

УДК 550.3.834:551.35 (268.46)

А.В. Старовойтов¹, М.Ю. Токарев², З.С. Замотина³, Я.Е. Терехина⁴**РОЛЬ ЛЕДНИКОВОГО И ЛИТОДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРОВ
В ФОРМИРОВАНИИ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА
ПРОЛИВА ВЕЛИКАЯ САЛМА (БЕЛОЕ МОРЕ)***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Новые данные о рельефе дна на акваториях, прилегающих к Беломорской биологической станции МГУ (Кандалакшский залив), полученные с помощью многолучевого эхолота (МЛЭ), позволили детально изучить рельеф дна и уточнить строение четвертичных отложений этого района, существенно детализировав полученные ранее данные непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП). В западной части изученной акватории в комплексе ледниковых отложений впервые были выделены морены де Гира, которые сформировались при отступании ледника в позднем плейстоцене в восточном направлении в сторону современной глубоководной части Белого моря. В глубоководной части акватории по данным МЛЭ и НСП изучены отложения, генезис которых обусловлен интенсивным проявлением гравитационных процессов в конце позднего плейстоцена — голоцене. Полученные новые данные могут свидетельствовать о существовании «мертвого» льда в Беломорской впадине.

Ключевые слова: Кандалакшский залив, Белое море, сейсмоакустика, многолучевой эхолот, ледниковые отложения, оползневые процессы.

New data on the bottom relief in the waters adjacent to the Belomorskaya Biological Station of Moscow State University (Kandalaksha Bay), obtained with the help of a multipath echo sounder (MBE), allowed us to study the bottom relief in detail and clarify the structure of Quaternary sediments in this area, significantly detailing the previously obtained data of continuous seismoacoustic profiling (CSP). In the western part of the studied water area, the de Geer moraines were first identified in a complex of glacial deposits, which were formed during the retreat of the glacier in the late Pleistocene in an easterly direction towards the modern deep-water part of the White Sea. In the deep-water part of the water area, according to the data of the MBE and CSP, sediments were studied, the genesis of which is due to the intensive manifestation of gravitational processes at the end of the Late Pleistocene — Holocene. The new data obtained may indicate the existence of “dead” ice in the Belomorskaya Depression.

Keywords: Kandalaksha Bay, White Sea, seismoacoustics, multibeam echo sounder, glacial deposits, landslide processes.

Введение. С 2004 г. на Белом море в районе Беломорской биологической станции (ББС) МГУ имени М.В. Ломоносова проводится учебно-научная морская геофизическая практика для студентов-геофизиков геологического факультета. Полученные за это время геолого-геофизические данные позволили детально изучить геологическое строение прилегающих акваторий. ББС МГУ в геологическом отношении находится в пределах Беломорского блока архейского возраста (2,5–3,0 млрд лет), структура которого в рифее осложнилась образованием наложенного на его осевую часть Кандалакшского грабен-прогиба [Слабунов, 2008; Балувев и др., 2009].

В четвертичное время опускание возобновилось, что привело к образованию Кандалакшского залива и современной центральной части акватории Белого моря [Хаин, 1977]. Грабен пролива Великая Салма – фрагмент Кандалакшского грабен-прогиба и выполнен четвертичными отложениями позднего плейстоцена–голоцена, представленными ледниковыми отложениями последнего оледенения (~18 000 лет назад, л. н.) и залегающими на нем, а местами и на архейском фундаменте ледниково-озерными, ледниково-морскими и морскими осадками разнообразного состава. Более древние осадочные отложения в западной части Беломорской впадины в

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, доцент; e-mail: starovoytov_msu@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, вед. науч. с.; e-mail: tokarev@decogeo.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, магистрант; e-mail: zlata_zamotina@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, науч. с.; e-mail: yana.msu@gmail.com

