

УДК 551.248+551.4

## РОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА ДНА И ПОБЕРЕЖЬЯ БЕЛОГО МОРЯ

© 2024 г. А. Е. Рыбалко<sup>1,2,3,\*</sup>, В. А. Щербаков<sup>1</sup>, М. Ю. Токарев<sup>4</sup>, А. А. Кудинов<sup>1,2</sup>, П. Ю. Беляев<sup>1</sup>,  
Т. Ю. Репкина<sup>1,4,5</sup>, Н. Е. Зарецкая<sup>1,5</sup>, Я. Е. Терехина<sup>1,4</sup>, В. В. Иванова<sup>1</sup>, В. И. Сличенков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового Океана им. акад. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), д.1, Английский пр., 190121 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет — Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7–9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, вл.1, стр. 77, оф.402, Ленинские горы — Научный парк МГУ, 119991 Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, д.1, Ленинские горы, 119991 Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт Географии РАН, д.29, Старомонетный пер., 119017 Москва, Россия

\*e-mail: alek-rybalko@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

После доработки 3.10.2023 г.

В печать 22.02.2024 г.

В настоящей статье приведены результаты исследования проявлений современных геодинамических движений в донных структурах Белого моря (Балтийский кристаллический щит). На основании проведенных экспедиционных работ в Белом море получены данные о формировании подводного рельефа и толщи рыхлых отложений под влиянием современных сеймотектонических явлений и геодинамических движений, а также долговременных неотектонических процессов. Показано, что впадина Кандалакшского залива представляет собой современный грабен, развивающийся по активизированным в четвертичное время разломам. Развитие грабена продолжается на северо-запад, где формируется новая структура четвертичного возраста. Выявлены признаки проявления современных геодинамических движений. Показана роль дизъюнктивной тектоники в формировании склонов и поперечных по отношению к простираанию залива тектонических структур, морфологически представленных грядами рельефа, секущими поднятия Средние Луды, расположенном в Кандалакшском заливе. Установлено влияние современных геодинамических процессов на распределение толщ четвертичных отложений различного генезиса, и мозаичного распространения современных донных осадков. Изучено влияние гравитационных процессов, участвующих в формировании подводных оползней, приводящих к появлению аномально мощных толщ рыхлого осадочного чехла.

**Ключевые слова:** современные геодинамические движения, грабены, тектонические нарушения, Белое море, Кандалакшский залив, неотектоника, сейсмоакустические методы, гравитационные процессы, опасные геологические процессы, рельеф, донные отложения

DOI: 10.31857/S0016853X24010044, EDN: HMGEOR

### ВВЕДЕНИЕ

Особенности проявления современных геодинамических движений на северо-западе территории России, в том числе на окружающих Балтийский кристаллический щит шельфовых морях, являются в настоящее время обсуждаемыми и относительно новой проблемой.

Некоторые исследователи настаивают на том, что эти процессы проявлялись как на протяжении всего четвертичного этапа развития региона, так и в позднем неоплейстоцене и голоцене [2, 5–7, 10, 11, 21–24, 29, 34, 37, 45, 47, 49, 55, 56, 64].

Другие исследователи отрицают значительное влияние блоковых неотектонических движений на формирование современного рельефа, отдавая предпочтение экзарационным и гляциоизостатическим процессам во время развития покровных оледенений [1, 13, 48–50, 63].

Особенно четко взгляды на гляциоизостатию, как ведущий фактор современных вертикальных движений, развиваются в Норвегии [53]. Однако для Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита выявлены многочисленные проявления как неотектонических процессов



Рис. 1. Карта-схема региона исследования (по данным [66], с дополнениями).

(прямолинейные участки рельефа, обширные области распространения структурно предопределенного рельефа), так и прямые свидетельства тектонических событий в голоцене, — прежде всего многочисленные сейсмодислокации, установленные как на севере, так и в других регионах Карелии [11, 20, 45].

Внедрение новых методов геофизических исследований, в том числе высокоразрешающего многоканального сейсмоакустического профилирования, многолучевого эхолотирования, показало, что многие особенности рельефа и четвертичного покрова морей гляциального шельфа, к которым относятся Баренцево море, Белое море и часть Карского моря, связаны не только с неотектоническими движениями, но проявляющимися именно в голоцене, в том числе и во второй половине этого периода.

При этом сеймотектонические процессы являются триггерами для подводных гравитационных процессов, которые существенно влияют на распределение донных осадков.

Целью настоящей статьи является исследование влияния современных геодинамических процессов на геоморфологию морского дна и литологию донных осадков Белого моря, где мы проводили иссле-

дования на протяжении многих лет, участвуя в морских геологосъемочных и тематических работах.

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

### *Западно-Арктический шельф*

Окраинные моря (Баренцево и Карское), а также внутришельфовые моря (Белое и Балтийское) на Северо-Западе России являются морями гляциального шельфа, т.е. шельфа, покрытого в четвертичное время континентальными и шельфовыми ледниками [31].

Беломорская котловина входит в строение одноименного морского бассейна, она является северной частью моря и имеет форму воронки. В строение Беломорской котловины входят (рис. 1):

- Центральная котловина вместе с Кандалакшским, Онежским и Двинским заливами;
- пролив Горло Белого моря;
- Воронка Белого моря (структура, которая является северной частью Белого моря в форме воронки, раструбом обращенная к Баренцеву морю, — внешняя зона раструба называется Воронка Белого моря).

Предполагается, что контур современной Беломорской депрессии предопределен системой

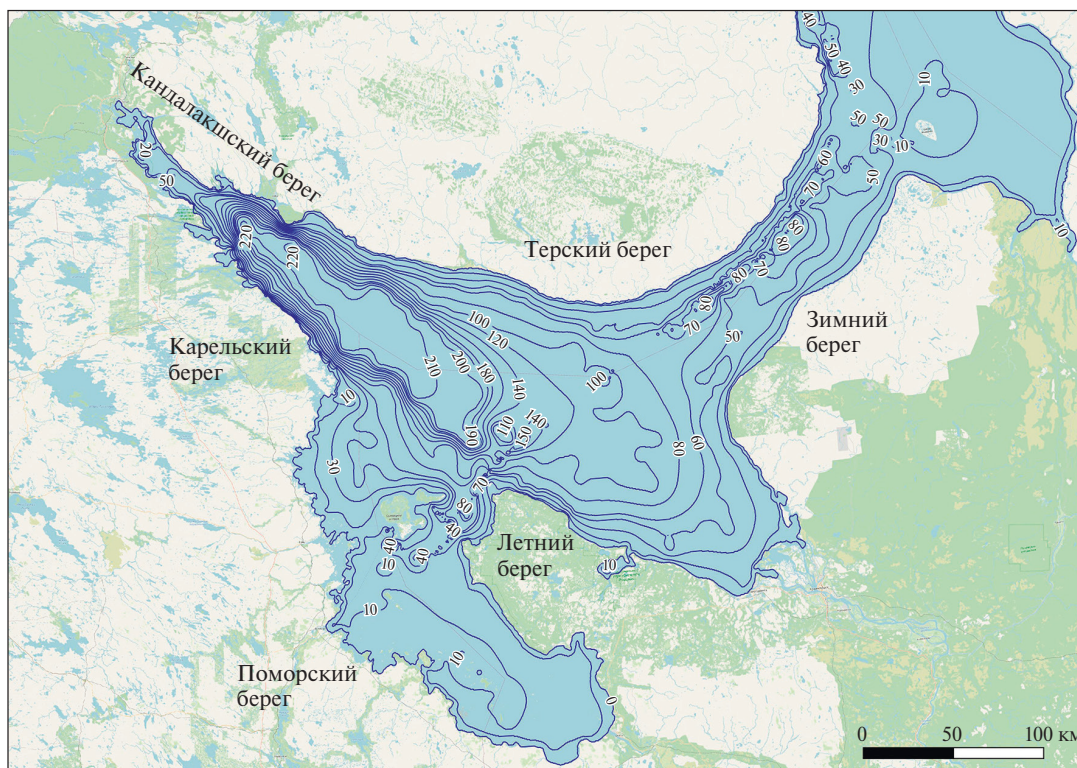


Рис. 2. Рельеф дна Белого моря (по данным [19]).

рифейских грабенов, которые сформировались на пассивной окраине палеократона Балтика в интервале 1263–1080 млн лет назад [5].

Именно эта депрессия и предопределила положение и морфологию наиболее северо-западного и глубоководного Кандалакшского залива, представляющего в настоящее время глубоководный желоб с крутыми бортами. Его формирование связывается с активизацией разломов вдоль рифейских грабенов в четвертичное время.

Окончательное формирование этой морфоструктуры определялось двумя факторами — эндогенными тектоническими напряжениями непосредственно в рассматриваемой части Балтийского кристаллического щита, а также динамическими нагрузками, связанными с развитием и деградацией Скандинавского ледника [5]. Эта активизация наблюдается и в наше время. При этом, значительная, наиболее глубоководная часть этого желоба выполнена мощной толщей рифейских песчаников [4].

Наличие крупных структурных нарушений характерно также для Баренцева моря.

