

На правах рукописи



Абрамова Анастасия Сергеевна

**Методика оценки точности и качества математико-
картографического моделирования рельефа дна океана
(на примере Западной Арктики)**

Специальность 25.00.33 – Картография

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре картографии

Научный руководитель: **Флоринский Игорь Васильевич**
доктор технических наук, Институт математических проблем биологии РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Отдел перспективных информационных технологий, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Николаева Ольга Николаевна**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра экологии и природопользования, профессор

Шарков Андрей Михайлович
кандидат технических наук, доцент, АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», Управление гидрографии, геофизики и гидрометеорологии, начальник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Защита диссертации состоится «3» июня 2021 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер. 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного университета геодезии и картографии:

<http://www.miiigaik.ru/upload/iblock/3fc/3fc11f552341a8a842a34c182f314c34.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Беленко Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Математико-картографическое цифровое моделирование рельефа дна морей и океанов лежит в основе батиметрического картографирования и применяется при проведении морских геоморфологических, геолого-геофизических и биологических исследований. Список задач, решение которых невозможно без знания рельефа дна, включает определение границ континентального шельфа, обеспечение безопасности навигации, изучение и разведку минеральных ресурсов, проведение инженерных работ, управление рыболовством, моделирование цунами и др.

Современными носителями информации о рельефе дна морей и океанов являются батиметрические цифровые модели рельефа (ЦМР). 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 (Mayer et al., 2018).

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 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 (Нарышкин и др., 2005, 2013; Фридман, 2007). В этой связи особый интерес и важность представляет математико-картографическое моделирование рельефа дна Северного Ледовитого океана. Учитывая специфику региона, значение общедоступных батиметрических ЦМР для исследований Арктики сложно переоценить.

Степень разработанности проблемы. Математико-картографическое цифровое моделирование рельефа (геоморфометрия) сегодня является самостоятельной научной дисциплиной с развитой теорией и мощным алгоритмическим аппаратом, которые широко используются для решения задач гидрологии, геоморфологии, почвоведения, геоботаники, геологии, гляциологии и других наук о Земле (Evans, 1972; Krcho, 1973; Moore et al, 1991; Wilson, Gallant, 2000; Shary et al., 2002; Hengl, Reuter, 2009; Florinsky, 1998, 2016, 2017; Minár et al., 2016; Wilson, 2018). Интенсивно развивается морская геоморфометрия (Lecours et al., 2016; Florinsky, Filippov, 2020; Ware et al., 2020).

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 (Li, 1990; Florinsky, 2016). При этом точность и качество ЦМР не могут быть измерены каким-то одним параметром и характеризуются пространственной вариабельностью (Veregin, 1999; Bernhardsen, 2002).

Вопросам точности и качества моделирования рельефа суши посвящены десятки работ (McCullagh, 1988; Li, 1990; Wood, 1996; Florinsky, 1998, 2002; Veregin, 1999; Hutchinson, Gallant, 1999; Karel et al., 2006). При этом исследования точности и качества моделирования рельефа морского дна затрагивают лишь частные аспекты этой проблемы (Jakobsson et al., 2002; Marks, Smith, 2006; Marks et al., 2010; Никифоров и др., 2011, 2015; Lecours et al., 2017; Зеньков и др., 2017). 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 качество последних и негативно влияет на возможности их дальнейшего использования (Hell, Jakobsson, 2011; Lecours et al., 2016, 2017).

Рельеф дна Северного Ледовитого океана изучается на протяжении десятилетий (Johnson et al., 1978; Weber, 1983, 1989; Ласточкин, Нарышкин, 1989; Нарышкин, 1998, 2001; Фридман, 2002, 2007; Jakobsson et al., 2003, 2015; Ка-

минский, 2017; Зеньков и др., 2017; Зубченко, Шарков, 2018). Существует ряд общедоступных ЦМР, которые с той или иной степенью точности, детальности и достоверности отображают рельеф дна этого океана. К ним относятся серия ЦМР ETOPO (NOAA, 1993, 2001, 2006, 2009), 19 версий ЦМР Global Topography (Smith, Sandwell, 1997), 5 версий ЦМР GEBCO (GEBCO Comp. Group, 2003, 2008, 2014, 2019, 2020), 11 версий ЦМР SRTM30_Plus (Becker et al., 2009), 2 версии ЦМР SRTM15_Plus (Olson et al., 2014; Tozer et al., 2019) и 4 версии ЦМР IBCAO (Jakobsson et al., 2000, 2008, 2012, 2020).

Цель исследования: разработать 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 высокоточные эталонные батиметрические ЦМР.

Объектом исследования является математико-картографическое моделирование рельефа дна океана. **Предметом исследования** является точность и качество математико-картографического моделирования рельефа дна океана.

Научная новизна исследования:

Впервые разработана методика оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана. Уникаль-

ность методики определяется ее комплексностью: для оценки точности и качества моделирования подводного рельефа используется пять критериев, а именно: точность данных, по которым строятся батиметрические ЦМР; точность собственно ЦМР; точность интерполяции ЦМР; классы характерных для ЦМР артефактов; степень выраженности артефактов в ЦМР. Методика состоит из трех основных частей:

1. Двух способов оценки точности батиметрических ЦМР и данных, по которым строятся батиметрические ЦМР, с использованием в качестве эталонов независимых ЦМР высокой точности и разрешения, полученных с помощью МЛЭ.

