

УДК 551.7(268.5)

**Я.Е. Терехина<sup>1</sup>, М.Ю. Токарев<sup>2</sup>, Н.В. Шевченко<sup>3</sup>, Н.А. Козупица<sup>4</sup>****ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ПОДНЯТИЙ ГУБЫ РУГОЗЕРСКАЯ И ПРОЛИВА ВЕЛИКАЯ САЛМА (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ)**

На основании комплексных исследований, включающих непрерывное сейсмическое профилирование (НСП), гидролокацию бокового обзора (ГЛБО), донный пробоотбор и водолазные методы, изучены участки мелководий губы Ругозерская (Кандалакшский залив Белого моря). В результате выявлен ряд закономерностей в геологическом строении региона, в частности, установлен генезис некоторых форм донного и берегового рельефа.

*Ключевые слова:* геофизические исследования, сейсмоакустика, гидролокация, генезис, Белое море.

Lots of shallow Rugozerskaya firth (Kandalaksha Bay of the White Sea) were studied on the basis of integrated explorations including continuous seismic profiling, side scan sonar (SSS), bottom sampling and diver inspection. As a result a number of regularities in the geological structure of the region was identified, in particular — the origin of certain bottom forms and coast terrain was revealed.

*Key words:* geophysics, seismoacoustics, side scan sonar, origin, White Sea.

**Введение.** Белое море — единственное внутреннее море в пределах России. Несмотря на сравнительно небольшую величину, оно характеризуется разными геологическим строением, геоморфологией, гидродинамическим режимом и природными условиями. Изучение геологии, геоморфологии и донных ландшафтов дна Белого моря имеет богатую историю, на его акватории успешно работали сотрудники ВСЕГЕИ, ИО РАН, МГУ, ГИН РАН, «Архангельскгеологии» и ряда других организаций.

Детальное изучение строения рельефа и донных осадков беломорских заливов и губ в Кандалакшском заливе началось еще во второй половине XX в. (ИО РАН) [Спиридонов и др., 1890; Соболев и др., 1995], но до сих пор некоторые вопросы остаются открытыми, например, точный генезис специфических форм беломорского подводного рельефа — банок (каменистых подводных возвышенностей), которые широко распространены в Кандалакшском заливе Белого моря.

Исследуемая территория находится в зоне неотектонического воздымания [Кошечкин, 1979], вследствие чего банки, как и остальное морское дно, постепенно поднимаются. При достижении уровня волновой переработки начинается их преобразование береговыми процессами в серповидные каменистые формы рельефа — корги. Изменяется гранулометрический состав отложений:

вымываются пелитовая, алевритовая и частично песчаная фракции, происходит концентрация грубообломочного материала, который испытывает не только воздействие волн, но и припайных льдов. По мере подъема корги выходят из зоны волновой переработки и постепенно становятся небольшими каменистыми островами.

В 1973–1984 гг. в Белом море сотрудниками ВСЕГЕИ и лаборатории сейсмоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова были проведены детальные работы, по результатам которых составлена серия геологических, тектонических и структурных карт Беломорской впадины [Спиридонов и др.]. В начале 2000 гг. начался новый этап изучения Белого моря — выполнены геофизические работы силами МАГЭ, а также ИО РАН под руководством акад. А.П. Лисицина и т.д. [Рыбалко и др., 2009]. В 2001 г. геофизические исследования были возобновлены и на базе Беломорской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова (ББС МГУ). В них принимали участие студенты и преподаватели геологического, географического и биологического факультетов, сотрудники ИО РАН. Важнейший элемент исследований — работы, выполняемые преподавателями и студентами кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке компании ООО «ДЕКО-геофизика».

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, науч. с.; *e-mail:* yana.msu@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ст. преп.; *e-mail:* tokarev@decogeo.com

<sup>3</sup> ООО «ДЕКО-геофизика», науч. с.; *e-mail:* snatti@yandex.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра литологии и морской геологии, аспирантка; *e-mail:* natako1701@gmail.com.com



Рис. 1. Расположение района работ полигона «Высокий», на врезке — схема расположения сейсмоакустических профилей

Часть исследований проводилась на полигоне «Высокий» (рис. 1), расположенном в центральной части Ругозерской губы (Кандалакшский залив Белого моря) — вытянутого и глубоко вклинивающегося в сушу фиордообразного залива. От открытого моря он отгорожен подводными порогами и островами-шхерами, что существенно ослабляет волновую активность (высота волн преимущественно дециметровая), но не препятствует высокой скорости приливно-отливных течений.

