

УДК 551.465

## МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И ТИПИЗАЦИЯ РЕЛЬЕФА ШЕЛЬФА

© 2018 г. С. Л. Никифоров<sup>1</sup>, Н. О. Сорохтин<sup>1</sup>, С. М. Кошель<sup>2</sup>, Л. И. Лобковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия  
e-mail: nikiforov@ocean.ru

Поступила в редакцию 23.03.2016 г., после доработки 26.04.2016 г.

Проведенный анализ морфометрических характеристик поверхности на примере дна Баренцева моря показал, что выделенные группы впадин по целому ряду параметров согласуются с геодинамическими построениями и позволяют по типу морфологии склонов судить об их происхождении. Так, Норвежско-Мезенская система рифтов, грабены Воронина, Святой Анны и Франц-Виктория были сформированы за счет растяжения литосферы. Южно-Баренцевская впадина и Медвежинско-Эджинская зона прогибов образовались на стадии зарождения литосферной плиты за счет столкновения нескольких островных дуг и зажаты между останцами древней океанической коры. Выбор геоморфологического метода изучения рельефа дна связан с тем, что наука “геоморфология” изучает в комплексе рельеф дна (морфологию), его происхождение и возраст. Адекватное восстановление причинно-следственных связей экзогенных и эндогенных процессов также позволяет обосновать прогноз вероятных катастрофических событий на морском дне и дать им количественную оценку. Результаты математических расчетов подтвердили основные выводы геодинамических построений в Баренцевоморском регионе.

DOI: 10.7868/S0030157418020120

### ВВЕДЕНИЕ

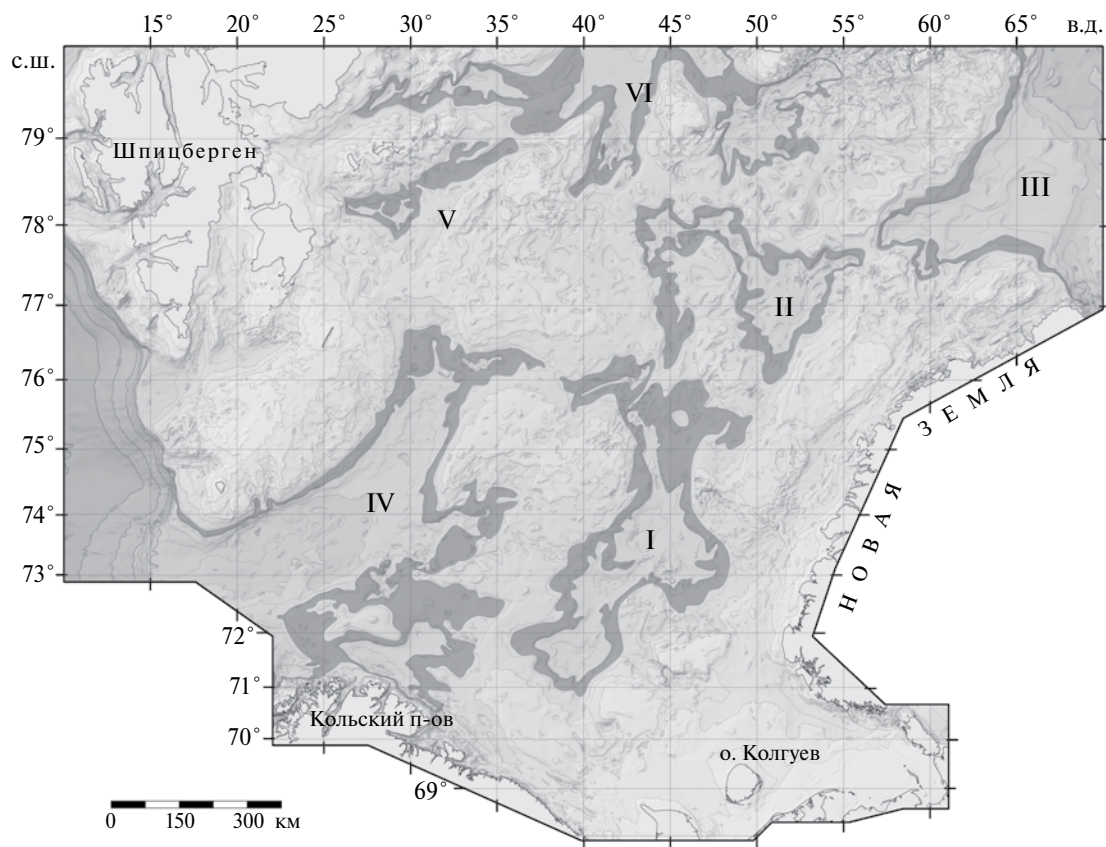
Исследование структурного рельефа дна шельфовых областей позволяет определить особенности гетерогенного строения фундамента и уточнить геодинамическую природу погребенных под осадочным чехлом участков литосферы. Примером могут служить многочисленные впадины Баренцева моря, происхождение которых не позволяет однозначно их относить к наложенным рифтогенам или впадинам, сформированным на стадии консолидации литосферной плиты.

