

УДК 551.24

## ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ ФЛАНГ ХРЕБТА КНИПОВИЧА (СЕВЕРНАЯ АТЛАНТИКА): СТРУКТУРА ФУНДАМЕНТА И НЕОТЕКТОНИКА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

© 2023 г. С. Ю. Соколов<sup>1, \*</sup>, Г. Д. Агранов<sup>1, 2</sup>, С. И. Шкарубо<sup>3</sup>, А. Л. Грохольский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН,

Пыжевский пер., д. 7, 119017 Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,  
Музей землеведения, Ленинские горы, д. 1, 119991 Москва, Россия

<sup>3</sup>АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция»,  
ул. Софьи Перовской, д. 26, 183038 Мурманск, Россия

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

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 28.01.2023 г.

Принята к публикации 30.01.2023 г.

Для юго-восточного фланга хребта Книповича по выделенному на временных разрезах ОГТ акустическому фундаменту проведена калибровка гравитационных аномалий Буге в глубины и построена структурная карта фундамента для области с океаническим типом коры. На карте к востоку от хребта Книповича выделяется субмеридиональное поднятие, являющееся северным продолжением разлома Сенья и интерпретируемое как поперечный хребет при трансформном разломе. Это поднятие обрамлено линейными группами эпицентров вне осевой сейсмичности, указывающей на активизацию структур района. Полученные данные ОГТ над выявленным поднятием показывают нарушения плиоцен–четвертичного осадочного чехла со взбросовой и сдвиговой кинематикой. Физическое моделирование структурообразования в районе хребта Книповича наглядно продемонстрировало особенности главных тектонических элементов при косом спрединге. Результат, особенно близкий к реальности, был получен при проведении комбинированных экспериментов с изгибом ослабленной зоны до больших углов между направлением растяжения и перпендикуляром к оси ослабленной зоны. При этом отмечается появление полноценных аккреционных валов и нетрансформных смещений, имитирующих структуры юго-восточного фланга хребта Книповича близко к реальности. Серия экспериментов, проведенная для изучения возможного формирования перескока оси спрединга в восточном направлении на продолжение разлома Сенья, показала возможность активизации этой структуры, рассматриваемой нами в качестве одной из причин формирования особенностей, наблюдаемых по геофизическим данным. Современное положение активных зон региона, сейсмичность, структура фундамента и строение осадочного чехла указывают на смещение активности главных тектонических элементов в восточном направлении относительно современного положения оси растяжения. Вероятным сценарием дальнейшего развития региона будет трансформация хребта Книповича в один или серию трансформных разломов, параллельных западной бровке шельфа Баренцева моря и серию коротких спрединговых сегментов между ними.

*Ключевые слова:* хребет Книповича, трансформный разлом, спрединг, физическое моделирование, деформации осадочного чехла, сейсмичность, аномалии Буге, активизация структуры

DOI: 10.31857/S0016853X2301006X, EDN: ELZHAU

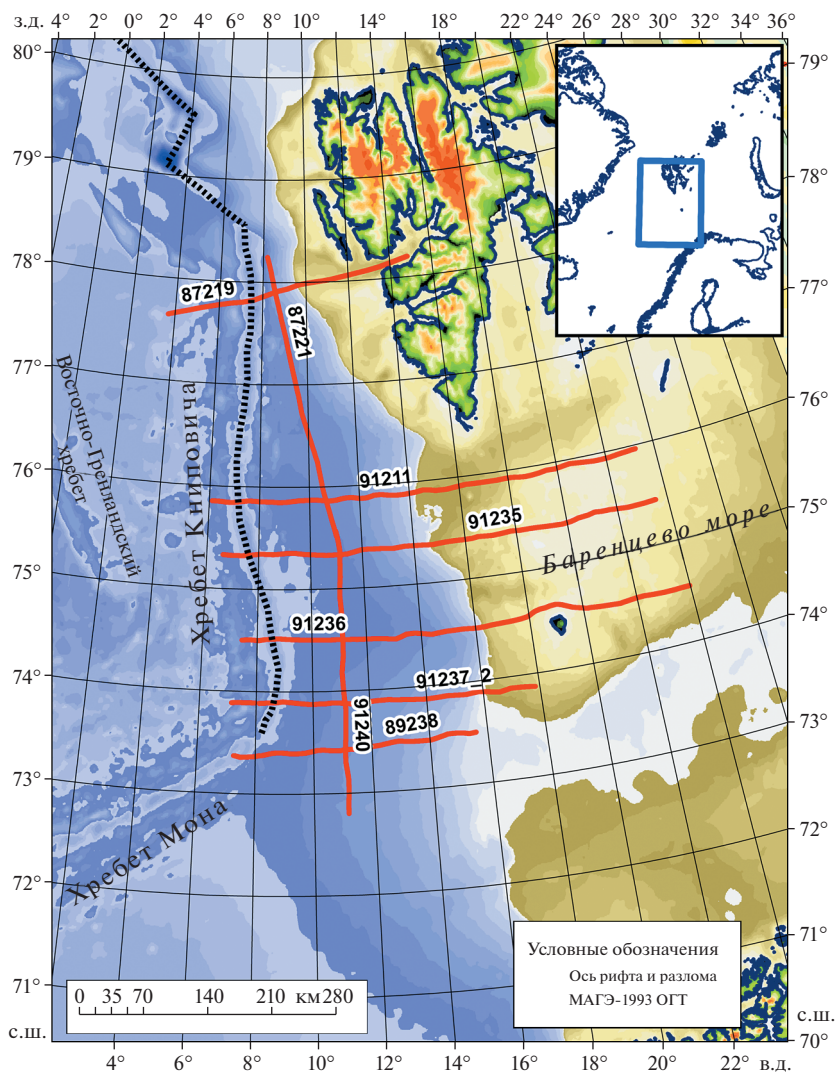
### ВВЕДЕНИЕ

Хребт Книповича расположен в восточной части Норвежско-Гренландской котловины на удалении 40 км на севере и 200 км на юге от западной бровки шельфа Баренцева моря, являющегося источником сноса терригенного материала и лавинной седиментации в котловине (рис. 1).

Выровненный осадками рельеф восточного фланга данного сегмента Срединно-Атлантиче-

ского хребта (САХ) и частично выровненный рельеф западного фланга не отражают первичной структуры океанического базальтового фундамента, какой она известна по наблюдениям в других сегментах САХ, не расположенных настолько близко от источников сноса осадочного материала [17].

По данным экспедиций Геологического института РАН (ГИН РАН, г. Москва, Россия) в



**Рис. 1.** Район хребта Книповича и положение сейсмических разрезов МАГЭ-1993 г., использованных в настоящей работе. На врезке: показан регион исследования (прямоугольник синим). На карте обозначено: ось рифта и разлома (точечная линия); временные разрезы МАГЭ-1993 г. (линия красным); номера временных разрезов (арабские цифры).

период с 2006 г. по 2010 г. на НИС “Академик Николай Страхов” в районе хребта Книповича, в верхней части разреза осадков по данным сейсмоакустики были установлены многочисленные неотектонические дислокации, по которым была построена карта вертикальных амплитуд нарушений осадочного чехла [18]. Интерпретация их пространственного распределения и генезиса была проведена с учетом присутствия сдвиговой компоненты в кинематике рифтовой структуры.

Наличие неотектонических нарушений на юго-восточном фланге хребта Книповича указывает на современную активность района вне осевой части рифта. Это является подтверждающим фактором возможной активизации структур фундамента, поскольку именно консолидированная часть земной коры и верхней мантии является но-

сителем движения, которое формирует картируемые сейсмоакустическими методами деформации и разрывные нарушения в покрывающей ее слабоконсолидированной осадочной толще.

Близость рифта к источнику лавинной седиментации создает уникальную возможность уверенно выявлять современные тектонические нарушения по осадкам, отложенным на фундаменте с подвижным блоковым строением.

Океанический фундамент без осадочного чехла представлен поверхностью с неровной морфологией грядового рельефа, в котором сложно отличить первичный рельеф, сформированный аккрецией в процессе спрединга, от неровностей, возникших под действием тектонических нарушений.

Одним из признаков деформаций, наложенных на первичную структуру фундамента, является их

дискордантная ориентация по отношению к основным структурным элементам рифта и его флангов. Анализ карты фундамента позволяет выявить такие структуры.

При наличии хорошей сейсмической изученности района в открытых источниках структурные карты фундамента отсутствуют. Единственной информацией о структурной поверхности фундамента в юго-восточном обрамлении хребта Книповича является работа [24], которая проведена по съемке 1993 г. В настоящей работе мы приводим положение использованных разрезов этой съемки [24] (см. рис. 1).

Детальной и равномерной является информация редукции Буге силы тяжести в океанической части района [28], построенная на сетке с шагом в 2 дуговые минуты. Она использована в настоящей работе для получения аналога структурной поверхности фундамента методом ее калибровки по сейсмическим разрезам. Полученный результат сопоставляется с аномальным магнитным полем и сейсмичностью, а также литературными данными, для обнаружения активированной в настоящее время структуры фундамента, формирующей наблюдаемую в геофизических полях картину. Полученное из этого сравнения предположение о характере геодинамики района и природе наблюдаемой трансформации на юго-восточном фланге хребта Книповича проверяется при помощи физического моделирования процессов спрединга в условиях, сходных с его юго-восточным обрамлением.