М.Л. Верба [5, 8] указал на рифтогенную природу глубинных разломов Баренцевоморско–Карского шельфа. С глубинными разломами было связано формирование как крупнейших седимен-

тационных бассейнов в северной и южной частях Баренцева моря, так и унаследованное от системы древних рифтов распределение основных морфологических форм Баренцева моря — желобов и разделяющих их поднятий [8].

Исследованиями, проведенными на Западно-Арктическом шельфе ГИН РАН (г. Москва, Россия) совместно с ОАО “МАГЭ” (г. Мурманск, Россия) — одной из основных геологосъемочных организаций, — четко увязана современная неотектоническая активность с положением подвижных блоков в верхней мантии и разломной сетью глубинного заложения, которые выходят на поверхность морского дна [39].

Тесная связь древних и активизированных в четвертичное время разломов привела к характерной для Западно-Арктического шельфа (и нехарактерной для шельфовых морей) расчлененности рельефа донной поверхности. Эта связь прослеживается на цифровых моделях Баренцева и Белого морей, составленных в последнее время в Институте океанологии РАН (ИО РАН, г. Москва, Россия) (рис. 2).

Характер рельефа во многом предопределяет как распределение четвертичных и современных донных осадков, так и направленность седиментационных процессов. Крутые склоны современной

глубоководной котловины Кандалакшского залива обуславливают развитие на склонах гравитационных процессов [31].

Наличие желобов на Баренцево-Карском шельфе является причиной появления на их склонах гляциотурбидитов, возникших при дегляциации шельфовых областей [15, 30].

На распределение четвертичных отложений на дне западно-арктических морей оказывает воздействие и направленность неотектонических движений в позднечетвертичное время. Продолжающееся гляциоизостатическое поднятие дна Баренцева моря приводит к резкому сокращению мощности четвертичных отложений, в первую очередь, современных нефелоидных морских осадков [37, 42].

В Белом море неотектонический подъем глыбы Кольского полуострова и сопутствующее погружение осевой части Кандалакшского залива приводит к формированию на глубинах до 50–60 м преимущественно покрова маломощного перлювия, образующегося при размыве ледниково-морских и ледниковых отложений [31].

Таким образом, мы видим тесную связь геологического строения морей гляциальной зоны с особенностями формирования четвертичного покрова, а также с донными отложениями, непосредственно залегающими на поверхности морского дна.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Особенности проявления современных геодинамических процессов в Западно-Арктических морях*

Широко распространенное понятие новейшей тектоники, прочно вошедшее в геологию четвертичных отложений, подразумевает изучение тектонических движений в земной коре и литосфере, которые происходили в позднем кайнозое (~35 млн лет) и продолжают на современном этапе развития территорий. Это — вертикальные движения, которые имеют разнонаправленный характер и приводят к поднятиям или опусканиям земной поверхности.

На северо-западе Европы — это преимущественно восходящие движения Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита, компенсированные опусканием земной коры в странах центральной Европы, в частности, — Голландии.

На эти движения в северных районах, испытавших четвертичное оледенение, накладываются

ся гляциоизостатические движения, связанные с прогибанием земной поверхности под тяжестью ледника и компенсационным поднятием после снятия ледниковой нагрузки.

Все эти движения очень медленные и обладают долговременным эффектом. Кроме прямых фактов сейсмогенных явлений, примером которых может являться Калининградское землетрясение в 2004 г. [25] или Териберское землетрясение в 1917 г. [23], появляется все большее количество данных о землетрясениях в платформенных областях, свидетельством чему являются многочисленные сейсмодислокации, обнаруженные в Карелии и на Кольском полуострове [20, 44].

В связи с этим возникла необходимость введения определения для новейшего этапа развития земной коры — современные геодинамические движения. Под этим определением понимаются движения земной поверхности в реальном масштабе времени, что обычно соотносится с голоценовым этапом развития территорий, т.е. в течение последних 10–12 тыс. лет [14]. Такое понятийное определение существовало и раньше, но оно охватывало в основном высокоточные измерения смещения поверхности Земли геодезическими методами. Однако в последнее время в это понятие все чаще вводятся данные о геодинамических преобразованиях Земной коры (разрывы, сейсмогенные толчки и др.).

Эти представления в значительной мере отнеслись к структурам Балтийского кристаллического щита, практически лишенного осадочного покрова, кроме маломощного четвертичного чехла. При этом наряду с важным геодинамическим фактором современного морфогенеза земной поверхности, большую роль в формировании донного рельефа играют ледниковые процессы на фоне снижения активности поздневалдайского ледника.

Четвертичные покровные ледники активно преобразовывали породы ложа Северного Ледовитого океана, а при деградации ледникового покрова они оставляли после себя аккумулятивные формы ледникового и водно-ледникового генезиса.

### *Сейсмоакустическое профилирование*

Важнейшую роль для геоморфологических построений приобрело непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП), так как этот метод позволил получать информацию о морфологических формах, а по геометрическому соотношению форм получать косвенную информацию о возрасте структур.

Важной характеристикой форм донного рельефа является возраст их формирования, который может быть определен только при геологическом изучении толщи осадков, что реализуется путем геологического отбора проб тяжелыми грунтовыми трубками, а также при проведении бурения рыхлых отложений на всю их мощность.

Однако геологические методы исследования рельефа дна в шельфовых морях до сих пор используются ограниченно. В этих условиях метод НСП остается единственным источником информации о генезисе и возрасте форм донного рельефа. В настоящее время информативность сейсмоакустических методов можно повышать за счет использования аппаратуры с различными частотами излучения, а также проведения многоканального профилирования, что позволяет переходить к точным метрическим методам морфометрического анализа.

По классификации метода НСП наибольшую глубину (до 1 км) зондирования донных грунтов при относительно высокой вертикальной разрешающей способности (4–1 м) обеспечивает сейсморазведка высокого разрешения (СВР) в частотном диапазоне колебаний 80–375 Гц.

Применяется метод сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР) в частотном диапазоне колебаний 375–1500 Гц с разрешающей способностью  $\leq 1$  м. Метод ССВР является наиболее востребованным методом исследования.

Проводится сейсморазведка ультравысокого разрешения (СУВР) на частотном диапазоне колебаний 1.5–13 кГц с разрешающей способностью  $\leq 25$  см и глубинной зондирования  $\leq 30$  м по глинистым отложениям [9, 44].

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА БЕЛОГО МОРЯ

### *Кандалакшский залив*

Ранее проведенными исследованиями было подтверждено, что берега и острова Белого и Баренцева морей испытывают вертикальные движения [12, 18, 20, 40].

С.В. Победоносцев и Л.Л. Розанов [23] на основании исследований голоценовых и современных тектонических движений берегов Белого и Баренцева морей выделили обширную зону, расположенную рядом с поднятиями голоценового возраста, на Кандалакшском и Карельском берегах Белого моря.

Испытывают подъем также береговые зоны Онежского п-ова, Соловецких островов, о. Жужмуй и о. Жижгин в Онежском заливе.

Наряду с этим выделяются значительные по протяженности погружения в голоцене следующих структур [23]:

- юго-восточная часть Кольского полуострова;
- южная часть п-ова Канин;
- западное побережье Чешской губы;
- о. Колгуев;
- приустьевые зоны рек Северная Двина и Онега.

Движения берегов были сопряжены и с аналогичными движениями на морском дне.

Б.И. Кошечкин [38] указал, что подъем и формирование Кандалакшских тундр сопровождалось регрессией на прилежащей части Кандалакшского залива.

Эти данные совпали с нашими наблюдениями рельефа дна при проведении морских геолого-съёмочных работ, ходе которых был выделен регрессивный уровень на отметках –50—–60 м, ниже –60 м голоценовые осадки почти полностью отсутствовали [30].

Белое море относится к внутришельфовым морям гляциальной зоны и характеризуется достаточно расчлененным, а главное — разнообразным, характером донного рельефа. Максимальные глубины в нем превышают 200 м, при этом наиболее яркой чертой рельефа беломорского бассейна является глубоководная впадина Кандалакшского залива, которая во многом предопределяет контур современного морского бассейна.

Генезис этого рельефа полигенетичен, но главными факторами являются тектонический и ледниковый. Соотношение этих факторов в морфогенезе донной поверхности связано с тем, что до сих пор основным направлением в исследованиях морской геоморфологии является районирование морфологии морского дна [16].

### *Сеймотектоническая активизация и морфоструктуры*

Белое море представляет собой внутриплитную морфоструктуру, расположенную на границе Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита. Контур современной Беломорской депрессии наследует структурный план рифейской системы грабенов, возникших на пассивной окраине палеократона Балтика в интервале 1263–1080 млн лет назад [4, 62].

Система разломов, ограничивающих эти позднепротерозойские структуры, неоднократно активизировалась, по ним часто происходило внедрение даек, которые видны на острове Касьян в проливе Великая Салма.

Один из последних этапов сеймотектонической активизации произошел в четвертичное время. Окончательное формирование морфоструктуры Белого моря определялось взаимодействием двух факторов [5]:

- эндогенные тектонические напряжения в кристаллическом фундаменте;
- экзогенные статические и динамические нагрузки, создаваемые Скандинавским ледниковым покровом.

Ледниковая нагрузка, создаваемая этим ледником, приводила к проседанию подстилающей поверхности. После снятия этой нагрузки происходило компенсационное воздымание земной поверхности, что и предопределило сложное сочетание влияния на позднеледниковый рельеф тектонического и гляциоизостатического факторов. Однако реальная картина поднятия в Кольском регионе оказалась более сложной.