Геодинамические и морфоструктурные построения с описанием развития и изменения структурного основания земной коры за большие (даже по геологическим меркам) временные интервалы всегда вызывают полемику исследователей [1, 2, 6–8, 10–12 и др.]. Это связано как с недостаточным количеством первичного материала, так и разной их трактовкой, особенно в комплексе. В связи с этим, авторы предприняли попытку проверить полученные выводы с помощью геоморфологических методов. Для проведения морфоструктурного анализа ранее была создана цифровая модель рельефа (ЦМР), на основе которой в выделенных областях был рассчитан комплекс морфометрических параметров (углы наклона, профильная и касательная кривизны) и построены гистограммы их распределения.

Попытки изучения западного шельфа Баренцева моря с помощью анализа углов наклона были предприняты в начале текущего века [3]. Однако эти исследования основывались на не совершенной глобальной модели топографии Земли выпуска 1995 года [16], а аналитические вычисления были ограничены только расчетом распределений углов наклона. Нами предлагается другая методика морфоструктурного анализа на основе собственной ЦМР дна, которая, в свою очередь, также была составлена на основе иных методических решений.

### МЕТОДИКА И ОБСУЖДЕНИЕ

Рельеф дна, с некоторой долей условности, создан эндогенными и экзогенными процессами. Геологическими структурами определяется положение крупных форм рельефа, таких как синклинальные подводные впадины, антиклинальные и брахиантиклинальные подводные возвышенности, равнины, флексурные уступы и т.п. Формирование экзогенного рельефа, наоборот, связано с определяющим влиянием современных или древних субаквальных (субаэральных) процессов морфогенеза (климатические, гидрофизические и др.). В случае экзогенных форм рельефа дна связь между их морфологией и происхождением, а также возрастом хорошо установлена. Это нашло свою отражение при описании и анализе различных моренных



**Рис. 1.** Основные наиболее крупные структурные элементы Баренцева моря: I – Южно-Баренцевская впадина; II – Северо-Баренцевская впадина; III – желоб Святой Анны; IV – Медвежинско-Эджинская зона прогибов; V – Прогиб Ольги; VI – желоб Франц–Виктории.

образований, подводных дельт и баров, затопленных русел рек и лагун и многих других образований на шельфе. В настоящее время существует стойкое убеждение, что все геологические структуры глубоко переработаны экзогенными рельефообразующими процессами и их первичный облик уже давно утрачен. Отчасти это утверждение правильно, но не всегда и не везде, например, на шельфе Баренцева моря. С геоморфологической точки зрения он скорее относится к бордерленду, так как имеет большую контрастность рельефа с перепадом высот более 300 метров. Здесь глубочайшие структурные впадины соседствуют с не менее ярко выраженными в рельефе структурными поднятиями. Однако не все участки котловин по своим параметрам подходят для проведения морфоструктурного анализа. Так, днища котловин в настоящее время перекрыты мощным слоем осадков. Данное положение относится и к верхним частям склонов, где структурный рельеф значительно изменен за счет перемещения материала с поднятий на более низкие гипсометрические уровни. Наиболее удачными участками для морфоструктурного анализа являются срединные части склона, наименее

подверженные экзогенной переработке. Для “чистоты эксперимента” эмпирическим путем был подобран единый интервал глубин для склонов всех котловин, а именно 260–320 м (рис. 1).

