Извлечение из БД карты покрытия исходными данными для тестируемой ЦМР.

- 2) Определение размера окна для расчета изменчивости глубин по пространственному разрешению исходных данных в районе исследования.

- 3) Расчет цифровой модели Лапласиана по тестируемой ЦМР для определения диаметра буферной зоны ЗВИД. Лапласиан, как и другие локальные морфометрические величины, является функцией частных производных высоты. Частные производные чувствительны к высокочастотному шуму и резким перепадам значений функции $z = f(x, y)$, где z – высота, x и y – декартовы координаты [115]. На карте Лапласиана артефакты в ЦМР будут выражены значительно заметнее, чем на карте

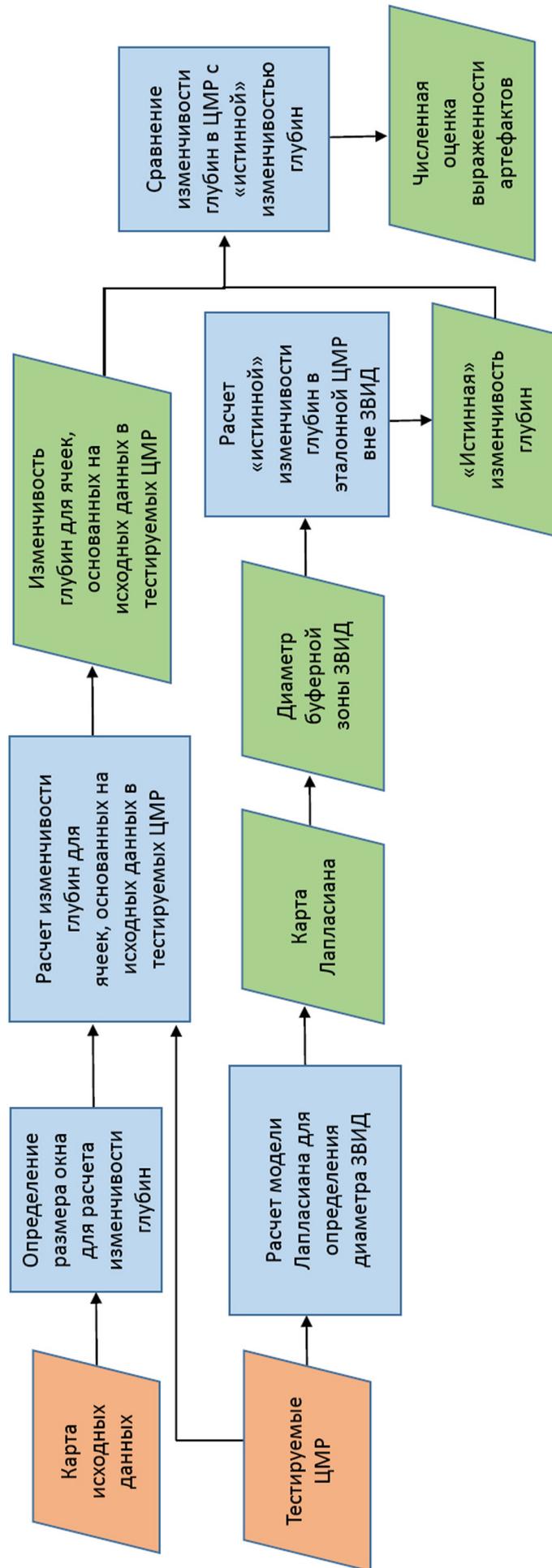


Рисунок 7.2 – Блок-схема метода оценки степени выраженности артефактов ЦМР

глубин. Лапласиан (∇^2) рассчитывается по формуле [116]:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = r + t, \quad (7.1)$$

где r и t – вторые частные производные высоты: $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$, $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$. Единица измерения Лапласиана – m^{-1} . Расчет r и t по ЦМР проводится с помощью одного из известных конечно-разностных алгоритмов, например, методом Эванса [106, 116].

4) Расчет матриц изменчивости глубин для двух ЦМР (1-ая – тестируемая, 2-ая – эталонная). Значение изменчивости глубин вычисляется для каждой ячейки ЦМР, значение глубины в которой (D_o) основано на исходных данных (ячейки с черными точками на рис. 7.3). За изменчивость глубин принимается большее из двух значений разности глубин между D_o и медианными значениями глубин, рассчитанными в узком крестообразном окне вдоль осей X и Y (\tilde{D}_x и \tilde{D}_y , соответственно). Значение D_o не участвует в расчете медианных значений глубин. На рис. 7.3 фиолетовым цветом указаны ячейки, используемые при расчете.

5) Расчет матрицы ИИ глубин по эталонной ЦМР (аналогично п. 4). ИИ глубин вычисляется для каждой ячейки ЦМР в пределах ЗИИ (серые ячейки на рис. 7.3). Ячейки, которые попадают в пределы ЗВИД, буферизируются и исключаются из вычислений (желтые ячейки на рис. 7.3). Значение изменчивости глубин рассчитывается аналогично п. 1: берется большее из двух значений изменчивости глубин в пределах узкого крестообразного окна по осям X и Y .

6) Построение гистограмм распределения значений изменчивости глубин в тестируемых ЦМР и ИИ глубин в эталонной ЦМР.

7) Оценка степени выраженности артефактов. Изменчивость глубин тестируемых ЦМР сравнивается с ИИ глубин эталонной ЦМР. Распределение значений изменчивости глубин характеризует степень выраженности артефактов в исследуемом районе.

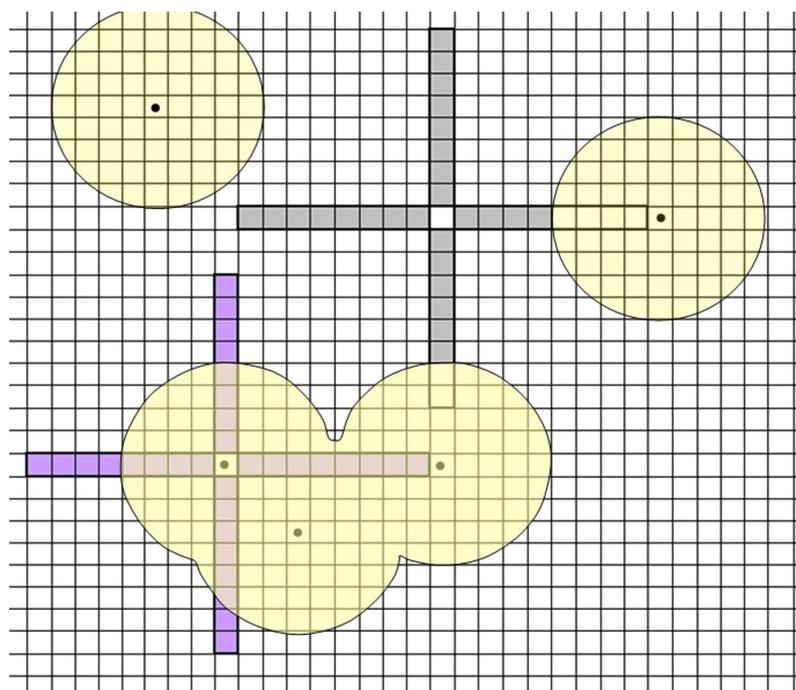


Рисунок 7.3 – Оценка изменчивости глубин в ячейках ЦМР, значение глубины в которых основано на исходных данных (ячейки с черными точками), а также в других ячейках ЦМР, где оценивается ИИ. Фиолетовые ячейки используются для вычисления изменчивости глубин в ячейках с измеренными значениями глубин. Серые ячейки используются для вычисления ИИ глубин. Желтые области соответствуют ЗВИД

7.2 Апробация метода оценки степени выраженности артефактов

Метод оценки выраженности артефактов в батиметрических ЦМР был апробирован на примере шельфового участка Баренцева моря (рис. 6.1). Использовались фрагменты ЦМР GEBCO_08 (тип А) и GT 13.1 (тип Б).

Шельф Баренцева моря характеризуется относительно простой морфологией рельефа. Выбранный район также 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 батиметрию в ЦМР двух типов (рис. 7.4а и 7.5а) легко визуально определить, в какой из этих ЦМР батиметрия описана более согласовано.