Обсуждая историю становления взглядов на развитие морфоструктуры Кольского полуострова, С.А. Стрелков с соавт. [38] показали, что разработка первоначальной схемы гляциоизостазии принадлежит В. Рамзаю [60].

В конце 1990 гг., когда началось планомерное изучение отложений озерных котловин, изолированных от моря вследствие гляциоизостатического поднятия, было установлено, что ключевое положение гляциоизостазии, при котором накопление мощности ледника приводит к воздыманию территории после его таяния, было существенно нарушено на Кольском полуострове.

Такие массивы, как Хибины или Кандалакшские тундры, никак не укладывались в это понятие. Кроме того, было установлено доминирование сдвигов среди неотектонических разрывных нарушений [10]. Б.И. Кошечкин полагал, что тектонические движения преобладали над гляциоизостатическими [38].

#### *Кандалакшский залив*

Кандалакшский залив располагается в пределах двух грабенов [5, 43]:

– одноименный Кандалакшский грабен (на юго-востоке залива), который унаследовал древний рифейский прогиб позднепротерозойского палеорифта и активизированный (воссозданный) в неоплейстоцене до наступления валдайского ледника;

– Колвицкий грабен (на северо-западе залива — эта часть залива имеет название Кандалуха).

Грабены разделены расположенной между островом Великий и Порьей губой межвпадинной

перемычкой. Здесь происходит перенос напряжений растяжения с юго-западного борта (южная часть рифтовой зоны) на северо-восточный борт (северная часть рифтовой зоны) [5, 47].

Проведенные нами здесь сейсмоакустические исследования показали, что данная перемычка представлена структурным поднятием, рассеченным мелкими разломами, при этом в верхней части этого поднятия сохранился блок рифейских пород (рис. 3).

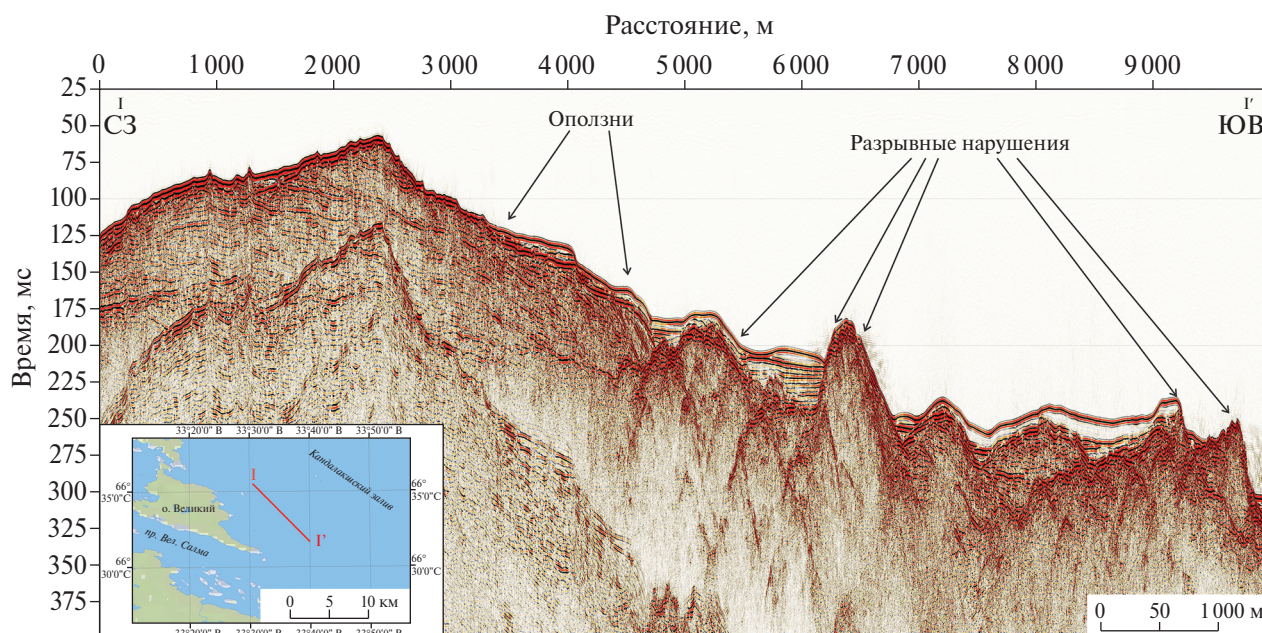
Проведенными исследованиями были выявлены многочисленные формы рельефа, связанные с проявлением современных геодинамических движений, выраженных в распределении отложений как четвертичных, так и поверхностных донных осадков. Было установлено, что многие мезоформы рельефа, часто выражающиеся на поверхности Кандалакшского залива в виде луд и корг, а также островов, отражают мелкоблочную структуру коренного цоколя, представленного кристаллическими породами архея и нижнего протерозоя.

Эти блоковые дифференцированные движения происходят на фоне унаследованного общего поднятия западной части Беломорского бассейна при относительном погружении восточной, в настоящее время со скоростью +4 мм/год и –1––2 мм/год соответственно [46]. На сейсмограммах отчетливо выделяются ступенчатые склоны со значительными градиентами между бровкой и подножием (рис. 4).

Наибольшие градиенты связаны с уступом (бровка Самбалудского шельфа), который протягивается от южного обрамления залива на юго-восток к Онежскому полуострову [31, 63].

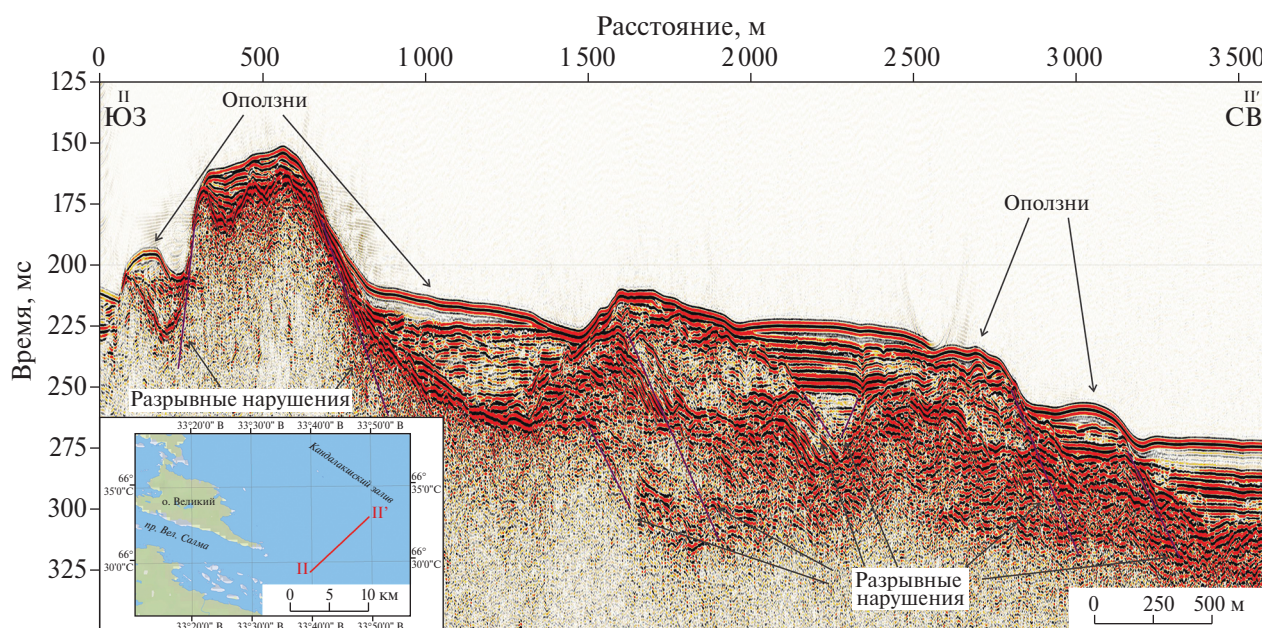
А.А. Никонов с соавт. [24] выделили структуру уступа как региональный сейсмолинеament, вдоль которого отмечались неоднократно сильные землетрясения, произошедшие в неоплейстоцене и голоцене.

В районе наибольших глубин Кандалакшского залива, который находится между мысом Турий нос и Карельским берегом, были выделены (с использованием модели рельефа Белого моря [18]) узкие трог, тектоническое происхождение которых подчеркивается геометрической формой и приуроченностью к резким перегибам рельефа. При этом формирование этих трогов происходило в результате не только вертикальных, но и сдвиговых смещений по направлениям, поперечным и диагональным к простираанию Кандалакшского грабена [24].



**Рис. 3.** Сейсмоакустический профиль I–I' по восточному склону поднятия островов Средние Луды в Канда- лашском заливе.

При визуализации использовалась по трассовой нормировка амплитуд с усилением 0.3. Показан (линии фиолетовым) блок слоистых пород — реликт покрова рифейских песчаников.



**Рис. 4.** Сейсмоакустический профиль II–II' по юго-западному склону впадины Кандалакшского залива, пере- секающей пролив Велика Салма.