**Аппаратура и методика работ.** Исследования основаны на материалах, полученных во время ежегодных научно-практических морских практик на базе ББС МГУ в 2010–2015 гг. Комплекс методов включает в себя непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) и гидролокацию бокового обзора (ГЛБО). Верификация производилась с помощью пробоотбора и подводных наблюдений — фото- и видеосъемки и водолазных наблюдений.

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование проводилось электроискровым источником типа «Спаркер», излучение производилось 2 раза в секунду, доминирующая частота 1250 Гц, что обеспечило вертикальное разрешение около 30 см. В качестве приемного устройства использовалась одноканальная сейсмическая коса. Скорость движения судна составляла от 3,5 до 4,5 узлов (1,8–2,3 м/с), позиционирование осуществлялось при помощи GPS-приемника. Всего исследовано около 300 км профилей. Изображение получено на глубину до 50 м.

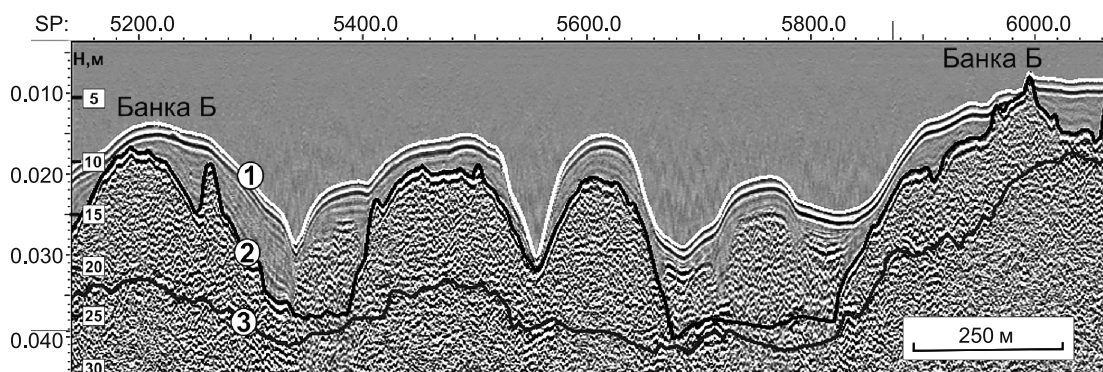
Гидролокация бокового обзора проводилась с помощью гидролокатора «Гидра». Детальность исследования составила несколько десятков

сантиметров — хорошо видны средние валуны. Набортная часть аппаратуры «Гидра» обеспечивает формирование импульса синхронизации для блока подводной электроники, оцифровку данных ГЛБО и отображение оперативной информации о режимах работы аппаратуры и текущих данных на экране монитора. Данные конвертируются из внутреннего формата комплекса «Гидра» в стандартный тип сейсмических данных SGY и загружаются в обрабатывающую программу 3sPro, в которой производится ввод навигации, пикировка первых вступлений, ввод AVG-поправки и построение «мозаики» — схемы акустического изображения дна, составленной из сонограмм.

При планировании профили прокладывались через 50 м, но в связи со сложным рельефом дна не всегда удавалось выдержать это расстояние и менее чем в 10% случаев расстояние превышало 50 м (до 70 м). Для наиболее полного покрытия площади было решено сгустить сетку профилей до шага в 25–30 м. Скорость судна от 3 до 4 узлов (1,5–2 м/с), всего исследовано около 15 км<sup>2</sup>.

После установления распространения того или иного типа осадков применялись соответствующие условиям варианты верификации. Водолазный метод наиболее эффективен при работах на глубине до 10–15 м (реже до 20 м) на каменистых, песчаных и смешанных грунтах и в условиях разнообразных донных ландшафтов, а также при обследовании одиночных или ограниченных по площади объектов. Фиксировались характер рельефа дна, уклон, осадок, растительность, глубина, применялась также подводная фото- и видеосъемка. Всего проведено более 20 погружений.

