# ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РЕЛЬЕФА ШЕЛЬФА АРКТИКИ И СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МОРСКОГО ДНА

**С.Л. Никифоров, Д.Б. Островский, Ю.А. Павлидис, И.А. Селезнев**

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
ОАО Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение рельефа шельфа является важной задачей для исследований в области геологии, геоморфологии, геофизики, при проведении поисково-разведочных и инженерных работ, включая прокладку трубопроводов, для работы гидроакустических средств различного назначения. В рельефе шельфа заложена информация о геологическом строении, истории развития и современных морфолитодинамических процессах. Современный рельеф морского дна является следствием его происхождения и развития, при этом картирование рельефа должно строиться не на формальном принципе сопоставления глубин, а на научном понимании природных процессов, которые привели к его образованию. Определение происхождения рельефа имеет принципиальное значение, так как без понимания генетических особенностей картографируемых форм невозможно их объективное и обоснованное изображение [1–3]. Ключом к такому пониманию является учет рельефообразующих процессов, которые привели к образованию форм рельефа. Обычно рельефообразующие процессы подразделяют на экзогенные (внешние, связанные с энергией Солнца) и эндогенные (внутренние, тектонические), а в ряде случаев и антропогенные.

В настоящее время интенсивно развивается оперативная океанология, в частности, сделаны выводы о том, что расчеты распространения сигналов в море должны производиться с учётом геоакустических характеристик морского дна, в том числе подробного описания его рельефа. Активно ведутся работы по созданию баз данных о геоакустических характеристиках морского дна. Созданы системы расчёта и оперативного мониторинга полей гидрофизических характеристик среды.

Для стран Северного полушария, в первую очередь России, первостепенное значение имеет изучение шельфа арктических морей. Значительное разнообразие форм рельефа дна, огромное влияние на природную среду всей Земли делает Арктику полигоном для проведения исследований, построения и апробации геофизических и геоакустических моделей. Трансформация рельефа арктических морей значительно отличается от других районов Мирового океана, что связано со спецификой современных волновых и ледовых факторов, особенностями изменения уровня моря и характером развития оледенений в гляциальные периоды. Предлагаемые методы батиметрического картирования основаны на морфогенетическом (геоморфологическом) подходе и анализе сложного взаимодействия различных процессов, определяющих происхождение и морфологическую выраженность рельефа. Анализ ведущих рельефообразующих процессов является основой не только для решения широкого круга фундаментальных, включая разработки сценариев возможного развития рельефа, но и прикладных задач. Необходимость знаний о рельефе существует практически во всех областях жизнедеятельности человека, связанных с Океаном. С использованием морфогенетического подхода построена геоакустическая модель морского дна одного из районов Баренцева моря. Прогнозные оценки подтверждены натурными экспериментами, сопоставлением с данными акустического профилографа и скважин бурения.

## 1. Рельефообразующие факторы и формы рельефа шельфа

Анализ ведущих рельефообразующих процессов является основой разработки сценариев возможного развития рельефа. Формирование генеральных форм шельфа происходит под влиянием эндогенных факторов, в то время как образование более мелких форм рельефа, определяющих современный облик шельфа, обусловлено экзогенными процессами. По морфометрическим признакам рельеф шельфа можно разделить на группы, как показано в табл. 1.

Промежуточное положение между мезо- и микрорельефом занимают формы рельефа, формирование которых связано с проявлением криогенных процессов (термокарст, криодислокации и т. п.). Их размеры, как правило, около 10 м (и меньше) по ширине и первые метры по

**Таблица 1. Морфометрические характеристики рельефа шельфа**

| Морфометрические группы рельефа | Структурно-геоморфологическая принадлежность | Размер |
|---|---|---|
| Мегарельеф | Шельф в целом как крупнейший структурный элемент в планетарном плане | Ширина – от берега до бровки – 1 тыс. км и более, перепад высот, как правило, около 200 м. В Баренцевом море, учитывая своеобразие структурного строения, – до 400 м |
| Макрорельеф | Протяженные равнины, крупные структурные поднятия и депрессии, как правило, структурно обусловленные (Адмиралтейский вал, Южно-Новоземельский желоб и др.) | Протяженность – сотни километров, перепад высот (в Баренцевом море) – 300 м и более |
| Мезорельеф | Структурные и экзогенные формы рельефа, формирование и развитие которых связано с особенностями палеогеографии или проявления современных процессов, а также неотектоники (затопленные бары, моренные валы, горсты, грабены и пр.) | Протяженность, как правило, до 100 км. Перепад высот – десятки метров |
| Микрорельеф | Экзогенный рельеф, связанный с проявлением современных процессов (знаки ряби, биотурбационные признаки и т. д.) | Относительная высота (глубина) – как правило, до метра |

высоте. К этой же группе можно отнести и антропогенные формы рельефа.

В основе *всех* крупных форм рельефа шельфа так или иначе лежит тектоническая *структура*, на которую впоследствии накладываются формы рельефа экзогенного происхождения.

Геологическими структурами определяется положение крупных форм рельефа, таких как синклинальные подводные впадины, антиклинальные и брахиантиклинальные подводные возвышенности, моноклинальные равнины, флексурные уступы и т. п. Вместе с тем они все в большей или меньшей степени переработаны современными и древними экзогенными процессами. Выделение структурного рельефа на шельфе Арктики, как правило, отражает лишь тот факт, что он был первоначально создан в результате эндогенной деятельности, а в настоящее время практически все исходные структуры в той или иной степени переработаны экзогенными процессами.