Для проведения морфоструктурного анализа за основу была взята разработанная авторами цифровая модель рельефа дна Баренцева моря и созданная по методике, описанной в [4, 5 и др.] (рис. 2). Основой ЦМР дна являлись навигационные карты различного масштаба. Далее на навигационных картах вручную проводились дополнительные изобаты. Несмотря на большую трудоемкость, такой подход является необходимым условием подготовки исходных данных для дальнейшего создания цифровой модели рельефа, так как в настоящее время еще не разработаны методы компьютерного анализа массивов глубин, позволяющих выявлять особенности, а, главное, генезис рельефа. Сечение изобат выбиралось из условия наиболее полного отражения имеющихся эндогенных и относительно небольших по размерам экзогенных форм рельефа. Затем проводилось сканирование карт, обработка их растровых образов, векторизация изобат и создание атрибутивных таблиц, трансформирование

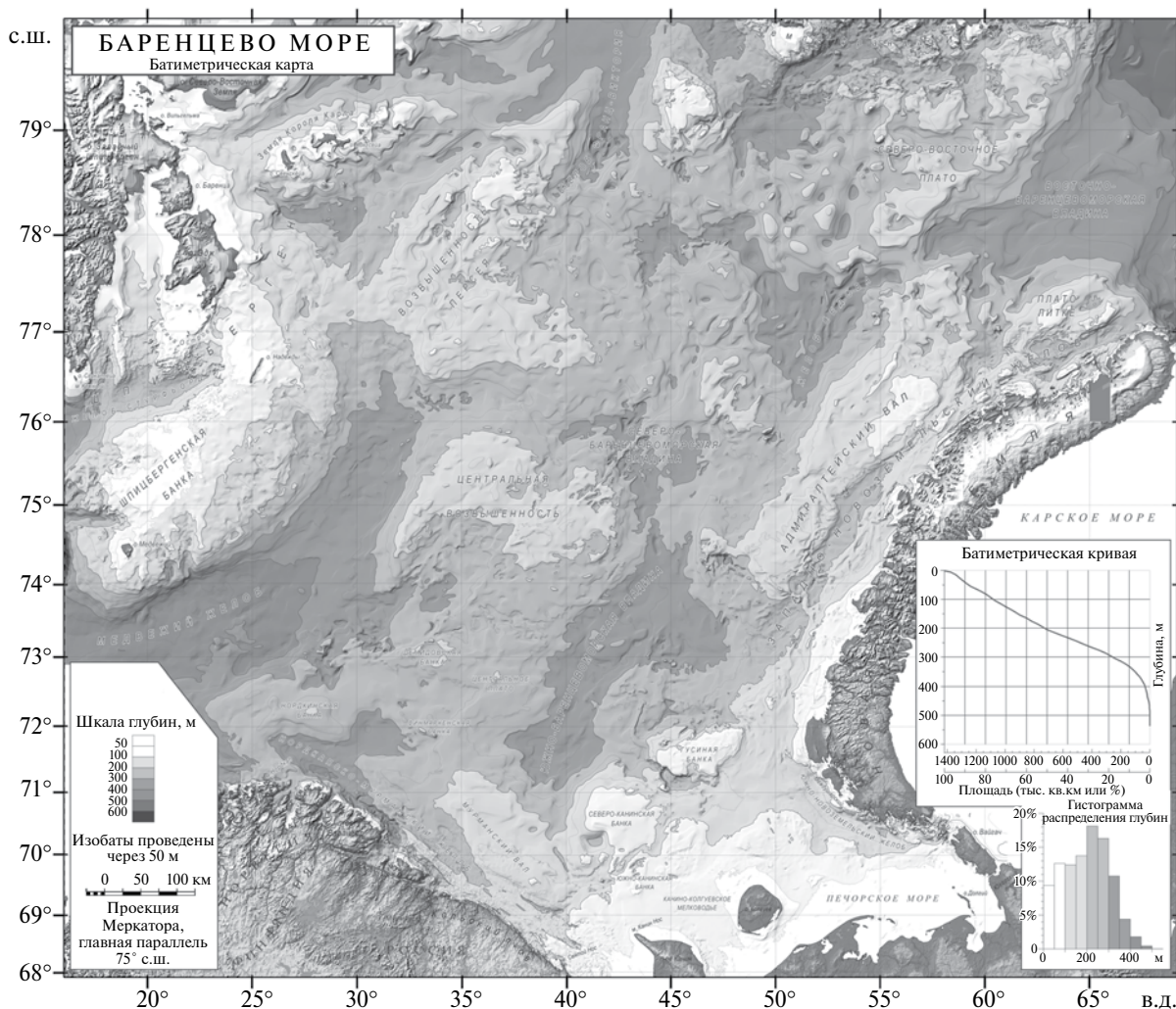


Рис. 2. Батиметрическая карта Баренцева моря, созданная на основе цифровой модели рельефа дна.