Задачей моделирования является выяснение условий, а также геометрии влияния мантийных термальных неоднородностей, при которых возможна инициация перескока оси хребта и активизация его флангов. Планируется физическое моделирование процесса смещения и определения условий, необходимых для реализации перескока оси рифта, и мантийных плюмовых аномалий как эффективных триггеров смены конфигурации главных тектонических элементов хребта Книповича.

## РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИКА

Современные представления о начале раскрытия Норвежско-Гренландского бассейна сходятся на том, что на начальном этапе расхождения Гренландии и Свальбардской плиты ~54 млн лет назад процесс происходил вдоль трансформной межплитной границы, представленной эшелонированной системой разломов Хорнсунн и Сенья и вулканической провинции Вестбакен между ними [31–33].

В работе [33] был предложен вполне логичный механизм дальнейшей тектонической эволюции региона, состоящий в том, что спрединг, сформировавший магматический фундамент, изначально проходил по направлению, субпараллельному

трансформной границе с небольшой девиацией в сторону Гренландии. Данная модель была основана на предположении, что хребет Книповича на одном из этапов развития геодинамики обеспечил раскрытие бассейна по более короткой рифтовой структуре, пересекающей начальные спрединговые сегменты молодого океанического бассейна со сформированным осадочным чехлом [33]. Но современная тенденция рассматривать хребет Книповича, как изначальный центр спрединга, привела к значительному разнообразию представлений о геодинамике региона.

Большинство исследований хребта Книповича указывают на аномальность его тектонического строения по сравнению с остальными структурами САХ с типичной конфигурацией структурных элементов. Эта аномальность заключается в следующих фактах:

- Осевая зона хребта с ограничивающими рифт бортами по данным аномального магнитного поля имеет угловое соотношение с отрезками линейных магнитных аномалий между  $35^\circ$  и  $50^\circ$ , что слишком велико для обычного косоугольного спрединга с углами не более  $15^\circ$  [35] (см. рис. 1). Это указывает на то, что динамика вдоль дивергентной границы при таких углах вдоль направления аккреции и перпендикулярно к оси рифта, вероятнее всего, будет иметь сдвиговую компоненту [19].

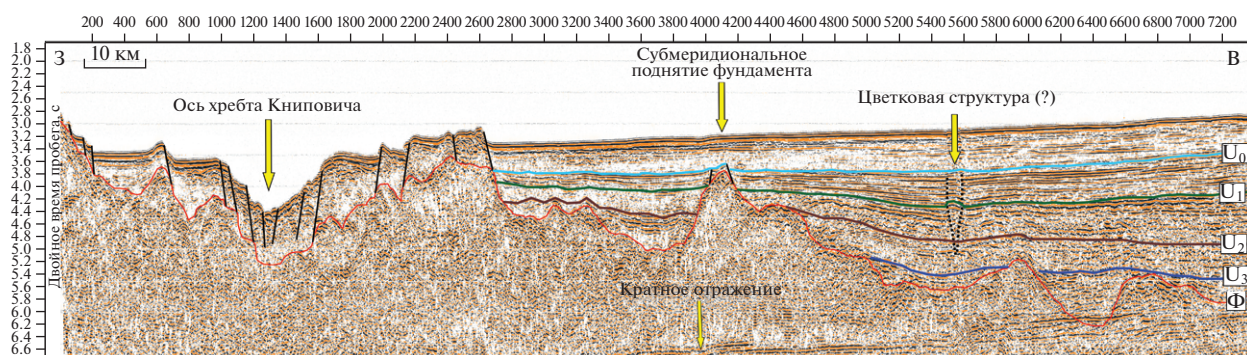
- Донное опробование западного борта хребта Книповича показало наличие олигоценых аргиллитов в коренном залегании [1]. Это указывает на то, что хребет Книповича не являлся центром спрединга, при котором на флангах накапливаются рыхлые осадки и уплотняются по мере удаления от оси. Это также видно на сейсмических разрезах, на которых установлено смещение литифицированных осадочных толщ по сбросовым нарушениям в бортах рифта [8, 26].

- Углы наклона склонов в местах проявлений смещенных по сбросам осадков достигают  $35^\circ$ , что физически не реализуемо для накопления рыхлых обводненных отложений в сейсмически активной зоне [16].

- Кривые повторяемости сейсмических событий вдоль хребта также аномальны и находятся в промежуточном положении между типичными наклонами для рифтов и трансформных разломов [9].

Перечисленные факты указывают на перескок центра спрединга, который в данном случае сопровождается также разворотом его оси на  $45^\circ$ . Известные случаи перескока северных сегментов САХ происходили как субпараллельное смещение оси спрединга [32].

Другие представления о развитии региона представлены схемами, по которым современная ось хребта Книповича является изначальным центром косоугольного спрединга, вдоль которого



**Рис. 2.** Интерпретация фрагмента временного сейсмического разреза 91 236 (по данным [24], с изменениями).

Положение разреза см. рис. 1.

*Разломы:* выделяемые уверенно (линия черным), предполагаемые (пунктир); акустический фундамент  $\Phi$  (линия красным).

*Кровля сейсмокомплексов:*  $U_3$  — средний олигоцен—нижний миоцен (32—22.5 млн лет);  $U_2$  — миоцен (22.5—9.8 млн лет);  $U_1$  — верхний миоцен (9.8—6.6 млн лет);  $U_0$  — верхний миоцен—плейстоцен (6.6—2.8 млн лет).

*Подощва сейсмокомплекса:*  $U_0$  — плейстоцен (2.8—0 млн лет).

по системе коротких сегментов рифта происходила аккреция коры с косым направлением наращивания океанической коры относительно нормали к его современной оси [10, 13, 23, 30].

В работе [30] была предпринята попытка идентифицировать короткие мозаичные фрагменты аномального магнитного поля хребта Книповича таким образом, чтобы текущее положение его оси стало исходным центром спрединга, что, по нашему мнению, не снимает противоречия с приведенными нами фактами [30].

Другие предположения о тектоническом развитии региона в разной мере учитывают имеющиеся несоответствия перечисленных фактов с упрощенными модельными представлениями, — это объясняет существующее разнообразие этих предположений.

Наиболее значимы реконструкции, основанные на том, что хребет Книповича не является классическим спрединговым хребтом, а сдвиговая трансформная структура с элементами раздвигания [2, 6, 29], что совпадает с определением структур типа пулл-апарт, сформированными в виде цепочки амагматических депрессий, разделенных магматическими перешейками с вулканическими постройками центрального типа [9, 29]. Геодинамическим явлением, которое устранило бы противоречие в наблюдаемых фактах без рассмотрения косоугольного спрединга, может быть именно перескок дивергентной границы с разворотом на  $45^\circ$  и начало рифтогенеза в совершенно новом положении с расколом ранее сформированного спредингового фундамента с осадочным чехлом.

По мнению [6] оформление структурного плана новой рифтогенной структуры еще не закончено, но старт этого процесса возник в миоцене. Отсутствие осевой магнитной аномалии вдоль всего хребта Книповича, за исключением неболь-

шого участка на севере, по нашему мнению, указывает на то, что перескок мог произойти в четвертичное время [15].

Это может означать, что спрединг вдоль хребта Книповича еще не возник, но начался рифтогенез в цепочке депрессий пулл-апарт, которыми представлен данный хребет. Появление таких нарушений, спрямляющих межплитную границу, скорее всего, является наиболее простым решением разрядки системы тектонических напряжений [19].