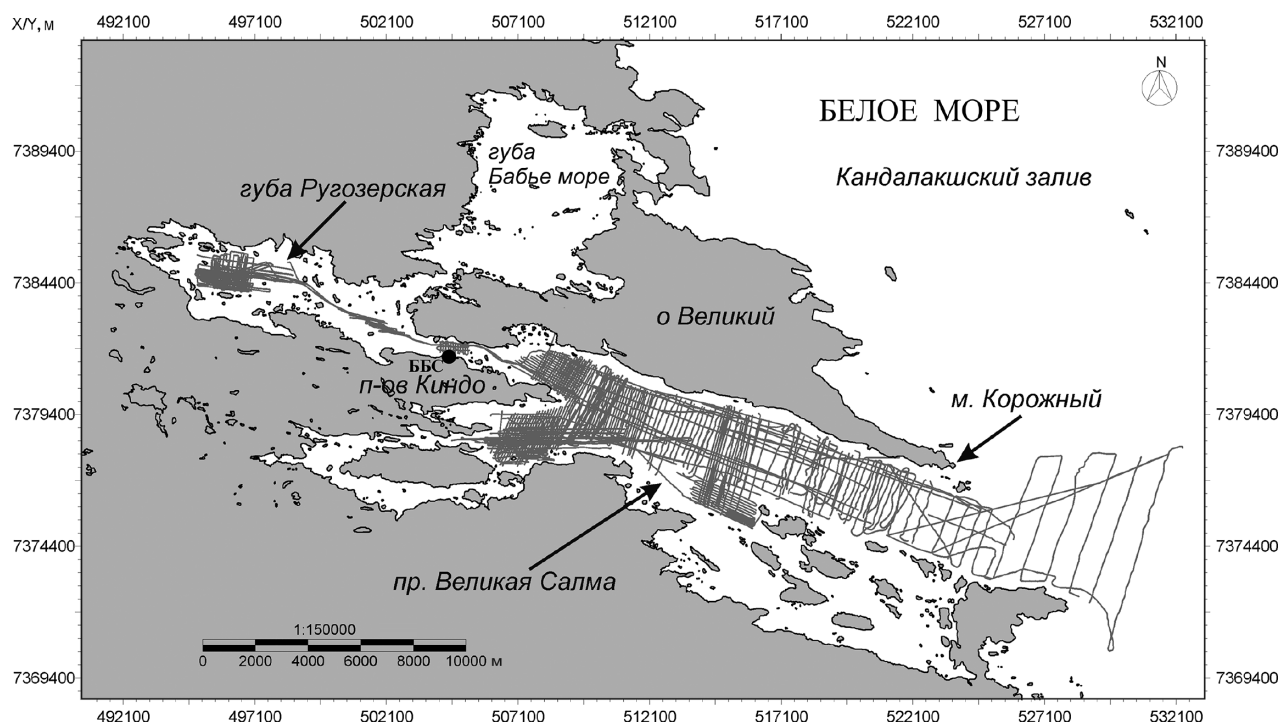


Рис. 1. Схема расположения сейсмоакустических профилей в проливе Великая Салма. Черный кружок — Беломорская биологическая станция (БС) МГУ имени М.В. Ломоносова

районе БС не обнаружены [Спиридонов и др., 1980; Девдариани, 1985; Сорокин и др., 2009; Кубышкина и др., 2012; Старовойтов и др., 2018].

В основании осадочного разреза залегают ледниковые отложения последнего оледенения, которые уверенно выделяются по сейсмоакустическим данным на всех прилегающих к БС акваториях. В проливе Великая Салма морена мощностью до 40 м выделена у восточного окончания п-ова Киндо, далее на юго-восток ледниковый комплекс небольшой мощности обнаружен лишь на мелководных участках юго-западного борта пролива [Старовойтов и др., 2018]. В глубоководной части пролива морена не выявлена. Это может быть связано как с ее отсутствием в этом районе, так и с тем, что по типу волновой картины ледниковый комплекс практически нельзя отличить от оползневых отложений, широко развитых в этом районе, а ее выделение вследствие этого весьма затруднительно. Не исключено также, что оползневые отложения, которые сформировались в проливе в течение масштабных опусканий в новейшее время включают в себя и ледниковые отложения. При образовании грабена пролива Великая Салма угол наклона дна на его бортах увеличился и может достигать 7° , редко больше, что должно было привести к развитию здесь гравитационных процессов [Lewis, 1971]. Новые детальные данные о рельефе дна, полученные с помощью многолучевого эхолота, позволили оценить роль ледникового и гравитационного факторов и повысить информативность сейсмоакустических данных при анализе строения осадочного четвертичного покрова в проливе Великая Салма.

Материалы и методы исследований. В работе использованы данные двух методов — сейсмоакустического профилирования и съемки рельефа дна многолучевым эхолотом. Сейсмоакустические наблюдения выполняли с двумя типами источников — электроискровым (спаркером) и электродинамическим (бумером). Частотный состав возбуждаемых колебаний менялся от нескольких сотен герц до 1500 Гц. Работы выполнены в двух методических вариантах — приповерхностном, когда источник и приемник находились на согласованной глубине [Калинин и др., 1983], и заглубленном [Токарев, 2016]. Разрешающая способность по вертикали менялась от нескольких десятков сантиметров до 1,0–1,5 м. Привязку проводили с помощью эхолота-навигатора Lowrance LMS 320. Точность привязки по паспортным данным — 15 м. Расстояние между профилями, как правило, не превышало 100 м (рис. 1).

При площадном изучении рельефа дна использован многолучевой эхолот Reson SeaBat T20-P. Привязка осуществлялась GNSS-приемником Trimble R7. Рабочая частота многолучевого эхолота — 200–400 кГц, глубина съемки — до 450 м, разрешение — 6 мм, число лучей — 512. Точность измерений положения в плане — 8 ± 1 мм/км, по высоте — 15 ± 1 мм/км. Съемка выполнена по системе параллельных галсов, расстояние между галсами определялось исходя из глубины моря так, чтобы перекрытие смежных полос составляло не менее 30% (рис. 2).

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам интерпретации данных сейсмоакустического профилирования в проливе Великая

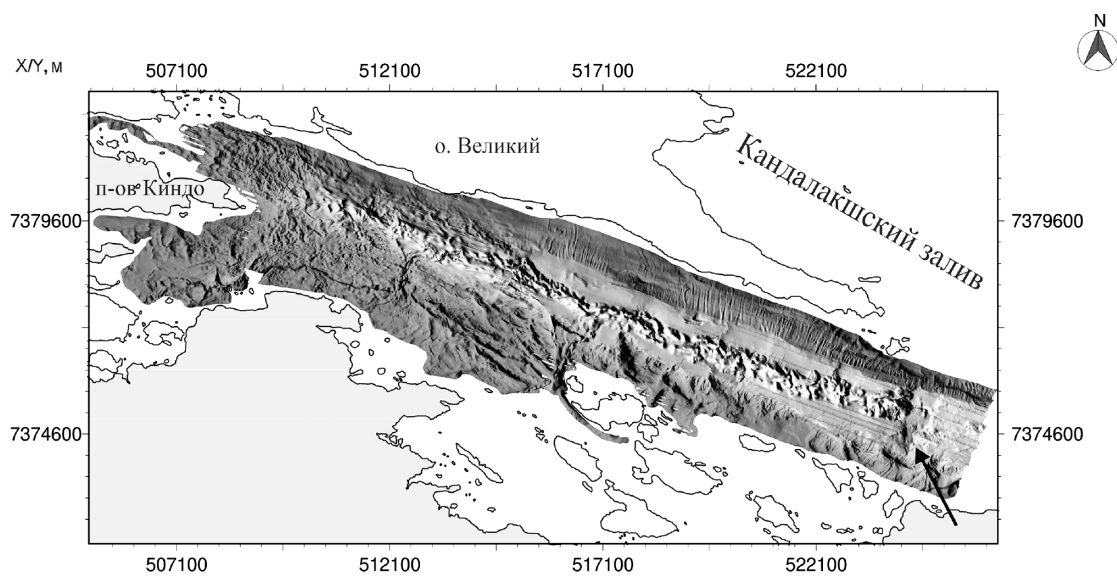


Рис. 2. Схема рельефа дна пролива Великая Салма по данным многолучевого эхолота. Черной стрелкой показана структура, поперечная к продольной оси пролива. Объяснения см. в тексте