векторных слоев из проекции карты в географические координаты, а также редактирование и сшивание листов, коррекция геометрии и атрибутов. При создании ЦМР важен выбор алгоритма, который позволил бы сохранить в модели выраженные в исходных изобатах формы рельефа дна с максимальной детальностью. Был использован оригинальный, разработанный и реализованный авторами алгоритм, основанный на быстром вычислении расстояний до двух ближайших изобат разного уровня. Его главная особенность – интерпретация изолиний как векторных линейных объектов. Сравнение глубин из построенной цифровой модели ЦМР дна с глубинами, измеренными при проведении эхолотных промеров в натуральных условиях, показало их хорошее соответствие [4, 5 и др.]. Данные методические решения и собственно ЦМР дна Баренцева моря являются собственной разработкой авторов.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) дна морских акваторий является важнейшим компонентом базы пространственных данных геоинформационных систем. Данные по свойствам рельефа дна необходимы как для решения фундаментальных задач, так и широкого круга прикладных исследований. Генеральные модели рельефа дна являются основой для определения “ключевых” участков шельфа для их дальнейшего детального изучения, включая промер глубин. При промышленном освоении шельфа они необходимы на стадии обоснования, планирования и определения георисков, разведки и строительства, а на стадии эксплуатации должны служить основой для проведения мониторинга, обеспечения мероприятий по отражению возможных угроз, включая природные и т.п. Данный подход наиболее адекватен для оптимизации материальных затрат, учитывая большую стоимость натуральных изысканий. Необходимо учитывать и то, что именно генеральные модели сводят



к минимуму возможные и неизбежные ошибки на всех стадиях изысканий и эксплуатации. ЦМР дна также предоставляет широкие возможности для математического анализа различных параметров, включая геолого-геоморфологические.

Батиметрическая карта на основе ЦМР дна Баренцева моря составлена в проекции Меркатора с главной параллелью  $70^\circ$ , шаг сетки модели в этой проекции составляет 500 м (рис. 2). На карте были выделены участки, подлежащие морфоструктурному анализу (на рис. 1 они выделены темным цветом). Далее по каждому склону в рамках выделенных областей были рассчитаны гистограммы распределения углов наклона, профильной кривизны и касательной кривизны.

Если с таким морфометрическим показателем, как угол наклона, все достаточно хорошо знакомы, то кривизны стали широко использоваться в морфометрическом анализе сравнительно недавно (одной из первых фундаментальных работ, в которой была выполнена классификация форм земной поверхности на основе значений профильной и касательной кривизн была работа [13]).

Профильная кривизна (profile curvature)  $k_s$  — это кривизна нормального сечения поверхности, включающего вектор ускорения силы тяжести в данной точке (фактически, это кривизна линии тока, проходящей через эту точку). Она является мерой относительного замедления (ускорения) потоков вещества, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием силы тяжести. При отрицательных значениях вертикальной кривизны потоки ускоряются, а при положительных — замедляются. Геометрически знак вертикальной кривизны отражает вогнутость (при положительных значениях) и выпуклость (при отрицательных) поверхности вдоль направления градиента.

Касательная кривизна (tangential curvature)  $k_t$  — это кривизна нормального сечения земной поверхности в данной точке плоскостью, ортогональной плоскости, указанной в определении профильной кривизны. Фактически (с поправкой на синус угла наклона) это кривизна изолинии поверхности в данной точке. Является мерой конвергенции потоков, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием силы тяжести. При положительных значениях горизонтальной кривизны наблюдается конвергентное поведение потоков (линии тока сближаются), при отрицательных — дивергентное (линии тока расходятся). Геометрически знак горизонтальной кривизны отражает вогнутость (при положительных значениях) и выпуклость (при отрицательных) поверхности в направлении, перпендикулярном направлению градиента.

Перечисленные морфометрические показатели вычисляются по формулам [13, 14]:

$$s = \frac{360^\circ}{2\pi} \arctg \sqrt{p}, \quad k_s = \frac{f_{xx}f_x^2 + 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_y^2}{p\sqrt{q^3}},$$

$$k_t = \frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_x^2}{p\sqrt{q}},$$

где  $f_x = \partial f / \partial x$ ,  $f_y = \partial f / \partial y$ ,  $f_{xx} = \partial^2 f / \partial x^2$ ,  $f_{yy} = \partial^2 f / \partial y^2$ ,  $f_{xy} = \partial^2 f / (\partial x \partial y)$ ,  $p = f_x^2 + f_y^2$ ,  $q = 1 + p$ ,  $s$  — угол наклона в градусах,  $f = f(x, y)$  — функция двух переменных, описывающая рельеф.