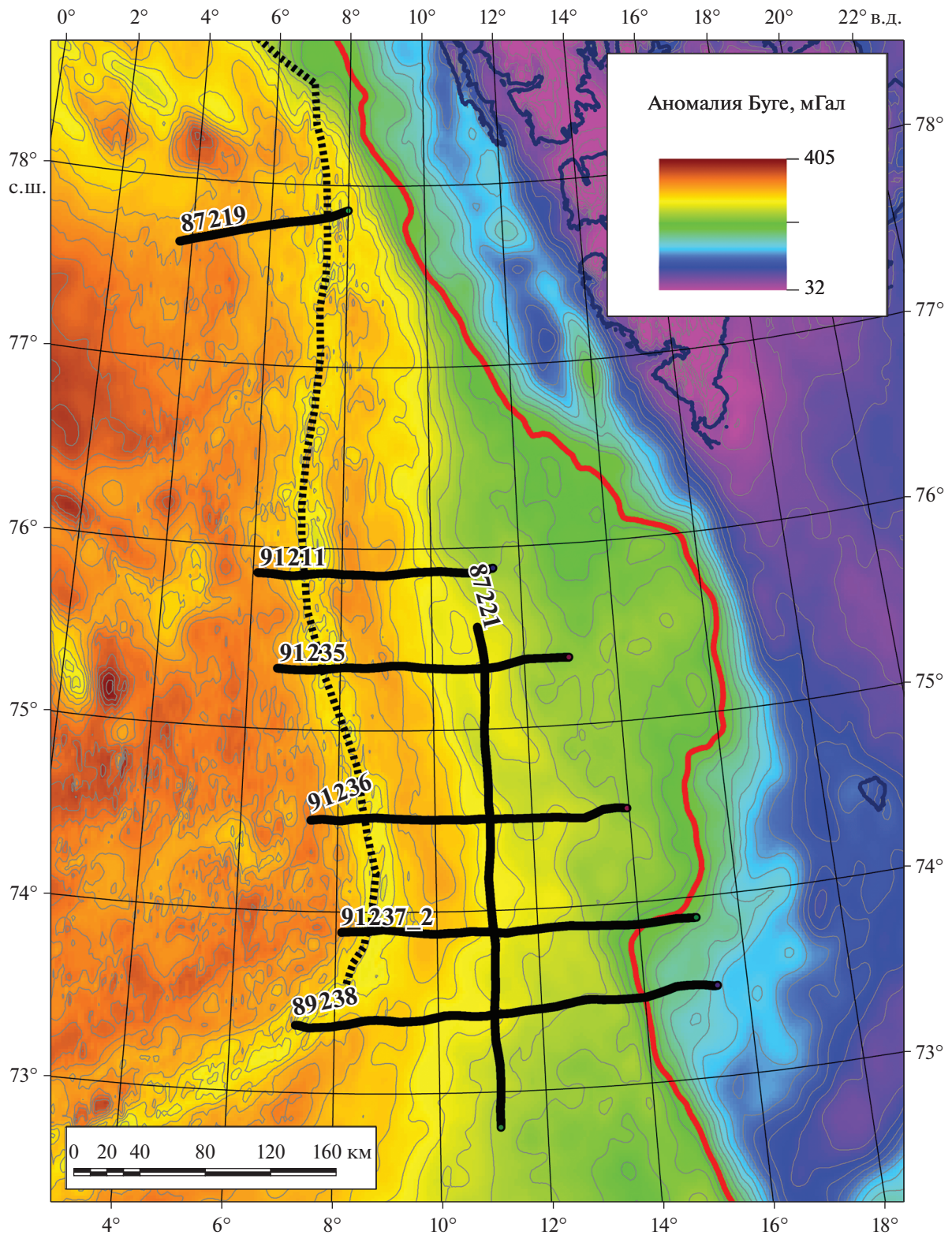
Имеющиеся петрологические данные по изотопии гафния и неодима в основных породах также указывают на уникальность структуры хребта Книповича, которая согласно отношениям изотопов этих элементов может возникнуть только при повторном плавлении ранее деплетированной мантии, что подтверждает перескок оси дивергентной границы в регионе [36, 37].

В настоящее время хребет Книповича имеет гибридные свойства рифта и трансформного разлома [9]. Анализ данных сейсмотомографии указывает на наличие пониженных значений сейсмических волн, связанных, по всей видимости, с локальной “горячей” аномалией в верхней мантии около южной оконечности хребта Книповича, которая теоретически может являться триггером наблюдаемой трансформации [25].

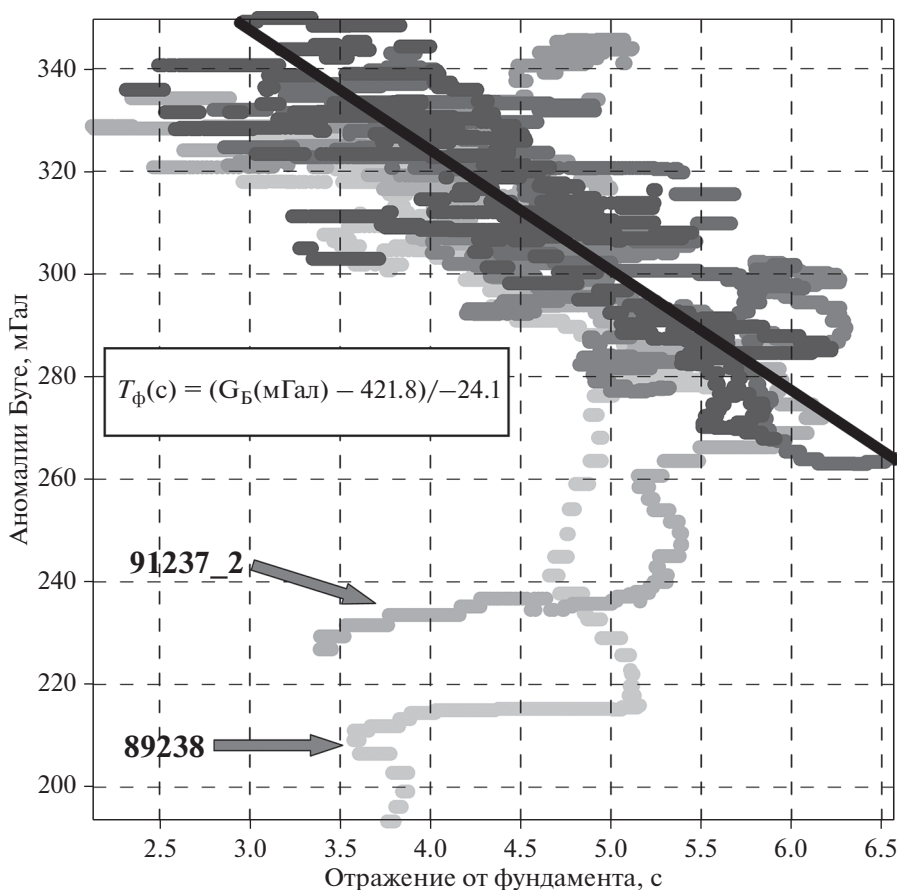
## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использовались временные сейсмические разрезы МОВ ОГТ, полученные АО “МАГЭ” в 1993 г. [7, 24] (см. рис. 1). Нами приведен пример сейсмических данных с интерпретацией кровли фундамента и кайнозойских сейсмокомплексов (рис. 2).

Для построения расчетной структурной карты фундамента использовались гравитационные аномалии в редукции Буге (рис. 3).



**Рис. 3.** Положение интерпретированных глубин акустического фундамента вдольсейсмических профилей МАГЭ-1993 г. и изолиния 240 мГал, отделяющая область с океанической корой от области перехода к коре континентального типа. Обозначено: аномалии Буге (по данным [28]) (шкала); ось рифта и разлома (пунктир); выделенный фундамент (линии черным); изолиния 240 мГал (линия красным); изолинии с интервалом 10 мГал (линии серым).



**Рис. 4.** Корреляция глубин фундамента в двойном времени пробега со значениями аномалий Буге (по [28]). Формула показывает линейную аппроксимацию тренда зависимости глубин от значений гравитационной редукции. Стрелками показаны сильные отскоки значений вдоль разрезов, где положение интерпретированного фундамента выходит за изолинию 240 мГал.

Показаны положения на плане отпикированного фундамента в сегментах разрезов, где он различим до суперпозиции с кратными волнами (см. рис. 3). Отдельно показана изолиния аномалий Буге 240 мГал, которая для данного поля [28] условно отделяет континентальную литосферу от океанической. Сейсмичность хребта Книповича и его флангов рассматривается по данным каталога NORSAR [34]. Карта аномального магнитного поля  $\Delta T_a$  приведена по данным [35].

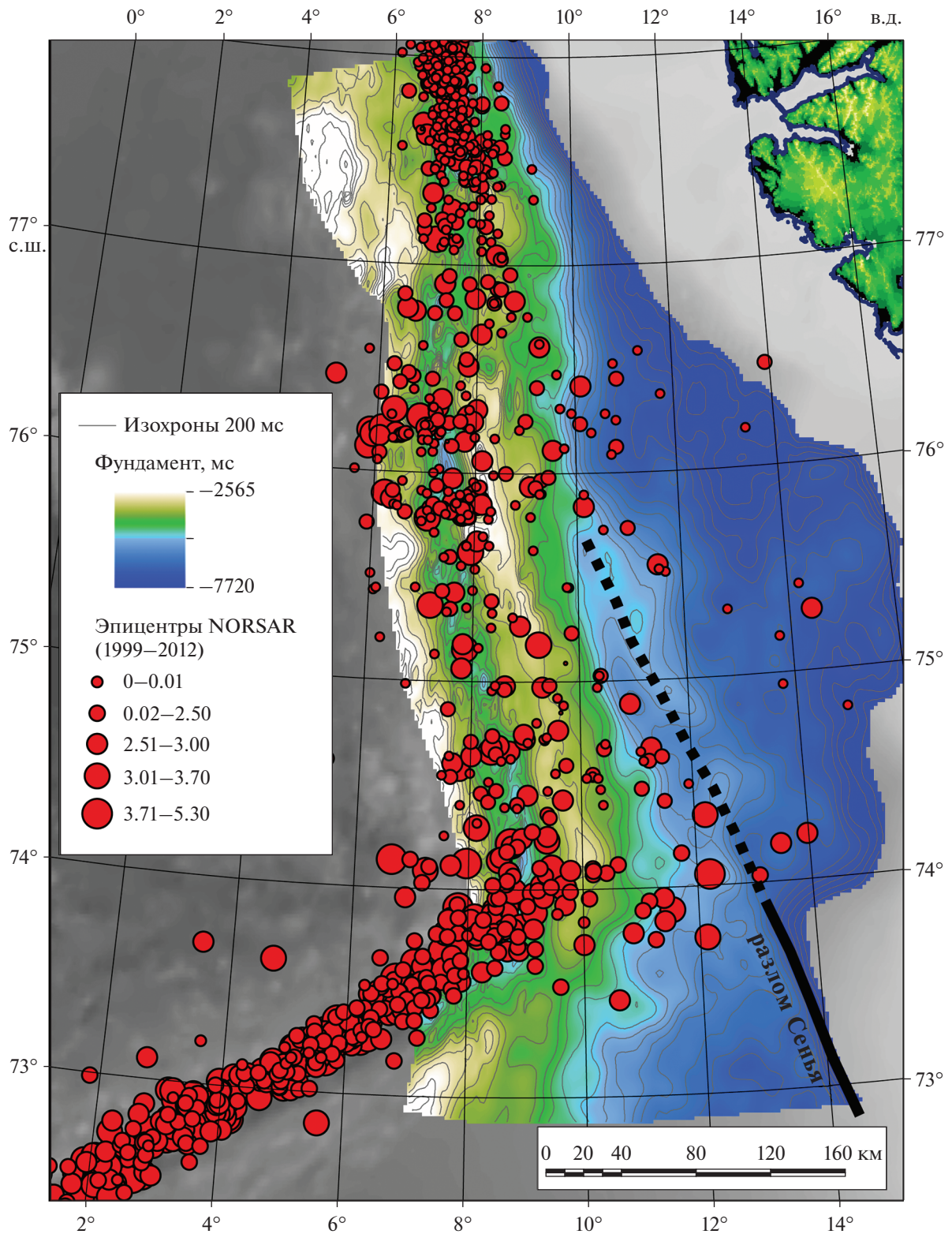
#### Обработка данных и первичная интерпретация результатов