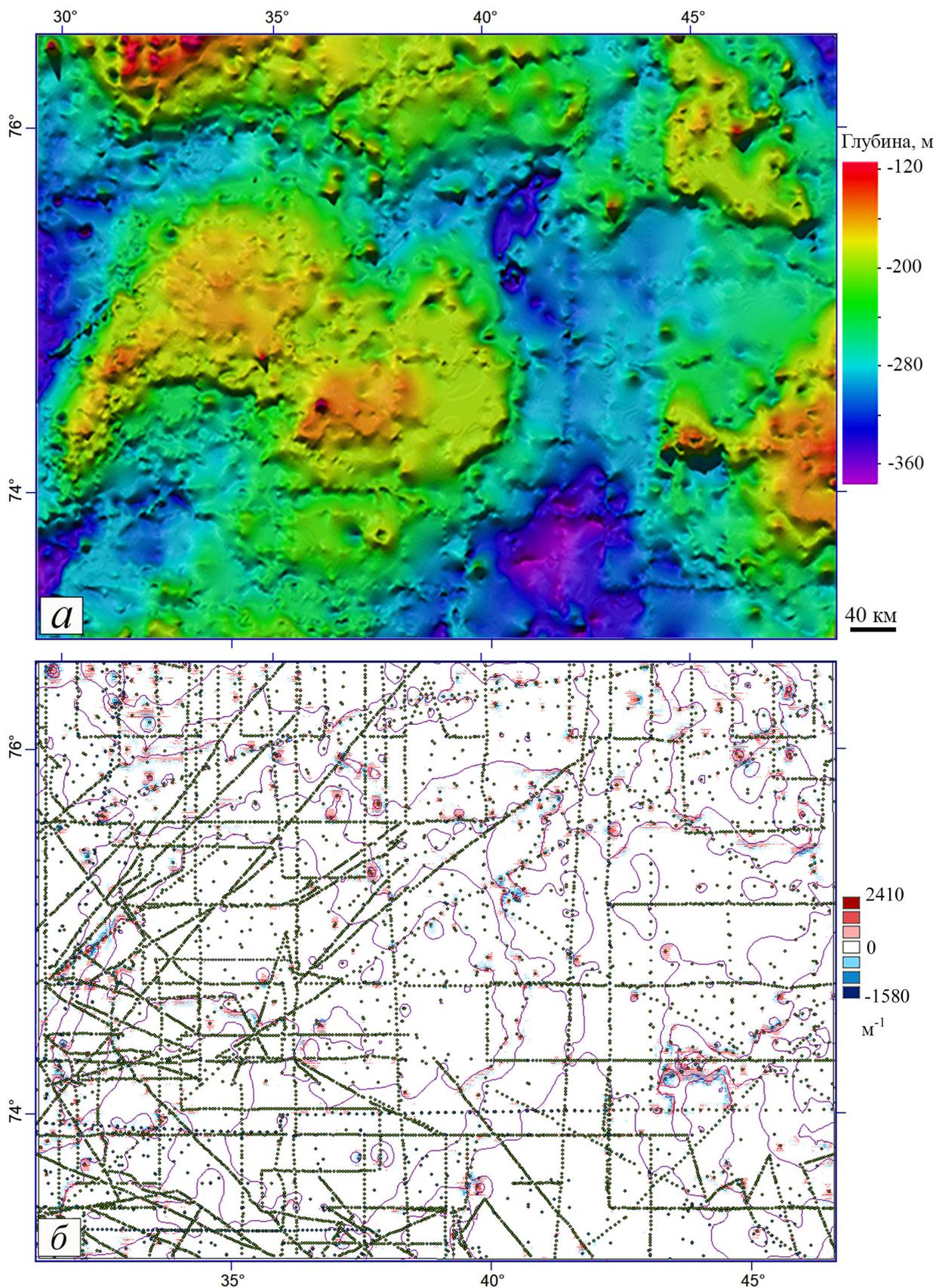


Рисунок 7.4 – Район континентального шельфа в ЦМР GEBCO_08 (местоположение см. рис. 6.1): *a* – батиметрия; *б* – Лапласиан. Исходные данные показаны болотным (точечные измерения) и фиолетовым (изобаты)

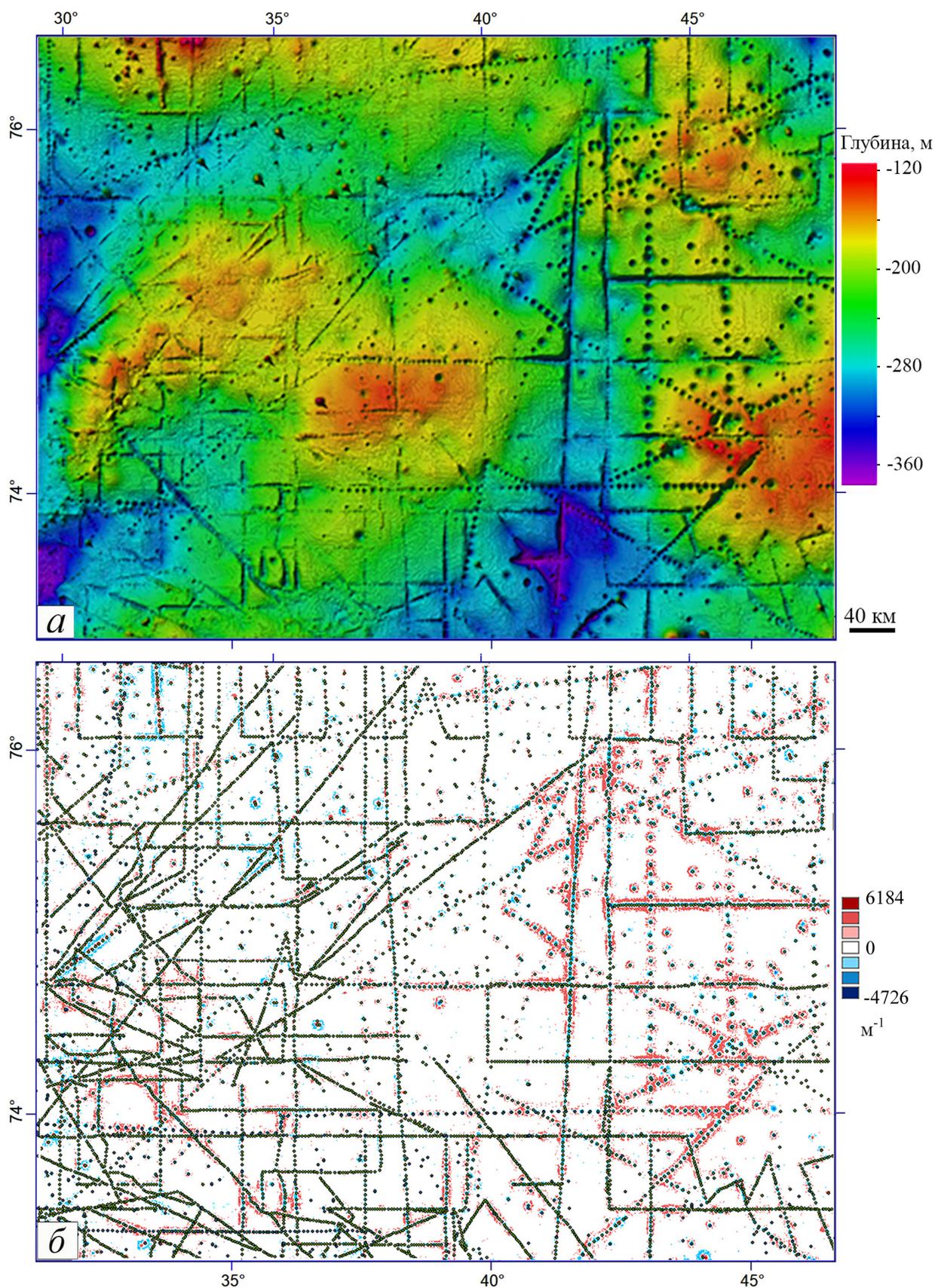


Рисунок 7.5 – Район континентального шельфа в ЦМР GT 13.1 (местоположение см. рис. 6.1): *a* – батиметрия; *б* – Лапласиан. Исходные данные (точечные измерения) показаны болотным цветом

Батиметрия в ЦМР GT 13.1 (рис. 7.5а и 7.1б) характеризуется наличием множества артефактов в окрестностях исходных данных, в то время как батиметрия ЦМР GEBCO_08 (рис. 7.4а и 7.1а) в окрестностях исходных данных выглядит более согласованной. Эти различия обусловлены различиями в методике построения двух типов ЦМР (подразд. 2.2.1 и 2.2.2). В то же время ожидается, что батиметрия в ЦМР GT 13.1 будет более согласованной в областях, где отсутствуют данные измеренных глубин, то есть там, где значения в ЦМР основаны на данных об аномалиях гравитационного поля.

Анализ рассчитанных моделей Лапласиана для фрагментов ЦМР GT 13.1 и GEBCO_08 показал, что его высокие по модулю значения (красные или синие точки) характерны для участков, где локализованы точки исходных данных (рис. 7.4б и 7.5б), особенно в областях, где значения глубин изобат не согласуются со значениями измеренных глубин. Таким образом, наибольшая изменчивость значений глубин в ЦМР наблюдаются в местах локализации исходных данных. Высокочастотные артефакты, как правило, ассоциированы с местоположением исходных данных.

Отметим, что почти для всех артефактов типа «впадина» Лапласиан (рис. 7.4б и 7.5б) зафиксировал классические признаки возникновения явления Гиббса (всплески функции вблизи точки разрыва) [115]: почти все «впадины» (высокие отрицательные значения Лапласиана, синие точки) окружены кольцевыми валами (высокие положительные значения Лапласиана, красные окружности вокруг синих точек).

Буферная зона ЗВИД ограничивает из вычисления «истинной» изменчивости все ячейки, значение глубин которых зависят от D_o . Диаметр ЗВИД определяет размер артефакта в поперечном сечении; он зависит от типа исходных данных. Для данного района и данного типа данных выбранный размер буфера ЗВИД был взят на основе анализа карты Лапласиана (рис. 7.4б и 7.5б). Максимальная ЗВИД составила 10 ячеек ЦМР.

Размер окна для вычисления изменчивости рельефа должен быть

достаточно большим, чтобы захватить значения из области ЗИИ. Выбор размера окна определяется пространственным разрешением исходных данных в этой области. Известно, что в районах, где нет многолучевых данных высокого разрешения, характерные размеры элементов предсказанного по гравитационным аномалиям подводного рельефа составляют 20–25 км [211]. Таким образом, в таких районах формы рельефа с характерными размерами менее 12,5 км (половина длины волны) будут являться артефактами.

Для случая ЦМР GEBCO_08 это утверждение неверно, если на район имеются данные однолучевой съемки, которые имеют более высокое пространственное разрешение.