2. Способа оценки точности интерполяции значений глубин в батиметрических ЦМР.

3. Классификации артефактов батиметрических ЦМР и метода оценки степени выраженности артефактов.

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

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной 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 (Seabat 8111) комплексами МЛЭ с навигационной системой динамического позиционирования POS MV.

Для обработки материалов МЛЭ применялось программное обеспечение

RESON PDS2000, CARIS HIPS & SIPS 6.1 и 7.0, Surfer. Для реализации разработанной методики и картографирования результатов применялись программы Generic Mapping Tools, IVS Fledermaus 3D, Matlab и ArcMap 10.0.

Использовались общедоступные ЦМР: IBCAO 2.23, GEBCO_08, Global Topography (GT) 13.1, SRTM30_Plus 6.0, GEBCO 1 minute 2.0, ETOPO1.

На защиту выносятся методика оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана, которая включает 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 ЦМР.
4. Классификацию артефактов батиметрических ЦМР.
5. Метод оценки степени выраженности артефактов в батиметрических ЦМР.

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, трехмерной 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 Тектоническое совещание (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: рейсы 24, 25 и 30 НИС *Академик Николай Страхов* (авг. – окт. 2006, июль – окт. 2007, июль – сент. 2013); рейс ARK XXIV-3 НИС *Polarstern* (авг. – окт. 2009); НИС *Академик Трешников* (июль – окт. 2014), экспедиция «Кара – лето 2014».

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

дынского по данным 28 рейса НИС *Академик Николай Страхов*)», № 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».

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: 202 страницы, в том числе 92 рисунка и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, излагаются цель и задачи работы, указаны научная новизна, защищаемые положения, теоретическая и практическая значимость работы, аргументируется степень достоверности и апробация результатов исследования, указан личный вклад соискателя.

В **первой главе** рассмотрено современное состояние картографирования и цифрового моделирования рельефа дна океанов. Проведен обзор истории развития морского картографирования. Обозначены основные этапы истории развития инструментов и методов измерения глубин, соответствующие этапы изучения рельефа мирового океана, история картографического отображения рельефа морского дна: от карт изобат к цифровым базам данных и построенным по ним батиметрическим ЦМР.

Рассмотрены достоинства и недостатки двух основных методов получения данных, по которым строятся батиметрические ЦМР: эхолотирование (однолучевая съемка по профилям и МЛЭ) и спутниковая альтиметрия.

Дан обзор проблемы точности и качества в математико-картографическом моделировании рельефа морского дна и ее сравнение со сходной проблемой цифрового моделирования рельефа суши.

Сформулирован авторский комплексный подход к оценке точности и каче-

ства батиметрических ЦМР по следующим критериям: 1) точность данных, по которым строятся батиметрические ЦМР; 2) точность батиметрических ЦМР; 3) точность интерполяции значений глубин в ЦМР в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок; 4) наличие артефактов в батиметрических ЦМР; 5) степень выраженности артефактов в ЦМР.

Во **второй главе** дана характеристика использованных в работе общедоступных тестируемых и независимых эталонных батиметрических ЦМР.

Рассмотрены типы регулярных сеток и основные алгоритмы интерполяции (алгоритмы Смита–Вессела и Смита–Сэндвелла), используемые при создании батиметрических ЦМР. Приведена сравнительная характеристика общедоступных ЦМР, описывающих подводный рельеф Арктики. Батиметрические ЦМР разделены автором на два типа: А) ЦМР GEBCO_08 и IBCAO 2.23, основанные на данных эхолотирования, с заполнением пробелов в измерениях интерполяцией, в том числе по оцифрованным изобатам; и Б) ЦМР ETOPO1, GT и SRTM30_Plus, основанные на комбинации данных эхолотирования и спутниковой альтиметрии. Описаны основные этапы построения батиметрических ЦМР обоих типов.

Для апробации трех разработанных способов методики были выбраны шесть полигонов в Норвежско-Гренландском и Баренцевом морях. На полигонах представлены участки морского дна с разными морфологическими типами рельефа: срединно-океанический хребет Книповича (полигоны 1 и 2), абиссальная равнина Норвежского бассейна (полигон 3), шельфовая равнина Баренцева моря (полигоны 4 и 5), Арктический континентальный склон (полигон 6). Для Северного Ледовитого океана выбранные полигоны репрезентативны: они характеризуются разной степенью расчлененности рельефа, разным уровнем корреляции между подводным рельефом и гравитационными аномалиями, разным типом исходных батиметрических данных, использованных для создания тестируемых ЦМР, и разной степенью покрытия этими данными.

Для шести указанных полигонов из общедоступных ЦМР GEBCO_08, IBCAO 2.23, GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0 были выделены фрагменты, которые используются в следующих главах при апробации трех разработанных спосо-

бов методики.