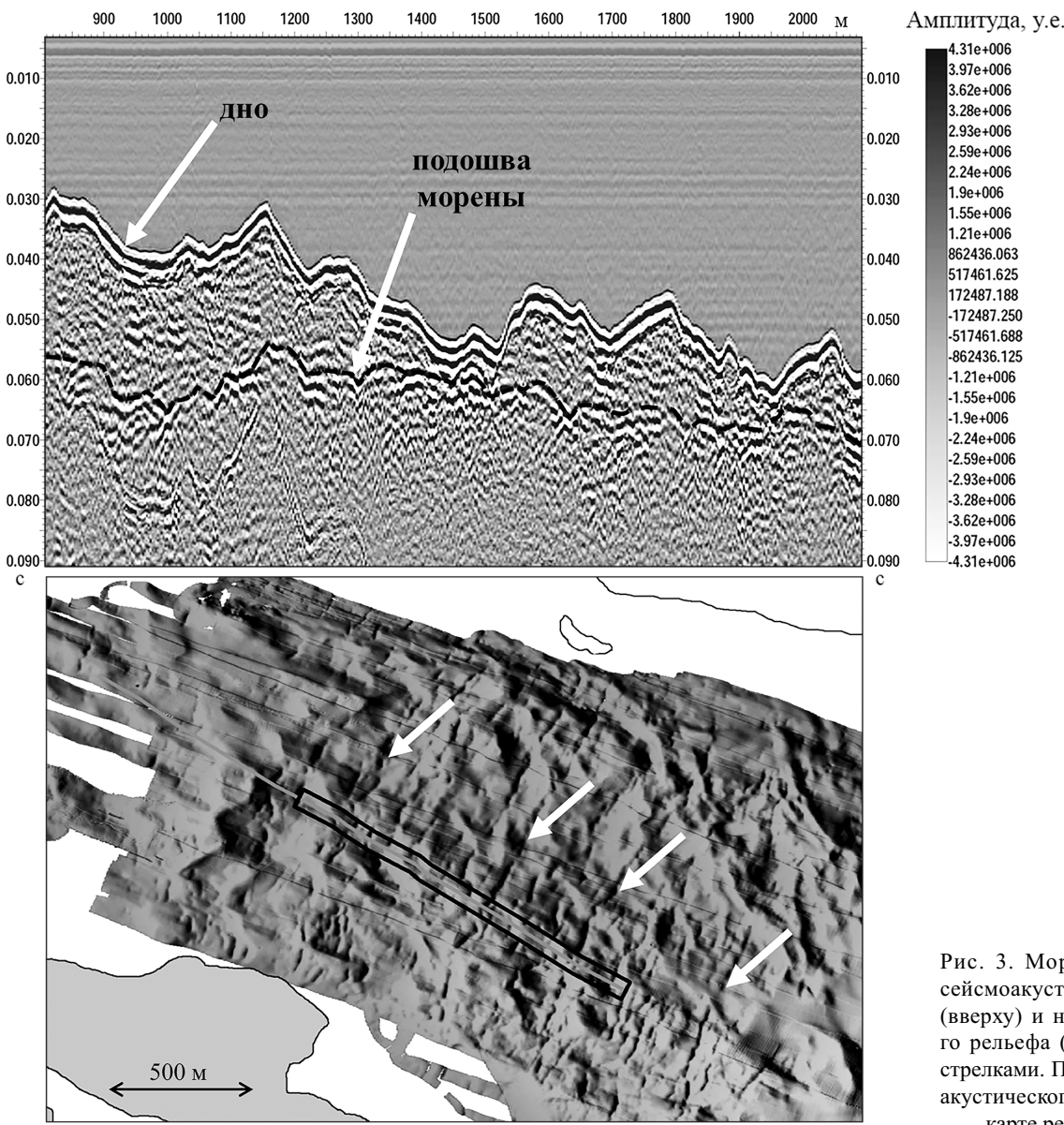
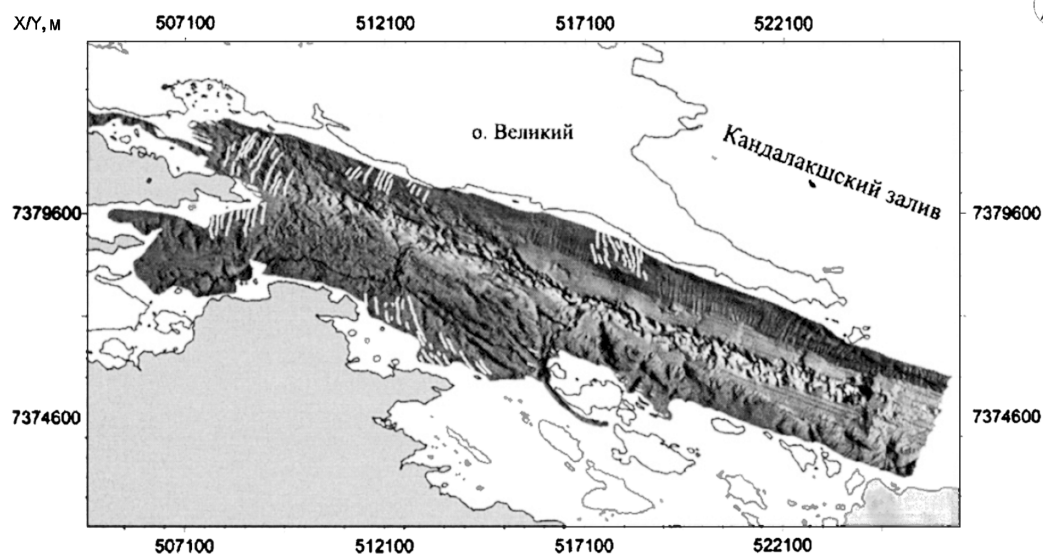