Проведено сопоставление и сделана корреляция глубин фундамента на временных разрезах со значениями аномалии Буге. Это дало возможность получить линейную аппроксимационную зависимость глубины фундамента от значения гравитационной редукции (рис. 4).

Редкая сеть суммарных временных сейсмических разрезов, на которых выделен акустический фундамент, соответствующий кровле второго

базальтового слоя океанической коры, позволила на этих разрезах осуществить привязку значений глубин фундамента к значениям аномалии Буге. Кросс-плот по полученным парам числовых значений для части акватории с океанической литосферой является достаточно компактным для получения линейной зависимости пересчета поля редукции в структурную поверхность в изохронах. Редкая сеть прямых сейсмических наблюдений фундамента калибрует поле аномалий Буге, которое на рассматриваемой площади имеет равномерное покрытие, таким образом, что после пересчета в глубины фундамента создает реалистичный структурный план кровли 2-го океанического слоя (рис. 5).

Отметим, что для области, в которой сегменты разрезов 89238 и 91237\_2 выходят на восток за изолинию 240 мГал, условно отделяющую океаническую литосферу от переходной зоны океан-континент, на кросс-плоте сформированы отскоки от основного облака с линейным трендом (см. рис. 3, см. рис. 4).



**Рис. 5.** Структурная карта акустического фундамента в изохронах в области юго-восточного фланга хребта Книповича и сейсмичность района (по данным [34]). Показано: положение разлома Сеня (сплошная линия черным), его вероятное современное продолжение (пунктир).

Это указывает на неприменимость полученной аппроксимации к континентальной и переходной области с присутствием вулканического плато. Основные структурные особенности сейсмических разрывов после пересчета по ним всей площади района исследований в поверхность, сохраняются в характере локального рельефа фундамента, но приобретают равномерное отображение, позволяющее адекватно оценивать строение всего района. Это возможно из-за того, что в аномалиях Буге отображается главным образом наиболее контрастная плотностная граница, каковой является именно кровля фундамента, разделяющая базальтовую и осадочную часть разреза.

Сопоставление рассчитанной структурной поверхности с сейсмичностью по данным NORSAR показывает, что внеосевые события, указывающие на современную активизацию фланга хребта Книповича, группируются в линейные кластеры, которые расположены на флангах субмеридионального поднятия, примыкающего к хребту с востока севернее 76° с.ш. (см. рис. 5). Это поднятие расположено на продолжении разлома Сенья, вдоль которого изначально проходило раскрытие океанического бассейна по межплитной границе трансформного типа.

События вдоль оси хребта Книповича группируются в изолированные друг от друга группы, что не противоречит предположению о формировании хребта Книповича в виде цепочки впадин пулл-апарт, возникших при действии растяжения со сдвигом.

Сопоставление рассчитанной структурной поверхности с аномальным магнитным полем (АМП)  $\Delta T_a$  показывает расхождение ориентации структур рельефа фундамента с прилегающей к ней мозаикой линейных отрезков магнитных аномалий (рис. 6).

Это указывает на разный генезис структур, возникших при спрединговой аккреции фундамента и отраженных в линейных фрагментах аномального магнитного поля, и структур, возникших в фундаменте к востоку от линейных аномалий. Именно с этими структурами пространственно связана активизация фланга хребта Книповича в новейшее время, и на современном этапе сопровождающейся сейсмической активностью вдоль северного продолжения разлома Сенья. Полученный структурный рисунок определяет направление и первичную геометрию, которую предстоит моделировать экспериментально.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### *Постановка и методика проведения экспериментов*

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории физического моделирования

геодинамических процессов Музея Землеведения МГУ (г. Москва, Россия) в соответствии с методиками, описанными в работах [3, 4, 7, 38]. Модельное вещество представляет собой сложную коллоидную систему, основой которой являются жидкие (минеральное масло) и твердые (церезин, парафин) углеводороды с различными поверхностно-активными добавками. Вещество отвечает критерию подобия по модулю сдвига:

$$F = \tau_s / \rho gh = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\tau_s$  – характерные надгидростатические напряжения;  $\rho$ ,  $h$  – соответственно плотность и толщина литосферы;  $g$  – ускорение свободного падения [22]. Для его выполнения требуется, чтобы отношение напряжений в литосфере, вызывающих ее деформации (надгидростатических напряжений), к гидростатическим напряжениям в плите, в природе и модели было одинаковым.

Экспериментальная установка представляет собой текстолитовую ванну с поршнем, движущимся с помощью электромеханического привода (рис. 7).

Равномерное температурное поле модельного вещества создается благодаря нагревательному контуру, расположенному вдоль стенок и дна установки. Электромеханический привод позволяет варьировать скорости деформации модельной плиты (см. рис. 7, п. 3).

Применяемые методики дают возможность создавать обстановки ортогонального, или косоуго растяжения модельной плиты. Изменение длительности ее охлаждения при подготовке обеспечивает различное соотношение ее хрупкого и пластичного слоев [3]. При подготовке эксперимента вещество нагревается в установке до определенной температуры, при условии поддержания фиксированного температурного режима в лаборатории (см. рис. 7, а).

Затем начинается процесс охлаждения расплавленного модельного вещества – образуется корка (модельная литосфера), которая приваривается к поршню и противоположной стенке ванны (см. рис. 7, б).

После того как модельная плита достигает необходимой для данного эксперимента толщины (параметр  $h$  в описании экспериментов), начинается ее горизонтальное растяжение (см. рис. 7, в).

При необходимости создания ослабленной или более прочной зоны часть плиты вырезалась или дополнительно охлаждалась. В рамках данного исследования в ряде опытов использовался локальный источник нагрева (ЛИН), который на этапе подготовки экспериментов помещался в модельную астеносферу в нужной локации и включался в необходимый момент в процессе проведения эксперимента. Локальный источник