В качестве эталонных ЦМР при этом применяются шесть независимых батиметрических ЦМР высокого разрешения и точности, полученных ГИН РАН в результате МЛЭ шести указанных полигонов в ходе 24–26 рейсов НИС *Академик Николай Страхов*. Эти ЦМР не использовались при создании тестируемых версий общедоступных ЦМР, что и позволяет применять их в качестве эталонных. В то же время, эталонные ЦМР вошли в более поздние версии общедоступных ЦМР, что исключает возможность использовать эти более поздние версии при апробации разработанной методики.

Оценена точность эталонных данных и ЦМР. Максимальная суммарная перенесенная неопределенность (СПН) эталонных МЛЭ-данных составила 1,85% глубины для уклона рельефа 45°, а их средняя СПН – 1,05% глубины для уклона рельефа 5° (доверительная вероятность 95%). По результатам расчета матриц разности между значениями глубин в эталонных ЦМР и в независимых ЦМР, построенных по МЛЭ-данным рейсов НИС *Healy* и *Oden*, не было обнаружено значительных расхождений в значениях глубин: их средние арифметические (\bar{x}) и средние квадратические ошибки (m) находятся в пределах максимальной СПН. Аргументировано, что присутствующие в эталонных ЦМР незначительные артефакты (из-за рефракции звуковых волн) не могут оказать существенного влияния на результаты апробации разработанной методики.

Третья глава посвящена способу оценки точности данных, по которым строятся батиметрические ЦМР. Разработанный способ 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.

Способ включает следующие основные этапы: 1) Получение максимальной информации об исходных данных, формате карты покрытия и способа извлечения, а также способа разделения на основные типы исходных данных. 2) Построение карты покрытия исходных данных, наложенных на карту рельефа, для сравнения полноты карты исходных данных. 3) Расчет матрицы

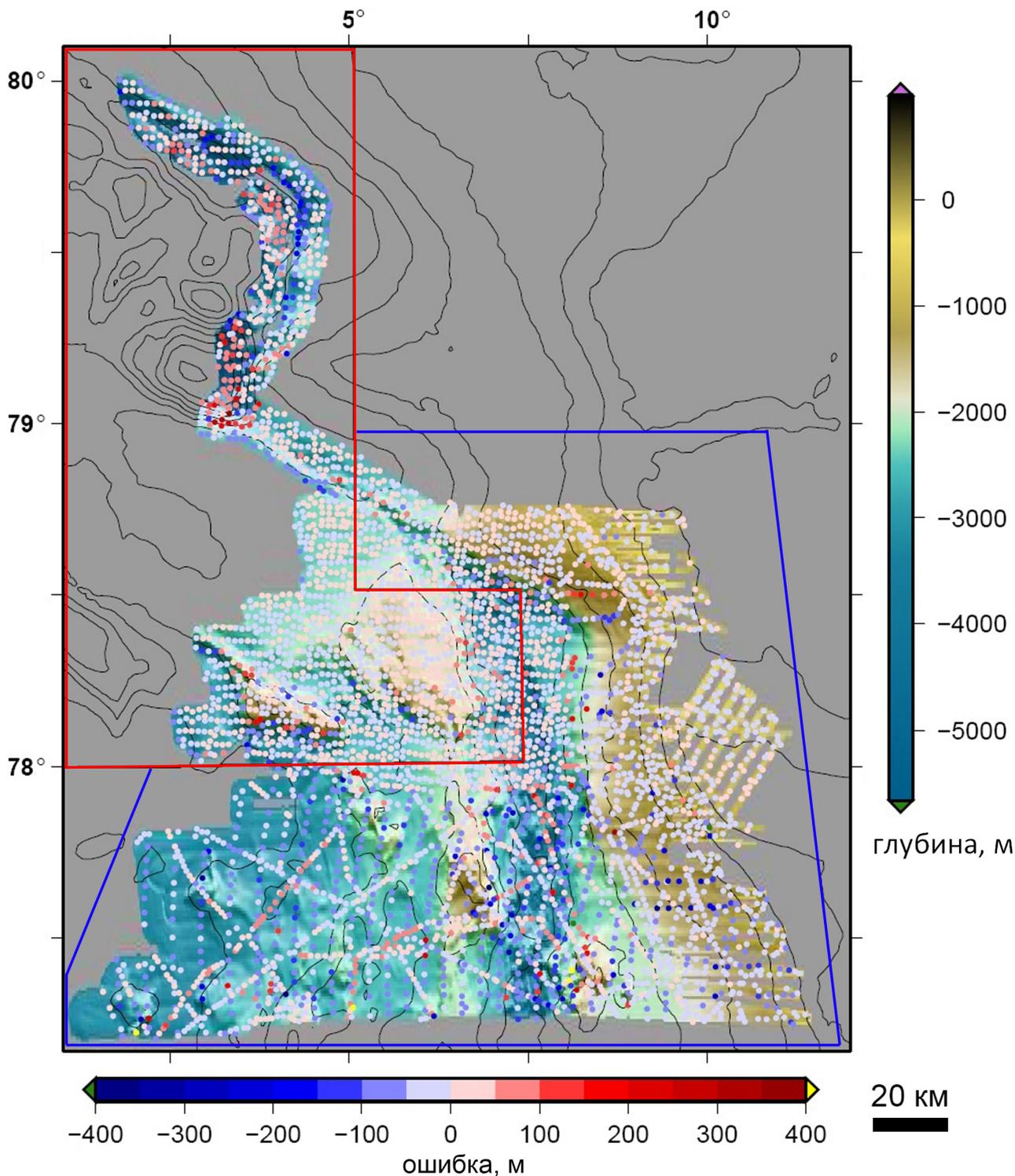


Рисунок 1 – Пример карты ошибок исходных данных для ЦМР ИВСаО 2.23 на полигонах 1 и 2. Слой ошибок наложен на батиметрию, построенную по эталонной ЦМР. Границы полигонов 1 и 2 обозначены красной и синей рамками