Для учета различий в физическом покрытии ячейками ЦМР в разных картографических проекциях был выбран различный размер окна для оценки изменчивости в ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1 (рис. 7.6). Расстояние в 12,5 км соответствует приблизительно 25 ячейкам в ЦМР GT 13.1 на широте района исследования (75° с.ш.). Поэтому для ЦМР GT 13.1 выбрано окно 1×25 по оси X и 25×1 по оси Y . Окно, выбранное для оценки ЦМР GEBCO_08, составило 1×53 по оси X и 1×13 по оси Y .

Расчеты были выполнены в пакете MathWorks MATLAB [183].

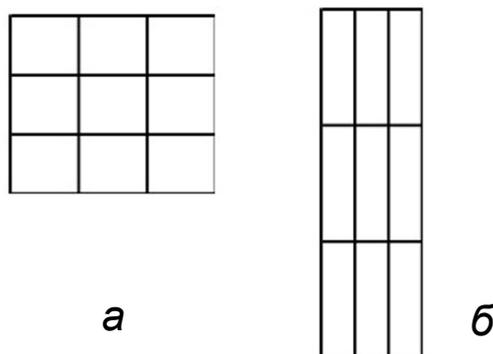


Рисунок 7.6 – Окно 3×3 для сеток ЦМР различного типа: *а* – ЦМР GT 13.1 в проекции Меркатора; *б* – ЦМР GEBCO_08 в равнопромежуточной цилиндрической проекции

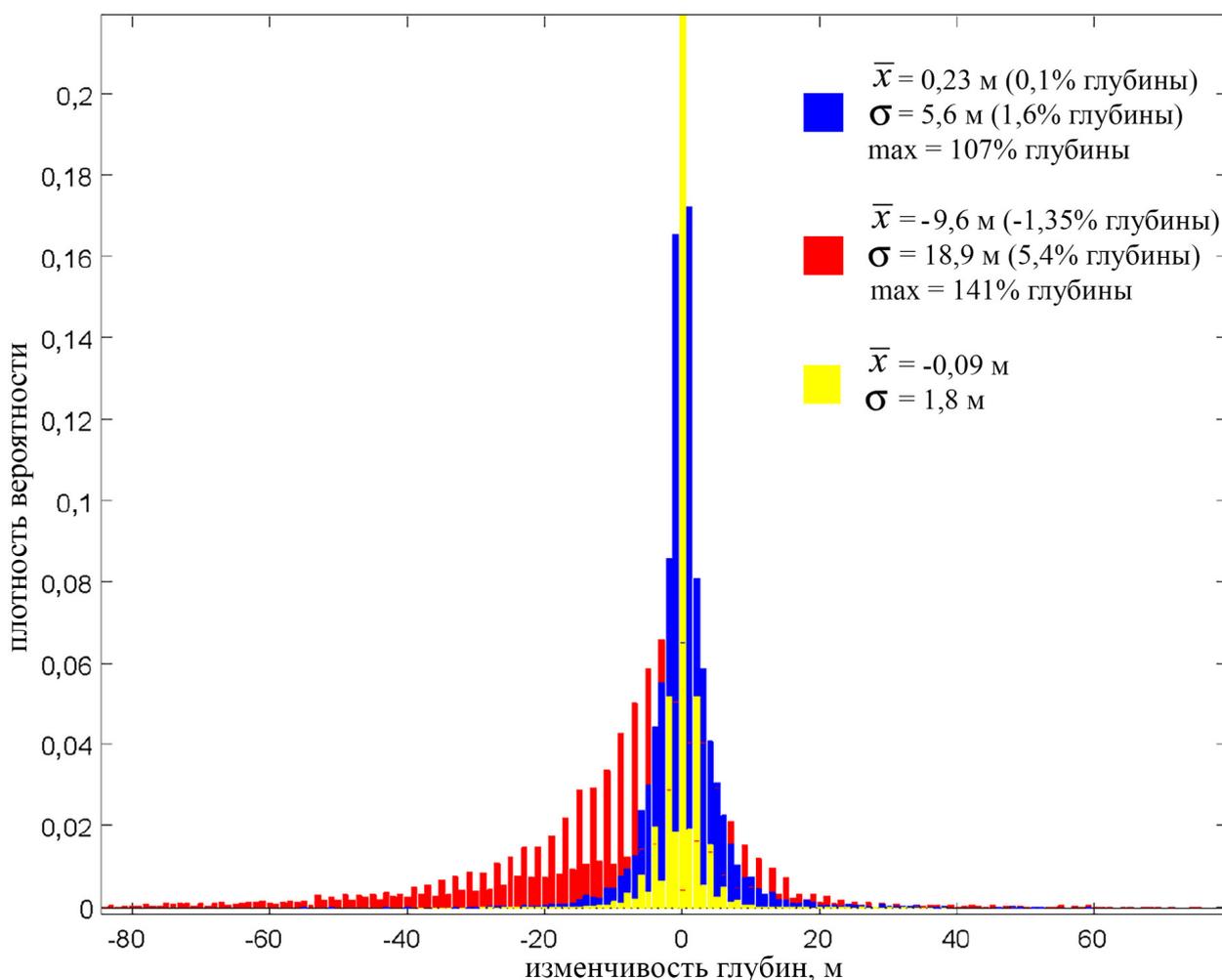


Рисунок 7.7 – Распределение изменчивости глубин в ЦМР GEBCO_08 (синий цвет) и GT 13.1 (красный цвет), а также распределение ИИ (желтый цвет)

7.3 Результаты апробации

Гистограммы распределения изменчивости глубин для ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1, ИИ, а также результаты их сравнения приведены на рис. 7.7.

Распределение рассчитанной изменчивости глубин и сравнение этой характеристики с ИИ определяет согласованность глубин батиметрической поверхности в анализируемых ЦМР и характеризует степень выраженности артефактов в районе континентального шельфа. На рис. 7.7 видно, что ЦМР GEBCO_08 имеет более узкое распределение изменчивости глубин по сравнению с ЦМР GT 13.1, и это распределение близко к распределению ИИ.

Для ЦМР GT 13.1 распределение намного шире по сравнению с ЦМР GEBCO_08, причем наблюдается смещение в сторону отрицательных

значений (со средним значением $-1,35\%$ глубины), что означает, что значения глубин D_o в ЦМР GT 13.1 чаще всего глубже, чем окружающие их значения глубин (рис. 7.5a).

Наблюдаемые пики четных значений в распределении изменчивости глубин ЦМР GT 13.1 вызваны тем, что значения глубин в ЦМР семейства 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 (то есть, D_o). Изменчивость глубин в каждой ячейке сетки ЦМР GT 13.1 вычисляется как разность между нечетным значением D_o и медианной по четному числу (24 ячейки) четных значений. Из гистограммы видно, что значение изменчивости глубин в ЦМР GT 13.1 является четным значением чаще, чем нечетным значением.

Статистическая оценка согласованности глубин, проведенная для ЦМР каждого типа, показала, что в районе шельфа Баренцева моря ЦМР GEBCO_08 являются более согласованной, чем ЦМР GT 13.1. Значение σ изменчивости глубин в пределах выбранного окна в ЦМР GEBCO_08 меньше (5,6 м или 1,6% глубины), чем в ЦМР GT 13.1 (18,9 м или 5,4% глубины). Эта характеристика описывает степень выраженности артефактов для двух рассмотренных ЦМР.

ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1 имеют очень четкие различия, связанные с методом построения, а также с различием в источниках данных. Наиболее явное различие заключается во внешнем виде и внутренней согласованности этих ЦМР (рис. 7.4 и 7.5). Батиметрия в ЦМР GEBCO_08, визуально более согласована по сравнению с батиметрией в ЦМР GT 13.1, в которой присутствуют очевидные артефакты. Эти артефакты не только нежелательны для визуализации, но и могут быть ошибочно восприняты неосведомленными пользователями как реальные формы рельефа.

Одной из причин наличия артефактов в ЦМР GT 13.1 является алгоритм интерполяции, используемый для построения регулярной сетки ЦМР:

исходные 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» [211, 81]. 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, если эти значения глубин не соответствуют предсказанному рельефу. В зонах отсутствия многолучевых данных эти артефакты представляют собой «элементы подводного рельефа» с характерными размерами, которые не могут быть связаны с применением метода предсказанного рельефа с заявленным пространственным разрешением 20–160 км [212].

По результатам оценки согласованности глубин, в ЦМР GT 13.1 присутствуют артефакты с характерными плановыми размерами менее 12,5 км. При этом выраженность артефактов в ЦМР GT 13.1 в шельфовых районах достигают 141% глубины (абсолютный максимум) (рис. 7.7). Известно, что ошибки в предсказанном рельефе не зависят от глубины и составляют 50 м в 50% случаев и 220 м в 90% случаев [182]. Эти ошибки незначительны для глубоководных участков, но имеют решающее значение на мелководье.

Метод спутниковой альтиметрии для моделирования и картографирования подводного рельефа океана имеет несколько ограничений [137]. В районах с высокой мощностью осадочного чехла, особенно в районах арктического шельфа, точность инверсии и, следовательно, предсказанных глубин – ниже. Спутники, оснащенные альтиметрами, не обеспечивают покрытия центральной части Северного Ледовитого океана. Дополнительные ограничения для спутниковой альтиметрии создает постоянное ледовое покрытие полярных областей, что добавляет дополнительный шум в альтиметрические измерения [212, 188].