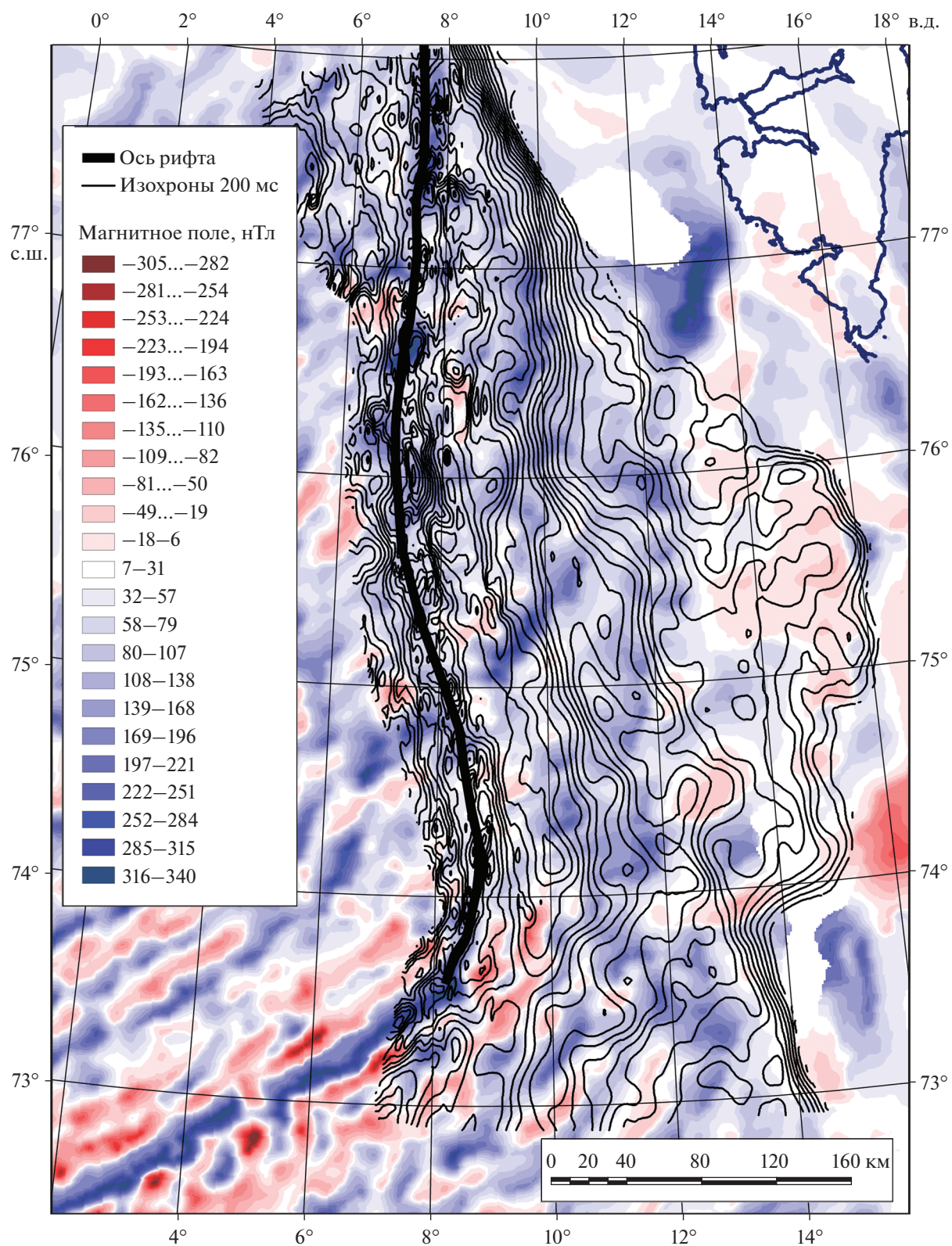


Рис. 6. Структурная карта акустического фундамента в изохронах в области юго-восточного фланга хребта Книповича и аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$  (по данным [35]).

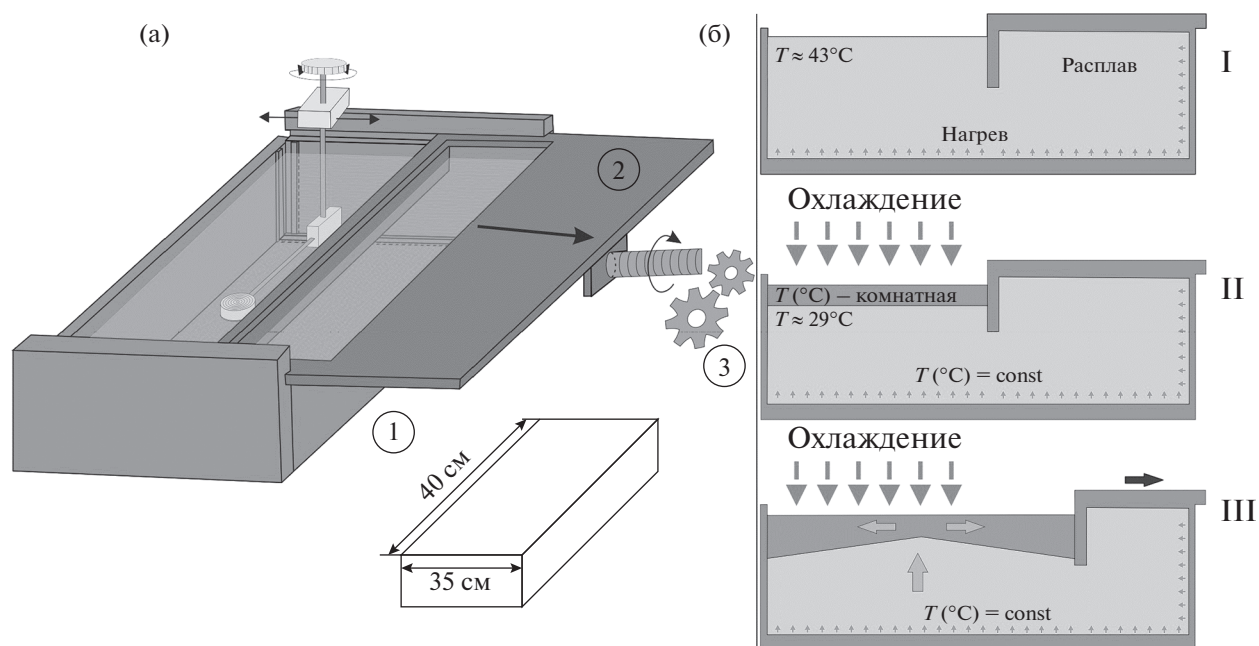


Рис. 7. Экспериментальная установка (а), подготовка модели в разрезе (б).

На (а): 1 – ванна из текстолита; 2 – рамка с поршнем; 3 – электромеханический привод.

На (б): I – стадия нагревания рабочего вещества; II – формирование охлажденного слоя; III – запуск кинематики моделирования.

нагрева представляет собой устройство, позволяющее имитировать деятельность горячей точки путем локального повышения температуры и плавления модельного вещества.

В рамках данного исследования перед физическим моделированием были поставлены две основные цели, в соответствии с которыми все эксперименты были разделены на две серии:

- изучение особенностей структурообразующих деформаций при формировании хребта Книповича в условиях косоугольного растяжения между Шпицбергом и Гренландией;
- моделирование возможной реактивации разломной зоны Сенья, проявленной в природе линейно вытянутой зоной современной сейсмической активности на продолжение древнего разлома.

## СЕРИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Серия 1

В рамках первой серии хребт Книповича был разделен на две части по углу между направлением растяжения и простиранием хребта:

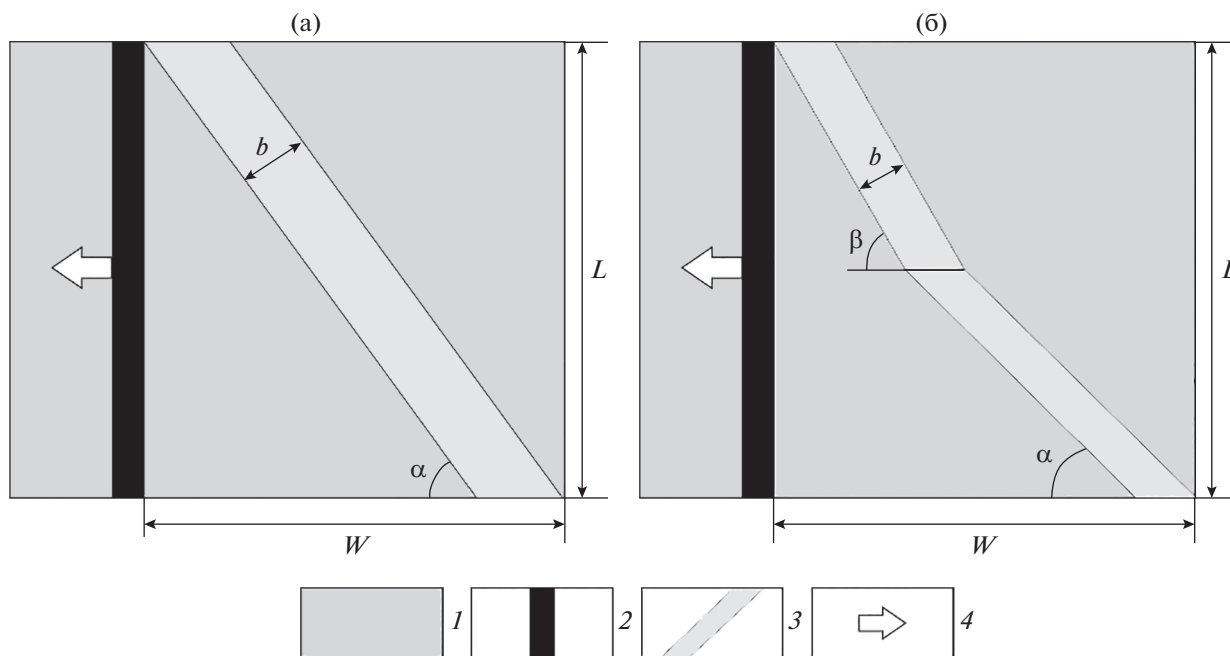
- верхний сегмент, определяемый значениями угла наклона оси растяжения в пределах  $\angle 35^\circ\text{--}45^\circ$  (рис. 8, а; рис. 9, эксп. № 2397);
- южный сегмент, определяемый значениями в пределах  $\angle 50^\circ\text{--}60^\circ$  (см. рис. 8, а; см. рис. 9, эксп. № 2407).

После получения результатов в данных двух группах экспериментов была проведена комбинированная группа экспериментов с изгибом ослабленной зоны (см. рис. 8, а; см. рис. 9, эксп. № 2416).

Для моделирования косоугольного растяжения в рамках экспериментальной установки в модельной литосфере на этапе подготовки эксперимента задавалась ослабленная зона для локализации напряжений под необходимым углом к направлению растяжения. После чего запускался электродвигатель, благодаря чему начиналось равномерное растяжение. Рассмотрим эксперименты №№ 2397, 2407 и 2416.

**Эксперимент № 2397.** На первой стадии видна первоначально заданная ослабленная зона в модельной литосфере под углом  $\angle 40^\circ$  и шириной 2 см (см. рис. 9). Для создания данной зоны при формировании модельной литосферы на этапе подготовки происходила зачистка зоны от застывшего вещества, после чего производилось повторное охлаждение, благодаря чему создается разность мощностей литосферы в пределах ослабленной зоны ( $h_2$ ) и основной литосферой ( $h_1$ ). При начале растяжения первоначально в пределах зоны сфокусированных напряжений формируется серия трещин, которые соединяются в единую ось через трансформные разломы.