Рис. 2. Сейсмический разрез по профилю 51 (фрагмент): 1 — поверхность дна, 2 — граница морены и морских отложений, 3 — кровля кристаллического фундамента



Дистанционная подводная видеосъемка производилась с помощью телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) «ГНОМ», выполнено более 20 видеообследований. Подводная видеосъемка хорошо зарекомендовала себя как на средней, так и на большой глубине для верификации сравнительно больших однородных площадей [Шабалин и др., 2014].

Пробоотбор в 2010 г. осуществлялся с помощью пробоотборника «Океан» с площадью захвата 0,1 м<sup>2</sup>, всего отобрано 15 проб. В 2012 г. было опробовано 11 точек с помощью пробоотборника «Naps bottom corer», который позволяет отобрать 27 см ненарушенного осадка. Метод хорошо зарекомендовал себя в зоне распространения илистых грунтов, но оказался ограниченно применим на каменистых и смешанных грунтах.

Описанная комплексная методика изучения геологического строения верхней части разреза (ВЧР) дает возможность получить детальную картину распространения донных осадков на изучаемой площади. Анализ сейсмоакустических профилей позволяет находить места выхода на поверхность более древних, грубых моренных отложений, оконтуривать их на мозаике гидролокации бокового обзора и верифицировать водолазными методами.

Полагаем, что для мелководья Кандалакшского залива разработанный комплекс работ дает возможность изучать геологическое строение на глубине от дна до нескольких десятков метров даже при отсутствии данных бурения.

**Геологическое строение.** Для западной части Белого моря характерен ряд особенностей рельефа и геологического строения: высокая расчлененность рельефа (для равнинных территорий), многочисленные выходы на поверхность пород кристаллического фундамента, маломощный и крайне неоднородно распространенный чехол рыхлых отложений, высокая скорость неотектонического воздымания, большое влияние на современный рельеф тектонического строения и т.д. Скорость гляциоизостатического поднятия в голоцене в районе работ варьировала от 9–13 мм/год в начале и середине голоцена до 5–5,5 мм/год во второй половине голоцена, что сильно повлияло на

развитие территории [Романенко, Шилова, 2012]. В результате рельеф формировался в условиях перманентной регрессии, при постоянном изменении конфигурации береговой линии и рельефа мелководья.

Кандалакшский залив расположен в пределах Беломорского блока Балтийского щита (в Лапландско-Беломорском поясе), основу которого составляет пояс архейских и протерозойских метаморфических пород беломорской серии, представленных гранитогнейсами, кристаллическими сланцами, кварцитами и амфиболитами. Метаморфические породы во многих местах прорваны интрузиями разного состава: гранодиоритами, гранитами, диоритами, пегматитами, перидотитами, пироксенитами [Невесский и др., 1976]. Эти породы образуют кристаллический фундамент, который на сейсмограммах выделяется как «акустический фундамент».

Кристаллический фундамент характеризуется однородным типом сейсмической записи. Его поверхность выделяется по четким высокоамплитудным положительным осям синфазности с многочисленными дифракциями (рис. 2). Скорость продольных волн в фундаменте составляет около 2000–3000 м/с, плотность пород — 2,6–2,7 г/см<sup>3</sup>. Строение фундамента носит ярко выраженный блоковый характер.

Осадочный чехол на исследуемой территории представлен четвертичными отложениями, среди которых выделяют ледниковые, комплекс послеледниковых и морские отложения поздне-послеледникового возраста [Спиридонов и др., 1980].

На сейсмограммах ледниковые отложения (морена) отличаются по хаотичной сейсмической записи и относительно резким высокоамплитудным положительным, но непротяженным осям синфазности в кровле и подошве комплекса (рис. 2). Мощность комплекса составляет от нескольких метров до нескольких десятков метров, скорость упругих волн в морене — ~2000 м/с, плотность 1,6–2,0 г/см<sup>3</sup>. Ледниковые отложения образуют выраженные аккумулятивные тела разной формы. Кровля морены хорошо выражена на сейсмических профилях и имеет наибольшее расчленение (рис. 2, 4.).