Направленность экзогенных рельефообразующих процессов и интенсивность их проявления изменяются во времени и пространстве. В связи с этим следует различать экзогенные факторы, влияющие на процессы рельефообразования в настоящее время (современные) и в прошлые эпохи (палеогеографические).

Современный рельеф шельфа арктических морей образован в результате чередований ледниковых и межледниковых природных обстановок и сопутствующих им колебаний уровня Мирового океана, которые привели к формированию на структурах дочетвертичного фундамента морфогенетических комплексов ледникового, ледниково-морского, морского и субаэрального происхождения. Рельеф шельфа каждого из арктических морей России имеет собственную специфику, связанную как с современными процессами, так и с историей развития.

На обширном шельфе российской Арктики происходили неоднократные понижения и повышения уровня океана, преимущественно связанные с глобальными изменениями климата и развитием огромных оледенений в холодные эпохи. На эволюцию современного рельефа шельфа наибольшее влияние оказало последнее (вюрмское) оледенение (18–20 тыс. лет назад), которое сопровождалось сильным похолоданием, развитием покровных ледников и глубокой регрессией Мирового океана. Уровень моря понизился до 100–130 м, а в районах тектонического погружения (баренцево-карский шельф) – до 150–160 м от современных значений.

С точки зрения палеогеографического развития в Северном Ледовитом океане существует два основных типа шельфов: гляциальный, подвергавшийся воздействию четвертичных покровных ледников, и перигляциальный – не подвергавшийся их существенному воздействию.

К первому типу относятся шельфы Норвежского и Баренцева морей, окраина Канадского Арктического архипелага и Гренландии; ко второму – шельфы арктических морей от Карского до Бофорта.

Послеледниковое потепление в Арктике началось позднее, чем в более низких широтах, с началом деградации полей многолетних малоподвижных морских льдов в Северной Атлантике и после окончательного распада ледниковых покровов, а около 5–6 тыс. лет назад уровень Мирового океана приблизился к его современному положению. Современная природная обстановка в Арктике сложилась к началу субатлантического периода (около 2500 лет назад).

Таким образом, практически вся площадь арктического шельфа являлась ареной широкомасштабных экзогенных преобразований. С регрессивными этапами развития рельефа связаны значительная переработка, дифференциация донных осадков гидрогенными (преимущественно волновыми и флювиальными) процессами, а также формирование различных ледниковых, волновых аккумулятивных и абразионных, эоловых и других экзогенных (скульптурных) форм рельефа [1, 2]. Благодаря деятельности покровных ледников существенные изменения претерпели первично тектонические и эрозионные формы рельефа, что привело к формированию фиордовых, фиардовых и шхерных берегов, а на шельфе – подводных фиордовых долин, окраинных желобов и т. д. Характерными признаками этих образований является переуглубленность, наличие порогов, боковых и напорных морен, связанных с аккумулятивной деятельностью ледников.

В настоящее время на прибрежном мелководье (подводном береговом склоне) доминируют волновые процессы, в то время как на более мористых участках преобладают процессы аккумуляции. Следует отметить, что на прибрежном мелководье Арктики существуют аномалии в формировании рельефа. Мощный припай, характерный для наиболее ледовитых морей Арктики (Восточно-Сибирское, море Лаптевых), резко ослабляет интенсивность волнения, что приводит к образованию крайне пологого берегового склона и распределению тонкодисперсных осадков (более характерных для глубоководных впадин). Подобный тип внутреннего шельфа, современная эволюция которого связана не только с волновыми процессами, но и с ледовым покровом, представляет собой яркий пример проявления зональных литолого-геоморфологических процессов в Арктике. В целом прибрежное мелководье является наиболее динамичной областью. За время сильных штормовых явлений эта область может быть кардинально преобразована в течение нескольких часов и суток, а в условиях продолжающегося потепления климата интенсивность подобных воздействий будет увеличиваться. Средняя и нижняя зоны шельфа характеризуются преобладанием современных аккумулятивных процессов, во многом связанных с процессами осаждения взвеси (нормального осадконакопления). Эти процессы контролируются течениями, циркуляционными вихрями, экстремальными волнениями и т. д. В сильно ледовитых районах необходимо отметить большую роль подледного осадконакопления (обширные районы Восточно-Сибирского моря). Средняя и нижняя части шельфа достаточно статичны, и изменения (динамика) рельефа происходят достаточно медленно. Исключение составляют: Горло Белого моря и Горло Чешской губы (где очень значительные приливные движения), а также Берингов пролив. Менее значительное воздействие на формирование рельефа отмечается в проливах (Лонга, Карские Ворота и др.), а также крупных эстуариях (Хатанга) и, вероятно, в крупных желобах в районе бровки шельфа. В результате потепления климата динамика рельефа в этих районах усилится, в то время как на большей части шельфа Арктики существенных изменений не ожидается.

Таким образом, рельеф шельфа не является стабильным. Подобные морфологические изменения будут продолжаться в будущем, причем в условиях потепления климата некоторые природные процессы будут усиливаться, а некоторые, наоборот, ослабевать. Из этого следует, что при изучении рельефа шельфа необходимо проводить комплексный анализ современных и древних экзогенных процессов совместно с их структурно-геологической принадлежностью.

Среди ведущих рельефообразующих факторов и процессов следует выделять активные, непосредственно принимающие участие в формировании рельефа того или иного участка, и пассивные, которые как бы предопределяют проявление активных и направляют общий ход их развития. К активным рельефообразующим процессам обычно относятся как современные, так и палеогеографические экзогенные факторы, а в некоторых случаях антропогенные, созданные конструктивной и деструктивной хозяйственной деятельностью человека. Эндогенные процессы относятся, как правило, к пассивным факторам.