разности между значениями глубин в эталонной ЦМР и в исходных данных с помощью авторского алгоритма, который предназначен для обработки ЦМР, построенных в разных картографических проекциях, с различным пространст-

венным разрешением и с несовпадающими по размерам и ориентации сетками. 4) Построение карты разности значений глубин (т.е., карты ошибок исходных данных). 5) Расчет статистических характеристик ошибок исходных данных: максимального (\max), минимального (\min), \bar{x} и m . 6) Построение гистограммы распределения ошибок исходных данных. 7) Анализ пространственного распределения ошибок исходных данных ЦМР с использованием полученной карты и гистограммы.

Разработанный способ успешно апробирован (рис. 1) на примере фрагментов двух ЦМР, относящихся к разным типам: 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 ~ 50 м, которая была вызвана использованием некорректно построенной ЦМР НИС *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.

В **четвертой главе** рассмотрен способ оценки точности батиметрических ЦМР. Разработанный 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.

Способ состоит из следующих основных этапов: 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 гл. 3. 3) Построение карты разности глубин (карты ошибок тестируемой ЦМР). 4) Расчет статистических характеристик ошибок тестируемой ЦМР (\min , \max , \bar{x} , m). 5) Построение гистограммы распределения ошибок в тестируемой ЦМР. 6) Анализ пространственного распределения ошибок ЦМР с использованием полученной карты и гистограммы.

Разработанный способ успешно апробирован (рис. 2) на примере фрагментов ЦМР, относящихся к разным типам ЦМР: GEVCO_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 ЦМР 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).

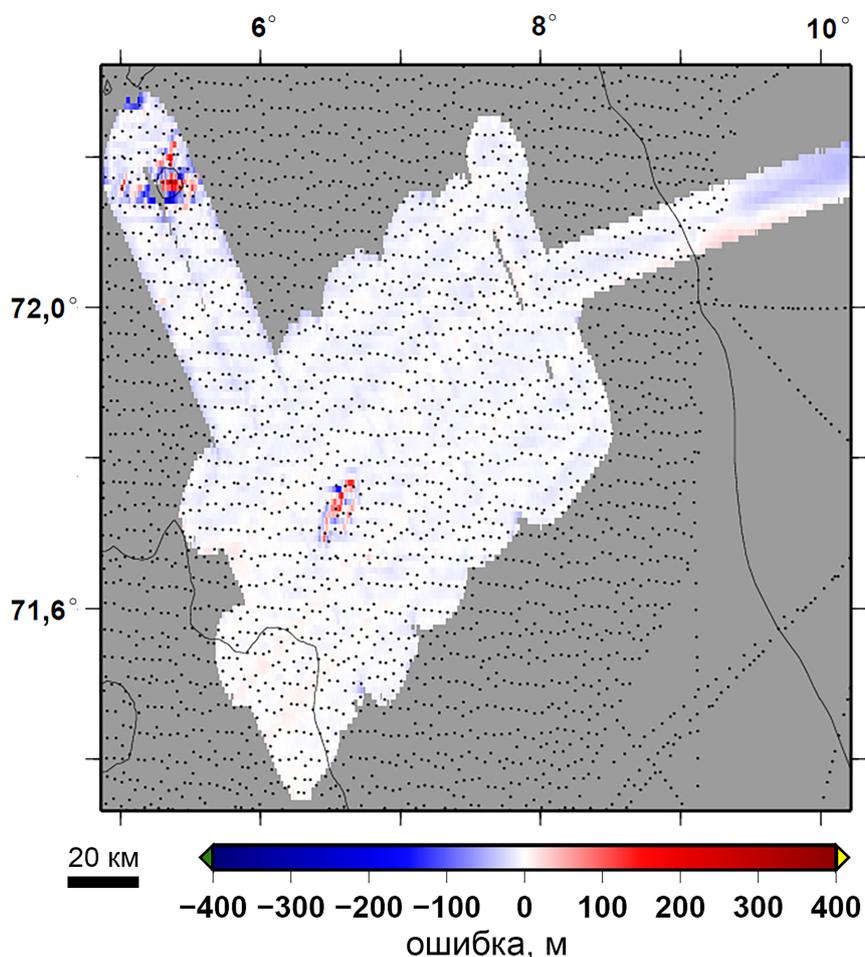


Рисунок 2 – Пример карты ошибок для ЦМР GEBCO_08 на полигоне 3 (точки – покрытие исходными данными; изобаты ЦМР GEBCO_08)

Пятая глава посвящена способу оценки точности интерполяции значений глубин в ЦМР в зависимости от степени покрытия данными батиметрических съемок. Разработанный способ основан на расчете, статистическом анализе и картографировании двух матриц: 1) матрицы разности между значениями глу-

бин в тестируемой и эталонной ЦМР (т.е., 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 с измеренным значением глубины.