Максимальное пространственное разрешение моделей предсказанного рельефа в Арктике (к югу от 80° с.ш.) составляет 35 км [188]. Эти ограничения следует учитывать при использовании ЦМР, использующих предсказанный рельеф в Арктике. Выраженность артефактов демонстрирует, насколько хорошо предсказанный рельеф соответствует измеренным значениям глубины, и визуально иллюстрирует, насколько надежна предсказанная батиметрия на шельфе.

Разработанный метод оценки выраженности артефактов в ЦМР морского дна был апробирован на участке с простым рельефом, а также с одним типом исходных данных. Помимо шельфа, метод также будет удовлетворительно работать в районе абиссальной равнины и континентального склона, для которых также характерна простая морфология и относительно низкая изученность.

Однако удовлетворительная работа метода становится проблематичной на участках с сильной расчлененностью рельефа (например, срединно-океанический хребет), а также для ЦМР, построенных с использованием разнородных данных с разным пространственным разрешением (многолучевая и однолучевая съемка, отдельные промеры глубин). На таких участках, кроме высокочастотных артефактов, характерных для многолучевой съемки (см. разд. 6.3), будут присутствовать реальные высокочастотные формы рельефа. Отделение реально существующих высокочастотных форм рельефа от высокочастотных артефактов (то есть, высокочастотной составляющей полезного сигнала от высокочастотного шума) является нетривиальной задачей и находится за пределами этого диссертационного исследования.

Выводы по главе 7

Разработан метод оценки степени выраженности артефактов в батиметрических ЦМР. Метод основан на сканировании ЦМР узким крестообразным скользящим окном с целью поиска значений глубин, превышающих некоторое пороговое значение, оцениваемое для каждой точки ЦМР по текущим значениям глубин в ячейках скользящего окна.

Метод успешно апробирован на участке шельфа Баренцева моря на примере ЦМР GEBCO_08 и GT. 13.1, относящихся к разным типам ЦМР, А и Б, соответственно. В частности, получена количественная оценка выраженности артефактов в этих ЦМР: значения σ изменчивости глубин для ЦМР GEBCO_08 составляет 5,6 м или 1,6% глубины, а для ЦМР GT 13.1 – 18,9 м или 5,4% глубины. В ЦМР GEBCO_08 артефакты могут достигать 107% глубины, а в ЦМР GT 13.1 – 141% глубины. Таким образом, установлено, что ЦМР GEBCO_08 является более согласованной, чем ЦМР GT 13.1.

Разработанный метод оценки выраженности артефактов удовлетворительно работает в районах с простой морфологией (шельф, абиссальная равнина и континентальный склон). В случае районов с сильной расчлененностью рельефа (например, срединно-океанический хребет), а также для ЦМР, построенных с использованием разнородных данных, удовлетворительная работа метода становится проблематичной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана комплексная методика оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана, которая включает в себя шесть указанных ниже компонентов.

2. Разработан способ оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР. Способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матрицы разности между значениями глубин в исходных данных тестируемой ЦМР и в независимой эталонной ЦМР высокого разрешения, полученной по материалам высокоточной МЛЭ.

3. Разработан способ оценки точности батиметрических ЦМР. Способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матрицы разности между значениями глубин в тестируемой ЦМР и в независимой эталонной ЦМР высокого разрешения, полученной по результатам высокоточной МЛЭ.

4. Разработан способ оценки точности интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок. Способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании матрицы ошибок глубины тестируемой ЦМР и матрицы расстояний от данной ячейки тестируемой ЦМР до ближайшей ячейки с измеренным значением глубины. Точность интерполяции оценивается по графику зависимости ошибок ЦМР от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР с измеренным значением глубины.

5. Разработана классификация артефактов батиметрических ЦМР. Показано, что различные по форме, размерам и виду артефакты связаны с различными типами исходных батиметрических данных, отсутствием данных, а также ошибками интерполяции. Разработанная классификация артефактов совместно с картографической визуализацией батиметрических ЦМР могут использоваться для выявления артефактов в батиметрических ЦМР с целью их дальнейшего редактирования.

6. Разработан метод оценки степени выраженности артефактов в

батиметрических ЦМР. Метод основан на расчете изменчивости глубин в ЦМР, для чего ЦМР сканируется узким крестообразным окном с целью поиска значений глубин, превышающих некоторое пороговое значение.

7. Разработанная комплексная методика оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана успешно апробирована на примере фрагментов ряда общедоступных ЦМР, описывающих рельеф дна Северного Ледовитого океана.

8. С точки зрения структуры и способов составления, версии общедоступных ЦМР семейств GEBCO, IBCAO, GT и SRTM_Plus являются однотипными. Во вновь создаваемых версиях этих ЦМР могут лишь уточняться значения глубин, использоваться более точные методы интерполяции исходных данных, а также сгущаться регулярная сетка ЦМР. Однако такие различия не требуют дополнительной доработки или адаптации комплексной методики оценки точности и качества батиметрических ЦМР. В этой связи разработанная комплексная методика и все ее компоненты являются универсальными: они могут применяться для оценки точности и качества как существующих, так и новых версий батиметрических ЦМР.

9. Разработанная комплексная методика может быть применена для оценки точности и качества батиметрических ЦМР других регионов. Если для этих целей предполагается использовать фрагменты рассмотренных ЦМР GEBCO, IBCAO, GT и SRTM_Plus, то адаптации методики не требуется. Если же предполагается использовать другие ЦМР, то адаптация методики может быть незначительной, так как структура и способы составления батиметрических ЦМР достаточно унифицированы в силу использования сходного судового оборудования и программного обеспечения. В этом отношении разработанная комплексная методика также универсальна.

10. Разработанная комплексная методика является необходимым инструментом как при создании батиметрических карт, так и для оценки возможности адекватного использования той или иной ЦМР при проведении морских геоморфологических, геологических и других исследований океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамова А.С. Метод оценки выраженности артефактов в цифровых батиметрических моделях дна // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – № 5. – С. 522–531.
2. Абрамова А.С. Типы артефактов в цифровых моделях рельефа дна (на примере Арктического бассейна) // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – № 6. – С. 642–652.
3. Абрамова А.С. Оценка точности общедоступных цифровых моделей рельефа дна океанов на примере участков покрытия многолучевой съемкой Норвежского и Баренцева морей // Геодезия и картография. – 2021. – № 1. – С. ...–....
4. Абрамова А.С. Способ оценки точности метода интерполяции в батиметрических цифровых моделях рельефа // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65. – № 1. – С. ...–....
5. Агапова Г.В. О некоторых аспектах составления крупномасштабных карт по данным многолучевого эхолотирования // Океанология. – 1992. – Т. 32. – № 2. – С. 362–371.
6. Агапова Г.В. История создания Международной генеральной батиметрической карты океанов – ГЕБКО // Геодезия и картография. – 2004. – № 6. – С. 25–36.
7. Агапова Г.В. Исследование и картографирование подводного рельефа в познании природы Мирового океана. Автореф. ... д.г.н. – М., 2008. – 48 с.
8. Арктический бассейн (геология и морфология) / Гл. ред. В.Д. Каминский. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. – 291 с.
9. Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны / Гл. ред. В.И. Фалеев. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1977. – 364 с.
10. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан / Гл. ред. В.И. Фалеев. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1980. – 215 с.
11. Атлас океанов. Тихий океан / Гл. ред. В.И. Фалеев, Л.А. Демин. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1974. – 358 с.

12. Берлянт А.М. Картографический метод исследования. 2-е изд. – М.: Изд-во Московского университета, 1988. – 252 с.
13. Богданов К.А. Истоки русской морской картографии // Морской сборник. – 1951. – № 10. – С. 64–75.
14. Богданов К.А. Морская картография. Ч. 1: Советские морские навигационные карты, их история и описание. – Л.: Гидрографическое управление ВМС, 1954. – 170 с.
15. Богданов К.А. Очерк истории картографического производства Военно-морского флота // Записки по гидрографии. – 1958. – № 1 (156). – С. 91–97.
16. Богданов К.А. Картографическое производство Военно-морского флота. Исторический очерк. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1977. – 228 с.
17. Верещака Т.В., Горевалова А.А., Степанченко А.Л. Основные этапы и направления развития морской картографии в России // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – № 6. – С. 659–668.
18. Верещака Т.В., Ковалева О.В. Изображение рельефа на картах. Теория и методы (оформительские аспекты). – М.: Научный мир, 2016. – 181 с.
19. Гордеева Е.А., Костенич А.В., Колобов Е.В., Кытманов Д.Н., Ставров К.Г. О создании цифровых моделей рельефа дна // Навигация и гидрография. – 2017. – № 50. – С. 45–51.
20. Жуков В.Т., Сербенюк С.Н., Тикунов В.С. Математико-картографическое моделирование в географии. – М.: Мысль, 1980. – 224 с.
21. 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.

22. Зайончек А.В., Мазарович А.О., Лаврушин В.Ю., Соколов С.Ю., Хуторской М.Д., Абрамова А.С., Алиулов Р.Х., Ахмедзянов В.Р., Зарайская Ю.А., Ермаков А.В., Ефимов В.Н., Мороз Е.А., Пейве А.А., Прохоров Д.А., Радионова Э.П., Разницын Ю.Н., Разумовский А.А., Черных А.А., Ямпольский К.П. Геолого-геофизические работы 25-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» на севере Баренцева моря и на континентальном склоне Северного Ледовитого океана // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 427. – № 1. – С. 67–72.

23. Зеньков А.Ф., Гордеева Е.А., Костенич А.В., Колобов Е.В., Кытманов Д.Н., Ставров К.Г. О подходе к созданию цифровой модели рельефа дна Арктического бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – № 1 (111). – С. 57–61.