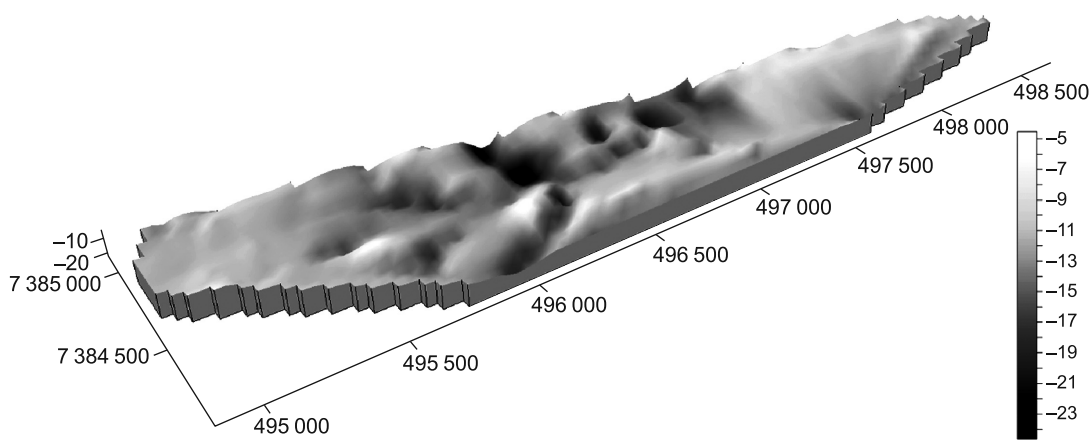


Рис. 3. Трехмерная модель рельефа дна полигона «Высокий»

Ледниково-морские и морские отложения составляют комплекс четвертичных отложений, который на исследуемом полигоне имеет повсеместное распространение и выклинивается только на вершинах моренных гряд и в некоторых понижениях (рис. 2). Осадки ледниково-морского комплекса слоистые, на полигоне «Высокий» их мощность редко превышает 12 м (рис. 2, 4), скорость упругих волн близка к скорости в воде и составляет  $\sim 1500\text{--}1600$  м/с, плотность  $1,4\text{--}1,7$  г/см<sup>3</sup>. Примечательно, что на сейсмограммах этот комплекс осложнен наличием газонасыщенных осадков (рис. 2): в сейсмической записи это проявляется в виде высокоамплитудных отражений обратной полярности, ниже которых наблюдается акустическая тень. Весь надморенный комплекс в Ругозерской губе залегает на подстилающих отложениях с ярко выраженным несогласием (рис. 2).

**Результаты исследований.** Донный рельеф в районе исследований в целом неоднородный — уплощенные террасообразные поверхности и плавно очерченные возвышенности и котловины

(уклон не превышает несколько градусов) соседствуют с крутыми склонами (рис. 3).

Сопоставление данных НСП с данными ГЛБО позволило соотнести древние структуры с современным рельефом. На сейсмических профилях четко выделяются не до конца погребенные древние аккумулятивные моренные тела, соответствующие подводным возвышенностям. По данным ГЛБО видно, что для их вершин, на которых практически отсутствуют современные морские отложения, характерен более светлый тон, присущий грубым осадкам (рис. 4).

При комплексном анализе результатов донного проботбора, данных водолазных обследований и акустических изображений выявлено, что характерному для вершин банок типу записи на ГЛБО соответствуют покрытые тонким слоем ила россыпи валунов, между которыми залегают опесчаненные илы с высоким содержанием грубого материала (гравия, дресвы, гальки, щебня разной степени окатанности), местами присутствует ракушка (рис. 5, а, б).