Способ включает следующие основные этапы: 1) Расчет матрицы разности между значениями глубин в эталонной и тестируемой ЦМР с помощью алгоритма, описанного в гл. 3. 2) Построение карты ошибок тестируемой ЦМР. 3) Извлечение из базы данных (БД) карты покрытия исходными данными тестируемой ЦМР. 4) Расчет матрицы расстояний от данной ячейки тестируемой ЦМР до ближайшей ячейки с измеренным значением глубины. 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

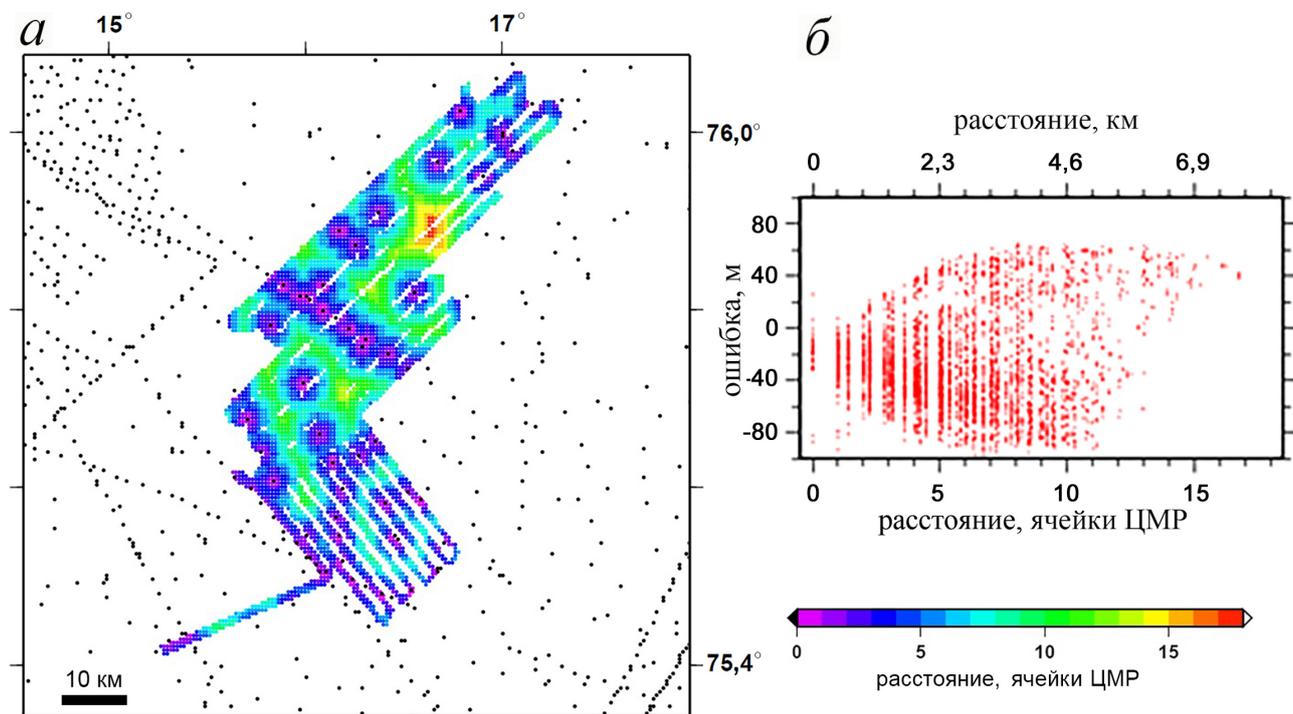


Рисунок 3 – Пример оценки точности интерполяции значений глубин для ЦМР GT 13.1 на полигоне 4: *а* – карта расстояний (точки – покрытие исходными данными); *б* – зависимость величины ошибок от расстояния до ближайшей ячейки ЦМР с измеренной глубиной

с измеренной глубиной.

Разработанный способ успешно апробирован (рис. 3) на примере фрагментов ЦМР GEBCO_08 и GT 13.1, построенных с применением различных алгоритмов интерполяции. В частности, установлено: 1) В пределах каждого полигона характер распределения ошибок в ЦМР зависит от плотности исходных данных и количества ячеек сетки. 2) Ошибки в ячейках ЦМР, где расстояние до точек с измеренными значениями глубин равно нулю, отражают ошибки исходных данных. 3) 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.

В **шестой главе** представлены результаты исследования артефактов в батиметрических ЦМР на примере трех морфологических провинций Норвежско-Гренландского и Баренцева морей (континентальный шельф, абиссальная равнина и срединно-океанический хребет). Использовались семь фрагментов ЦМР IBCAO 2.23, GEBCO_08, GT 13.1 и SRTM30_Plus 6.0.

Для визуального анализа батиметрии были применены методы картографической визуализации ЦМР и информации о покрытии исходными данными, использованными 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 пр.