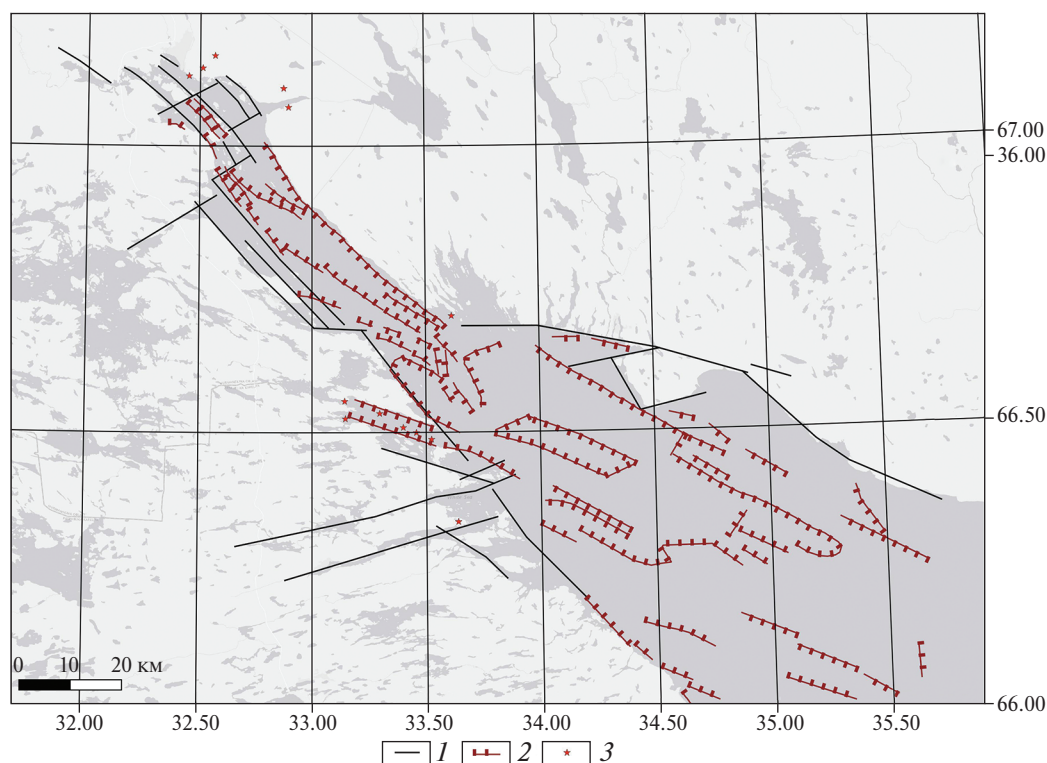
На врезке: показан профиль II–II'. На сейсмограмме выделены по смещению сейсмических горизонтов множествен- ные активизированные разломы и связанные с ними оползни.

*Система разломов глубоководной впадины*

Борта наиболее глубоководной впадины, рас- положенной напротив мыса Турий нос, имеют высоту от 30 до 80 м, они связаны с диагональ- ными и поперечными направлениями смещений, сформировавших системы разломов.

Диагональная система разломов прослеживается к западу в район пролива Великая Салма и к вос- току, определяя положение оси Кандалакшского грабена ближе к его северному (Кольскому) борту.

Поперечная система разломов связана с про- дольными грабенообразными депрессиями со



**Рис. 5.** Элементы морфоструктуры Кандаляшского залива (по данным [46], с изменениями и дополнениями). 1 — линейные элементы рельефа береговой зоны; 2 — основные тектонические уступы (ограничения грабенов); 3 — палеосейсмодислокации (по [46])

сдвигом осевой части, который наиболее выразительно прослеживается от губы Чупа к полуострову Турий. Тектоническая природа этих разломов, четко просматривающихся по уступам в донном рельефе, подтверждается материалами проведенного нами сейсмопрофилирования (см. рис. 4).

На сейсмограммах отчетливо выделяются смещения в первые метры—десятки метров послеледниковых осадков по тектоническим нарушениям, расположенных в тыловом шве этих уступов [35].

Это привело к формированию на дне Кандаляшского залива плотной системы многочисленных грабенообразных форм (рис. 5).

Приуроченность палеосейсмодислокаций к поперечным и диагональным направлениям деформаций подтверждает сейсмическую активность в неоплейстоцене, возможно, в голоцене [47, 48].

Также в более мелководных впадинах наблюдается резкая дифференцированность рельефа, которая связана с тем, что блоки фундамента, испытывающие разнонаправленное и разновременное движение имеют прямолинейные границы, которые предопределяют появление линейных форм рельефа, причем эта прямолинейность нередко переходит с борта на борт впадины, захватывая и береговую линию (рис. 6).

#### *Продольная асимметрия структур Кандаляшского залива*

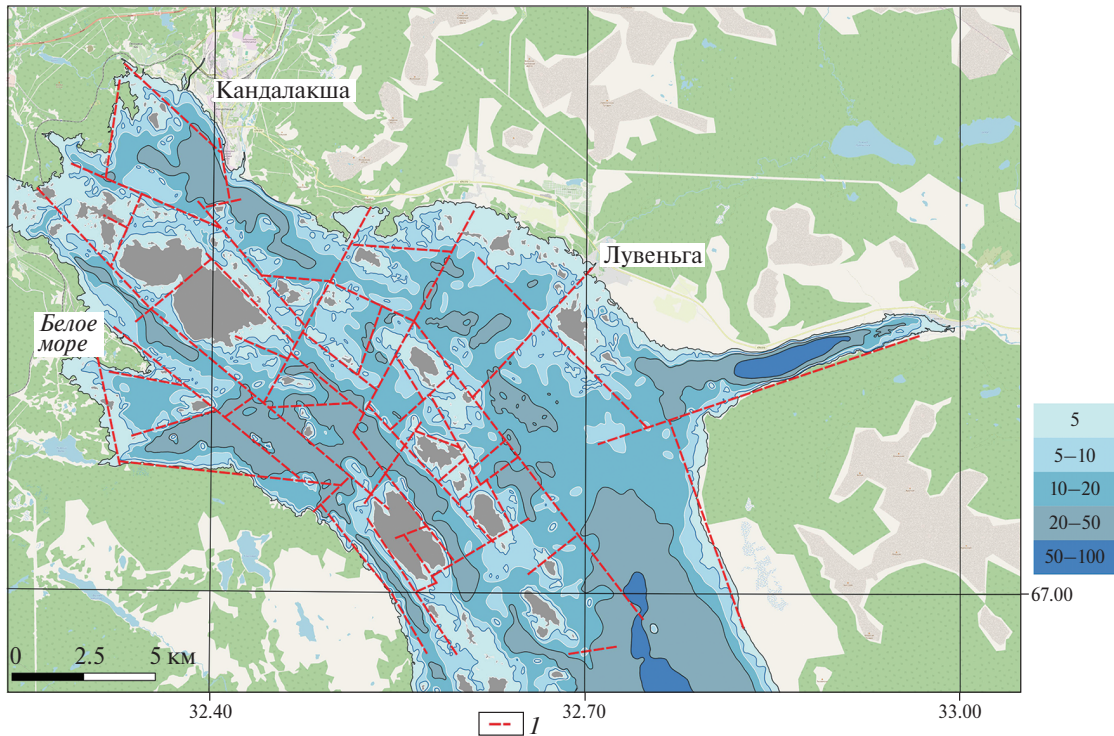
Для Кандаляшского залива характерна продольная асимметрия, связанная с различным батиметрическим уровнем уступов, обрамляющих современный грабен. Уступы, протягивающиеся вдоль Карельского берега, имеют высоту до 160 м, а высота уступов у южного побережья Кольского полуострова достигает только 100 м.

Аналогичная асимметрия наблюдается в восточном замыкании, где вдоль Онежского полуострова высота уступов составляет ~30 м, вдоль Зимнего берега <2 м, иногда эти уступы отсутствуют [48].

Подобные уступы показаны на сейсмограммах, а их прямая связь с геодинамическими зонами позволяет выделить подобные формы рельефа как структурно-денудационные (см. рис. 4).

Примером грядового структурно предопределенного рельефа является вершина Кандаляшского залива (Кандалухи), где типичный шхерный облик акватории имеет черты четкой линейной упорядоченности. Причем гряды структурного происхождения чередуются с грядами, покрытыми моренными отложениями и характеризующимися развитой растительностью.





**Рис. 6.** Схема распространения современных дизъюнктивов в вершине Кандалакшского залива по данным анализа космоснимков и полученным геофизическим данным (по [64, 65]).

*I* — разрывные нарушения



Структурное происхождение этого рельефа подчеркивается выходами газов по трещинам, а также гидрологическими измерениями, которые указывают на нахождение в нижней части водной толщи относительно опресненных вод [35].