Рис. 3. Морены де Гира на сейсмоакустическом профиле (вверху) и на карте цифрового рельефа (внизу), показаны стрелками. Положение сейсмоакустического профиля см. на карте рельефа (внизу)

Рис. 4. Схема расположения морен де Гира в проливе Великая Салма по данным многолучевого эхолота (показаны белыми линиями)



Салма выделены ледниковые отложения (морена). Они уверенно картируются в районах, прилегающих к восточному окончанию п-ова Киндо — мысу Киндо [Старовойтов и др., 2018]. Максимальная мощность морены отмечена северо-восточнее м. Киндо, где она достигает 40 м. Также морена выделена на мелководных участках юго-западного борта пролива, но здесь ее мощность значительно меньше (до 10–12 м). В глубоководной части пролива Великая Салма морена отсутствует, хотя здесь отмечены сейсмокомплексы, по типу волновой картины и условиям залегания напоминающие ледниковый комплекс, но их генезис связан с оползневыми процессами (строение этих сейсмокомплексов рассмотрено в работе [Старовойтов и др., 2018]).

При анализе материалов сейсмопрофилирования видно, что рельеф кровли морены довольно сложный, однако, несмотря на плотную сетку профилей, проанализировать пространственное положение различных форм ледникового рельефа только по данным сейсмопрофилирования не удалось. На фрагменте профиля, представленном на рис. 3 (вверху), в кровле морены, которая обнажена на дне в северо-восточной части пролива Великая Салма, выделяются поднятия высотой несколько метров. Анализ донного рельефа, полученного с помощью многолучевого эхолота (рис. 3, внизу), показал, что положительные формы рельефа в кровле морены в плане представляют собой вытянутые в основном в северо-восточном направлении гряды (некоторые показаны стрелками). Максимальная протяженность гряд составляет около 2 км. Аналогичные положительные формы ледникового рельефа небольшой амплитуды (несколько метров) известны как морены де Гира и довольно широко распространены в Арктике [Todd, 2016; Shaw, Potter, 2016]. Их образование связано с кратковременными остановками ледника при его отступании, в плане они расположены, как правило,

поперек направления движения ледникового потока [Dowdeswell, Ottesen, 2016]. В некоторых районах по данным нескольких методов удалось установить положение и возраст этих морен за несколько десятков лет — с 1970 по 2010 г. [Flink et al., 2016].

Анализ данных многолучевого эхолота всей Великой Салмы позволил выделить морены де Гира еще на нескольких участках. Кроме района у восточного окончания п-ова Киндо, морены де Гира обнаружены на мелководных участках юго-западного борта пролива и на подводном склоне о-ва Великий (рис. 4). Высота этих форм рельефа также составляет в среднем несколько метров. Особо отметим, что в плане эти положительные структуры образуют форму, напоминающую язык, выпуклой стороной ориентированный в сторону п-ова Киндо. С учетом того, что морены де Гира образуются поперек движения ледника при его отступании, можно предположить, что в процессе таяния ледник отступал приблизительно в восточном направлении, т. е. в сторону современной глубоководной впадины Белого моря. Морены де Гира в некоторых местах перекрыты маломощным чехлом послеледниковых отложений.

В западной части акватории в рельефе дна выделяется линейная (на некоторых участках в плане напоминает синусоиду) форма протяженностью около 2,5 км (рис. 5, 9). В поперечном сечении она представляет собой холмообразную структуру высотой до 10–15 м, сложенную неслоистыми отложениями. Эта структура протягивается в субширотном (восточном) направлении, в целом ее простирание совпадает с предполагаемым направлением отступления ледника. По структурно-морфологическим признакам и по форме в плане ее можно отнести к структуре водноледникового происхождения — эскеру.

Центральная глубоководная часть пролива представляет собой вытянутую в юго-восточном направ-