На этом принципе создана новая морфогенетическая клас-

сификация форм и типов рельефа. Классификация предназначена специально для шельфа Арктики и отражает характер специфических природных процессов, присущих именно высоким широтам.

В классификации одновременно учитывается сложное взаимодействие различных природных факторов, определяющих происхождение и морфологическую выраженность различных форм рельефа, поэтому ее можно назвать «морфогенетической». Происхождение рельефа шельфа определяется не отдельно взятым процессом, а является результатом сложного взаимодействия современных, палеогеографических экзогенных процессов совместно с учетом структурно-геологической принадлежности. Используя данный подход, можно определить тренд (или направленность) изменения морфологии рельефа в будущем.

Подобной классификации до сих пор не было. Разработанные ранее классификации рельефа шельфа предназначались исключительно для мелкомасштабного картирования и для шельфов Мирового океана в целом. Поэтому значительный ряд форм и типов рельефа шельфа арктических морей не попадали под их рубрикации. Кроме того, в них, в зависимости от целей классификации, ведущее значение придавалось тому или другому признаку (группе признаков) – рассматривались либо преимущественно геологическое строение, либо палеогеографическое развитие, либо современные процессы. Первая и единственная попытка классификации форм рельефа шельфа на морфогенетических принципах была предпринята только в конце XX в. [см. 5], однако эта классификация была весьма генерализирована, создана для всего Мирового океана, и в ней не учтены региональные особенности формирования рельефа шельфа Арктики.

В разработанной классификации охарактеризован основной комплекс эндогенных (структурных) и экзогенных (скульптурных) форм рельефа, с учетом их специфических особенностей формирования и развития в полярной зоне (табл. 2, 3).

Экзогенный (скульптурный) рельеф шельфа, как правило, относится к мезорельефу и создан преимущественно наиболее активно действующими субаэральными и субаквальными процессами морфогенеза (табл. 3).

В настоящее время, в связи с возрастающим индустриальным освоением арктического шельфа, появилось большое количество данных о формах антропогенного рельефа и механизмах его формирования. По морфологической выраженности в рельефе антропогенные образования можно разделить на конструктивные, преимущественно положительные формы рельефа, связанные с отсыпкой грунта (различные фундаменты, свалки), и деструктивные (каналы, прорези различного назначения).

**Таблица 2. Основные типы структурно-скульптурного мега- и макрорельефа арктического шельфа**

| Ведущие рельефообразующие процессы | Типы и формы рельефа | Примеры |
|---|---|---|
| Структурно-тектонические | Поднятия-острова, мелководные банки, вытянутые гряды и валы (в пределах антиклиналей и брахиантиклиналей) | Архипелаг Земля Франца-Иосифа, о-в Врангеля, банка Геральда в Чукотском море и др. |
| | Протяженные желоба, депрессии и более мелкие западины, межостровные проливы, котловины (в пределах синклиналей и брахисинклиналей) | Пролив Лонга, Центрально-Чукотская впадина, Южно-Баренцевоморская впадина и др. |
| | Протяженные субгоризонтальные равнины (в пределах моноклиналей и флексур) | Участок шельфа Карского моря к северу от Обской и Енисейской губ, основная часть шельфа Восточно-Сибирского моря и др. |
| | Грабенообразные желоба, межостровные проливы (в пределах сбросовых и сбросово-блоковых структур-грабенов) | Желоба Медвежинский, Франц-Виктория, Георга, Святой Анны, Воронина, Седова и др. |
| | Подводные платообразные возвышенности, отдельные острова «останцевого типа» (в пределах взбросово-блоковых структур – горстов) | Структурно-блоковые возвышенности (Мурманская, Центральная, Персея); взбросово-блоковое поднятие Гусиной банки и др. |

**Таблица 3. Экзогенный (скульптурный) рельеф шельфа**

| Ведущие рельефообразующие процессы | Типы и формы рельефа | | Примеры |
|---|---|---|---|
| | Реликтовые | Современные | |
| Ледниково-экзарационные (гляциогенные) | Днища фиордов, ландшафты «бараньих лбов» (шхеры). Котловины выпахивания в основной (донной) морене | Рытвины, борозды выпахивания (волочения), созданные движущимся паковым льдом и айсбергами | *Реликтовые* – фиорды Новой Земли, Шпицбергена, Северной Норвегии; шхеры Белого моря; «бараньи лбы» Ботнического залива, архипелага Норденшельда (Карское море) и др. *Современные* – рытвины, борозды ледового выпахивания (волочения) – шельфы морей Чукотского, Бофорта и др. |
| Ледниково-аккумулятивные (гляциогенные) | Гряды и холмы боковых и конечных морен, друмлины | Боковые, донные морены, напорные валы и гряды | *Реликтовые* – морена Эгга у берегов Северной Норвегии; друмлины в Гудзоновом заливе *Современные* — моренные гряды в фиордах Новой Земли, на шельфе Шпицбергена и Гренландии, валы напора моря Бофорта, ложбины выпахивания в Баффиновом море |
| Термокарстовые (криогенные) | Депрессии вытаивания линз повторно-жильного льда, выполненные толщей голоценовых морских осадков | Вытянутые депрессии с крутыми бортами, не заполненные морскими осадками | *Реликтовые* – в Чукотском и Печорском морях. *Современные* – в Лаптевых и Восточно-Сибирском морях |
| Криодислокационные (криогенные) | Не известны | Складки, бугры пучения | Береговая зона Западного Ямала |
| Волновые абразионные | Поверхности и уступы подводных террас, абразионные останцы и гряды, абразионные равнины | Современные клифы и бенчи | *Реликтовые* – Печорское море. *Современные* – повсеместно |
| Волновые аккумулятивные | Подводные аккумулятивные формы, фиксирующие древние береговые линии | Современные береговые аккумулятивные формы (бары, косы, пересыпи, пляжи), подводные валы | *Реликтовые* – захороненные бары на шельфе у Новосибирских островов. *Современные* – повсеместно |
| Волновые абразионно-аккумулятивные | Поверхности и уступы подводных террас | Современный подводный береговой склон | *Реликтовые* – Печорское море *Современные* – повсеместно |
| Ледово-волновые | Не обнаружены | Современный выположенный подводный береговой склон, сформированный в условиях длительно не разрушающегося ледового покрова и кратковременного волнового воздействия в летний период | Восточно-Сибирское море |
| Преимущественно подледной аккумуляции | Погребенные аккумулятивные равнины | Подводные аккумулятивные равнины, сложенные глинистыми илами | *Современные* – шельф Восточно-Сибирского моря. *Реликтовые* – Центральная впадина в Баренцевом море |
| Приливо-отливные (аккумулятивные и деструктивные) | Не обнаружены | Песчаные волны и гряды, подводные приливные дельты, осушки, ватты. Приливные желоба, переуглубленные протоки лагун, ступенчатые приливные бенчи | Районы шельфа с высокими приливами (Северное, Баренцево, Белое моря) |