Ввиду того, что исследуемые морфометрические показатели имеют распределение с ярко выраженным пиком около нулевых значений, визуальное сравнение гистограмм не представляется возможным. Для того, чтобы разница в распределении значений показателей была заметна, требуется выполнить их преобразование, позволяющее выровнять (или привести к нормальному виду) гистограмму. Нами преобразование выполнялось по формуле, предложенной в работе [15]:

$$t' = \text{sign}(t) \cdot \ln(1 + 10^n |t|),$$

где  $t$  — значение преобразуемой величины,  $n$  — параметр преобразования,  $t'$  — преобразованное значение. Значения  $n$  подбирались интерактивно для каждого из показателей таким образом, чтобы наиболее полно выявить различия в их распределении для склонов разных впадин. В итоге для углов наклона было выбраны значения  $n = 4$  и  $n = 3$  (два варианта оставлены для иллюстрации действия параметра  $n$  на вид распределения), а для обеих кривизн — значение  $n = 7$ .

Следует также отметить, что производные в приведенных формулах вычисляются для сеточной функции, полученные значения являются усредненными на участке размером порядка 1000 м (удвоенный шаг сетки ЦМР).

Исходя из геодинамических построений [9 и др.], можно сделать вывод, что в Баренцевом море структуры Норвежско-Мезенской системы рифтов, желоба Святой Анны и Франц-Виктория отличаются по генезису от Южно-Баренцевской впадины и Медвежинско-Эджинской зоны прогибов. Данный вывод основан на том, что крупное прогибание фундамента Баренцевоморской плиты и формирование Восточно-Баренцевоморской впадины с одной стороны вызвано развитием краевого прогиба в литосфере, а с другой — отражает сильную неоднородность толщины коры. В условиях геодинамического развития крупного прогибания фундамента, образующиеся впадины обычно имеют достаточно узкую и вытянутую форму. Часто, при развитии процессов коробления чехла, возникают