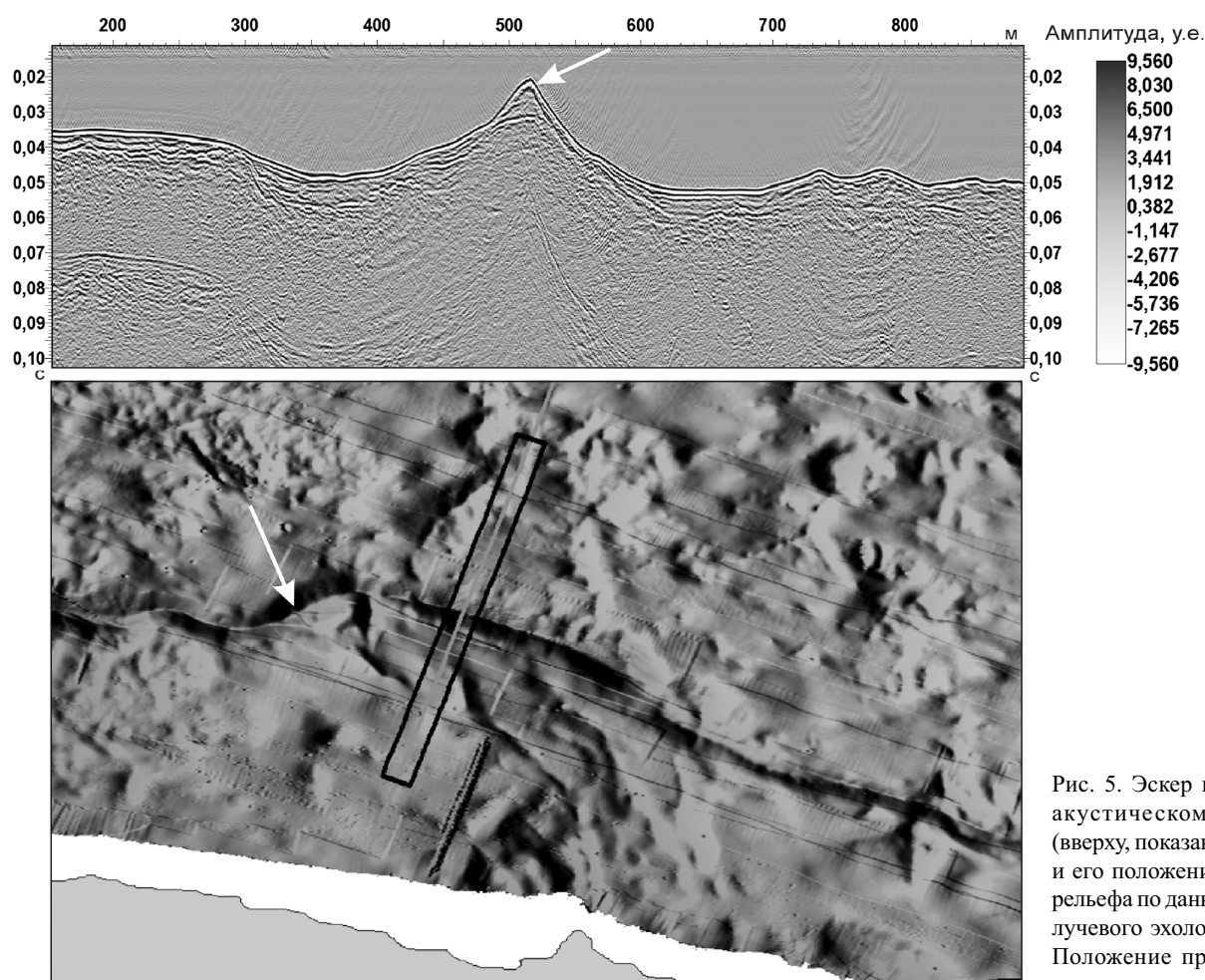


Рис. 5. Эскер на сейсмоакустическом профиле (вверху, показан стрелкой) и его положение на карте рельефа по данным многолучевого эхолота (внизу). Положение профиля см. на карте рельефа

лении узкую долину (ложбину) шириной в среднем 500–600 м и глубиной до 140 м. Долина в целом имеет прямолинейную форму, а ее дно характеризуется очень сложным рельефом (рис. 2, 6). На подводных склонах пролива Великая Салма, особенно на склоне о-ва Великий, обнаружены многочисленные неглубокие долины (глубина до 2–3 м), которые служили каналами сноса терригенного материала с образованием небольших подводных конусов выноса. На некоторых участках расположенные рядом конусы выноса сформировали у основания склона аккумулятивные шлейфы с пологим рельефом дна

(рис. 6, 7). На рис. 7 в левой части сейсмоакустического профиля стрелками показаны долины на склоне, которые прорезают современные осадки, в правой части малоамплитудные поднятия на дне представляют собой отображение в рельефе морен де Гира, погребенных под современными молодыми осадками. В морфологическом отношении участок дна между основанием склонов и глубоководной ложбиной характеризуется пологим рельефом и сложен тонкослоистыми осадками (рис. 6, 8).

Перегиб в рельефе дна между участком с пологим рельефом и глубоководной ложбиной в плане

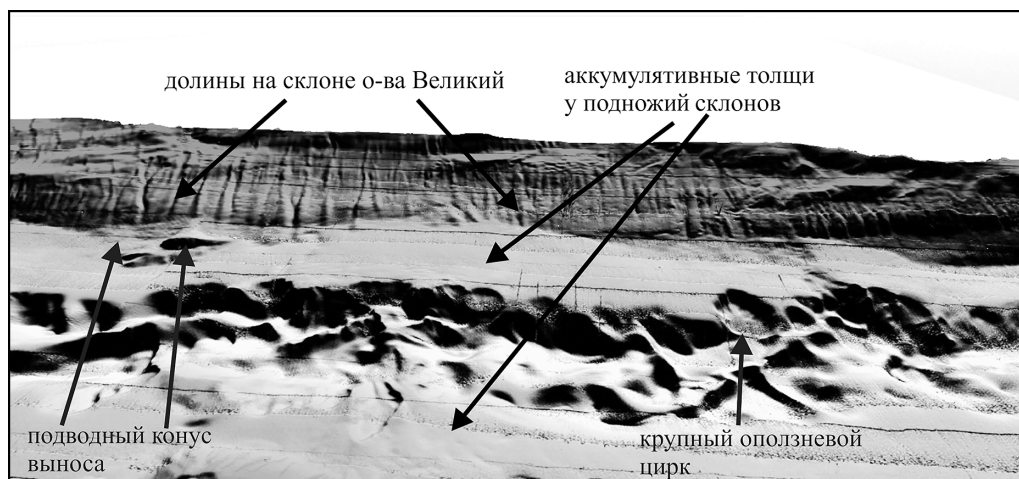


Рис. 6. Трехмерное изображение дна в юго-восточной части пролива Великая Салма по данным многолучевого эхолота