24. Зинченко А.Г., Фирсов Ю.Г. Геоморфология дна Северного Ледовитого океана в контексте конвенции ООН по морскому праву 1982 г. // Вестник Государственного университета морского и речного флота. – 2018. – Т. 10. – № 4 (50). – С. 734–751.

25. Зубченко Э.С., Шарков А.М. Современные подходы к съемке рельефа дна в акватории Северного Ледовитого океана // Навигация и гидрография. – 2018. – № 54. – С. 38–44.

26. Кузьмин Б.С. О терминах «ошибка», «поправка», «точность» и «погрешность» // Геодезия и картография. – 1972. – № 8. – С. 21–23.

27. Кузьмин Б.С. Еще раз о терминах «ошибка» и «погрешность» // Геодезия и картография. – 1983. – № 3. – С. 29–30.

28. Ласточкин А.Н., Нарышкин Г.Д. Новые представления о рельефе дна Северного Ледовитого океана // Океанология. – 1989. – Т. 29. – Вып. 6. – С. 968–973.

29. Лонский И.И., Степанченко А.Л., Шлапак В.В. Качество картографического произведения // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка – 2020 – Т. 64 – № 5 – С. 541–544.

30. 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 3–4 июня 2019. – М.: ГЕОХИ РАН, 2019 – С. 36–38.

31. Международный геолого-геофизический атлас Атлантического океана / Гл. ред. Г.Б. Удинцев. – М.: МОК (ЮНЕСКО), Мингео СССР, АН СССР, ГУГК СМ СССР, 1989–1990. – 158 с.

32. Международный геолого-геофизический атлас Индийского океана / Гл. ред. Г.Б. Удинцев. – М.: МОК, Мингео СССР, АН СССР, ГУГК СМ СССР, 1975. – 151 с.

33. Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана / Гл. ред. Г.Б. Удинцев. – М.: МОК, ПКО «Картография», ГУНиО, 2003. – 192 с.

34. Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Сухих Е.А., Соколов С.Ю., Ермаков А.В., Абрамова А.С. Рельеф и строение верхней части осадочного чехла в районе свода Федынского по акустическим данным // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. – 2020. – № 2. – С. 82–91.

35. 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.

36. Морской атлас / Гл. ред. Л.А. Демин. – Л.: Гл. штаб ВМФ, 1950–1958. – Т. 1: Навигационно-географический. – 83 сдвоен. л.; Т. 2: Физико-географический. – 76 сдвоен. л.; Т. 3: Военно-исторический. – 45 сдвоен. л.

37. Нарышкин Г.Д. Рельеф дна Арктического бассейна. Дис. ... д.г.н. – М., 2001. – 151 с.

38. Нарышкин Г.Д., Комарицын А.А., Каврайский А.В. Нестеров Н.А., Опарин А.Б., Фридман Б.С. Геоморфологические аспекты внешней границы континентального шельфа России в Арктике. – СПб.: ГУНиО МО РФ, 2005. – 60 с.

39. Нарышкин Г.Д., Петров Д.М., Ермолаев А.А., Алексеев С.П., Костенич А.В. Критерии внешней границы континентального шельфа прибрежных государств в Арктике в соответствии с требованиями конвенции ООН по морскому праву // Навигация и гидрография. – 2013. – № 36. – С. 61–68.
40. 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.
41. Национальный атлас Арктики / Гл. ред. Н.С. Касимов. – М.: Роскартография, 2017. – 495 с.
42. Никифоров С.Л. Рельеф шельфа морей российской Арктики. Автореф. ... д.г.н. – М., 2006. – 43 с.
43. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В., Попов О.Е., Левченко О.В. О методах построения цифровых моделей рельефа дна (на примере Белого моря) // Океанология. – 2015. – Т. 55. – № 2. – С. 326–336.
44. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Либина Н.В. Цифровая модель рельефа дна Белого и Баренцева морей // Геоинформатика. – 2018. – № 2. – С. 32–36.
45. Пейве А.А., Добролюбова К.О., Сколотнев С.Г., Сущевская Н.М., Разницин Ю.Н., Зайончек А.В., Абрамова А.С., Алиулов Р.Х., Зарайская Ю.А., Ескин А.Е., Ефимов В.Н., Мазарович А.О., Мороз Е.А., Разумовский А.А., Ямпольский К.П. Строение области сочленения хребтов Книповича и Мона (Северная Атлантика) // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 426. – № 3. – С. 355–360.
46. Рельеф дна Северного Ледовитого океана. 1 : 5 000 000 / Гл. ред. Г.Д. Нарышкин. – СПб.: ГУНиО МО РФ, ВНИИОкеангеология, 1998. – 1 к.
47. Салищев К.А. Картоведение. 3-е изд. – М.: Изд-во Московского университета, 1990. – 400 с.
48. 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

49. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Мороз Е.А., Добролюбова К.О. Процессы эволюции литосферы в районе архипелага Земля Франца-Иосифа по данным картирования донных обнажений магматических тел // Мониторинг. Наука и технологии. – 2016. – № 4 (29). – С. 14–19.

50. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. Амплитуды дизъюнктивных нарушений флангов хребта Книповича (Северная Атлантика) как индикатор современной геодинамики региона // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 769–789.

51. Сорокин А.И. Морская картография. – М.: ГУНиО МО СССР, 1985. – 254 с.

52. Теплых А.Н. К вопросу о понятиях «ошибка» и «погрешность» измерения // Сборник материалов III Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2007». Т. 4: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. – Новосибирск, 2007. – Ч. 2. – С. 160–163.

53. Турко Н.Н., Агапова Г.В. Методические особенности картирования подводного рельефа многолучевыми эхолотами // Океанология. – 2003. – Т. 43. – № 2. – С. 367–374.

54. Фирсов Ю.Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 348 с.

55. Фирсов Ю.Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки // Вестник Государственного университета морского и речного флота. – 2014. – №2 (24). – С. 17–23.

56. Фирсов Ю.Г. Современная батиметрическая съемка Северного Ледовитого океана в контексте определения внешних границ континентального шельфа в Арктике // Вестник Государственного

университета морского и речного флота. – 2016. – № 6 (40). – С. 81–95.

57. Фирсов Ю.Г. Проблемы отображения рельефа дна на российских батиметрических картах Северного Ледовитого океана // Вестник Государственного университета морского и речного флота. – 2019. – Т. 19. – № 5 (57). – С. 880–892.

58. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа. Дис. ... д.т.н. – Пущино: ИМПБ РАН, 2010. – 267 с.

59. Фридман Б.С. История морского картографического производства в России (конец XIX – начало XX вв.). Автореф. ... к.т.н. – М., 2002. – 29 с.

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

61. Фридман Б.С. Результаты гидрографических исследований и картографирование рельефа дна Арктического бассейна для определения внешней границы континентального шельфа России в Арктике. – СПб.: Наука, 2007. – 207 с.

62. Фридман Б.С. Научные основы картографирования рельефа дна Арктического бассейна для определения границы Национальной юрисдикции России в Арктике. Автореф. ... д.г.н. – М., 2008. – 42 с.

63. Центральный Арктический бассейн. 1 : 2 500 000. – СПб: ГУНиО МО РФ, 2002. – 1 к.

64. Шарков А.М. Перспективы использования многолучевых эхолотов на подводных носителях // Навигация и гидрография. – 2016. – № 46. – С. 29–36.

65. Шумахер А. Эхолотирование на судне «Швабенланд» // Рельеф и геология дна океанов. – М.: Прогресс, 1964. – С. 270–282

66. Abramova A. Comparison of publicly available global bathymetric grids // 5th Annual GEBCO Bathymetric Science Day, 10–18 Sept. 2010, Lima, Peru. – https://www.gebco.net/about_us/gebco_symposium/documents/gebco_fifth_scienc_e_day_abramova2.pdf.

67. Abramova A. Artifacts in gridded bathymetry // 8th Annual GEBCO Bathymetric Science Day, 8 Oct. 2013, Venice, Italy. – https://www.gebco.net/about_us/gebco_symposium/documents/abramova_poster_gebco_2013.pdf.

68. 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, 17–19 May 2018. – St. Petersburg, 2018. – P. 1–10.

69. Abramova A., Lippmann T., Calder B., Mayer L., Monahan D. Comparison and evaluation of publicly available bathymetry grids in the Arctic // 6th Annual GEBCO Bathymetric Science Day, 4 Oct. 2011, La Jolla, USA. – https://www.gebco.net/about_us/gebco_symposium/documents/gsd_2011_poster_abramova.pdf.

70. 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, USA, 3–7 Dec. 2012. – # OS51D-1905.

71. 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. – V. 1. – P. 148–157.

72. Aguilar F.J., Agüera F., Aguilar M.A., Carvajal F. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2005. – V. 71. – № 7. – P. 805–816.

73. Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. – Boulder: NOAA, National Geophysical Data Center, 2009. – 19 p.

74. Amante C.J., Eakins B.W. Accuracy of interpolated bathymetry in digital

elevation models // Journal of Coastal Research. – 2016. – № 76 (10076). – P. 123–133.

75. ArcMap. – Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2010–2020. – <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>.

76. Arefi H., Reinartz P. Accuracy enhancement of ASTER global digital elevation models using ICESat data // Remote Sensing. – 2011. – V. 3. – № 7. – P. 1323–1343.

77. Arndt J.E., Schenke H.W., Jakobsson M., Nitsche F.O., Buys G., Goleby B., Rebesco M., Bohoyo F., Hong J., Black J., Greku R., Udintsev G., Barrios F., Reynoso-Peralta W., Taisei M., Wigley R. The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO) Version 1.0 – A new bathymetric compilation covering circum-Antarctic waters // Geophysical Research Letters. – 2013. – V. 40. – № 12. – P. 3111–3117.