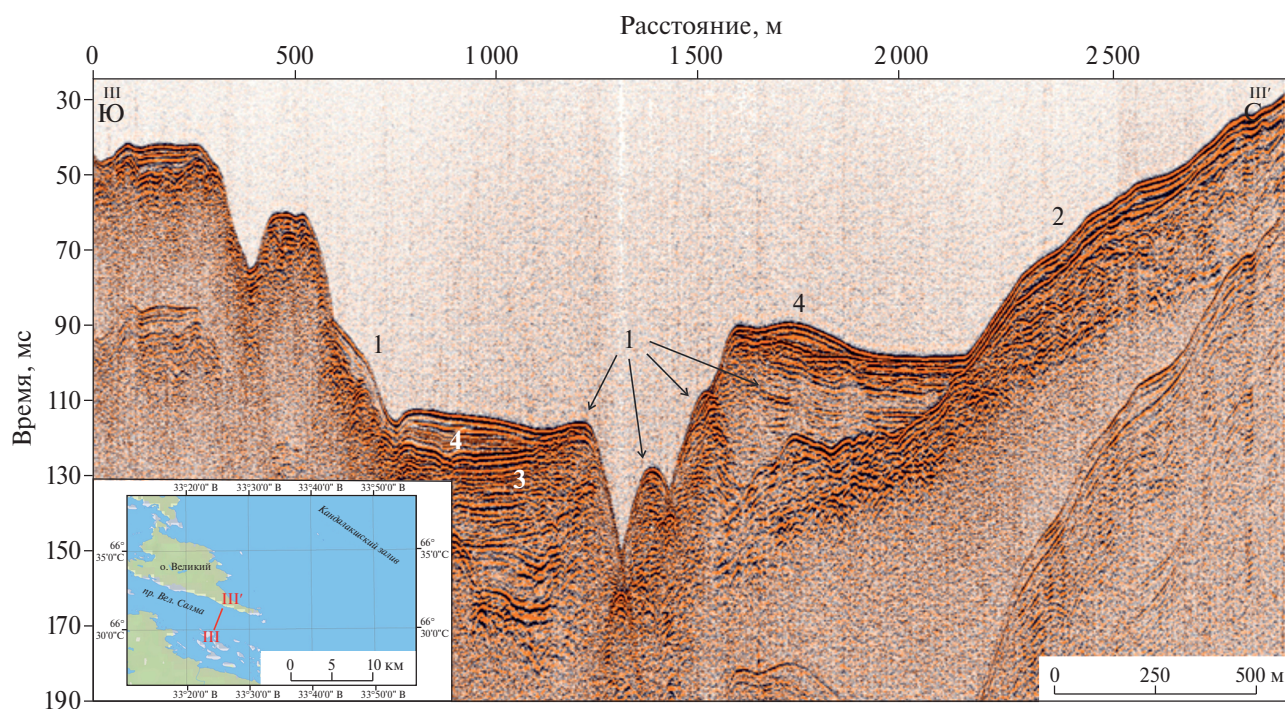
Этот факт можно интерпретировать как результат водообмена по тектоническим трещинам, что мы наблюдали на береговых разрезах. При этом мощность придонного горизонта воды и его минерализация менялись в разное время, что, как мы полагаем, связано с периодами геодинамической активизации и расширением трещин или увеличением водообмена.

Впоследствии наше мнение подтвердилось, когда после разлива нефти на берегу в Витинском порту и правильной обваловки разлива, нефтепродукты по трещинам проникли в Кандалакшский залив [32].

В большом количестве островов, а также на территории приморской суши, в зоне выхода

**Рис. 7.** Сейсмодислокация на северном берегу Кандалакшского залива.

Смещение по линии тектонического разлома составляет 1.5 м. Показано смещение по тектонической трещине (пунктир красным) верхней линии зоны ожелезнения, связанной с максимальным уровнем приливов (линии черным).



**Рис. 8.** Сейсмограмма по профилю III–III' зоны активного развития оползневых процессов в проливе Великая Салма (Кандалакшский залив).

Обозначено (арабские цифры): 1 — тела оползней; 2 — зеркало скольжения оползня; 3 — зона накопления осадков с аномально высокой мощностью в результате проявления гравитационных процессов;

4 — накопление современных нефелоидных осадков, формирующихся за счет взвеси, образовавшейся при движении оползней.

габброидных пород Кандалакшских тундр на берег, нами было установлено большое количество сейсмодислокаций. Характерно, что на одной из этих сейсмодислокаций видно смещение по разлому приливной линии на расстояние до 1 м, что указывает на ее молодое происхождение (рис. 7).

Еще одним доказательством молодых послеледниковых геодинамических движений являются острые и свежие грани микрорельефа береговых уступов на фоне сглаженного ледником берега, что однозначно свидетельствует об их формировании после отступления ледника.

#### *Пролив Великая Салма*

Пролив Великая Салма находится в структуре Кандалакшского залива.

Желоб пролива является зоной растяжения, которая развивалась одновременно с впадиной Кандалакшского залива [7].

Основными чертами рельефа дна желоба и поверхности фундамента в его границах являются [46]:

- увеличение глубин дна в направлении с северо-запада на юго-восток от 40 до 140 м и углубление поверхности фундамента до 300 м;

- увеличение мощности осадочной толщи от 10 до 100–150 м;

- наличие изолированных котловин с глубиной до 120 м, разделенных порогами относительной высотой в несколько десятков метров;

- смещение оси желоба к южному борту, что формирует резкую поперечную асимметрию с крутым резко расчлененным юго-западным и пологим северо-восточным (Великоостровским) склонами.

Склоны впадины пролива по данным сейсмометрии крутые, ступенчатые (рис. 8).

Перечисленные особенности указывают на первичное тектоническое происхождение желоба и свидетельствуют об активном погружении дна желоба в новейшее время и резкой дифференцированности тектонических движений [17].

#### *Разрывные нарушения кровли фундамента*

По полученным данным непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) в фундаменте и перекрывающей его толщ четвертичных отложений были выделены разрывные нарушения, определяющие размер отдельных блоков на уровне первых сотен метров, с вертикальными

смещениями, проявляющимися в донном рельефе, что указывает на современную активность.

Амплитуда смещения кровли фундамента по разрывам в среднем составляет 10–12 м, достигая 35–40 м и уменьшаясь к кровле осадочного чехла до первых метров [36]. При этом осевая часть пролива является контактом многофазных гравитационных блоков, оползающих по обоим бортам. Между ними практически отсутствуют донные осадки. Большое количество оползневых тел устанавливаются здесь и по данным многолучевого эхолотирования [28].

Вследствие того, что толща четвертичных отложений начала накапливаться в течение второй стадии Валдайского оледенения 20–18 тыс. лет назад, скорость вертикальных смещений можно оценить в 0.5–2 м/тыс. лет.

На юго-западном борту грабена обнаружены блоковые оползни объемом до 800 000 м<sup>3</sup>, которые включают как моренные отложения, так и блоки кристаллического основания, что может быть подтверждением произошедших сильных сейсмических событий, когда разрушению подвергся коренной цоколь. В результате склон имеет ступенчатый характер, формируя почти вертикальную структуру с уступами шириной 100–200 м и высотой крутых склонов до 20–30 м (см. рис. 6).

#### *Скорости поднятия*

Измерения поднятий береговой зоны в районе полуострова Киндо в северо-западной части Кандалакшского пролива показали очень высокие скорости поднятия пролива за последние 9.5 тыс. календарных лет — за это время берег полуострова поднялся на ~90 м [29].

В начале голоцена в интервале 9.5–5 тыс. лет назад скорость оценивается в 9–13 мм/год. Скорость замедлилась в атлантическое время (трансгрессия Тапес), затем активизировалось в суббореальное время и опять замедлилась в субатлантическое время. Современные скорости поднятия составляют примерно 4 мм/год. В кутовой части Кандалакшского залива на беломорском побережье амплитуды постледникового поднятия были максимальными — до 150 и более метров [28].

Высокие скорости подъема в голоцене явились причиной заметных тектонических напряжений в земной коре, разрядка которых происходила в результате землетрясений, разломов разной ориентировки, активизации гравитационных процессов.

Это подтверждается наличием многочисленных скальных уступов высотой 15–40 м на берегах пролива, террасовидных ступеней (блоков отседания) на склонах, глубоких (до 2–3 м) трещин и рвов, а также каменных сейсмодислокаций на островах и прилегающей части Карельского берега [29]. Размер каменных блоков в этих сейсмодислокациях может свидетельствовать о землетрясениях магнитудой  $M \leq 9$  баллов [48].

#### *Сейсмогенные структуры Беломорского бассейна*

Потенциальные сейсмогенные структуры выявлены по сейсмоакустическим данным и в остальных частях Беломорского бассейна. Вторым по размеру после Кандалакшского является грабен Онежского залива с сужением прогибов в западной части. На всем протяжении, вплоть до устьевой части реки Онега на востоке, у Онежского залива прослеживаются оба борта с высотой уступов 15–30 м. На сочленении Кандалакшского и Онежского грабенов расположены поперечные уступы высотой до 60 м и с северо-восточным простиранием, как и в проливе Горло Белого моря [48].

Морфоструктура пролива Горло Белого моря, соединяющего беломорскую котловину с Баренцевым морем, имеет значимые геологические особенности. При преобладании в Белом море северо-западного простирания, в проливе Горло Белого моря основные тектонические элементы, в том числе и активизированные в четвертичное время, направлены на северо-восток, параллельно берегу Кольского полуострова и восточной оконечности Зимнего берега.

Мы предположительно объясняем разнонаправленность простирания разрывной тектоникой, а именно системой позднекайнозойских сбросов, которые определили границы современного грабена, к которому приурочен пролив. Это подтверждается полученными нами данными сейсмоакустического профилирования.