На второй стадии начинается процесс аккреции новой океанической модельной коры вдоль спрединговых сегментов.



**Рис. 8.** Схемы и параметры экспериментов.

(а) — ослабленная зона без изгиба; (б) — ослабленная зона с изгибом.

На (а)–(б):  $b$  — ширина структурной неоднородности;  $\alpha$  и  $\beta$  — угол между ослабленной зоной и направлением растяжения;  $W$  и  $L$  — начальные размеры модельного участка установки.

1 — модельная плита; 2 — поршень установки; 3 — структурная неоднородность с пониженной толщиной модельной литосферы; 4 — направление растяжения

На третьей стадии более отчетливо наблюдается неравномерность аккреции вдоль хребта, трансформные разломы уже частично компенсировались. Отчетливо видны все геоморфологические особенности рифтовой долины в условиях косога спрединга, ярко выражена узкая рифтовая долина с аномально большой для ортогонального спрединга глубиной.

Данный эксперимент наглядно демонстрирует особенности косога спрединга с углом наклона растяжения меньше  $\sim 45^\circ$ , выраженные в практически полном отсутствии аккреционных валов, свойственных ортогональному или слабонаклонному спредингу, узкой и аномально глубокой рифтовой долиной, наличием трансформных разломов.

**Эксперимент № 2407.** Во второй группе экспериментов в рамках данной серии угол наклона оси растяжения был увеличен до  $\sim 50^\circ$ , что соответствует значениям северо-западного сегмента хребта Книповича (см. рис. 9).

На первой стадии при зарождении трещины видны отличия: сегменты трещины более вытянутые и меньше смещены вдоль трансформных разломов.

На второй стадии так же видно, что начинается аккреция новой океанической коры. Отметим, что в сравнении с экспериментом № 2397, аккре-

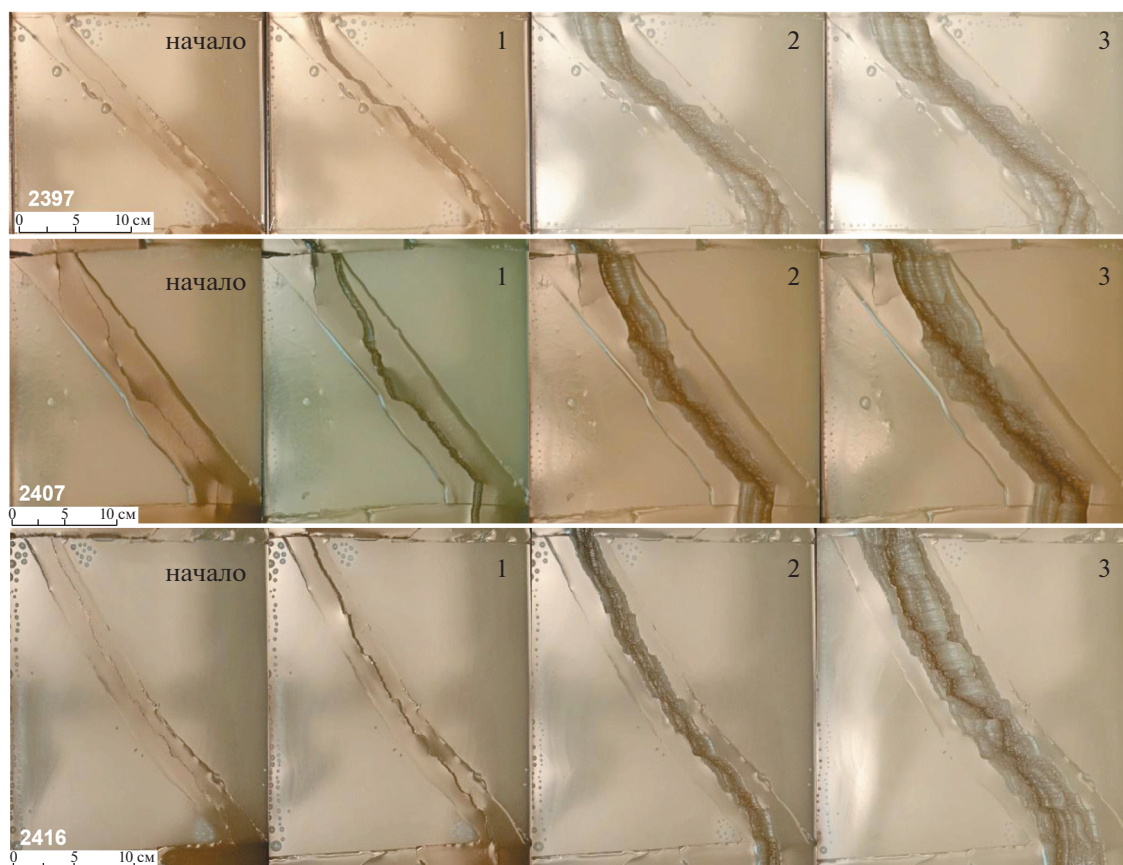
ционные валы формируются вдоль большей части простирания хребта.

На третьей стадии произошла компенсация большинства трансформных разломов, а в центральной части эксперимента продолжается формирование аккреционных валов. Подобных деформаций в эксперименте № 2397 с другим углом растяжения на данной стадии не наблюдалось.

На финальном фото отчетливо видно, что в сравнении с экспериментом № 2397, в результате изменения угла наклона оси растяжения всего на  $\sim 10^\circ$  рифтовая долина стала менее глубокой, но продолжает быть достаточно узкой (см. рис. 9). Вторым важным отличием являются ярко выраженные аккреционные валы в центральном и северном сегментах, что так же связано с изменением угла наклона оси растяжения.

**Эксперимент № 2416.** Данный эксперимент наглядно демонстрирует отличие структурообразующих деформаций вдоль хребта Книповича при изменении угла наклона оси растяжения на  $\sim 10^\circ$  (от  $40^\circ$  до  $50^\circ$ ) вдоль его простирания с юго-востока на северо-запад (см. рис. 9).

По аналогии с экспериментами № 2397 и № 2416, первоначально в модельной литосфере задавалась ослабленная зона шириной 2 см, после чего запускался электропривод, благодаря чему начиналось ее растяжение.



**Рис. 9.** Эксперименты №№ 2397, 2407 и 2416.

Особенности структурообразующих деформаций вдоль простирания хребта Книпович при различном угле наклона косого спрединга (№ 2397 –  $40^\circ$ , № 2407 –  $50^\circ$ ) и при изгибе ослабленной зоны (№ 2416,  $h_1 = 3 \times 10^{-3}$  м;  $h_2 = 1.5 \times 10^{-3}$  м;  $V_1 = 1.87 \times 10^{-5}$  м/с).

Обозначено: номер эксперимента (цифры белым); стадии эксперимента (цифры черным).

На первом этапе раскола литосферы и зарождения системы трещин в пределах ослабленной зоны видно различие в северном и южном сегментах. Если в северном сегменте формируется серия крупных линейных трещин с короткими трансформными разломами, то в южном сегменте длина сегментов меньше, а смещение больше. Это так же прослеживается и на более поздних этапах растяжения, что наблюдается с первого по третий этапы.

Также северный и южный сегменты различаются по амплитудам новообразованных структур, которые в верхней части модельной трещины выражены большими амплитудами. Данный эксперимент наглядно демонстрирует отличие структурообразующих деформаций при изменении угла растяжения вдоль простирания, что подтверждается геолого-геофизическими данными [8].

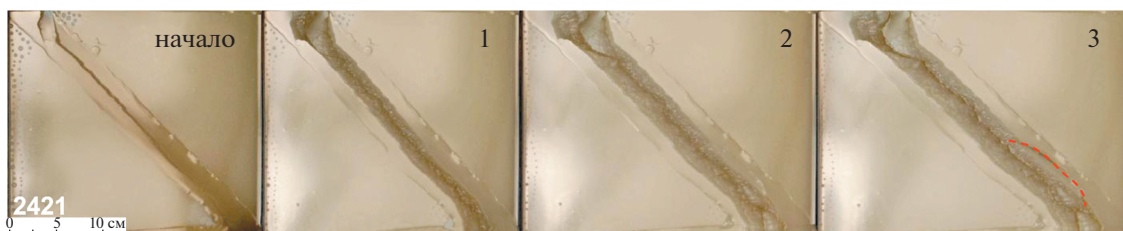
### Серия 2

Вторая серия проводилась для изучения возможной реактивации разлома Сенья и структур,

находящихся на его северном продолжении и примыкающих к хребту Книповича, с последующим изменением геометрии структурных элементов растяжения без введения в эксперимент термической и, как следствие, плотностной гетерогенности (рис. 10).

Первоначальные условия экспериментов данной серии аналогичны экспериментам серии 1 (см. рис. 8, а). В модельной литосфере задавалась ослабленная зона  $50^\circ$ – $55^\circ$ , после чего запускался двигатель. Особенностей данной серии является введение структурной неоднородности на границе новообразованной литосферы, которая соответствует разлому Сенья в природе. В некоторых экспериментах данная неоднородность служила причиной формирования перескока оси спрединга, что видно на примере эксперимента № 2421.