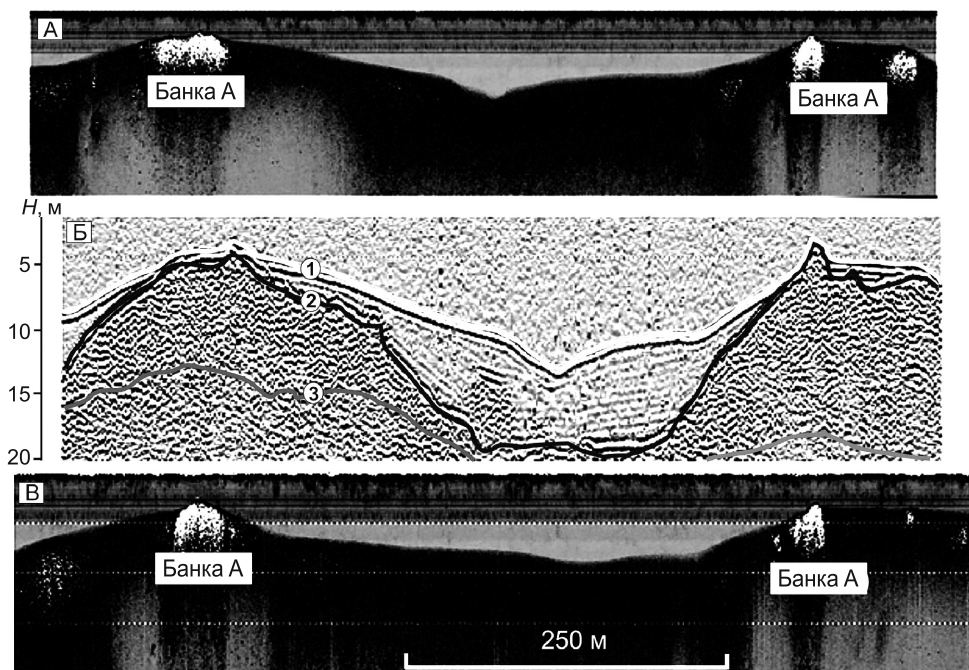


Рис. 4. Сопоставление данных ГЛБО (левые борты галсов 114 и 115) (А, В) и НСП (сейсмический разрез № 17) (Б): 1 — поверхность дна, 2 — граница морены и морских отложений, 3 — кровля кристаллического фундамента