**Окончание табл. 3**

| Ведущие рельефообразующие процессы | Типы и формы рельефа | | Примеры |
|---|---|---|---|
| | Реликтовые | Современные | |
| Торрентогенные аккумулятивные (сформированные в условиях мощных квазистационарных течений) | Не обнаружены | Конусы выноса, сформированные при разгрузке влекомого материала в условиях резкого ослабления потока мощных течений | Южная часть Чукотского моря в прилегающих к Берингову проливу районах |
| Торрентогенные эрозионные | Не обнаружены | Субгоризонтальные равнины практически без современных осадков, сформированные в условиях мощного промывного режима | Берингов пролив |
| Флювиальные | Прадолины и русла палеорек, древние дельты, древние речные террасы | Авандельты, предустьевые бары, русловые борозды | *Реликтовые* – палеодолина Хоуп (Чукотское море). *Современные* – авандельта Лены |
| Флювио-гляциальные | Прадолины и ложбины стока талых вод, зандровые равнины, системы озов и камы | Отсутствуют | Шельфы Норвежского, Гренландского морей |
| Гравитационные | Оползни | Оползни | Шельф Баренцева моря |
| Антропогенные конструктивные | Отсутствуют | Положительные формы рельефа, связанные с отсыпкой грунта, искусственные острова, фундаменты портовых сооружений, нефтяных вышек и пр. | Шельф Норвежского моря |
| Антропогенные деструктивные | Отсутствуют | Искусственные прорези и подходные каналы портов, устьев рек, фарватеры в заливах | На подходах к портам в условиях мелководья |

## 2. Цифровая модель рельефа

Использование классификации рельефа шельфа возможно при картографировании в любом масштабе. На основе комплексного анализа природных процессов разработана методика для создания цифровой модели рельефа. По территориальному охвату цифровая модель рельефа относится к глобальной, или планетарной, интегрированной ГИС.

Цифровые модели открывают огромные возможности и позволяют строить цифровые карты любого масштаба без потери первоначальной нагрузки и информативности, а также различные 3-мерные изображения и анимации, проводить совмещение с другими данными, выполнять сравнительный математический анализ и т. д. Особое значение цифровая модель рельефа имеет для геоакустических исследований.

Однако до сих пор при составлении карт не учитываются происхождение рельефа, его структурная принадлежность, палеогеографические условия формирования и современные особенности развития, не привлекаются имеющиеся геофизические, геологические, геоморфологические и другие данные и не проводится в достаточном объеме их комплексный анализ для решения конкретных задач. Кроме этого, как правило, производится механическая интерполяция глубин по регулярной (или нерегулярной) сетке отметок глубин. Для многих еще до изобретения эхолота было очевидно, что рисунок изобат, построенный на формально-геометрическом принципе, не отображает действительной морфологии морского дна.

Вместе с тем ручная обработка карт и определение происхождения рельефа на предварительной стадии обработки материала имеют принципиальное значение и являются необходимым условием морского картирования рельефа, включая создание цифровой модели. Без понимания генетических особенностей картографируемых форм невозможно их объективное и обоснованное изображение. Механическая компьютерная обработка массива глубин

не выявляет особенностей и, главное, генезиса рельефа.

Методика создания цифровой модели рельефа состоит из следующих этапов:

1) выбор картографической основы;

2) подготовка авторских оригиналов карт к созданию цифровой модели – ручная обработка карт;

3) проведение комплексного анализа имеющегося геофизического, геологического, геоморфологического материала, включая эхолотные профили натурных исследований, с целью выявления морфоструктурных особенностей и генезиса рельефа;

4) сканирование информации;

5) обработка растровых образов карт, включая изменение цветовой модели и ориентации изображения (например, с помощью растрового редактора Corel Photo Paint 12);

6) пересчет и построение координатных сеток (например, в Auto Cad Map);

7) векторизация объектов батиметрических карт (например, при помощи специализированного векторизатора Easy-Trace 7.0);

8) экспорт полученных результатов в проекты ArcView 3.2a;

9) трансформация векторных слоёв в географические координаты в приложении ArcView Register and Transform;

10) пересчет векторных слоёв отдельных листов карт из исходной проекции Меркатора с различными параметрами широт истинного масштаба в проекцию North_American_1927, Spheroid Clarke_1866 (decimal degrees) при помощи модуля ArcView Projection Utility;

11) сбивка листов векторной графики;

12) редактирование, внесение изменений, геометрическая корректировка цифровых моделей карт, проверка информации атрибутивных таблиц в ArcView 3.2a и создание цифровой модели рельефа (рис. 1, 2).