По результатам исследования автором разработана классификация батиметрических артефактов. Артефакты классифицированы в соответствии с вызывающими их источниками и факторами (табл. 1): данные многолучевой съемки, данные однолучевой съемки, точечные замеры, данные спутниковой альтиметрии, оцифрованные изобаты, склеивание разных источников данных, ошибки отображения береговой линии, а также отсутствие данных.

Наблюдаемые артефакты имеют морфологию, сходную с реальными формами рельефа на различных масштабных уровнях, и включают, в частности, следующие формы: хребты и трогии, воронки и холмы, плоские поверхности, террасы, звездоподобные формы. Примеры некоторых типов артефактов приведены на рис. 4.

Таблица 1 – Классификация артефактов батиметрических ЦМР

Источники и факторы, вызывающие артефакты	Морфология артефакта
Данные МЛЭ	Полосовые артефакты вдоль перекрытий соседних галсов
Данные однолучевого эхолотирования	Линейные артефакты – искусственные хребты и трогии
Точечные промеры глубин	Искусственные холмы и воронки
Изобаты	Эффект террасированности склонов и несуществующие формы рельефа в районах, где значения глубин по изобатам не совпадает с окружающими значениями
Ошибки интерполяции в районах отсутствия акустических данных	Искусственные равнины или впадины; звездоподобные формы
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
Высокочастотный шум в предсказанном по данным спутниковой альтиметрии рельефе	Эффект «апельсиновой корки»
Краевые эффекты по границе склеивания ЦМР разной точности и разрешения	Искусственные террасы, полосовые артефакты
Ошибки отображения береговой линии	Отрицательные и нулевые значения высот на суше, искусственные острова

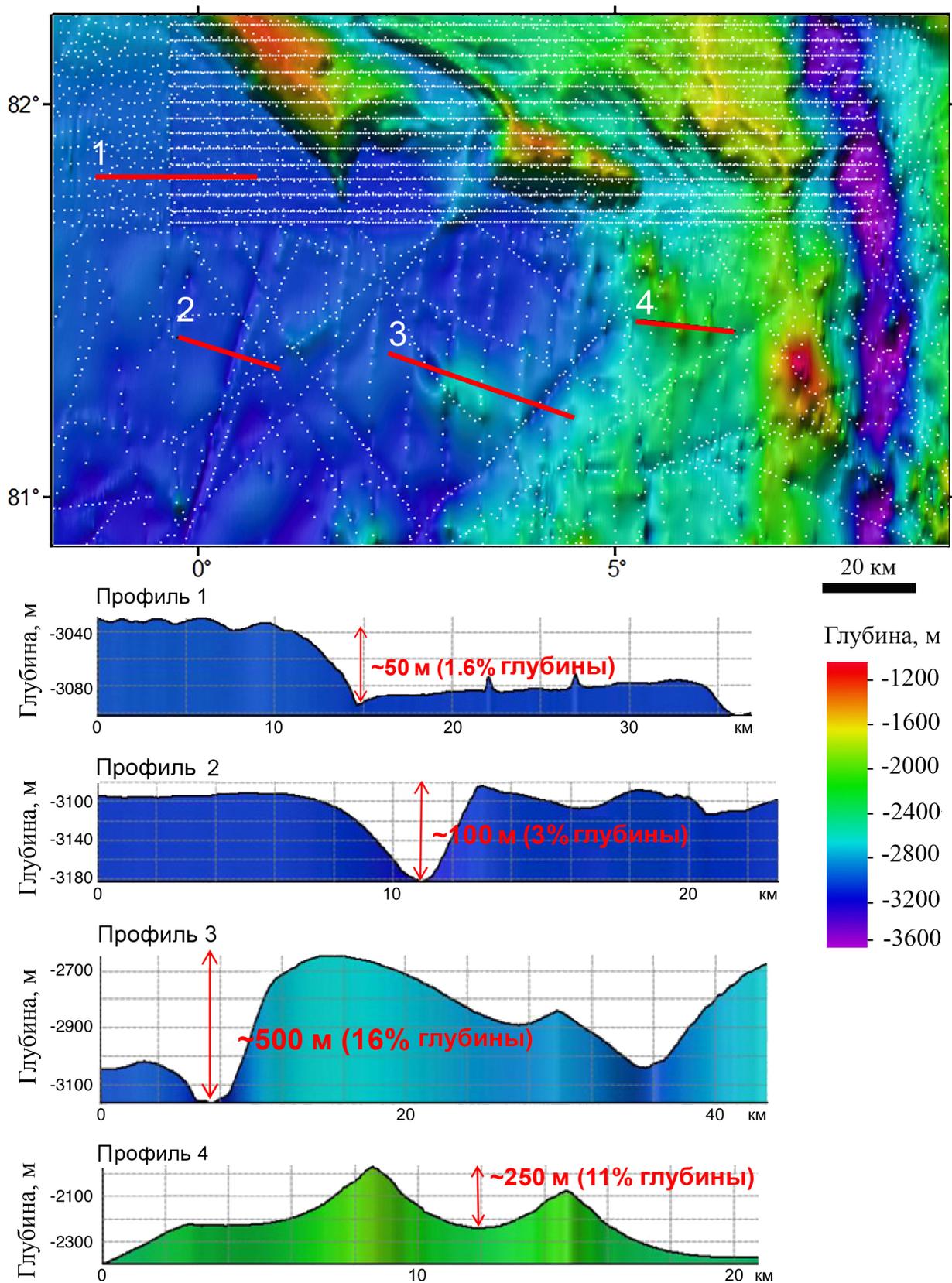


Рисунок 4 – Батиметрия ЦМР GT в районе срединно-океанического хребта; точками показано покрытие исходных данных. Артефакты: профиль 1 – искусственные ступени в рельефе (краевые эффекты по границе склеивания ЦМР); профили 2, 3, 4 – искусственные хребты и трюги (однолучевая съемка)