На сейсмограммах отчетливо выделяются разрывные нарушения северо-восточного простирания в породах, подстилающих четвертичные отложения в центральной части грабена. В рельефе дна каждому из них соответствует отрицательная форма в виде ложбины или рва, что свидетельствует о сейсмоактивности этих разломов, в голоцене [43].

Данные о современной геодинамической (сейсмотектонической) активности этой зоны дислокаций подтверждаются свидетельствами о двух землетрясениях, одно из которых зафиксировано

в 2006 г. в проливе Горло Белого моря на пересечении с Чапомским грабеном, а другое землетрясение произошло в 1542 г. в районе Соловецкого архипелага [40].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование морфоструктуры котловины Белого моря, имеющей древнее заложение в верхнем протерозое, продолжалось в голоцене в условиях направленного поднятия в западной (значительного) и центральной (умеренного) частях и погружения (заметного) в восточной части. Резкая расчлененность рельефа морского дна, наличие скальных гряд свежего облика — все это дает основания считать, что отдельные блоки рельефа разделяются активными в настоящее время разломами. Большинство из них приурочены к Кандалакшскому грабену, но отмечаются и в других районах Белого моря (Горло Белого моря, Соловецкие острова) [49].

Современные геодинамические процессы являются не только важным рельефообразующим процессом. Они влияют на распределение покрова четвертичных отложений. На дне большинства депрессий накапливаются голоценовые нефелоидные осадки, но их накопление практически отсутствует в зонах современных поднятий.

В Кандалакшском заливе, на глубинах <math>50-60</math> м происходит резкое редуцирование толщи четвертичных отложений, главным образом за счет отсутствия морских голоценовых глинистых осадков. Во многом это связано с резким сокращением поступления обломочного материала в беломорскую котловину после отступления ледников. В условиях малого объема обломочного материала именно геодинамические процессы стали определяющими в распределении толщ рыхлых осадков разного возраста.

Соответственно, на поверхности морского дна появились обширные площади морского перлювия, тонким слоем перекрывающим толщу ледниково-морских и ледниковых образований. При этом именно чередование зон современных поднятий или опусканий контролирует распределение слоя поверхностных (донных) осадков, обуславливая их мозаичное распределение.

Современные геодинамические движения могут приводить к аномально высокому накоплению рыхлых отложений. Гравитационные процессы перемещают значительные массы обломочного материала. Проявления этих процессов во многом

обусловлены именно современными геодинамическими движениями, так как именно сейсмические толчки при землетрясениях являются в условиях водных бассейнов триггером для развития процессов перемещения обломочного материала вниз по склону.

Пересеченный рельеф морского дна, наличие склонов, в том числе — крутые борта современного Кандалакшского грабена, создают благоприятные условия для развития процессов сноса обломочного материала.

В Белом море, особенно — в Кандалакшском заливе присутствуют все типы склоновых образований:

- блоковые структурные оползни (отседания);
- гравитационные оползни;
- водно-гравитационные процессы (оплывины);
- зерновые потоки (в том числе — турбидиты).

Развитию и формированию склоновых образований способствуют следующие факторы.

- Сильная насыщенность осадков водой, особенно, если вблизи поверхности располагается глинистый горизонт. В морских условиях достаточно уклонов в  $1^{\circ}-2^{\circ}$  для отрыва оползневого тела от склона. Еще меньшие углы достаточны для начала оплывания осадков.

- Наличие современных геодинамических движений, чаще всего проявляющихся в виде сейсмических толчков малой интенсивности — это является основным провоцирующим фактором развития склоновых процессов. Даже малое сотрясение грунта способно вызвать начало его перемещения на более низкие батиметрические уровни.

Пролив Великая Салма является оперяющей зоной для главного тектонического нарушения, проходящего вдоль юго-западного борта Кандалакшской впадины. Форма пролива — узкая и глубокая расселина — способствует оползанию осадочных масс. Наличие большого количества сейсмодислокаций свидетельствует о сохраняющейся вплоть до наших дней сейсмоактивности в этом районе [29, 47].

Об активности современных геодинамических движений свидетельствует появление относительно опресненного горизонта придонных вод в основании водной толщи в вершине Кандалакшского залива [33]. Приведенные нами данные указывают не только на особенности современных седиментационных процессов в различных районах Белого моря, но и на присутствие молодых тектонических процессов. Это — тектоногенные

зоны, по многим из них зафиксировано выделение газовых эманаций.

Геодинамические процессы в Белом море и, в частности, Кандалакшском заливе, приводят к многочисленным изменениям в морфологическом облике бассейна, в частности, — в появлении отчетливых и протяженных линейных элементов рельефа (берег—подводный уступ — берег острова—берег залива). Также, это — расчлененный рельеф морского дна, нехарактерный для шельфов вне гляциальной зоны, широкое развитие песчано-щебнистых осадков, маркирующих зоны неотектонического поднятия, изменчивый характер гидродинамических процессов, тесно связанных с особенностями донного рельефа.

Блоковая структура морского дна в вершине Кандалакшского залива приводит к появлению своеобразного шхерного рельефа, где небольшие острова, сложенные кристаллическими породами, иногда перекрыты чехлом моренных отложений, чередуются узкими глубокими проливами, где глубины могут достигать почти 100 м.

Поднятие суши является причиной для формирования меромиктических озер, т.е. заливов, постепенно отделяющихся от морских бассейнов в результате возникновения в их устьях порогов, препятствующих проникновению соленых вод.

Все эти явления, описанные на примере северо-западной части Белого моря, мы находим и на Балтийском море, Ладожском и Онежском озерах, также представляющих собой внутриматериковые водоемы гляциальной зоны [26, 32, 62].

Современные геодинамические процессы являются опасными геологическими процессами, изучение которых активно развивается в связи с началом хозяйственного освоения морского дна.

Морские исследования последних лет [46], проведенные в рамках научных экспедиций, свидетельствуют о большой роли современных геодинамических процессов в формировании донного рельефа и покрова четвертичных отложений для Баренцева и Карского морей гляциального шельфа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные геодинамические движения, рассмотренные нами на примере Белого моря, являются мощным фактором морфо-седиментогенеза в морях тектонически спокойной гляциальной зоны на северо-западе Европейской части России.

Уровень активности этих процессов несопоставим с дальневосточными морями и их побережьями, особенно камчатским, но отдельные сейсмические события могут привести к существенным разрушениям инженерных сооружений. Примером может служить Калининградское землетрясение 2004 г., когда на суше были зафиксированы многочисленные повреждения инфраструктуры на побережье [3, 25, 54].

Современные геодинамические движения вносят огромный вклад в формирование побережий Мурмана и Карелии, а также являются одной из главных причин своеобразия и расчлененности донного рельефа как внутренних морей и также крупных озер, так и окраинных Баренцева и Карского морей. С этими процессами связаны аномальные гидрологические процессы на дне Кандалакшского залива, которые связаны с поступлением пластово-поровых вод по активизированным тектоническим трещинам. Это позволило сделать предложения об использовании (измерении) гидрохимии придонного слоя водной толщи для предсказания современной тектонической активности региона [35].

Современная геодинамика может рассматриваться как триггер гравитационного перемещения осадков вниз по склону в тектонически предопределенных желобах, что приводит к формированию своеобразного ступенчатого рельефа, а также появлению труднообъяснимых с нормальной седиментационной точки зрения толщ глинистых отложений. Во многом это следствие осаждения взвешенного материала, взмученного при смещении подводных оползней. Были зафиксированы случаи, когда современные сейсмостектонические события кратковременно фиксировались даже на поверхности нефелоидных илистых осадков [28].

Проведенное исследование показало, что современные геодинамические процессы являются важным фактором современного лито-морфогенеза шельфовых морей Северо-Запада России и их необходимо принимать во внимание, как при современной геологической картографии, так и при проведении морских инженерно-геологических изысканий.

Изучение современных геодинамических процессов приобретает практическое значение при оценке опасных геологических процессов и явлений в зонах хозяйственного освоения шельфа. Все крупнейшие месторождения и проявления газифлюидов в Баренцевом и Карском морях связаны с зонами тектонических процессов.

**Благодарности.** Авторы благодарят наших коллег С.В. Шварева (ИГ РАН, Москва, Россия), Л.Р. Семенову (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, Россия) и Ю.А. Журавлева (ООО “МАГЭ”, Мурманск, Россия) за совместные исследования, в которых мы смогли по-новому подойти к исследованию структур, рассмотренных в статье.

В нашей памяти навсегда останется ушедший от нас коллега А.А. Никонов (ИФЗ РАН, Москва, Россия) — геолог, посвятивший всю свою жизнь изучению новейших тектонических движений.