78. Arndt J.E., Dorschel B., Hehemann L. and IBCSO Regional Mapping Committee. IBCSO V2.0: Progress to a new bathymetry off Antarctica // AGU Fall Meeting 2018, Washington, USA. – # OS23B-08.

79. Asche G.P. Omega system of global navigation // International Hydrographic Review. – 1972. – V. 50. – № 1. – P. 87–99.

80. Beaudoin J. Real-time monitoring of uncertainty due to refraction in multibeam echo sounding // Hydrographic Journal. – 2010. – № 134. – P. 3–13.

81. 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., von Rosenberg J., 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.

82. Bernhardsen T. Geographic Information Systems: An Introduction. 3rd ed. – New York: Wiley, 2002. – 448 p.

83. Born G.H., Dunne J.A., Lame D.B. Seasat mission overview // Science. – 1979. – V. 204. – № 4400. – P. 1405–1406.

84. Briggs I.C. Machine contouring using minimum curvature // Geophysics.

– 1974 – V. 39. – № 1. – P. 39–48.

85. Caglar B., Becek K., Mekik C., Ozendi M. On the vertical accuracy of the ALOS World 3D-30m digital elevation model // *Remote Sensing Letters*. – 2018. – V. 9. – № 6. – P. 607–615.

86. Calder B.R., Kraft B.J., de Moustier C., Lewis J., Stein P. Model-based refraction correction in intermediate depth multibeam echosounder survey // *Proceedings of the 7th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA)*, 5–8 July 2004, Delft, Netherlands. – P. 795–800.

87. Carlisle B.H. Modelling the spatial distribution of DEM error // *Transactions in GIS*. – 2005. – V. 9. – № 4. – P. 521–540.

88. Carpine-Lancre J., Fisher R., Harper B., Hunter P., Jones M., Kerr A., Laughton A., Ritchie S., Scott D., Whitmarsh M. The history of GEBCO 1903–2003: The 100-year story of the General Bathymetric Chart of the Oceans. – Lemmer: GITC, 2003. – 140 p.

89. Carte générale bathymétrique des océans. 1 : 10 000 000. – Monaco: Cabinet scientifique de le Prince de Monaco, 1903. – 24 ch.

90. Carte générale bathymétrique des océans. 1 : 10 000 000. 2nd ed. Monaco: Cabinet scientifique de le Prince de Monaco, 1910–1930. – 24 ch.

91. Carte générale bathymétrique des océans. 1 : 10 000 000. 3rd. ed. Monaco: Bureau Hydrographique International, 1932–1966. – 21 ch.

92. Carte générale bathymétrique des océans. 1 : 10 000 000. 4th ed. – Monaco: Bureau Hydrographique International, 1958–1973. – 24 ch.

93. Carte générale bathymétrique des océans (GEBCO). 1 : 10 000 000. 5th ed. – Monaco: Bureau Hydrographique International, 1973–1982. – 24 ch.

94. Copping J.P., Stewart B.D., McClean C.J., Hancock J., Rees R. Does bathymetry drive coastal whale shark (*Rhincodon typus*) aggregations? // *PeerJ*. – 2018. – V. 6. – # e4904.

95. Darby D., Polyak L., Jacobson M., Berger G., Lövlie R., Perovich D., Grenfell T., Kikuchi T., Tateyama K. HLY 0503 Cruise Report. – 2005. – 55 p.

96. Declercq F.A.N. Interpolation methods for scattered sample data:

Accuracy, spatial patterns, processing time // Cartography and Geographic Information Systems. – 1996. – V. 23. – № 3. – P. 128–144.

97. De Moustier C., Kleinrock M.C. Bathymetric artifacts in Sea Beam data: How to recognize them and what causes them // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1986. – V. 91. – № B3. – P. 3407–3424.

98. Di Stefano M., Mayer L.A. An automatic procedure for the quantitative characterization of submarine bedforms // Geosciences. – 2018. – V. 8. – № 1. – # 28.

99. Digital relief of the surface of the Earth. Data Announcement 88-MGG-02. – Boulder: NOAA, National Geophysical Data Center, 1988. – 2 p.

100. Dixon T.H., Naraghi M., McNutt M.K., Smith S.M. Bathymetric prediction from SEASAT altimeter data // Journal of Geophysical Research. – 1983. – V. 88. – № C3. – P. 1563–1571.

101. Eklundh L., Mårtensson U. Rapid generation of digital elevation models from topographic maps // International Journal of Geographical Information Science. – 1995. – V. 9. – № 3. – P. 329–340.

102. Elmore P.A., Fabre D.H., Sawyer R.T., Ladner R.W. Uncertainty estimation of historical bathymetric data from Bayesian networks // OCEANS 2009, 26–29 Oct. 2009, Biloxi, USA. – IEEE, 2009. – doi: 10.23919/OCEANS.2009.5422417.

103. ETOPO1 Global Relief Model. – Boulder: National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009. – <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>.

104. ETOPO2 2-Minute Gridded Global Relief Data. – Boulder: National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2006. – <https://ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>.

105. ETOPO5 5-Minute Gridded Elevation Data. – Boulder: National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1988. – <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5.html>.

106. Evans I.S. General geomorphometry, derivations of altitude, and

descriptive statistics // *Spatial Analysis in Geomorphology*. – London: Methuen, 1972. – P. 17–90.

107. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission // *Reviews of Geophysics*. – 2007. – V. 45. – № 2. – # RG2004.

108. Felicísimo A.M. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 1994. – V. 49. – № 4. – P. 29–33.

109. Fernandes W.A. A method to eliminate refraction artifacts in EM1002 multibeam echosounder system (Swath bathymetry and seabed surveys of EEZ). Technical Report NIO/TR-01/2011. – Dona Paula: National Institute of Oceanography (CSIR), 2011. – 17 p.

110. Fisher P.F., Tate N.J. Causes and consequences of error in digital elevation models // *Progress in Physical Geography*. – 2006. – V. 30. – № 4. – P. 467–489.

111. Fledermaus: 4D Geo-Spatial Analysis. – Fredericton: Quality Positioning Services, 2021. – <https://www.qps.nl/fledermaus/>

112. Florentino C., Pimentel V.B., Neto A. Methodology for quality analysis of regional bathymetric surfaces: From Brazilian South Coast to Hunter Channel // *International Hydrographic Review*. – 2019. – № 22. – P. 19–37.

113. Florinsky I.V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models // *International Journal of Geographical Information Science*. – 1998. – V. 12. – № 1. – P. 47–61.

114. Florinsky I.V. Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations // *Progress in Physical Geography*. – 1998. – V. 22. – № 1. – P. 33–60.

115. Florinsky I.V. Errors of signal processing in digital terrain modelling // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2002. – V. 16. – № 5.

– P. 475–501.

116. Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. 2nd ed. – Amsterdam: Academic Press, 2016. – 486 p.

117. Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry // Progress in Physical Geography. – 2017. – V. 41. – № 6. – P. 723–752.

118. Florinsky I.V., Filippov S.V. Three-dimensional geomorphometric modeling of the Arctic Ocean submarine topography: A low-resolution desktop application // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2021. – V. 46. – № 1. – P. 88–101.

119. Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Luschikova O.S. Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia // Remote Sensing Letters. – 2018. – V. 9. – № 7. – P. 706–714.

120. Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Trevisani S., Romaikin S.V. Statistical and visual quality assessment of nearly-global and continental digital elevation models of Trentino, Italy // Remote Sensing Letters. – 2019. – V. 10. – № 8. – P. 726–735.

121. Fujisada H., Urai M., Iwasaki A. Technical methodology for ASTER global DEM // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – V. 50. – № 10. – P. 3725–3736.

122. Gao J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: Methods, accuracy and limitations // Progress in Physical Geography. – 2009. – V. 33. – № 1. – P. 103–116.

123. GEBCO Digital Atlas. – Intergovernmental Oceanographic Commission, International Hydrographic Organization, British Oceanographic Data Centre, 1994. – 2 v. DVD. – https://www.gebco.net/data_and_products/gebco_digital_atlas/.

124. GEBCO One Minute Grid. – Liverpool: General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, 2003–2008. – https://www.gebco.net/data_and_products/historical_data_sets/#gebco_one.

125. GEBCO_08 Grid. – Liverpool: General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, 2008. – https://www.gebco.net/news_and_media/updated_gebco_08_release.html.
126. GEBCO_2014 Grid. – Liverpool: General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, 2014–2015. https://www.gebco.net/data_and_products/historical_data_sets/#gebco_2014.
127. GEBCO_2019 Grid. – Liverpool: General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, 2019. – https://www.gebco.net/data_and_products/historical_data_sets/#gebco_2019.
128. GEBCO_2020 Grid. – Liverpool: General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, 2020. – https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2020/.
129. Generic Mapping Tools. – 2019–2020. – <https://www.generic-mapping-tools.org/>.
130. GEODAS CD-ROM worldwide marine geophysical trackline data (version 4.1). Data Announcement 2002-MGG-01. – Boulder: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2002.
131. Gesch D., Oimoen M., Greenlee S., Nelson C., Steuck M., Tyler D. The National Elevation Dataset // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2002. – V. 68. – № 1. – P. 5–11.
132. Gille S.T. Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: Method and application // Journal of Geophysical Research. – 1994. – V. 99. – № C9. – P. 18255–18273.
133. Gonzalez C., Rizzoli P. Landcover-dependent assessment of the relative height accuracy in TanDEM-X DEM products // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2018. – V. 15. – № 12. – P. 1892–1896.
134. Hare R., Godin A., Mayer L. Accuracy estimation of Canadian Swath (multibeam) and Sweep (multi transducer) sounding systems. Technical Report. – Ottawa: Canadian Hydrographic Service, 1995. – 215 p.
135. Hare R., Eakins B., Amante C. Modelling bathymetric uncertainty //

International Hydrographic Review. – 2011. – № 6. – P. 31–42.