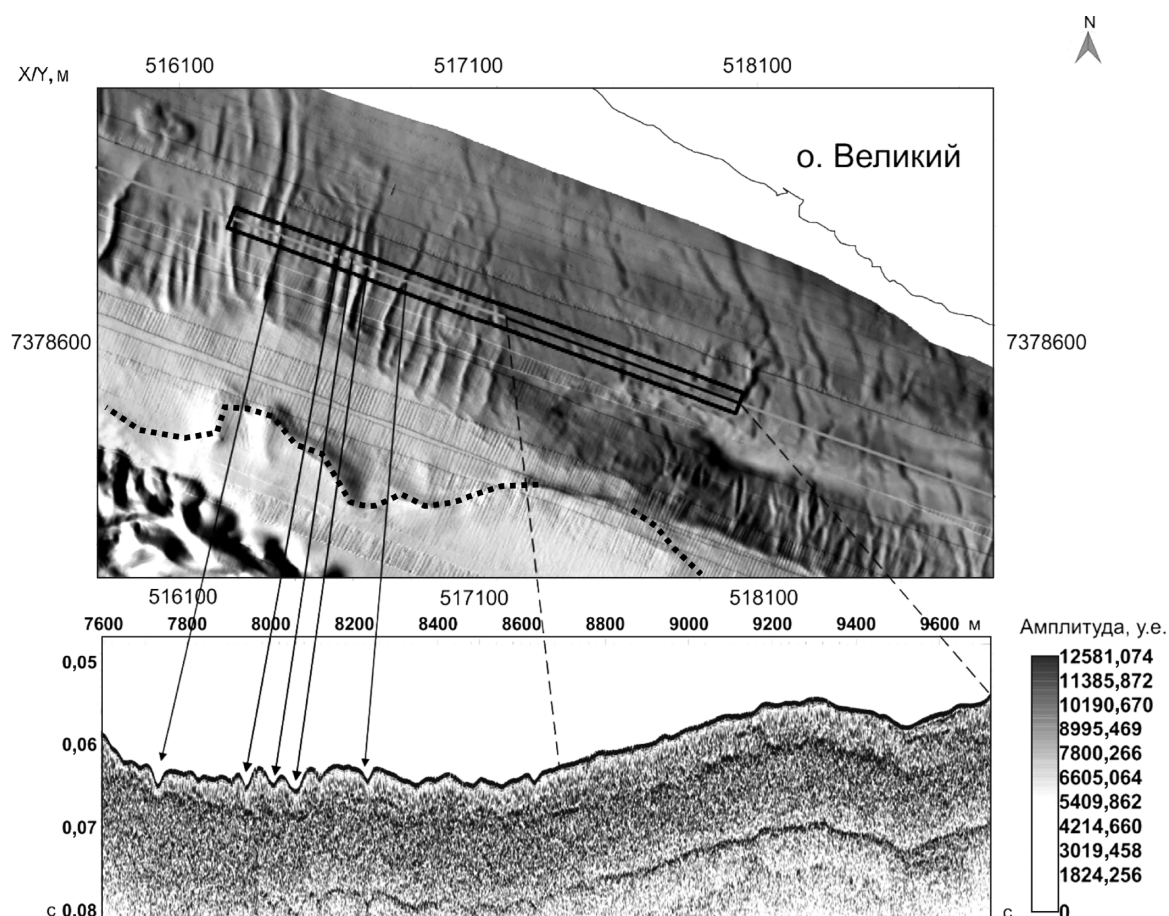


Рис. 7. Схема рельефа дна по данным многолучевого эхолота (вверху) и сейсмоакустический профиль вдоль основания склона (внизу), центральная часть пролива Великая Салма со стороны о-ва Великий. Черными точками околнурен аккумулятивный шлейф голоценовых (?) осадков у основания склона о-ва. Великий. Положение профиля см. на схеме рельефа. Справа — значения амплитуды в условных единицах. Остальные объяснения см. в тексте

имеет сильно изрезанную форму и представляет собой систему многочисленных, преимущественно овальных впадин шириной несколько десятки и несколько сотен метров, раскрывающихся в глубокую центральную ложбину. Эти впадины, очевидно, представляют собой оползневые цирки (рис. 6, 8), а сам перегиб — бровку срыва (бровку главного уступа). На рис. 8 приведен пример крупного оползневого цирка, глубина которого на представленном профиле составляет около 25 м. Так как подобные оползневые формы распространены на всем протяжении глубоководной ложбины, то можно предположить, что сложный рельеф дна в центральной глубоководной ложбине пролива Великая Салма в значительной степени сформирован оползневыми структурами, т. е. обусловлен широким проявлением здесь гравитационных процессов различного типа (оползневых, обломочных и грязевых потоков и т. д.), что типично при осадконакоплении на наклонных участках дна даже при незначительном угле наклона (1° и менее) [Lewis, 1971; Лонгинов, 1973]. В юго-восточной части пролива выделяется поперечная положительная структура шириной около 600 м, с восточной стороны которой рельеф дна становится практически субгоризонтальным (рис. 2), здесь

отсутствуют признаки современных оползневых структур. Следовательно, современные оползневые процессы происходили, как правило, только в самом проливе Великая Салма, в его глубокой центральной части.

Таким образом, ледниковый фактор сыграл главную роль в формировании структуры осадочного чехла и донного рельефа, в основном в северо-восточной части пролива — в районах, прилегающих к п-ову Киндо, тогда как в других районах пролива основная роль принадлежала гравитационным процессам (рис. 9). Подчеркнем, что влияние этих факторов происходило на фоне интенсивных тектонических движений в позднем плейстоцене—голоцене.

Заключение. Полученные новые данные о рельефе дна в проливе Великая Салма с помощью многолучевого эхолота позволили выявить не только некоторые важные особенности его рельефа, но и провести более достоверную интерпретацию полученных ранее сейсмоакустических материалов. На нескольких мелководных участках пролива впервые откартированы малоамплитудные гряды протяженностью до 2 км, сложенные ледниковыми отложениями (морены де Гира), которые в плане имеют форму языка (лопасти), выпуклой стороной