Седьмая глава посвящена методу оценки степени выраженности артефактов в батиметрических ЦМР. Разработанный 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 включает следующие основные этапы: 1) Извлечение из БД карты покрытия исходными данными для тестируемых ЦМР. 2) Определение размера окна для расчета изменчивости глубин по пространственному разрешению исходных данных. 3) Расчет модели Лапласиана по тестируемой ЦМР для определения диаметра буферной зоны влияния исходных данных. 4) Расчет матрицы изменчивости глубин для тестируемой ЦМР: значения изменчивости глубин вычисляются для каждой ячейки ЦМР, значение глубины в которой (D_o) основано на исходных данных. За изменчивость глубин принимается большее из двух значений разности глубин между D_o и медианными значениями глубин, рассчитанными в узком крестообразном окне по осям X и Y . 5) Расчет матрицы «истинной» изменчивости глубин по эталонной ЦМР (аналогично п. 4) для каждой ячейки в пределах зоны «истинной» изменчивости. 6) Построение гистограмм распределения значений изменчивости глубин в тестируемой ЦМР и «истинной» изменчивости глубин в эталонной ЦМР. 7) Оценка степени выраженности артефактов: распределение значений изменчивости глубин характеризует степень выраженности артефактов.

Метод успешно апробирован (рис. 5) на участке шельфа Баренцева моря на примере фрагментов ЦМР GEBCO_08 и GT. 13.1. В частности, получена количественная оценка выраженности артефактов в этих ЦМР: значения стандартного отклонения (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.

В заключении изложены итоги выполненной работы, рекомендации по их применению и перспективы дальнейшей разработки темы.