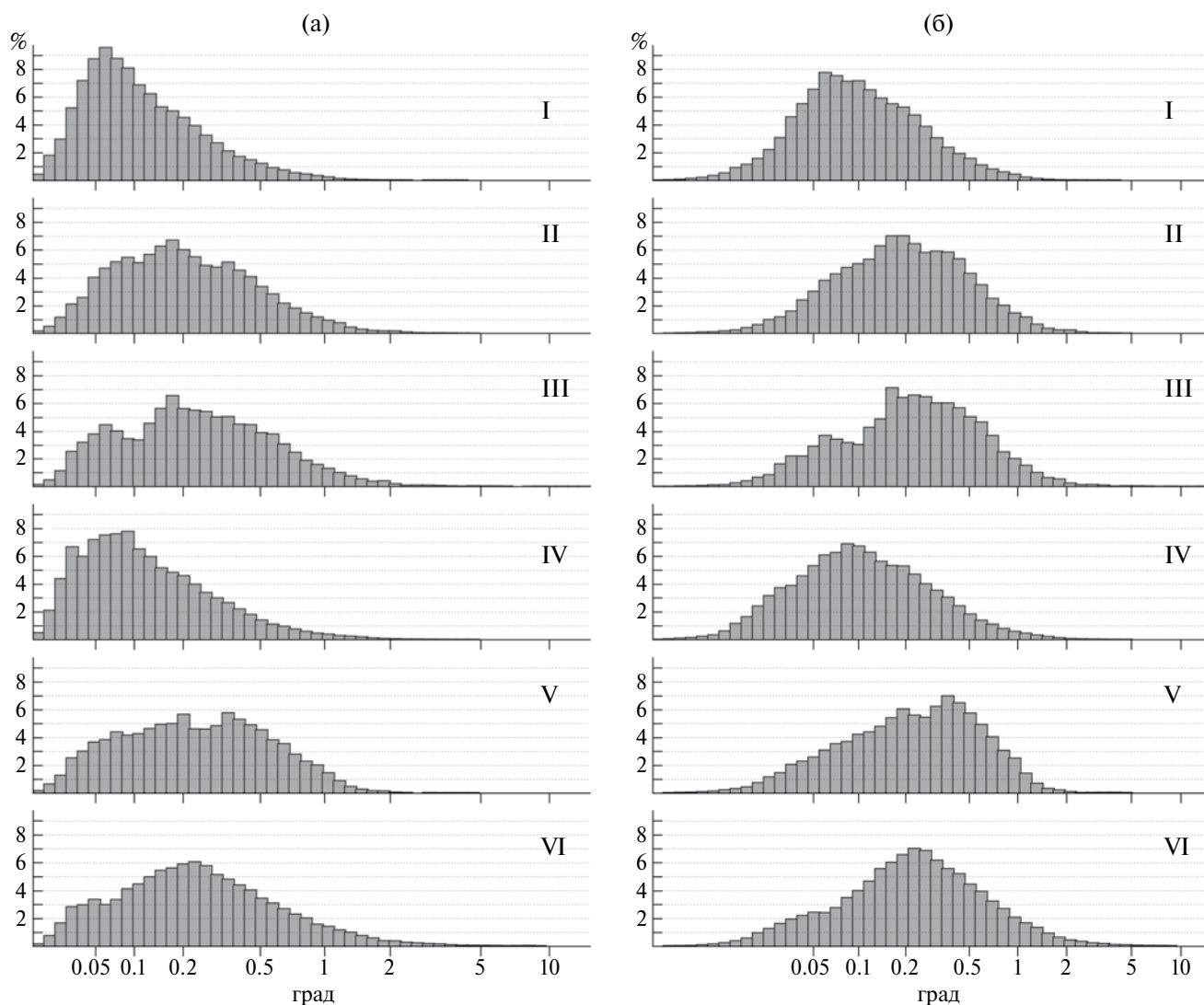


Рис. 3. Гистограммы распределения углов наклона на склонах впадин при: (а) –  $n = 3$ , (б) –  $n = 4$ .

характерные седловидные образования, которые разделяют их на сегменты. В качестве примера такой структуры можно рассматривать Лудловскую седловину, которая разделяет Восточно-Баренцево-морскую впадину на Северо- и Южно-Баренцевскую впадины. Возникли они, скорее всего, в результате изменения углов простираения коллизионной зоны и, как следствие, развития сдвиговых деформаций и структур коробления. Следует отметить тот факт, что перечисленные структуры осложнены развитием системы рифтов, которые усиливают процессы погружения фундамента.

Таким образом, анализируя полученные результаты можно заключить, что развивающиеся в пределах Баренцево-Карского региона структуры прогибания имеют различную природу – часть из них формировалась за счет растяжения литосферы, а другие – в результате эволюционного проседания фундамента.

Согласно условной нумерации впадин на рис. 1, к первой группе относятся впадины II, III, V и VI, а ко второй – I и IV.

Результаты проведенных вычислений применительно к конкретным выделенным участкам представлены на рис. 3 и 4 (условные номера отдельных гистограмм соответствуют условным номерам впадин на рис. 1).

Визуальный анализ гистограмм распределения значений углов наклона (после преобразования) показывает следующее (рис. 3): все распределения близки к унимодальным и практически симметричны. Четко выделяются две группы. В первую входят варианты I и IV, они отличаются от остальных меньшим значением моды распределения (около  $0.08^\circ$ ), в то время как все другие распределения имеют моду в районе  $0.2^\circ$  и более. Среди