**Эксперимент № 2421.** На этапе подготовки задавалась ослабленная зона под углом  $\sim 55^\circ$  и шириной 2.5 см. Первая часть эксперимента аналогична прошлой серии (см. рис. 9, см. рис. 10). На первой и второй стадиях формируется серия



**Рис. 10.** Эксперимент № 2421.

Моделирование формирования юго-восточного сегмента хребта Книповича и возможное формирование перескока оси спрединга (красный пунктир) в сторону разлома Сенья ( $h_1 = 3 \times 10^{-3}$  м;  $h_2 = 1.5 \times 10^{-3}$  м;  $V_1 = 1.87 \times 10^{-5}$  м/с).

Обозначено: номер эксперимента (цифры белым); стадии эксперимента (цифры черным).

трещин, которые, соединяясь, формируют единую рифтовую ось, возникают неортогональные трансформные смещения, структура долины четко выражена, практически отсутствуют аккреционные валы.

По завершении второй стадии двигатель был остановлен и задана структурная неоднородность для воссоздания природных условий. После повторного запуска двигателя заданная структура повлияла на геометрию рифтовой трещины, инициировав перескок оси, что видно на третьей стадии эксперимента, новый фрагмент рифтовой оси отмечен красным пунктиром (см. рис. 10).

Полученный перескок оси спрединга из-за изменившейся геометрии структурных неоднородностей в области рифтогенеза не является единственным вариантом, при котором такие изменения возможны. В работах [5] в эксперименте № 1997 и [21] в эксперименте № 1967 было показано, что изменение положения оси спрединга возможно из-за плотностной неоднородности, или термической аномалии в литосфере, возникающей в процессе эксперимента при наличии плюма в окрестностях рифта.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *Геодинамическая интерпретация*

Проявление современной тектонической активности в осевой части рифтовой структуры с деформацией осадочного чехла, отложенного в ней конусами выноса с шельфа Баренцева моря, является процессом с очевидным геодинамическим обоснованием. Тектоническая активность на фланге, зафиксированная в сейсмичности, нуждается в другой интерпретации (см. рис. 5).

Линейные группы эпицентров, вытянутые преимущественно вдоль западного борта субмеридионального поднятия, указывают на современную активизацию данной структуры (см. рис. 5, см. рис. 6). Поскольку раскрытие Норвежско-Гренландского бассейна, начиная с 54 млн лет, проходило вдоль трансформной сдвиговой границы со

сменной дополнительной компоненты с транспрессионной на транстенсионную 36 млн лет назад, этот процесс должен был сопровождаться образованием типичных для данной геодинамической обстановки приразломных структур – трансверсивных (поперечных хребтов) [11, 24, 31–33].

Поднятие на одном из бортов трансформных разломов может сформироваться как при сжатии, так и при растяжении после изостатического компенсационного подъема одного из бортов из-за снятия нагрузки на мантийный субстрат. Многие трансформные разломы в Атлантике (Вима, Романш, Сан-Паулу, Эндрю Бейн и др.) имеют на одном из бортов поперечные хребты с превышением до 3 км и более от основания, возникновение которых может быть интерпретировано как изостатическая реакция на смену типа кинематики сдвигового режима [17].

Отметим, что перечисленные разломы имеют сравнительно длинную офсетную часть – не менее 300 км, в пределах которой даже отклонения траектории от прямолинейной формы могут создать условия как для транстенсии, так и для транспрессии, не говоря уже о вариациях параметров кинематики плит, которые трансформный разлом разделяет. Современная общая длина смещения между головными частями хребтов Мона и Гаккеля составляет 1030 км, и на ее протяжении вариации типов геодинамического режима вполне реальны.

Интерпретация описанного в данной работе субмеридионального поднятия, расположенного на продолжении разлома Сенья, может быть сформулирована как поперечный хребет, уверенно прослеживаемый на структурной карте фундамента (см. рис. 5). Кроме его геометрии и соотношения с основными структурными элементами бассейна, включая Восточно-Гренландский хребет с запада от хребта Книповича, наша интерпретация объясняет также налегание на его склоны осадочных комплексов U3-U2-U1-U0 без сильных деформаций, свойственных активной тектонике осевой части рифта (см. рис. 2).

Небольшие пликативные деформации прослеживаются по горизонту U<sub>2</sub>, хотя это могут быть и штамповые складки (см. рис. 2). Наблюдается положительная цветковая структура, смещающая отложения между горизонтами U<sub>0</sub> и U<sub>2</sub> (см. рис. 2). Такая форма волнового поля обычно выявляется около сдвиговых зон. Также по горизонту U<sub>0</sub> мы видим малоамплитудный взброс над поднятием, имеющий перепад ~100 мс (см. рис. 2).

Это указывает на то, что перед началом четвертичного периода в районе могла возникнуть обстановка транспрессии, которая отображена в волновом поле положительной цветочной структурой и небольшим вертикальным движением вдоль погребенного под современными осадками поднятия. Поскольку над ним в рельефе дна наблюдается ступень около 35 м, можно предположить, что вертикальная компонента движения, возникшая в начале четвертичного времени, действует и в настоящее время, приводя к появлению сейсмичности между осью хребта Книповича и флангом поднятия, а также к востоку от него. Поступление большого объема гляциального материала сформировало сглаженный рельеф над этим поднятием.

Экспериментальное моделирование спрединговых процессов в районе хребта Книповича и его флангов с геометрическими параметрами движения, близкими к наблюдаемым в реальности показали, что наращивание спредингового фундамента сильно зависит от угла между осью рифта и направлением движения. Наиболее реалистичное воспроизведение современных структур рифта около хребта Книповича достигается с переменным углом между этими направлениями (см. рис. 9, эксперимент № 2416).

В этой серии модель в южном сегменте рифта показывает на третьей стадии пририфтовые дуги на флангах, как при реальном переходе к хребту Мона, и возникновение самых выраженных по сравнению с другими сериями трансформных и нетрансформных смещений оси моделируемого рифта.

Эксперимент с добавлением на восточном фланге структурной неоднородности показал, что ее активизация с потенциальным переносом центра растяжения является вполне правдоподобной (см. рис. 10). Таким образом, переменная кинематика движения плит при наличии ослабленной зоны может привести к миграции центра растяжения и к появлению дополнительных пространственных смещений оси.

Эксперименты с имитацией воздействия плюма показали, что воздействие горячей точки также может инициировать перескок центра растяжения в другое положение, близкое к проекции плюма на поверхность [5, 21]. Поскольку по данным региональной сейсмотомографии на юго-

востоке от хребта Книповича такая прогретая зона есть, мы вправе предположить, что триггер активизации может быть комплексным [25]. Современная схема геодинамики хребта Книповича и его флангов может быть отображена следующим образом (рис. 11, а).

Пространство между головными частями хребтов Мона и Гаккеля представляет собой широкую правосдвиговую зону, в которой в настоящее время сформирована трещина отрыва, являющаяся хребтом Книповича. Данные по веществу [1] и строению рельефа и осадочного чехла [16] показывают, что хребет Книповича с большой степенью вероятности не является первоначальным центром спрединга, а возник в результате рифтогенеза по спрямленной траектории на уже сформированном океаническом фундаменте с литифицированным осадочным чехлом. Хребет на северном продолжении разлома Сенья является неоднородностью, которая активизируется в результате развития тенденции на спрямление перехода между хребтами Мона и Гаккеля. Дополнительным источником подпитки этого процесса может быть мантийный плюм, выявленный по данным сейсмотомографии [25].

Данные по деформациям в верхней части разреза осадочного чехла, полученные в ходе экспедиций НИС “Академик Николай Страхов” с 2006 г. по 2010 г., позволили сформулировать представления о современной тектонике на юго-восточном фланге хребта Книповича [8, 18].

Ранее предлагалась идея о том, что логика развития в тектонически сложнопостроенном районе может состоять в спрямлении конфигурации дивергентной границы в Атлантике [17]. Если рассматривать процесс на флангах хребта Книповича с этих позиций, можно предположить следующее (см. рис. 11, б). Головная часть хребта Мона будет продвигаться в направлении Баренцева моря, вовлекая осадочный чехол в деформирование первоначальной структуры, возникшей в удаленных частях конуса выноса. Трансформация единой трещины отрыва хребта Книповича будет происходить путем выделения нескольких коротких спрединговых сегментов, перпендикулярных бровке шельфа, и оформления нескольких длинных трансформных разломов, параллельных ей одновременно с общим сужением зоны сдвига.

Сценарий перехода активизации на шельф также подтверждает область между бровкой шельфа и восточным флангом хребта Книповича с сильной сейсмичностью параллельно этим структурам [27]. Кроме этого, на Шпицбергене известен четвертичный вулканизм [14] и рифтогенный тепловой поток [20]. Эти факты указывают на возможность изменения траектории перехода активизации спрединга от хребта Мона к Гаккелю и далее — на шельф.