136. Hell B. Towards the Compilation of a New Digital Bathymetric Model of the North Atlantic Ocean. – Licentiate Thesis. – Stockholm: Stockholm University, Department of Geological Sciences, 2009. – 21 p.

137. Hell B. Mapping Bathymetry: From Measurements to Applications. – Doctoral Thesis. – Stockholm: Stockholm University, Department of Geological Sciences, 2011. – 41 p.

138. 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.

139. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.). Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 796 p.

140. HIPS & SIPS. – Fredericton: Teledyne CARIS, 2000–2021. – <http://www.teledynecaris.com/en/products/hips-and-sips/>

141. Holland D. Developing a national height database // ISPRS Archives. – 2002. – V. 34. – Pt. 4. – 3 p.

142. Hughes Clarke J.E. Dynamic motion residuals in swath sonar data: Ironing out the creases // International Hydrographic Review. – 2003. – V. 4. – № 1. – P. 6–23.

143. 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. – № 6. – P. 607–629.

144. Hunter G.J., Goodchild M.F. Dealing with error in spatial databases: A simple case study // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1995. – V. 61. – № 5. – P. 529–537.

145. Hutchinson M.F., Gallant J.C. Representation of terrain // Geographical Information Systems. – New York: Wiley, 1999. – V. 1. – P. 105–124.

146. IHO Standard for Hydrographic Surveys. Special Publication No. 44. 5th ed. – Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008. – 27 p.

147. IHO Standard for Hydrographic Surveys. Special Publication No. 44. 6th ed. – Monaco: International Hydrographic Organization, 2020. – 49 p.
148. Jakobsson M., Calder B., Mayer L. On the effect of random errors in gridded bathymetric compilations // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – V. 107. – № B12. – P. 1–14.
149. Jakobsson M., Cherkis N., Woodward J., Macnab R., Coakley B. New grid of Arctic bathymetry aids scientists and mapmakers // *Eos Transactions AGU*. – 2000. – V. 81. – № 9. – P. 89–96.
150. Jakobsson M., Grantz A., Kristoffersen Y., Macnab R. Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor // *Geological Society of America Bulletin*. – 2003. – V. 115. – № 12. – P. 1443–1455.
151. Jakobsson M., Macnab R. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Beta Version. Technical Reference and User's Guide. – IBCAO, 2008. – 14 p.
152. 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. – V. 35. – № 7. – # L07602.
153. Jakobsson M., Marcussen C., LOMROG Scientific Party. Lomonosov Ridge Off Greenland 2007 (LOMROG) – Cruise Report. – Copenhagen: Geological Survey of Denmark and Greenland, 2008. – 122 p.
154. 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., and Weatherall, P. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0. // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – V. 39. – № 1. – P. 35–48.

155. Jakobsson M., Mayer L., Monahan D. Arctic Ocean bathymetry: A necessary geospatial framework // *Arctic*. – 2015. – V. 68. – № 5. – P. 41–47.

156. Jakobsson M., Mayer L.A., Bringensparr C., Castro C.F., Mohammad R., Johnson P., Ketter T., Accettella D., Amblas D., An L., Arndt J.E., Canals M., Casamor J.L., Chauché N., Coakley B., Danielson S., Demarte M., Dickson M.-L., Dorschel B., Dowdeswell J.A., Dreutter S., Fremand A.C., Gallant D., Hall J.K., Hehemann L., Hodnesdal H., Hong J., Ivaldi R., Kane E., Klaucke I., Krawczyk D.W., Kristoffersen Y., Kuipers B.R., Millan R., Masetti G., Morlighem M., Noormets R., Prescott M.M., Rebesco M., Rignot E., Semiletov I., Tate A.J., Travaglini P., Velicogna I., Weatherall P., Weinrebe W., Willis J.K., Wood M., Zarayskaya Y., Zhang T., Zimmermann M., Zinglensen K.B. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // *Scientific Data*. – 2020. – V. 7. – № 176. – P. 1–14.

157. Jakobsson M., Nilsson J., O'Regan M., Backman J., Löwemark L., Dowdeswell J.A., Mayer L., Polyak L., Colleoni F., Anderson L., Björk G., Darby D., Eriksson B., Hanslik D., Hell B., Marcussen C., Sellén E., Wallin A. An Arctic Ocean ice shelf during MIS 6 constrained by new geophysical and geological data // *Quaternary Science Reviews*. – 2010. – V. 29. – № 25–26. – P. 3505–3517.

158. Johnson G.L., Taylor P.T., Vogt P.R., Sweeney J.F. Arctic Basin morphology // *Polarforschung*. – 1978. – V. 48. – № 1/2. – P. 20–30.

159. Jones M.T. The GEBCO Digital Atlas // *NERC News*. – 1994. – № 29. – P. 17–20.

160. Jones M.T. (Ed.). User Guide to the Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas and Its Data Sets. – Swindon: Natural Environment Research Council, 2003. – 141 p.

161. Kammerer E.L.L.M. A new method for the removal of refraction artifacts in multibeam echosounder systems. Ph.D. Thesis. – Fredericton: University of New Brunswick, 2000. – 191 p.

162. Karel W., Pfeifer N., Briese C. DTM quality assessment // *ISPRS Archives*. – 2006. – V. 36. – Pt. 2. – P. 7–12.

163. Klenke M., Schenke H.W. A new bathymetric model for the central Fram Strait // *Marine Geophysical Research*. – 2002. – V. 23. – № 4. – P. 367–378.
164. Klenke M., Schenke H.W. Digital terrain model (DTM) of the central Fram Strait // *Pangaea*. – 2006. – <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.526589>.
165. Kraus K., Karel W., Briese C., Mandlbürger G. Local accuracy measures for digital terrain models // *Photogrammetric Record*. – 2006. – V. 21. – № 116. – P. 342–354.
166. Krcho J. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory // *Acta Geographica Universitatis Comenianae, Geographico-Physica*. – 1973. – № 1. – P. 7–233.
167. Kumler M.P. An intensive comparison of triangulated irregular networks (TINs) and digital elevation models (DEMs) // *Cartographica*. – 1994. – V. 31. – № 2. – P. 1–99.
168. Laporte J., Dolou H., Avis J., Arino O. Thirty years of satellite derived bathymetry: The charting tool that hydrographers can no longer ignore // *International Hydrographic Review*. – 2020. – № 24. – P. 129–154.
169. Laxon S., McAdoo D. Arctic Ocean gravity field derived from ERS-1 satellite altimetry // *Science*. – 1994. – V. 265. – № 5172. – P. 621–624.
170. 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.
171. Lecours V., Devillers R., Lucieer V.L., Brown C.J. 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. – № 9. – P. 5391–5406.
172. Li Z. Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling. Ph.D. Dissertation. – University of Glasgow, 1990. – 299 p.
173. Li Z. A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 1994. – V. 49. – № 1. – P. 2–11.

174. Li Z., Chen J. Assessment of the accuracy of digital terrain models (DTM): Theory and practice // Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality, Hong Kong, 18–20 July 1999. – Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 1999. – P. 202–209.

175. Li Z., Zhu Q., Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. – New York: CRC Press, 2005, 323 p.

176. Lin P., Yu Q., Li J. Accuracy of digital elevation models generated by ANUDEM at a macro-scale level // Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality, Hong Kong, 18–20 July 1999. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 1999. – P. 191–201.

177. Lindquist K.G., Engle K., Stahlke D., Price E. Global topography and bathymetry grid improves research efforts // Eos Transactions AGU. – 2004. – V. 85. – № 19. – P. 186.

178. López C. Improving the elevation accuracy of digital elevation models: A comparison of some error detection procedures // Transactions in GIS. – 2000. – V. 4. – № 1. – P. 43–64.

179. Lurton X. An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications. – Berlin: Springer, 2002, 680 p.

180. Marine Trackline Geophysical Data. – Boulder: NOAA, National Centers for Environmental Information, 2009. – <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/trackline.html>.

181. 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.

182. Marks K.M., Smith W.H.F., Sandwell D.T. Evolution of errors in the altimetric bathymetry models used by Google Earth and GEBCO // Marine Geophysical Researches. – 2010. – V. 31. – № 3. – P. 223–238.

183. MATLAB. – MathWorks, 1994–2021. – <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.

184. Maune D.F. (Ed.). Digital Elevation Model Technologies and

Applications: The DEM User's Manual. 2nd ed. – Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007. – 655 p.

185. Mayer L. Frontiers in seafloor mapping and visualization // Marine Geophysical Researches. – 2006. – V. 27. – № 1. – P. 7–17.

186. 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. – # 63.

187. McAdoo B.G., Capone M.K., Minder J. Seafloor geomorphology of convergent margins: Implications for Cascadia seismic hazard // Tectonics. – 2004. – V. 23. – # TC6008.

188. 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. – V. 113. – # B05408.

189. McCullagh M.J. Terrain and surface modelling systems: Theory and practice // Photogrammetric Record. – 1988. – V. 12. – № 72. – P. 747–779.