В ходе работ использовались:

- *аппаратные средства* – вычислительный комплекс на базе процессоров Pentium IV с широкодиагональными мониторами, обеспечивающими наибольшую точность и масштабность изображения; широкоформатный сканер, позволяющий сканировать карты размером A0; устройство вывода на печать – плоттер формата A0, а также принтеры различных типов;
- *пакет программ*, позволяющий обрабатывать растровые изображения, векторизировать и цифровать данные, привязывать их к координатной сетке, редактировать и составлять цифровые карты;
- *навигационные карты* различных масштабов (вдоль берега анализировались карты масштаба 1:100 000, мористее – 1:200 000, а в центральных частях акватории – 1:500 000);
- *данные натурных исследований* (профили эхолотирования морского дна и геоакустического зондирования, а также геологические данные).

Укажем ряд областей использования предлагаемой методики.

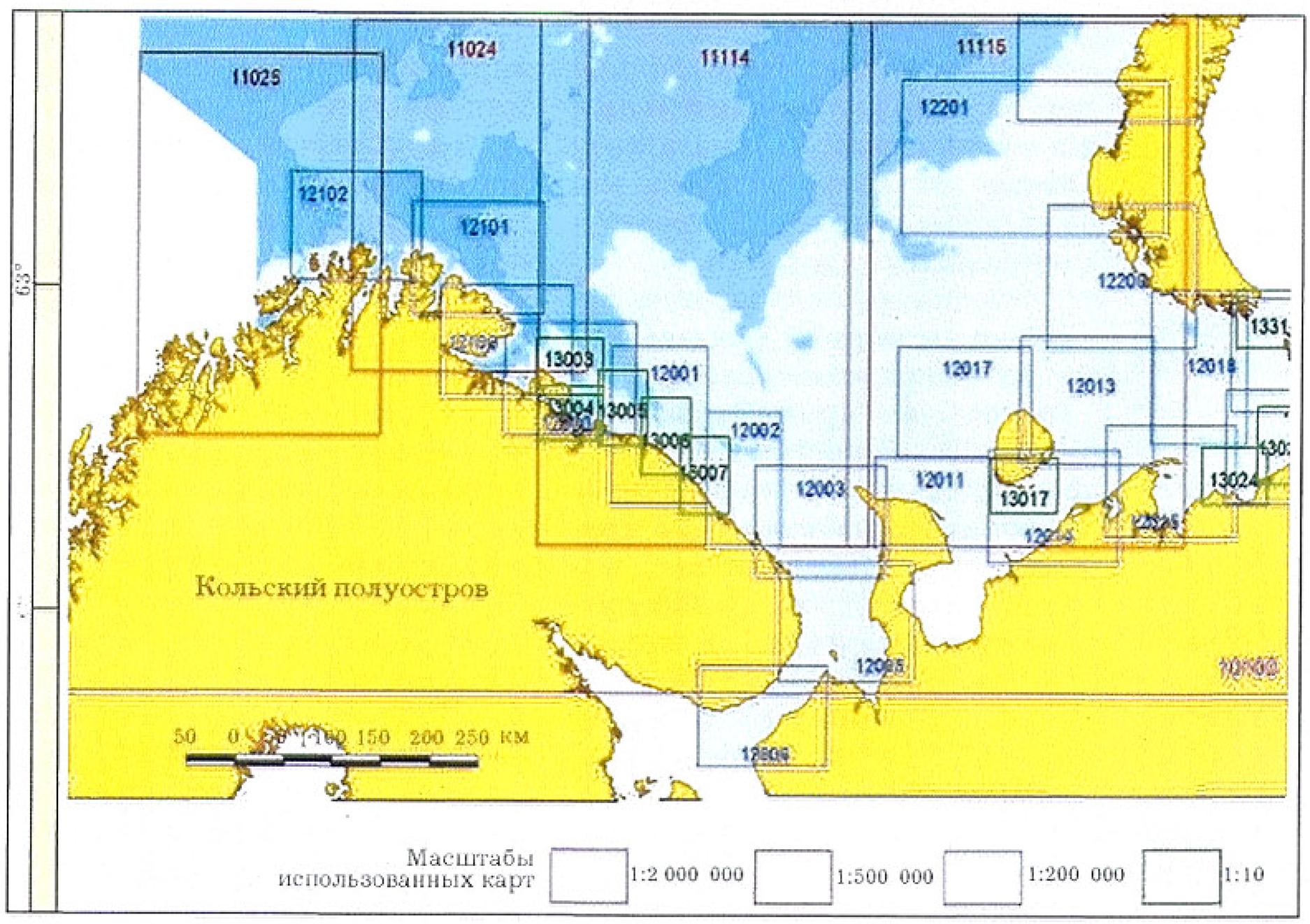


Рис. 1
Схема использования листов навигационных карт

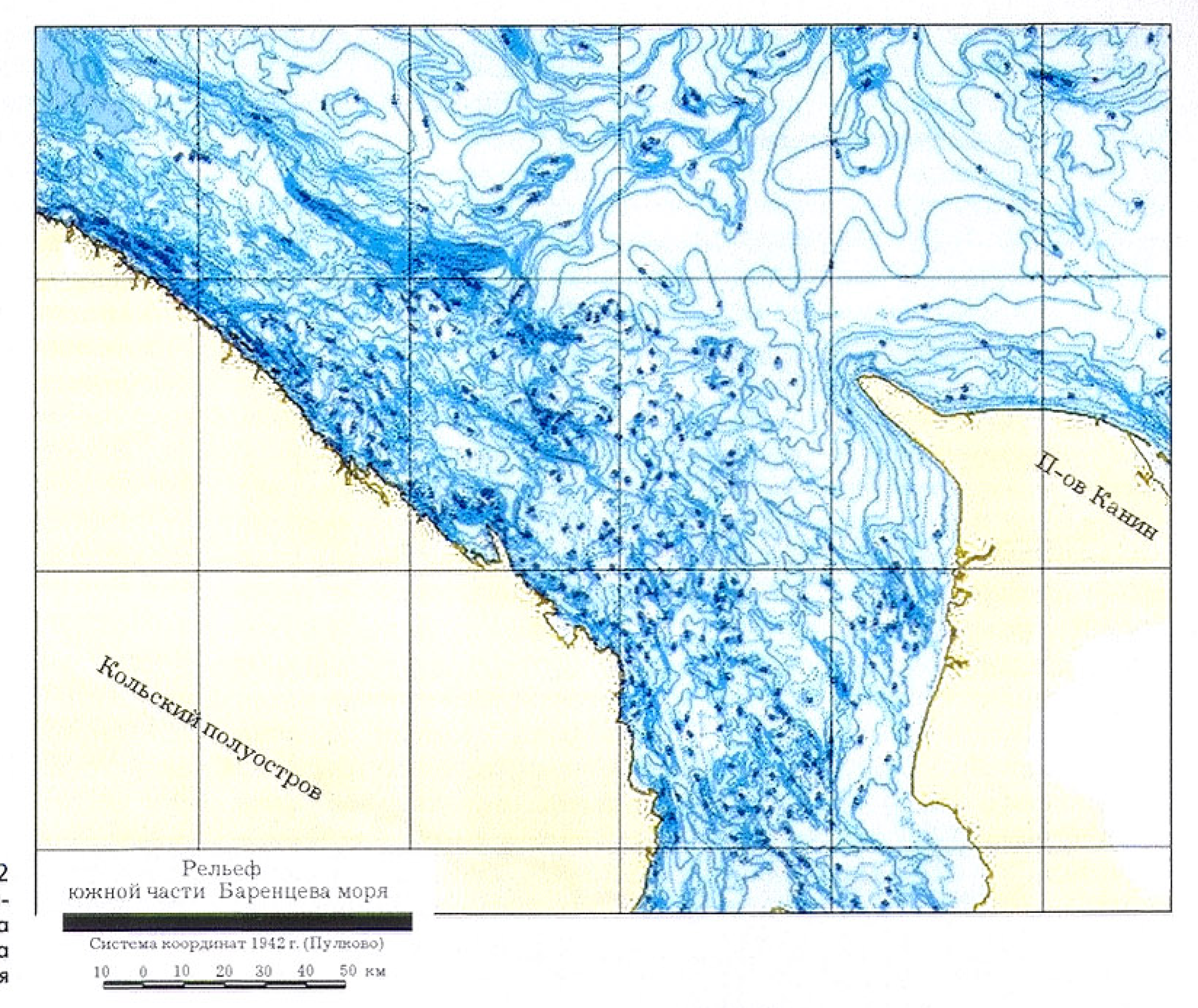


Рис. 2
Фрагмент генерализированного рельефа южной части шельфа Баренцева моря

В области фундаментальных исследований – при разработке морских карт нового качества с учетом все возрастающих требований к их содержанию, проведению океанологического мониторинга на новом уровне.

В области коммуникационных технологий – в обмене больших массивов данных через Интернет, а также создании, как составной части, всемирного банка данных.

В области математической картографии – при выборе оптимальных проекций для специальных карт с возможностью совмещения морских и сухопутных карт, при разработке новых, более прогрессивных приемов составления морских карт.