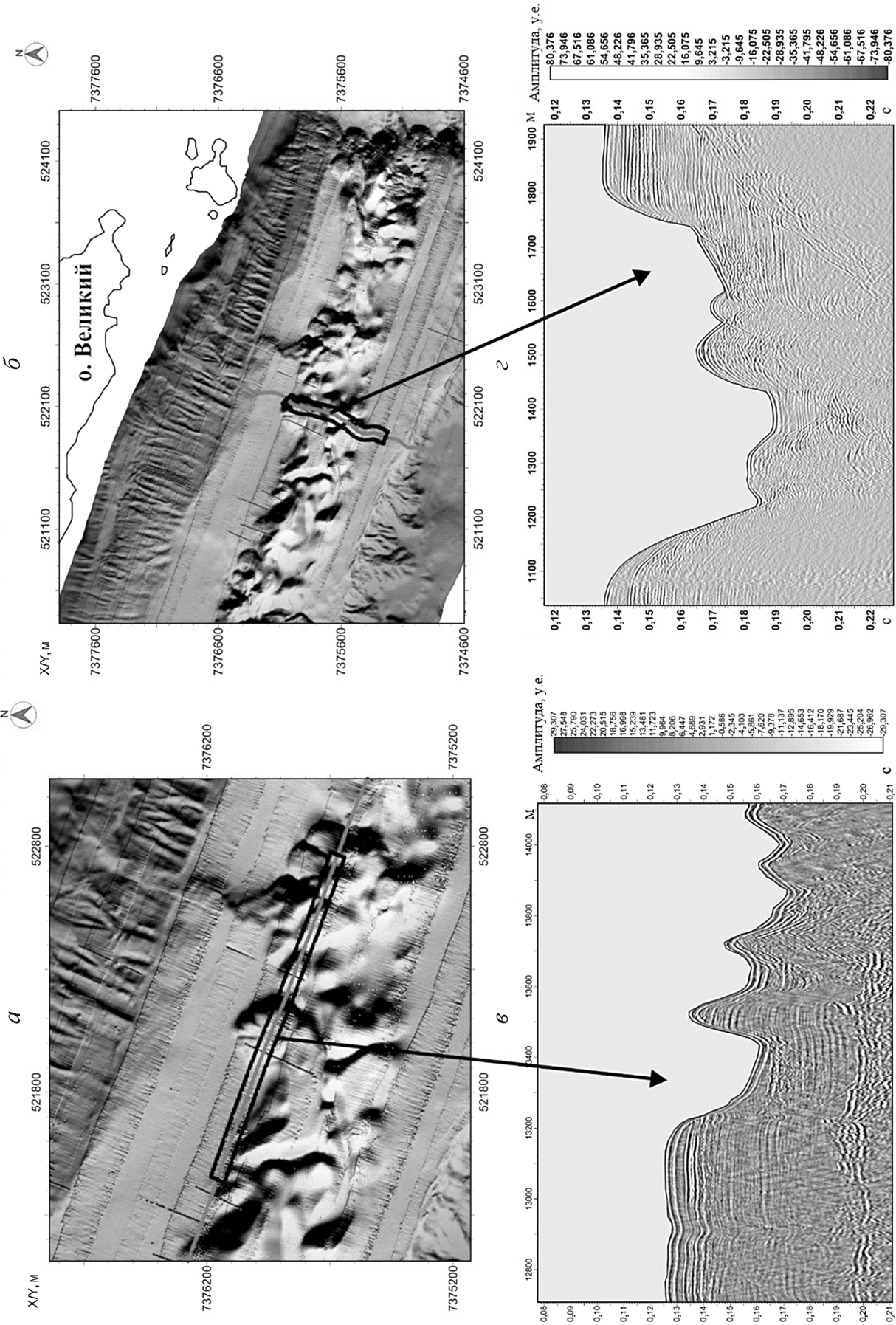


Рис. 8. Схемы рельефа дна (вверху) по данным многолучевого эхолота и сейсмоакустические профили вдоль и поперек склона (внизу), которые проходят через крупный оползневой цирк (см. рис. 6). Положение профилей показано на схемах рельефа. Стрелки указывают на продольное и поперечное к простираннию ложбины сечение оползневой цирка на сейсмоакустических профилях