Авторы благодарны рецензентам д.г.-м.н. А.А. Пейве (ГИН РАН, г. Москва, Россия) и д.г.-м.н. Н.П. Чамову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за полезные комментарии, а также крайне признательны редактору М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

**Финансирование.** Работа выполнена при содействии РФФИ — грант 22-17-00081.

**Соблюдение норм научной этики.** Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амантов А.В., Амантова М.Г., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Гусенцова Т.М., Жамойда В.А., Фьелдскар В. Проблемы голоценового развития Южного Приладожья // Региональная геология и металлогения. 2016. № 65. С. 37–49.
2. Ассиновская Б.А., Карпинский В.В., Овсов М.К., Мехрюшев Д.Ю. Сейсмические события на Ладоге // Геориск. 2009. № 3. С. 6–12.
3. Ассиновская Б.А., Овсов М.К. Сейсмотектоническая позиция Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 года // Физика земли. 2008. № 9. С. 32–43.
4. Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. — М-6 1:1 000 000 (третье поколение). — Сер. Балтийская. — Лист Q-37. — Объяснительная записка. — СПб.: ВСЕГЕИ. 2012. 302 с.
5. Балувев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий. — Объяснительная записка к “Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий”. — М-6 1:1 500 000. — Под ред. М.Г. Леонова — М.: ГЕОС, 104 с. (Тр. ГИН РАН. 2012. Вып. 597).
6. Баранская А.В., Мазнев С.В., Романенко Ф.А., Шилова О.С. Новейшие движения земной коры Карельского берега Белого моря // Арктика и Антарктика. 2019. № 2. С. 16–33.
7. Бондарь И.В., Шварев С.В. Детальная оценка новейших тектонических напряжений в районе пролива Великая Салма (Кандалакшский залив) по тектонофизическим данным. — Под ред. Н.Е. Козлова. — Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2020. С. 55–60. (Тр. Ферсмановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. Вып. 17).
8. Верба М.Л., Дараган-Суцова Л.А., Павленкин А.Д. Рифтогенные структуры Западно-Арктического шельфа по данным КМПВ // Советская геология. 1990. № 12. С. 36–47.
9. Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю., Зверев А.С., Росляков А.Д. Многоканальное сейсмоакустическое профилирование на разных частотных диапазонах — реальные возможности // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 35–38.
10. Евзеров В.Я., Виноградов А.Н., Николаева С.Б. Геодинамика Беломорской котловины в голоцене // Вестн. КНЦ РАН. 2014. Т. 17. № 2. С. 51–58.
11. Евзеров В.Я., Николаева С.Б. Сейсмотектонические последствия развития покровных оледенений четвертичного периода в Кольском регионе // Геоморфология. 2003. № 2. С. 61–64.
12. Иностранцев А. Геологический обзор местности между Белым морем и Онежским озером. — СПб: Типогр. В. Демаков, 1871. С. 1–83. (Тр. Санкт-Петербург. общ-ва естествоиспытателей. 1871. Т. 2. Вып. I).
13. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. — Под ред. Д.Д. Квасова, Г.Г. Мартинсона, А.В. Раукаса. — Л.: Наука, 1990. 280 с.
14. Кузмин Ю.О. Современная геодинамика — это наука о движениях Земли в реальном масштабе времени // Физика Земли. 2019. № 1. С. 78–103.
15. Лаврушин Ю.А., Алексеев В.В., Чистякова И.А., Хасанкаев В.Б. Типы осадков и эволюция обстановок осадконакопления Баренцева моря в поздне- и послеледниковое время // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1990. № 2. С. 82–90.
16. Ласточкин А.Н. Методы морского геоморфологического картирования — М.: ВИЭМС, 1980. 45 с.
17. Маев Е.Г., Сафьянов Г.А., Фроль В.В., Зверев А.С. Мощность осадков и рельеф коренного ложа пролива Великая Салма (Белое море) // Геоморфология. 2010. № 1. С. 59–67.
18. Медведев В.С. Краткий очерк динамики и морфологии западного побережья Белого моря. — М.: АН СССР, 1957. С. 1–15. (Тр. Океаногр. комис. 1957. Вып. 2).
19. Никифоров С.Л., Кошель С.М., Фроль В.В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря // Вестн. МГУ. Сер. 5: Геогр. 2012. № 3. С. 86–92.
20. Николаева С.Б. Сейсмичность в позднеплейстоцен–голоценовых осадках Северо-Запада Кольского региона (северная часть Балтийского шита) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 7. С. 830–839.
21. Никонов А.А. Молодые и современные тектонические движения земной коры на Кольском полуострове и в смежных с ним районах // Изв. АН СССР. Сер.: Геогр. 1965. № 6. С. 23–34.
22. Никонов А.А. К неотектонике Ладожской депрессии. — В сб.: Тектоника неогена: общие и региональные аспекты. — Мат-лы XXXIV Тектонич. совещ., г. Москва, МГУ, 30 янв.–3 февр. 2021 г. — М.: ГЕОС. 2001. Т. 2. С. 80–83.

23. Никонов А.А. Землетрясение в Териберке 100 лет тому назад и вопрос о сейсмическом потенциале среднего сектора Мурманской сейсмогенной зоны. — Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2018. С. 268–271. (Тр. Фермановской науч. сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. Вып. 15).
24. Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинементы и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет. — Мат-лы Междунар. конф. “Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности”. — Нерюнгри: ТИ СВФУ, 2015. С. 243–251.
25. Орленок В.В. Калининградское землетрясение 21 сентября 2004 года // Вестн. РГУ им. И. Канта. 2006. Вып. 1. С. 6–11.
26. Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. — Под ред. Д.А. Субетто. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 332 с.
27. Победоносцев С.В., Розанов Л.Л. Современные вертикальные движения берегов Белого и Баренцева морей (по уровнемерным данным) // Геоморфология. 1971. № 3. С. 57–62.
28. Репкина Т.Ю., Рыбалко А.Е., Михайлюкова П.Г. Терехина Я.Е., Барымова А.А., Серeda И.И., Соловьева М.А., Исаченко А.И., Корост Д.В., Токарев М.Ю. Опыт крупномасштабного геоморфологического картографирования морского дна по данным многолучевого эхолотирования и гидролокации бокового обзора (пролив Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря. — Мат-лы Всерос. науч. конф. “Поздние и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология”. — М.: ИГ РАН, 2018. С. 122–128.
29. Романенко Ф.А., Шилова О.С. Последледниковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озерно-болотных отложений п-ова Киндо // ДАН. 2012. Т. 442. № 4. С. 544–548.
30. Рыбалко А.Е. Позднечетвертичный седиментогенез внутренних морей гляциальных шельфов Северо-Запада России. — Автореф. дис. ... д.г.-м.н. — СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. 48 с.
31. Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р., Токарев М.Ю. Четвертичные отложения Белого моря и история развития современного Беломорского бассейна в позднем неоплейстоцене–голоцене — В сб.: Система Белого моря. — Т. IV. — Процессы осадкообразования, геология и история. — М.: Научный мир, 2017. С. 16–84.
32. Рыбалко А.Е., Росляков А.Г., Токарев М.Ю., Токарев А.М. Современные геодинамические процессы — важный фактор формирования структуры дна шельфовых морей. — Мат-лы XXI Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии “Геология морей и океанов”. — М.: ГЕОС, 2015. Т. V. С. 242–246.
33. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Федорова Н.К., Никитин М.А. Новые данные о геологии и геоморфологии Кандалакшского залива по материалам высокочастотного сейсмоакустического профилирования и геологического пробоотбора. — Мат-лы XIX Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии “Геология морей и океанов”. — М.: ИО РАН, 2011. Т. V. С. 174–177.
34. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Беляев П.Ю., Гайнанов В.Г., Токарев А.М., Балакин И.С. Геодинамические и неотектонические процессы в Ладожском и Онежском озерах по данным сейсмоакустических исследований. — Мат-лы VII Междунар. науч.-практич. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)”. — Тверь: Поли-ПРЕСС, 2019. Т. II. С. 39–40.
35. Рыбалко А.Е., Федорова Н.К., Никитин М.А., Токарев М.Ю. Геодинамические процессы в Кандалакшском заливе Белого моря и их роль в формировании покрова современных осадков. — Мат-лы XX Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии “Геология морей и океанов”. — М.: ИО РАН, 2013. Т. III. С. 237–241.
36. Рыбалко А.Е., Щербаков В.А., Захаров М.С., Локтев А.С., Иванова В.В., Исаева О.В., Мотычко В.В., Карташев А.О., Беляев П.Ю. Новая инженерно-геологическая карта шельфа арктических морей России // Деловой журнал Neftegaz.RU. Т. 97. № 1. 2020. С. 44–51.
37. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терехина Я.Е., Козупица Н.А. Строение осадочного чехла Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустики // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геол. 2018. № 2. С. 81–92.
38. Стрелков С.А., Афанасьев А.П., Евзеров В.Я., Каган Л.Я., Кошечкин Б.И., Лебедева Р.М., Рубинраут Г.С. История формирования рельефа и рыхлых отложений северо-восточной части Балтийского щита. — Л.: Наука, 1976. 164 с.
39. Соколов С. Ю., Абрамова А. С., Шкарубо С.И. Неотектонические нарушения шельфа Баренцева моря и их генезис по данным морфометрии рельефа дна, сейсморазведки и глубинному строению мантии // ДАН. 2023. Т. 509. № 1. С. 62–68.
40. Строение и динамика литосферы Беломорья. — Под ред. Н.В. Шарова. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 239 с.
41. Тарасов Г.А. Четвертичный осадочный чехол Западно-Арктического шельфа: литологическое строение, пространственное распределение // Вестн. КНЦ РАН. 2015. Т. 21. № 2. С. 124–134.
42. Тарасов Г.А., Шлыкова В.В. Распределение мощностей четвертичных отложений и основные черты довалдайской поверхности бассейна Белого моря // ДАН. 2006. Т. 411. № 2. С. 226–230.
43. Тектоническая карта Белого моря и прилегающих территорий. — М-б 1 : 1500 000. — Под ред. А.С. Балужева. — М.: ГИН РАН, 210 с.
44. Токарев М.Ю. Разработка технологии многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленными системами на мелководных акваториях. — М.: МГУ, 2016. 24 с.

45. Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Полудеткина Е.Н., Потемка А.К., Пирогова А.С., Дудков И.Ю., Строева А.П. Итоги экспедиции ТТР-21: новые данные о четвертичном седиментогенезе, рельефообразовании и флюидоразгрузке в северо-восточной части Карского шельфа. — Мат-лы XI Междунар. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2022)”. — Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. Т. IV. С. 254–258.
46. Шварев С.В., Бондарь И.В., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н. Голоценовые палеосейсмодеформации на островах Кузокоцкого архипелага (Кандалакшский залив Белого моря, восточная Фенноскандия) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 2. № 21. С. 9–43.
47. Шварев С.В., Никонов А.А. Морфотектоника бассейна Белого моря в сопоставлении с уточненными характеристиками исторических землетрясений. — Мат-лы Всерос. науч. конф. “Поздне- и постгляциальная история Белого моря: геология, тектоника, седиментационные обстановки, хронология”. — М.: ИГ РАН, 2018. С. 174–180.
48. Шварев С.В., Никонов А.А., Фроль В.В. Морфоструктура, тектоническая и сейсмическая активность в бассейне Белого моря: анализ на основе ЦМР, геологических и сейсмических данных — В сб.: Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике. — Мат-лы Всерос. конф. “VII Щукинские чтения”. — М.: МГУ, 2015. С. 199–202.
49. Amantov A., Fjeldskaar W., Cathles L. Glacial Erosion/Sedimentation of the Baltic Region, and the Effect on the Post-glacial Uplift. — In: *The Baltic Sea Basin*. — Ed. by J. Harff et alio, (Springer, Berlin–Heidelberg, Germany. 2011. Ch. 3). P. 53–71.
50. Amantov A., Fjeldskaar W. Geological–geomorphological features of the Balticregion and adjacent areas: Imprint on glacial-postglacial development // *Regional Geology and Metallogenia*, 2013. Vol. 53. P. 90–104.
51. Daly R.A. *The Changing World of the Ice Age*. — (New Haven, CT: Yale Univ. Press. 1934), 271 p.
52. Dehls J.F., Olesen O., Olsen L., Blikra L.H. Neotectonic faulting in northern Norway; the Stuoragurra and Nordmannvikdalen postglacial faults // *Quat. Sci. Rev.* 2000. Vol. 19. P. 1447–1460.
53. Fjeldskaar W., Amantov A. Effects of glaciations on sedimentary basins // *J Geodynam.* 2018. Vol.118. P. 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.10.005>
54. Gregersen S., Wiejacz P., Dębski W., Domanski B., Assinovskaya B., Guterch B., Mäntyniemi P., Nikulin V.G., Pacesa A., Puura V., Aronov A.G., Aronova T.I., Grunthal G., Husebye E.S., Sliupa S. The exceptional earthquakes in Kaliningrad district, Russia on September 21, 2004 // *Phys. Earth Planet. Interiors.* 2007. Vol. 164. No. 1–2. P. 63–74.
55. Mikhailova P.G., Sereda I.I., Solovyeva M.A., Potemka A.K., Tokarev A.M., Tokarev M.Yu., Isachenko A.I., Shabalin N.V. Experience of large-scale geomorphological mapping of glaciated shelves using geophysical data (Velikaya Salma Strait, Kandalaksha Gulf of the White Sea) // *Oceanology.* 2022. Vol. 62. No. 3. P. 390–403.
56. Mörner N.-A. Active faults and paleoseismicity in Fennoscandia, especially Sweden Primary structures and secondary effects // *Tectonophysics.* 2004. Vol. 380. P. 139–157.
57. Nikonov A.A. The stratigraphic method in the study of large past earthquakes: Seismotectonics and paleoseismicity// *Quaternary Int.* 1995. Vol. 25. P. 47–56.
58. Ojala A.E.K., Mattila J., Markovaara-Koivisto M., Ruskeenieni T., Palmu Ju.-P., Sutinen R. Distribution and morphology of landslides in northern Finland: An analysis of postglacial seismic activity // *Geomorphology.* 2019. Vol. 326. P. 190–201.
59. Olesen O., Blikra L.H., Braathen A., Dehls J.F., Olsen L., Rise L., Roberts D., Riis F., Faleide J.I., Anda E. Neotectonic deformation in Norway and its implications: A review // *Norwegian J. Geol.* 2004. Vol. 84. P. 3–34.
60. Ramsay W. *Über die geologische Entwicklung der Haibiusi Kola in der Quartarzeit* // *Fennia.* 1898. Vol. 16. No. 1. P. 3–54.
61. Rybalko A.E., Zhuravlyov V.A., Semyonova L.R., Tokarev M.Yu. Development history and Quaternary deposits of the White Sea basin. — In: *Sedimentation Processes in the White Sea the White Sea Environment*. — Ed. by A.P. Lisithin, L.L. Demina, (Springer Int. Publ. AG, NY. USA. 2018. Part II), P. 135–164.
62. Steffen H., Wu P. Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia — a review of data and modeling // *J. Geodynam.* 2011. Vol. 52. No. 3–4. P. 169–204.
63. Zaretskaya N., Shvarev S., Korsakova O., Grigoriev V. Palaeoseismic traces in the Late Pleistocene deposits of Southern Kola Peninsula. — In: *From Weichselian Ice-Sheet Dynamics to Holocene Land Use Development in Western Pomerania and Mecklenburg*. — (Field Symp. INQUA PeriBaltic Working Group. Potsdam, GFZ German Res. Centre for Geosci. Abstr. Volume. 2019. Sci. Techn. Rep. STR 19/01). P. 131–133.
64. <https://www.esri.com> (Accessed 2023).
65. <https://www.openstreetmap.org/#map=8/66.480/34.909> (Accessed 2023).
66. [https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/Ocean/World\\_Ocean\\_Base/MapServer/tile/%7Bz%7D/%7By%7D/%7Bx%7D&zmax=20&zmin=0](https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/Ocean/World_Ocean_Base/MapServer/tile/%7Bz%7D/%7By%7D/%7Bx%7D&zmax=20&zmin=0) (Accessed 2023).



## The Influence of Modern Geodynamic Processes on the Formation of the Coastal Relief and Seabed of the White Sea

A. E. Rybalko<sup>1,2,3,\*</sup>, V. A. Shcherbakov<sup>1</sup>, M. Yu. Tokarev<sup>4</sup>, A. A. Kudinov<sup>1,2</sup>, P. Yu. Belyaev<sup>1</sup>, T. Yu. Repkina<sup>1,4,5</sup>, N. E. Zaretskaya<sup>1,5</sup>, Ya. E. Terekhina<sup>1,4</sup>, V. V. Ivanova<sup>1</sup>, V. I. Slichenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Gramberg All-Russia Institute for Geology and Mineral Resources of the World Ocean*

*(VNIIOkeangeologiya), bld.1, Angliisky pr., 190121 St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*Saint Petersburg State University — Institute of Earth Sciences, bld.7–9, Universitetskaya emb., 199034 St. Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*Center for Marine Research, Lomonosov Moscow State University (MSU), prop. 1, bld.77, office 402, Leninskiye Gory — Science Park of MSU, 119991 Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty, bld.1, Leninskiye Gory, 119991 Moscow, Russia*

<sup>5</sup>*Institute of Geography RAS, bld.29, Staromonetny per., 119017 Moscow, Russia*

\* e-mail: [alek-rybalko@yandex.ru](mailto:alek-rybalko@yandex.ru)

The article presents the results of the study of manifestations of modern geodynamic movements in the bottom structures of the White Sea (Baltic crystalline shield). Based on expeditionary work carried out in the White Sea, data were obtained on the formation of the seabed relief and the thickness of loose sediments under the influence of modern seismotectonic events and geodynamic movements, as well as long-term neotectonic processes. It is shown that the Kandalaksha Bay depression is a modern graben developing along faults activated in the Quaternary. Graben development continues to the northwest, where a new Quaternary structure is formed. Signs of manifestations of modern geodynamic movements have been identified. The role of disjunctive tectonics in the formation of slopes and tectonic structures transverse to the strike of the bay, morphologically represented by relief ridges cutting the SrednyLudy rise, located in Kandalaksha Bay, is shown. The influence of modern geodynamic processes on the distribution of thicknesses of Quaternary sediments of various genesis and the mosaic distribution of modern bottom sediments has been established. The influence of gravitational processes involved in the formation of underwater landslides, leading to the appearance of abnormally thick layers of loose sedimentary cover, has been studied.

*Keywords:* East Arctic, White Sea, recent geodynamic movements, grabens, tectonic faults, Kandalaksha Bay, neotectonics, seismoacoustic methods, gravitational processes, hazardous geological processes, topography, bottom sediments