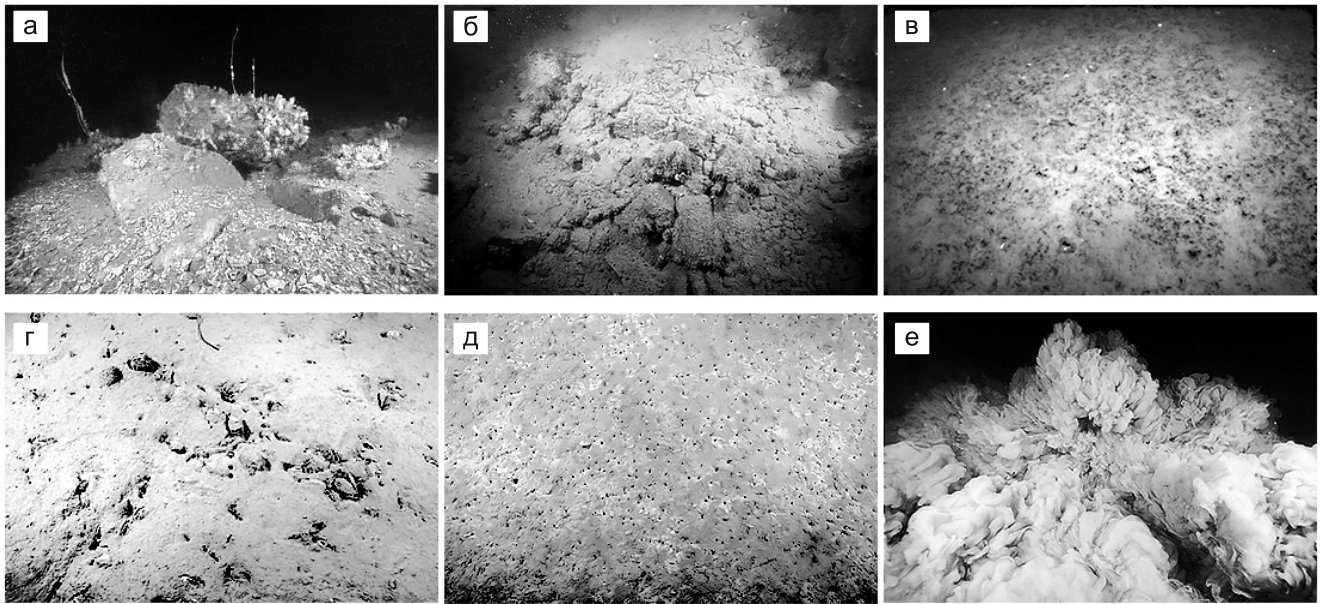


Рис. 5. Подводные фотографии различных литотипов на полигоне «Высокий»: а — грубообломочные отложения и ракушка (вершина банки Б); б — грубообломочные отложения вершинной части (банка А) под тонким слоем морских осадков; в — пестрые по гранулометрическому составу привершинные поверхности и склоны банок и поверхности приподнятых подводных плато, область распространения бурых водорослей; г, д — алевритистые илы с примесью песка, массовые поселения *A. islandica*; е — полужидкие илы замкнутых котловин

Таким образом, можно считать доказанным, что банки — вершины древних ледниковых форм рельефа, сложенных моренными грубообломочными отложениями. Моренные возвышенности в основном соответствуют выступам кристаллического фундамента (рис. 2, 4); депрессии современного рельефа, как правило, тоже наследуются.

Как уже упоминалось, полигон «Высокий» расположен вне предела интенсивной волновой переработки, и только на самых мелких его участках происходит размыв тонких осадков и перемещение песчаного материала по подводному береговому склону во время штормов. В свою очередь приливно-отливные течения действуют постоянно, препятствуют задержанию тонких

осадков на вершинах банок, поэтому осадки аккумулируются ниже (рис. 5, в–е).

При сопоставлении рельефа дна (рис. 3) и мозаики ГЛБО (рис. 6) на полигоне можно выделить вытянутые, неровные, многовершинные гряды, ориентированные с северо-запада на юго-восток. Вершинные части этих подводных возвышенностей и образуют банки с выходом на поверхность каменистых отложений. Эти формы рельефа очень хорошо картируются по данным ГЛБО, так как имеют существенно более интенсивное отражение на вершинах. Можно выделить два типа банок, которые, скорее всего, имеют один генезис, но находятся на разных стадиях развития (рис. 6).

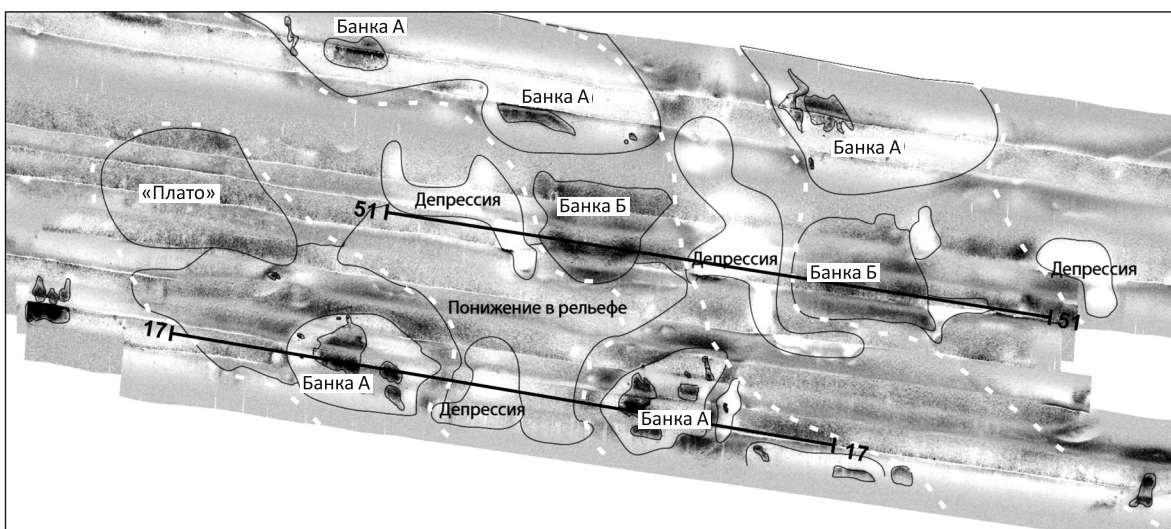


Рис. 6. ГЛБО-мозаика полигона «Высокий». Белые пунктирные линии — абрисы подводных гряд, вершины которых — банки А и Б; 51–51 — сейсмический разрез № 51; 17–17 — сейсмический разрез № 17

В одном случае ледниковые отложения частично перекрыты тонким слоем современных морских осадков (банки А), а в другом — морена непосредственно выходит на поверхность (банки Б). Размер вершинных поверхностей банок на полигоне 250–300 м в диаметре, глубина вершинных поверхностей 4–8 м. Первый тип банок выглядит на мозаике, как изометричное или вытянутое пятно относительно светлого тона, на котором резко выделяется несколько контрастных темных пятен.