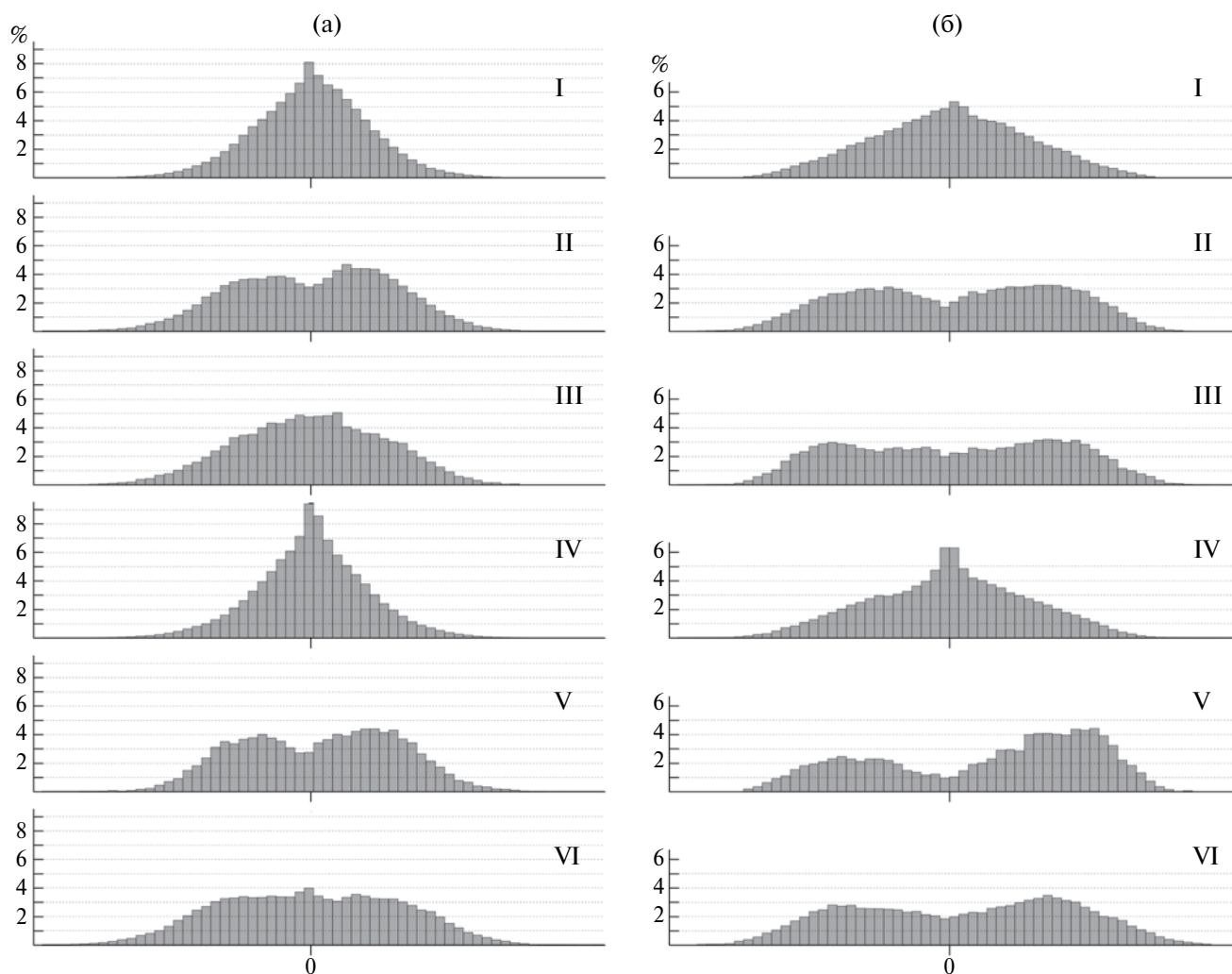


Рис. 4. Гистограммы распределения на склонах впадин: (а) – касательной кривизны, (б) – профильной кривизны.

вариантов II, III, V и VI есть свои незначительные отличия.

Анализ гистограммы распределения значений касательной кривизны (рис. 4а) позволяет выделить три группы. В первую входят варианты I и IV (унимодальное, симметричное относительно нуля распределение с острым, выраженным пиком в районе нуля), во вторую – варианты II и V (практически симметричное относительно нуля бимодальное распределение). Третью группу образуют варианты III и VI, и хотя их сходство выражено не так ярко, но они все-таки явно ближе друг к другу, чем к остальным вариантам (симметричное относительно нуля унимодальное распределение со сглаженным пиком, в варианте VI пик вырождается в практически плоский участок).

Рассматривая распределение значений профильной кривизны (рис. 4б), можно четко выделить две группы. В первую входят варианты I и IV (унимодальное, симметричное относительно нуля

распределение с умеренным пиком в районе нуля), а во вторую – все остальные варианты (практически симметричное, кроме варианта V, относительно нуля бимодальное распределение). Распределение варианта V хоть и близко по форме к варианту II, но отличается от него некоторой несимметричностью, наблюдается небольшое преобладание положительных значений.

Проведенный нами анализ морфометрических показателей поверхности дна Баренцевоморского бассейна показал, что выделение групп впадин по целому ряду параметров согласуется с геодинамическими построениями и позволяет по характеру изменения морфологии склонов судить с определенной степенью вероятности об их происхождении. Таким образом, кроме известного эффекта облекания структурного основания, удалось выявить закономерности структурно-генетических особенностей рельефообразования древней доплатформенной поверхности литосферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные морфоструктурные исследования проведены с учетом различной природы структур прогибания Баренцевоморского региона. В частности, Норвежско-Мезенская система рифтов, грабены Воронина, Святой Анны и Франц-Виктория были сформированы за счет растяжения литосферы. Южно-Баренцевская впадина и Медвежинско-Эджинская зона прогибов образовались на стадии зарождения литосферной плиты за счет столкновения нескольких островных дуг и зажаты между останцами древней океанической коры. При этом Северо-Баренцевский сегмент входит в состав Восточно-Баренцевоморской впадины и, согласно нашим геодинамическим построениям, относится ко второй генетической группе прогибов.