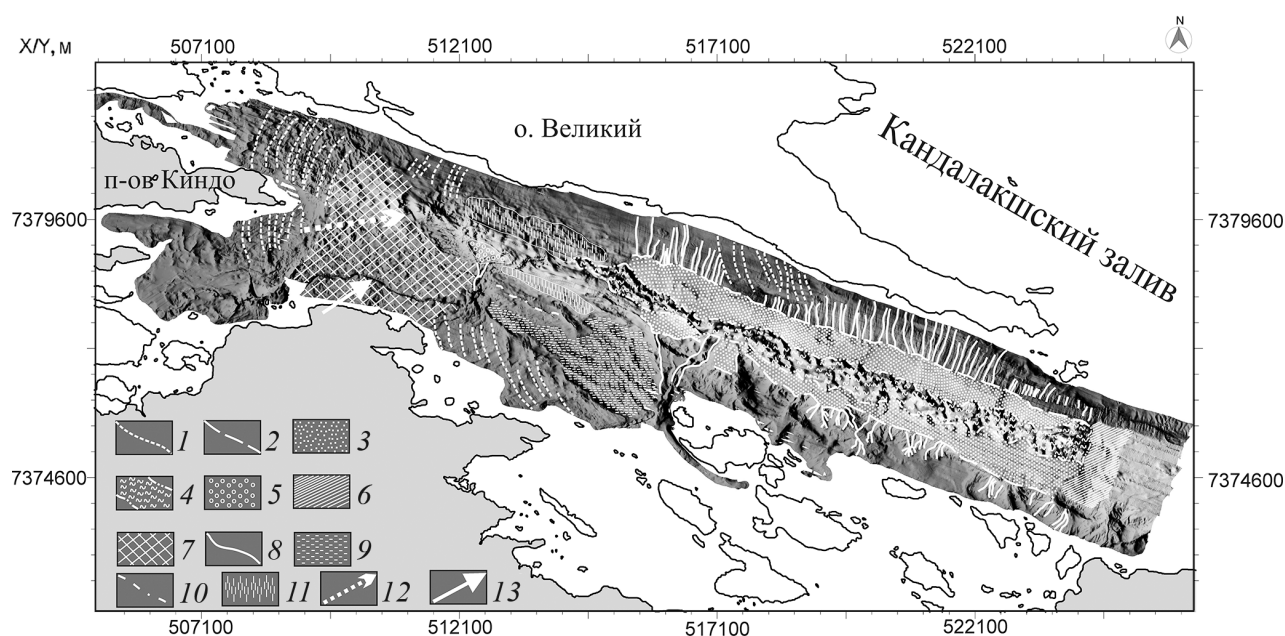


Рис. 9. Структурно-морфологическая схема пролива Великая Салма: 1 — морены де Гира в кровле ледникового комплекса; 2 — основание склона; 3 — участки с горизонтально-слоистым строением послеледниковых отложений; 4 — области распространения оползневых толщ; 5 — конус выноса (?); 6 — поперечная положительная структура; 7 — отложения ледникового комплекса, местами перекрытые надледниковыми слоистыми осадками разной мощности; 8 — долины на склонах; 9 — коренные отложения, местами перекрытые маломощным чехлом современных морских осадков; 10 — эрозионная ложбина (?); 11 — оползневые структуры с незначительными деформациями осадочного чехла; 12 — предполагаемое направление движения ледника; 13 — эскер

ориентированного в направлении п-ова Киндо. Расположение указывает на то, что в процессе таяния ледник отступал приблизительно в восточном направлении, в сторону современной глубоководной котловины Беломорской впадины. Не исключено, что таяние края ледника и его отступление в восточном направлении — свидетельство наличия глыбы мертвого льда в Центральном бассейне Белого моря, существование которого предполагали некоторые авторы [Невеский и др., 1977]. Ледниковые отложения залегают преимущественно в северо-восточной части пролива Великая Салма. Достоверных данных о присутствии морены в глубоководной части пролива в настоящее время нет.

Литодинамические (оползневые в широком смысле) процессы широко развиты в проливе и приурочены в основном к наклонным участкам склонов глубоководной ложбины пролива Великая Салма на всем его протяжении вплоть до поперечной структуры. Смещение осадков происходило преимущественно в два этапа и привело к формированию оползневых толщ мощностью до 40 м, редко больше [Старовойтов и др., 2018]. Первый этап гравитационных процессов предположительно был приурочен к начальному периоду опусканий дна пролива после

снятия ледниковой нагрузки и таяния ледникового покрова последнего оледенения. Оползневые толщ лежат непосредственно на кристаллическом фундаменте архейского возраста.

Причин, инициировавших гравитационные процессы, много [Prior, Coleman, 1982], но основными, вероятно, были тектонические движения и обусловленное ими увеличение углов наклона поверхности дна. Второй этап оползневых процессов связан с активизацией новейших тектонических движений, приведших к формированию современной структуры рассматриваемого региона. Во время этого заключительного этапа гравитационные процессы затронули слоистые послеледниковые отложения на отдельных участках вплоть до голоцена, в результате которых и был в основном сформирован сложный рельеф глубоководной ложбины в проливе. На аккумулятивных участках у основания склонов пролива отлагались ненарушенные слоистые отложения. Их генезис тесно связан со сносом терригенного материала по многочисленным неглубоким долинам, выделенным на прилегающих участках склонов. Проявления ледникового и литодинамического факторов происходили на фоне интенсивных тектонических опусканий на новейшем этапе развития этого региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балуев А.С., Пржиялговский Е.С., Терехов Е.Н. Новые данные по тектонике Онежско-Кандалакшского палеорифта (Белое море) // Докл. РАН. 2009. Т. 425, № 2. С. 249–252.

Девдариани Н.А. Геологическое строение Беломорской впадины: Автореф. канд. дисс. М., 1985.

Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях. М.: Недра, 1983. 204 с.

Кубышкина А.И., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю. Строение осадочного чехла на модельном полигоне «Глубоководный» по данным сейсмоакустического про-

филирования // Комплексные исследования подводных ландшафтов в Белом море с применением дистанционных методов. М.: Тов-во науч. изданий КМК, 2012. С. 34–40. (Тр. Беломорской биостанции МГУ; т. 11)

Лонгинов В.В. Очерки литодинамики океана. М.: Наука, 1973. 244 с.

Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 236 с.

Слабунов А.И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.

Сорокин В.М., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю. и др. Комплексные геолого-геофизические исследования осадочного чехла пролива Великая Салма // Разведка и охрана недр. 2009. № 2. С. 47–52.

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

Токарев М.Ю. Разработка технологии многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленными системами на мелководных акваториях: Автореф. канд. дисс. М., 2016.

Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Внеальпийская Европа и Западная Азия. М.: Недра, 1977. 360 с.

Dowdeswell J.A., Ottesen D. Submarine landform assemblage for Svalbard surge-type tidewater glaciers / Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient // Geol. Soc. Mem. Lond. 2016. Vol. 46. P. 151–154.

Flink A.E., Noormets R., Kirchner N. Annual moraine ridges in Tempelfjorden, Spitsbergen / Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient // Geol. Soc. Mem. Lond. 2016. Vol. 46. P. 75–76.

Lewis K.B. Slumping on continental slope inclined at 1° – 4° // Sedimentology. 1971. Vol. 16, N 1/2. P. 97–110.

Prior D.B., Coleman J.M. Active slides and flows in underconsolidated marine sediments on the slopes of the Mississippi delta // Marine Slides and other mass movements. N.Y.; L.: Plenum Press, 1982. P. 21–49.

Shaw J., Potter D.P. A glacial landform assemblage in Placentia Bay, Newfoundland, eastern Canada / Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient // Geol. Soc. Mem. Lond. 2016. Vol. 46. P. 139–142.

Todd B.J. De Geer moraines on German Bank, southern Scotian Shelf of Atlantic Canada / Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient // Geol. Soc. Mem. Lond. 2016. Vol. 46. P. 259–260.

Поступила в редакцию 17.02.2021

Поступила с доработки 05.04.2021

Принята к публикации 27.12.2021