190. Minár J., Krcho J., Evans I.S. Geomorphometry: Quantitative land-surface analysis // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. – Amsterdam: Elsevier, 2016. – doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10260-X.

191. Mitas L., Mitasova H. Spatial interpolation // Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, 2nd abr. ed. – Hoboken: Wiley, 1999. – P. 481–492.

192. Mohammadloo T.H., Snellen M., Renoud W., Beaudoin J., Simons D.G. Correcting multibeam echosounder bathymetric measurements for errors induced by inaccurate water column sound speeds // IEEE Access. – 2019. – V. 7. – P. 122052–122068.

193. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications //

Hydrological Processes. – 1991. – V. 5. – № 1. – P. 3–30.

194. Murray J. Bathymetrical Chart of the Oceans. 1 : 110 000 000. – Edinburgh: Edinburgh Geographical Institute, 1899. – 1 ch.

195. NOAA. Did I find the lost underwater civilization of Atlantis? – National Ocean Service. – <https://oceanservice.noaa.gov/facts/atlantis.html>.

196. Olson C.J., Becker J.J., Sandwell D.T. A new global bathymetry map at 15 arcsecond resolution for resolving seafloor fabric: SRTM15_Plus // American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, San Francisco, CA, 15–19 Dec. 2014. – San Francisco, 2014. – # OS34A-03.

197. Parkinson B.W., Stansell T., Beard R., Gromov K. A history of satellite navigation // Navigation. – 1995. – V. 42. – № 1. – P. 109–164.

198. PDS2000 Version 4.2.20. User Manual. – Rotterdam: Teledyne RESON, 2014. – 733 p.

199. Porskamp P., Rattray A., Young M., Ierodiaconou D. Multiscale and hierarchical classification for benthic habitat mapping // Geosciences. – 2018. – V. 8. – № 4. – # 119.

200. RESON. – Slangerup: Teledyne RESON. – <http://www.teledynemarine.com/reson>.

201. Robinson G.J. The accuracy of digital elevation models derived from digitised contour data // Photogrammetric Record. – 1994. – V. 14. – № 83. – P. 805–814.

202. Ryabchuk D., Sergeev A., Krek A., Kapustina M., Tkacheva E., Zhamoida V., Budanov L., Moskovtsev A., Danchenkov A. Geomorphology and late Pleistocene–Holocene sedimentary processes of the eastern Gulf of Finland // Geosciences. – 2018. – V. 8. – № 3. – # 102.

203. Ryan W.B.F., Carbotte S.M., Coplan J.O., O’Hara S., Melkonian A., Arko R., Weissel R.A., Ferrini V., Goodwillie A., Nitsche F., Bonczkowski J., Zemsky R. Global multi-resolution topography synthesis // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2009. – V. 10. – № 3. – # Q03014.

204. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine gravity anomaly from Geosat and

ERS 1 satellite altimetry // Journal of Geophysical Research. – 1997. – V. 102. – № B5. – P. 10039–10054.

205. Sandwell D.T., Smith W.H.F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // Journal of Geophysical Research. – 2009. – V. 114. – № B1. – # B01411.

206. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. – 2002. – V. 107. – № 1–2. – P. 1–32.

207. Siemens C.W. On determining the depth of the sea without the use of a sounding line // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1876. – V. 166. – P. 671–692.

208. Smith W.H.F. On the accuracy of digital bathymetric data // Journal of Geophysical Research. – 1993. – V. 98. – № 6. – P. 9591–9603.

209. Smith W.H.F. Seafloor tectonic fabric from satellite altimetry // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 1998. – V. 26. – P. 697–738.

210. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // Journal of Geophysical Research. – 1994. – V. 99. – № B11. – P. 21803–21824.

211. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. – 1997. – V. 277. – № 5334. – P. 1956–1962.

212. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Bathymetric estimation // Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications. – San Diego: Academic Press, 2001. – P. 441–457.

213. Smith W.H.F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension // Geophysics. – 1990. – V. 55. – № 3. – P. 293–305.

214. Stocks T. Morphologie des Atlantischen Ozeans. Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition auf dem Forschungs- und Vermessungsschiff *Meteor* 1925–1927. Berlin: de Gruyter, 1938. – Bd. 3. – T. 1. – 151 s.

215. Surfer. – Golden: Golden Software, 1983–2021. – <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>.
216. Tadono T., Nagai H., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by ALOS PRISM // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – V. 41. – Pt. B4. – P. 157–162.
217. Tozer B, Sandwell D.T., Smith W.H.F., Olson C., Beale J.R., Wessel Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15_PLUS // Earth and Space Science. – 2019. – V. 6. – № 10. – P. 1847–1864.
218. Van Doornik M. Comparison, Harmonization and Integration of Bathymetric Datasets from Multiple Sources. M.Sc. Thesis. – Wageningen: Wageningen University, 2016. – 51 p.
219. Veregin H. Data quality parameters // Geographical Information Systems. – New York: Wiley, 1999. – V. 1. – P. 177–189.
220. Vogt P.R., Jung W.-Y., Nagel D.J. GOMaP: A matchless resolution to start the new millennium // Eos Transactions AGU. – 2000. – V. 81. – № 23. – P. 254, 258.
221. Ware C., Mayer L., Johnson P., Jakobsson M., Ferrini V. A global geographic grid system for visualizing bathymetry // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. – 2020. – V. 9. – № 2. – P. 375–384.
222. Watson D. Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data. – Oxford: Pergamon Press, 1992. – 321 p.
223. Weatherall P., Marks K.M., Jakobsson M., Schmitt T., Tani S., Arndt J.E., Rovere M., Chayes D., Ferrini V., Wigley R. A new digital bathymetric model of the world's oceans // Earth and Space Science. – 2015. – V. 2. – № 8. – P. 331–345.
224. Weber J.R. Maps of the Arctic Basin sea floor: A history of bathymetry and its interpretation // Arctic. – 1983. – V. 36. – № 2. – P. 121–142.
225. Weber J.R. Physiography and bathymetry of the Arctic Ocean seafloor // The Arctic Seas: Climatology, Oceanography, Geology, and Biology. – Boston:

Springer, 1989. – P. 797–828.

226. Wechsler S., Kroll C. Quantifying DEM uncertainty and its effects on topographic parameters // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 2006. – V. 72. – № 9. – P. 1080–1090.

227. Wessel P., Smith W.H.F. New, improved version of Generic Mapping Tools released // *Eos Transactions AGU*. – 1998. – V. 79. – № 47. – P. 578.

228. Wilson J.P. *Environmental Applications of Digital Terrain Modeling*. – Chichester: Wiley–Blackwell, 2018. – 360 p.

229. Wilson J.P., Gallant J.C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. – New York: Wiley, 2000. – 479 p.

230. Wilson M.F.J., O’Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope // *Marine Geodesy*. – 2007. – V. 30. – № 1–2. – P. 3–35.

231. Winther R.G. *Mapping the deep blue oceans // The Philosophy of GIS*. – Cham: Springer, 2019. – P. 99–123.

232. Wood J.D. *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*. Ph.D. Thesis. – Leicester: University of Leicester, 1996. – 193 p.

233. Wood J.D., Fisher P.F. Assessing interpolation accuracy in elevation models // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1993. – V. 13. – № 2. – P. 48–56.

234. *World Ocean Floor. 1 : 46 460 600 / Heezen B.C., Tharp M.* – Arlington: US Navy, Office of Naval Research, 1977. – 1 m.

235. Yang F., Li J., Wu Z., Jin X., Chu F., Kang Z. A post-processing method for the removal of refraction artifacts in multibeam bathymetry data // *Marine Geodesy*. – 2007. – V. 30. – № 3. – P. 235–247.

236. Yang F., Li J., Han L. The filtering and compressing of outer beams to multibeam bathymetric data // *Marine Geophysical Research*. – 2013. – V. 34. – № 1. – P. 17–24.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Параметры гидрографического оборудования научно-исследовательского судна *Академик Николай Страхов*

Расположение гидрографических датчиков в системе координат судна согласно установкам программы PDS2000: ось X положительна в сторону правого борта, ось Y положительна в сторону носа судна, ось Z положительна вверх.

Расположение гидрографических датчиков в системе координат судна согласно установкам программы CARIS HIPS & SIPS: ось Z положительна вниз, датчик движения – точка начала координат.

Таблица А.1 – Значения неопределенности местоположения датчиков на судне

MRU to Trans ...	MRU to Trans2...	MRU to Trans ...	MRU to Trans2...	MRU to Trans ...	MRU to Trans2...	Nav to Trans X...
1.600	0.000	2.360	0.000	5.780	0.000	0.630
Nav to Trans2 ...	Nav to Trans Y...	Nav to Trans2 ...	Nav to Trans Z...	Nav to Trans2 ...	Trans Roll (deg)	Trans Roll 2 (d...
0.000	-3.040	0.000	25.360	0.000	0.010	0.000

Таблица А.2 – Значения инструментальных ошибок измерений, используемые для расчета СПН (подразд. 2.5.1)

Motion Gyro (d...	Heave % Amp	Heave (m)	Roll (deg)	Pitch (deg)	Position Nav (m)	Timing Trans (s)
0.158	5.000	0.100	0.100	0.100	1.000	0.000
Nav Timing (s)	Gyro Timing (s)	Heave Timing (s)	Pitch Timing (s)	Roll Timing (s)	Offset X (m)	Offset Y (m)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.20	0.200
					0.00	
Offset Z (m)	Vessel Speed (...)	Loading (m)	Draft (m)	Delta Draft (m)	MRU Align Std...	MRU Align Std...
0.200	0.000	0.000	0.100	0.200	0.200	0.200