Морфоструктурный анализ позволил восстановить и подтвердить отдельные этапы (параметры) прошлой геодинамической эволюции шельфа Баренцева моря.

Согласно морфоструктурному анализу поверхности склонов Северо-Баренцевская впадина по морфологическим признакам наиболее близка прогибам первой группы, т.е. рифтам. Следует отметить, что развитие специфических клинообразных грабенов Франц-Виктория и Св. Анны привело к пересечению оперяющих их разрывных нарушений в зоне развития Северо-Баренцевской впадины. Пространственное совмещение двух разновозрастных структурообразующих процессов, по-видимому, привело к затушевыванию раннего структурного плана и доминированию признаков более молодого. Такая же картина может наблюдаться и в области развития прогиба Ольги.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 14-50-00095 в части разработки методики как составной части прогноза вероятных катастрофических событий, государственного заказа № 0149-2018-0005 в части разработки геомodelей морского дна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ласточкин А.Н.* Структурно-геоморфологические исследования на шельфе. Л.: Недра, 1978. 247 с.
2. *Матишов Г.Г.* Дно океана в ледниковый период. Л.: Наука, 1984. 176 с.
3. *Митяев М.В., Хасанкаев В.Б., Тарасов Г.А., Голубев В.А.* Морфоструктуры западной части Баренцевоморского шельфа // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 4. С. 611–620.
4. *Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В. и др.* О методах построения цифровых моделей рельефа дна (на примере Белого моря) // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 326–336.
5. *Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В.* Цифровая модель рельефа дна Белого моря // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*. 2012. № 3. С. 86–92.
6. *Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л.* Обстановки морфолитогеनेза в прибрежной зоне Мирового океана. М.: Наука, 2007. 455 с.
7. *Сенин Б.В., Шипилов Э.В.* Классификация и номенклатура региональных структурных элементов метаплатформы // *Осадочный чехол Западно-Арктической метаплатформы*. Мурманск: ИПП “Север”, 1993. С. 16–25.
8. *Сенин Б.В., Шипилов Э.В., Юнов А.Ю.* Тектоника арктической зоны перехода от континента к океану. Мурманск: Изд. КНЦ РАН, 1989. 176 с.
9. *Сорохтин Н.О., Лобковский Л.И., Козлов Н.Е. и др.* Эволюция Баренцевоморского бассейна и потенциальная нефтегазоносность прибрежной зоны Кольского региона // *Докл. РАН*. 2015. Т. 465. № 6. С. 711–714.
10. *Тарасов Г.А., Погодина И.А., Хасанкаев В.Б. и др.* Процессы седиментации на гляциальных шельфах. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2000. 473 с.
11. *Шипилов Э.В.* Тектоника осадочного чехла и фундамента северо-запада Баренцевоморской континентальной окраины (шельф архипелага Шпицберген) // *Комплексные исследования архипелага Шпицберген*. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002. С. 86–100.
12. *Шипилов Э.В., Тарасов Г.А.* Региональная геология нефтегазоносных осадочных бассейнов Западно-Арктического шельфа России. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1998. 306 с.
13. *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.
14. *Mitasova H., Hofierka J.* Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis // *Mathematical Geology*. 1993. V. 25. № 6. P. 657–669.
15. *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.
16. *TerrainBase. Worldwide Digital Terrain Data. Documentation Manual & CDROM Release 1.0.* National Geophysical Data Center USA, 1995. 193 p.

## **Morphostructures Analysis and Seabed Shelf Typing**

**S. L. Nikiforov, N. O. Sorokhtin, S. M. Koshel', L. I. Lobkovsky**

The analysis of morphometric characteristics of the Barents Sea seabed (on the example) has shown that exist troughs are consistent with geodynamic conclusions and allow for morphology typing into structural slopes and reconstruct their origin also. So, the Norwegian-Mezenskaya rift system, St. Anne and Victoria troughs were formed due to the lithosphere stretching. Yuzhno-Barentsevsckaya and Medvezinsko-Edzinskaya depressions formed at incipient lithospheric plates that due to collision of several island arcs between the outliers of ancient oceanic crust. Selection of geomorphic method of seabed studying connected with the following – science “geomorphology” explores bottom relief (morphology), its origin and age in interacted complex. Adequate recovery of causal relationships of exogenous and endogenous processes could allow to justify the forecast view of probable seabed catastrophic events. Results of mathematical calculations confirmed the geodynamic conclusions within Barents Sea region.