В прикладной области – в навигации, при инженерно-строительных работах, проведении аварийно-спасательных мероприятий. Особое значение цифровая модель рельефа имеет для геоакустических исследований и расчетов.

Развитие подобных исследований возможно только на стыке разных отраслей знаний – геоморфологии, геологии, геофизики, картографии, акустики и математического программирования.

Проверка сопоставления цифровой модели рельефа с натурными данными проводилась в 21-м рейсе НИС «Академик Сергей Вавилов» в одном из районов южной части Баренцева моря в период с 5 по 16 июня 2005 г. Технические средства и средства измерений включали штатные системы НИС «Академик Сергей Вавилов», в том числе аппаратуру спутникового позиционирования – GPS, РЛС, бортовой комплекс средств связи; параметрический профилограф *Atlas Parasound*, гидрографический и навигационный эхолоты и зонды для измерения гидрофизических характеристик.

Натурный эксперимент проводился в условиях резко расчлененного рельефа с перепадом глубин более 100 м. Сигналы эхолота-профилографа вместе с навигационной информацией, временем и глубиной записывались в цифровом виде. При обработке сигнала учитывалась реальная поправка на прохождение по профилю скорости звука. В тех же координатах и с той же частотой была сделана выборка глубин из созданной модели рельефа. Фрагменты сравнения профилей рельефа морского дна, полученных в ходе натурного эксперимента и по геоакустической модели (на различных галсах), представлены на рис. 3.