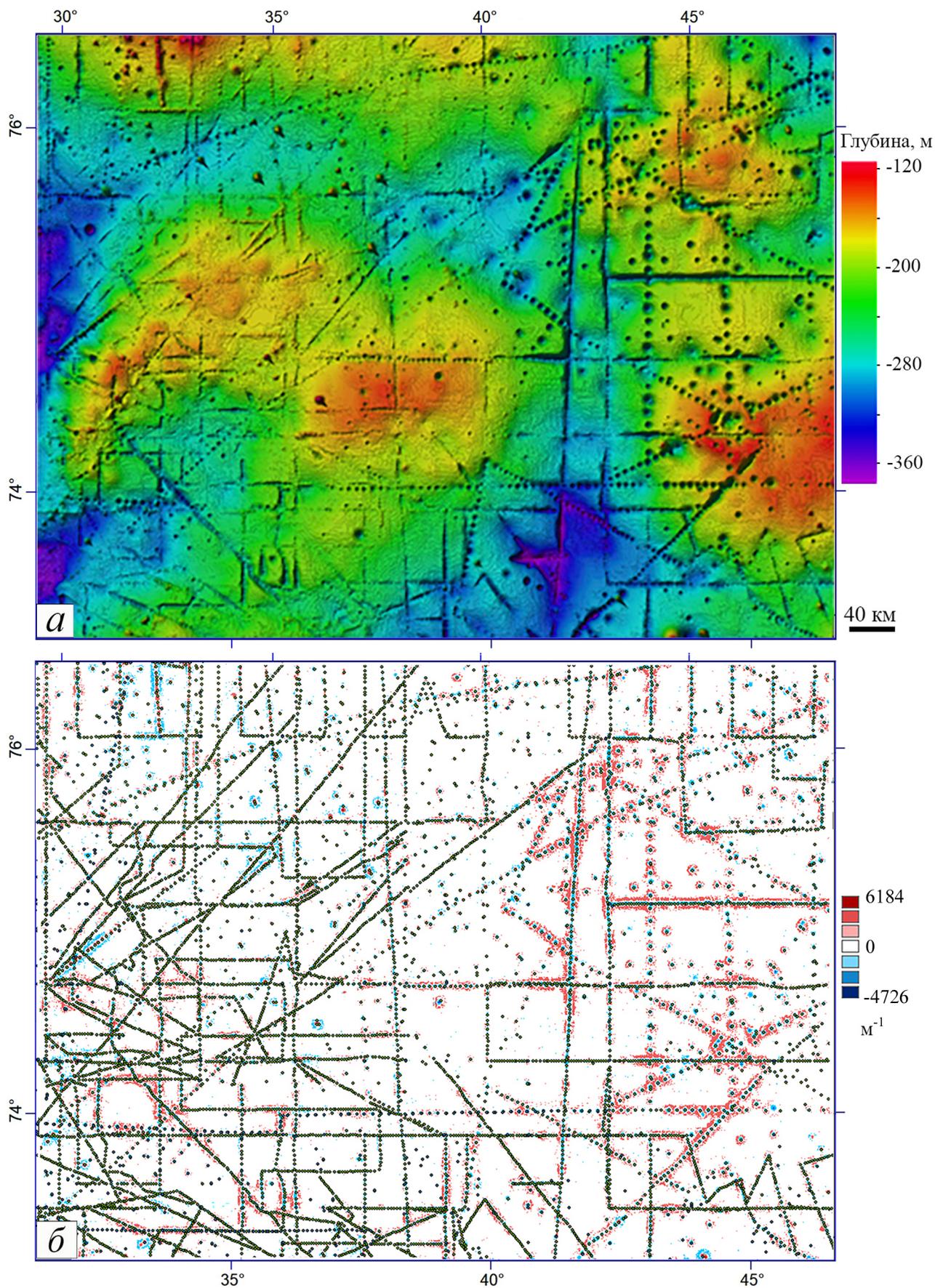


Рисунок 5 – Район континентального шельфа в ЦМР GT 13.1: *а* – Батиметрия. Видны ярко выраженные точечные и линейные артефакты. *б* – Лапласиан (исходные точечные измерения показаны болотным цветом)

В **приложении** приведены основные параметры гидрографического оборудования НИС *Академик Николай Страхов*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые разработана методика оценки точности и качества математико-картографического цифрового моделирования рельефа дна океана.

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 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 совместно с 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 поиске глубин, превышающих некоторое по-

роговое значение, с помощью сканирования ЦМР узким крестообразным скользящим окном.

7. Разработанная 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. Разработанная 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 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и/или Scopus:

1. 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. 13–22.

2. 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 // Вест. Москов. ун-та. Сер. 5: География. 2020. № 2. С. 82–91.

3. 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.

4. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О., Добролюбова К.О. Современная тектоника северной части хребта Книповича, Атлантика // Геотектоника. 2014. № 3. С. 16–29.

5. 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 // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 427. № 1. С. 67–72.

6. Пейве А.А., Добролюбова К.О., Сколотнев С.Г., Сущевская Н.М., Разницын 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., Черных А.А., Ямпольский К.П. Строение области сочленения хребтов Книповича и Мона (северная Атлантика) // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 426. № 3. С. 355–360.

Статьи в других журналах, рекомендованных ВАК:

7. Абрамова А.С. Способ оценки точности метода интерполяции в батиметрических цифровых моделях рельефа // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. Т. 65. № 1. С. 52–60.

8. Абрамова А.С. Типы артефактов в цифровых моделях рельефа дна (на примере Арктического бассейна) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64. № 6. С. 642–652.

9. Абрамова А.С. Метод оценки выраженности артефактов в цифровых батиметрических моделях дна // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64. № 5. С. 522–531.

10. 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.

Другие публикации:

11. Абрамова А.С., Зарайская Ю.А. Использование сонарных данных многолучевого эхолотирования как метод идентификации неотектонических элементов в рельефе на примере южной части Баренцевоморского шельфа //

Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2019. Т. 1. С. 8–13.

12. Abramova A., Chorzewska K. Gridding XYZ data with ArcMap // The IHO–IOC GEBCO Cook Book. IHO Publication B-11. Monaco: IHO, 2019. P. 34–51.

13. Абрамова А.С. Классификация типов артефактов в цифровых моделях рельефа дна (на примере нескольких версий ЦМР дна в Арктике) // Национальная картографическая конференция – 2018: Сб. тез., Москва, 16–19 окт. 2018. М.: Геогр. фак. МГУ, 2018. С. 13–14.

14. Флоринский И.В., Филиппов С.В., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Селезнева Е.В. Разработка системы для моделирования рельефа дна Северного Ледовитого океана // Тез. докл. 12-й Междунар. конф. «Интеллектуализация обработки информации» ИОИ-2018, Гаэта, Италия, 8–13 окт. 2018. М.: Торус-Пресс, 2018. С. 170.

15. Abramova A.S. Artifacts in the Arctic digital bathymetry models // Theory and Methods of Polar Science: Proc. Int. Youth Sci. Conf. Polar Geodesy, Glaciology, Hydrology and Geophysics, St. Petersburg, Russia, 17–19 May 2018. St. Petersburg, 2018. P. 1–10.

16. Florinsky I.V., Filippov S.V., Abramova A.S., Zarayskaya Yu.A., Selezneva E.V. Towards geomorphometric modelling of the topography of the Arctic Ocean floor // Proc. 7th Int. Conf. Cartography & GIS, 18–23 June 2018, Sozopol, Bulgaria. Sofia: BCA, 2018. Vol. 1. P. 166–173.

17. Абрамова А.С., Соколов С.Ю., Мороз Е.А. Картирование неотектонических элементов в условиях срединно-океанического хребта по данным высокочастотного профилографа // Материалы V Междунар. конф. молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана». СПб.: ВНИИОкеангеология. 2016. С. 80–81.

18. Мазарович А.О., Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Ефимов В.Н., Мороз Е.А. Рельеф севера Баренцева моря и континентального склона Северного Ледовитого океана // Геология полярных областей Земли. Материалы XLII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2009. Т. 2. С. 27–29.