Второй тип банок (Б) имеет преимущественно изометричную форму и представлен на мозаике неоднородным серым тоном, на котором иногда видны отдельно стоящие глыбы (рис. 6).

Слабозаиленные, существенно грубообломочные отложения вершин подводных поднятий (банок) обрамлены полями алевропелитов, которые местами (у подножий склонов) сменяются пятнами песчаных алевритов. Вершины банок практически не попадают в зону волновой переработки, и вынос тонкозернистых морских отложений осуществляется приливно-отливными течениями, которые охватывают значительную часть водной толщи и фиксируются при водолазных погружениях.

Между грядами расположены сложнопостроенные депрессии, центральные части которых занимают замкнутые понижения — котловины глубиной до 24 м, шириной менее 200 м в самых широких частях (в узких местах 70–100 м) и длиной до 500 м. Центральные части этих котловин заняты тонкодисперсными слабоконсолированными осадками (рис. 5, г).

Для анализа рельефа на разных этапах его развития составлены карты кровли кристаллического фундамента и кровли ледникового рельефа. При

сопоставлении их с современной батиметрической картой видно (как и на сейсмоакустических профилях), что наибольшей расчлененностью обладает «ледниковый», а вернее, послеледниковый рельеф.

**Заключение.** Современный рельеф дна на исследуемой территории преимущественно повторяет послеледниковый рельеф. В свою очередь послеледниковый («моренный») рельеф в целом наследует неровности кровли кристаллического фундамента, но с гораздо более высокой амплитудой положительных форм. Таким образом, в пределах полигона «Высокий» донный рельеф не структурный, его определяют аккумулятивные ледниковые образования, моделированные процессами послеледниковой седиментации. Наиболее расчленена кровля послеледникового рельефа. Все современные возвышенные участки дна соответствуют выступам древнего послеледникового рельефа.

Большинство понижений в современном донном рельефе также соответствуют неровностям кровли послеледникового рельефа, однако здесь зависимость более сложная. На конфигурацию современных замкнутых котловин могло влиять распределение ледниково-морских отложений, а также другие процессы.

Подводные банки представляют собой вершины аккумулятивных моренных гряд. Корги образуются в процессе неотектонического подъема дна, когда банки достигают уровня интенсивной волновой переработки (уровень среднеквадратного отлива). Таким образом, банки, корги и малые каменистые острова-шхеры представляют собой один генетический ряд, и они отпрепарированны от морских отложений выступами послеледникового рельефа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Кочечкин Б.И.* Голоценовая тектоника восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1979. 158 с.

*Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В.* Белое море — седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 235 с.

*Романенко Ф.А., Шилова О.С.* Послеледниковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озерно-болотных отложений полуострова Киндо // Докл. РАН. 2012. Т. 442, № 4. С. 544–548.

*Рыбалко А.Е., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* и др. Новые данные о геологическом строении четвертичного покрова Белого моря // Мат-лы Междунар. науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2009. С. 286–288.

*Соболев В.М., Алешинская З.В., Полякова Е.И.* Новые данные о палеогеографии Белого моря в позднем плейстоцене–голоцене // Корреляция палеогеографических событий: континент–шельф–океан. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 120–129.

*Спирidonov М.А., Девдариани Н.А., Калинин А.В.* и др. Геология Белого моря // Сов. геология. 1980. № 4. С. 45–55.

*Шабалин Н.В., Илюшин Д.Г., Исаченко А.И., Мокиевский В.О.* Современные методы исследования донных сообществ // Инженерные изыскания. Геомаркетинг. 2014. № 9–10. С. 98–104.

Поступила в редакцию  
25.10.2016