Среднее значение разностей измеренного эхолотом рельефа и рельефа, полученного из базы данных, составило около 4 %.

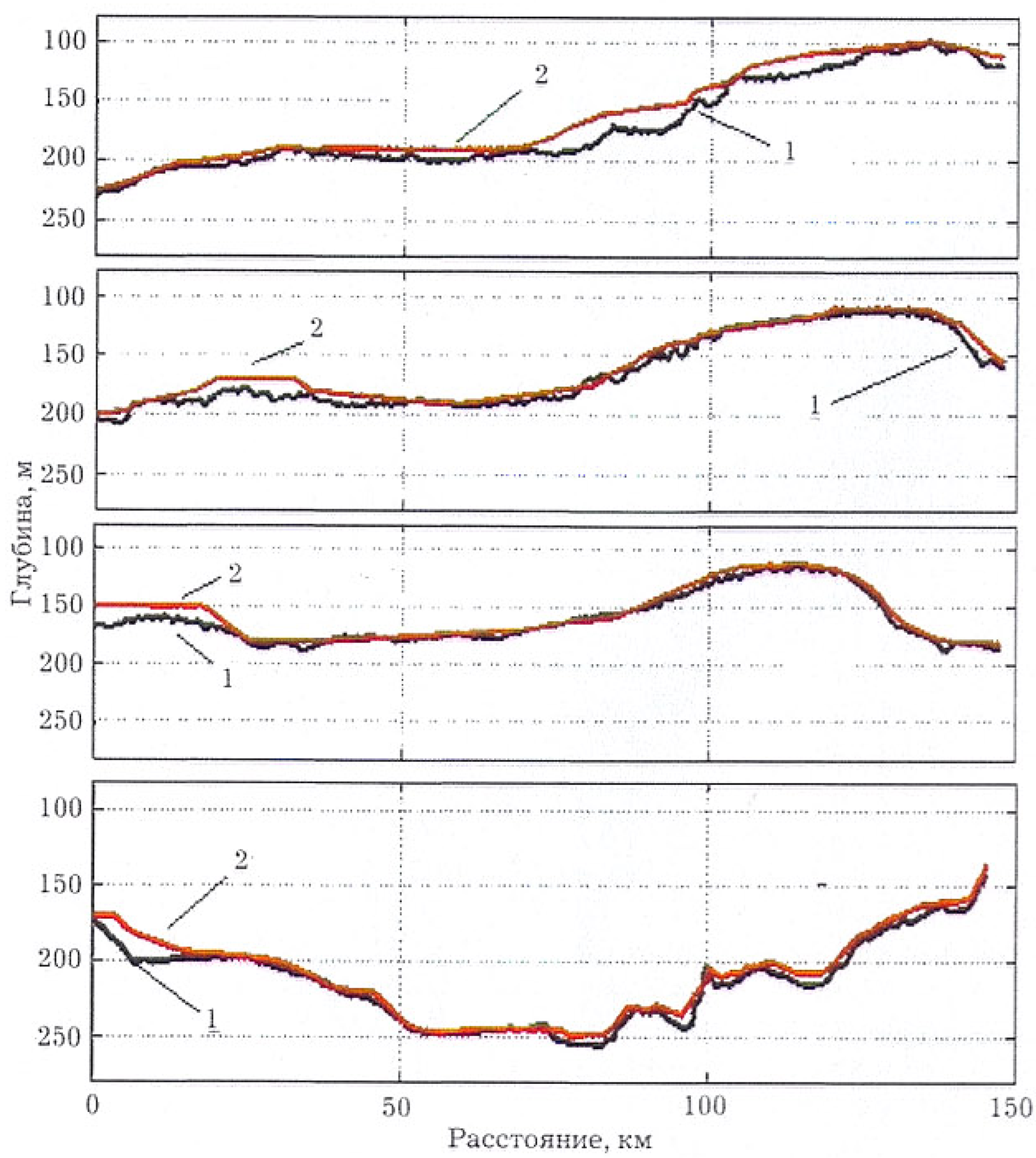


Рис. 3. Фрагменты профилей рельефа морского дна. 1 – профиль, полученный в ходе натурного эксперимента; 2 – профиль из базы данных геоакустической модели

В указанную разность входят следующие погрешности:

- инструментальная (система спутникового позиционирования судна, параметрический профилограф);
- картографическая (использовались навигационные карты, составленные по гидрографическому промеру прошлых лет без навигационной привязки хорошей точности и при отсутствии навигационных систем типа GPS);
- гидрографическая – в условиях эксперимента учитывалось изменение скорости звука по профилю воды, а при составлении навигационных карт скорость звука считалась постоянной, 1500 м/с (по этой причине измеренные глубины превышают глубину по модели).

Вместе с тем сравнение данных профилирования морского дна при проведении натурного эксперимента с аналогичными профилями, построенными по модели, свидетельствует о хорошем соответствии в строении генерального рельефа. Таким образом, разработанные принципы построения модели рельефа, основанные на морфогенетических и геохронологических принципах, являются достоверными.

Следует отметить, что для геоакустического моделирования следует использовать всю имеющуюся информацию о морском дне, не только о геоморфологических свойствах, но и об акустических, геологических и геофизических параметрах морского дна. Необходимы систематизация и анализ всех имеющихся данных, а также прогнозирование недостающей информации.

## 3. Об использовании цифровой базы данных геоакустических характеристик (ЦБГА) для гидроакустических средств

Учет характеристик дна необходим практически для всех гидроакустических средств. Выделим из них две группы, решающие различные задачи:

а) шумопеленгаторные системы (ШП) и гидролокаторы (ГЛ), работающие по трассам в десятки и сотни километров;

б) эхолоты, профилографы, гидролокаторы бокового обзора и другие системы «ближней» локации, предназначенные для получения информации о морском дне.

Требования по точности построения ЦБГА в части структуры рельефа и придонных слоев, классификации придонных слоев для этих групп различны.

Для ***систем ШП и ГЛ***, как показано в [4–6] и в других работах (любой список будет неполным), рельеф и импедансные характеристики дна существенно влияют на дистанции обнаружения целей, а также на классификационные признаки цели. В то же время для систем дальнего действия достаточно знать лишь рельеф дна и импеданс верхнего слоя, но данные необходимы по всей трассе прохождения сигнала. Проблема состоит в обеспечении данными ЦБГА по всей трассе, но при этом необходимо учесть, что зоны работы систем дальнего обнаружения охватывают практически весь Мировой океан.

***Эхолоты.*** Точность современных батиметрических

эхолотов достаточно высока. Основные погрешности при определении дистанции до дна связаны со знанием вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). В настоящее время эхолоты являются, видимо, единственным средством создания электронных карт рельефа Мирового океана. При введении в программное обеспечение эхолотов поправок на ВРСЗ (что было сделано в указанных выше экспериментах) результаты эхолотирования могут считаться контрольными для формирования ЦБГА по рельефу.

***Акустические профилографы.*** Назначением профилографов является отнесение материала слоя к определенному классу по принятой классификации и определение геометрических характеристик однородного по классу слоя, т. е. толщины слоя (иногда называют «мощность слоя») и его очертаний в горизонтальной плоскости с привязкой к географическим координатам. Требования к подробности определения геометрических форм (рельефа и границы придонных слоев) и импедансных характеристик определяются решаемыми задачами, но в целом значительно выше, чем для систем ШП и ГЛ. Принципиально возможно (и такие системы существуют [7]) совместить профилирование с эхолотированием, так что точность «оконтуривания» дна и придонных слоев у профилографов достаточно высока. Но при определении толщины слоя $\Delta h$ неизвестной является скорость звука $c_i$, и, следовательно, толщина слоя с номером $i$ также является неопределенной. Скорость звука в слоях и другие классификационные признаки слоев определяют из анализа характеристик эхосигнала (кроме времени прихода) аналитически, с помощью обработки по специальным алгоритмам [8]. Эти алгоритмы ориентированы на некие усредненные данные, поэтому профилографы требуют калибровки путем сопоставления их данных с данными бурения или на специальных полигонах. Недостатки этих способов калибровки и как следствие неопределенность данных, получаемых дистанционным зондированием:

– бурение требует специальных средств, а данные по буровым колонкам локализованы;

– создание полигонов с требуемой придонной структурой слоев представляется проблематичным.

Таким образом, оба рассматриваемых способа – цифровой базы данных и акустического профилирования – имеют взаимно дополняемые достоинства, сочетание которых может исключить присущие им недостатки. Акустическое зондирование дает возможность уточнения геометрии рельефа морского дна и его слоев, а геоморфологическое моделирование позволяет уточнить геологическую структуру, не всегда успешно интерпретируемую акустическими методами. В [9] предложена структура, в которой ЦБГА интегрирована в программное обеспечение профилографа. При этом решаются задачи, актуальные и для профилографа (по основному использованию), и для ЦБГА:

а) осуществляется оперативная калибровка профилографа по данным ЦБГА в части классификационных признаков слоев в акватории, где известна ЦБГА;

б) уточняется ЦБГА глубинных слоев, чего невозможно достичь обычным эхолотированием;

в) создается задел формирования ЦБГА, если профилирование с откалиброванным профилографом ведется в акватории, где отсутствует или недостаточно подробна ЦБГА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионин А.С. Рельеф шельфа Мирового океана. М.: Наука, 1992.

2. Nikiforov S., Pavlidis Yu., Rachold V., Gracheva M. Bathymetric seabed mapping based on GIS-technology // Berichte zur Polar- und Meeresforschung. 2004. N 482. P. 41–45.

3. Nikiforov S., Pavlidis Yu., Rachold V., Aibulatov D., Artemiev A. Bathymetric seabed mapping in GIS-format // Abstracts of Arctic Coastal Dynamics, 5th International Workshop, Oct. 13–16, 2004. Montreal, 2004. P. 27.

4. Авилов К.В. Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали, и их численное решение // Акуст. журн. 1995. № 1. С. 5–12.

5. Ионин А.С., Павлидис Ю.А., Юркевич М.Г. Морфогенетическая классификация форм рельефа шельфа Мирового океана // Современные процессы осадконакопления на шельфах Мирового океана. М.: Наука, 1990. С. 24–50.

6. Авилов К.В. Современные численные модели звуковых полей в Океане и их приложение к решению практических задач гидроакустики // Тр. VIII Междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2006. С. 5–10.

7. Atlas Parasound DS-3: проспект фирмы Atlas Hydrographic (ФРГ), 2004.

8. LeBlanc L.R., Mayer L., Rufino M., et al. Marine sediment classification using the chirp sonar // JASA. 1992. V. 41, N 1. P. 57–65.

9. Пат. РФ на полезную модель № 58734. МПК G01V 1/00. Акустический профилограф. Заявл. 20.07.2006; опубл. 27.11.2006.