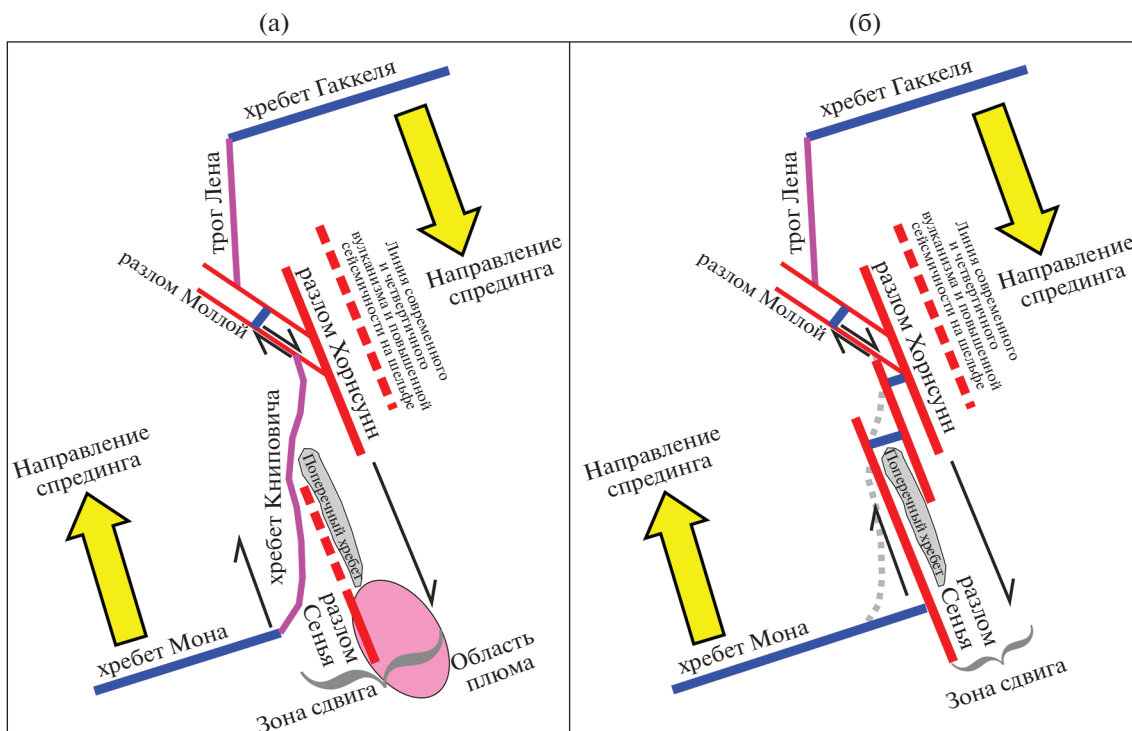


Рис. 11. Принципиальная схема современной геодинамики района хребта Книповича (по данным [16], с изменениями). (а) – современное состояние; (б) – прогноз трансформации тектонических элементов

Тектонические процессы, которые могут происходить к северу от хребта Книповича в регионе разлома Моллой, представляют интерес для исследования, но отметим, что по данным [12] в данном регионе сложилась ситуация, потенциально опасная в возможности схода оползня и запуска волны цунами, поэтому дальнейшие исследования тектонической эволюции этого региона остается актуальным.

**ВЫВОДЫ**

1. Интерпретация акустического фундамента на временных разрезах ОГТ на юго-восточном фланге хребта Книповича и их сопоставление с гравитационными аномалиями Буге позволили откалибровать значения аномалий в терминах глубин и построить карту фундамента в изохронах для района с океаническим типом коры, определяемому по уровню аномального поля.

На карте выделяется субмеридиональное поднятие, являющееся северным продолжением разлома Сенья и интерпретируемое как поперечный хребет, возникающий на бортах длинных трансформных разломов. По поднятию проходила трансформная межплитная граница при начале раскрытия Норвежско-Гренландского бассейна. В аномальном магнитном поле поднятие разделяет области с наличием линейных аномалий от области с мозаичной структурой поля.

2. Выделенное на юго-восточном фланге хребта Книповича поднятие обрамлено линейными группами эпицентров вне осевой сейсмичности, указывающей на наличие деформаций верхней части осадочного разреза и активизацию структур района. Данные ОГТ над выявленным поднятием показывают нарушения плиоцен–четвертичного осадочного чехла, которые вероятно активны в настоящее время. Данные нарушения имеют признаки взбросовой и сдвиговой кинематики.

3. Физическое моделирование структурообразования в районе хребта Книповича наглядно продемонстрировало особенности главных тектонических элементов при косом спрединге при отличии угла направления растяжения в 10°–15° (и более) от перпендикуляра к оси ослабленной зоны. Результат, близкий к реальности, был получен при проведении комбинированных экспериментов с изгибом ослабленной зоны, необходимой для локализации напряжений. Основными расхождениями в результатах этих экспериментов являются различная частота и амплитуда трансформных разломов, а также появление при большем угле полноценных аккреционных валов и нетрансформных смещений, имитирующих структуры юго-восточного фланга хребта Книповича близко к реальности.

4. Серия экспериментов, проведенная для изучения условий перескока оси спрединга в восточном направлении на продолжение разлома Сенья,

показала возможность активизации этой структуры, рассматриваемой нами как одной из причин формирования особенностей, наблюдаемых в геофизических данных.

5. Текущее положение активных зон региона, сейсмичность, структура фундамента и строение осадочного чехла указывают на смещение активности главных тектонических элементов в восточном направлении относительно современного положения оси растяжения. Вероятным сценарием дальнейшего развития региона будет трансформация хребта Книповича в один или серию трансформных разломов, параллельных западной бровке шельфа Баренцева моря и серию коротких спрединговых сегментов между ними. Особый интерес представляет потенциальное воздействие сдвиговой тектоники на большие осадочные массы в районе разлома Моллой.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Российскому Федеральному Геологическому Фонду (г. Москва, Россия) и АО “МАГЭ” за предоставленную возможность использовать сейсмические данные.

Авторы благодарны рецензенту Е.А. Гусеву (ВНИИОкеангеология, г. Санкт-Петербург, Россия) и анонимному рецензенту за полезные комментарии и редактору М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Проекта РНФ № 22-27-00578 “Новейшая и современная геодинамика Западной Арктики: эволюция и воздействие активных тектонических процессов на структурные элементы и осадочный чехол глубоководных котловин и шельфов”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугрова Э.М., Гусев Е.А., Тверская Л.А. Олигоценые породы хребта Книповича. — В сб.: *Геология морей и океанов.* — Т. 1 — Тез. докл. XIV Междунар. школы морской геол. — М.: ГЕОС, 2001. С. 28–29.
2. Верба В.В., Аветисов Г.П., Шолло Л.Е., Степанова Т.В. Геодинамика и магнетизм базальтов подводного хребта Книповича (Норвежско-Гренландский бассейн) // *Российский журнал наук о Земле.* 2000. Т. 2. № 4. С. 3–13.
3. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П. Аналоговое моделирование структурообразующих деформаций литосферы в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов // *Геотектоника.* 2006. № 1. С. 76–94.
4. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П., Севинян К.Т., Галушкин Ю.И. Экспериментальное моделирование взаимодействия горячей точки и спредингового хребта (на примере Юго-восточного Индийского хребта) // *Жизнь Земли.* 2012. № 34. С. 24–35.
5. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П., Агранов Г.Д., Барановский М.С., Данилов Я.А., Доманская П.А., Максимова А.А., Макушкина А.И., Рацупкина А.О., Толстова А.И., Филаретова А.Н., Шепталиня Ю.А., Щербакова Е.Л. Физическое моделирование структурообразующих деформаций в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея Землеведения МГУ (к 40-летию создания лаборатории) // *Жизнь Земли.* 2020. Т. 42. № 4. С. 485–501. [https://doi.org/10.29003/m1778.0514-7468.2020\\_42\\_4/485-501](https://doi.org/10.29003/m1778.0514-7468.2020_42_4/485-501)
6. Гусев Е.А., Шкарубо С.И. Аномальное строение хребта Книповича // *Российский журнал наук о Земле.* 2001. Т. 3. № 2. С. 165–182.
7. Дубинин Е.П. Геодинамические обстановки образования микроконтинентов, погруженных плато и невулканических островов в пределах континентальных окраин // *Океанология.* 2018. Т. 58. № 3. С. 463–475.
8. Зайончек А.В., Брекке Х., Соколов С.Ю., Мазарович А.О., Добролюбова К.О., Ефимов В.Н., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Кохан А.В., Мороз Е.А., Пейве А.А., Чамов Н.П., Ямпольский К.П. Строение зоны перехода континент–океан северо-западного обрамления Баренцева моря (по данным 24, 25 и 26 рейсов НИС “Академик Николай Страхов”, 2006–2009 гг.). — Т. 4. — В кн.: *Строение и история развития литосферы. Вклад России в Международный Полярный Год.* — М.: Paulsen, 2010. С. 111–157.
9. Зарайская Ю.А. Особенности сегментации и сейсмичности ультрамедленных срединно-океанических хребтов Книповича и Гаккеля // *Геотектоника.* 2017. № 2. С. 67–80.
10. Кохан А.В., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Абрамова А.С. Кинематика и особенности морфоструктурной сегментации хребта Книповича // *Океанология.* 2012. Т. 52. № 5. С. 744–756.
11. Мазарович А.О. Тектоника и геоморфология Мирного океана: термины и определения с иллюстрациями. — Отв. ред. Н.В. Межеловский — М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2018. 440 с.
12. Мазарович А.О., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. Опасность подводного оползня западнее архипелага Шпицберген // *Литология и полезные ископаемые.* 2018. № 4. С. 287–294.
13. Пейве А.А., Чамов Н.П. Основные черты тектоники хребта Книповича (Северная Атлантика) и история его развития на неотектоническом этапе // *Геотектоника.* 2008. № 1. С. 38–57.
14. Сироткин А.Н., Шарин В.В. Возраст проявлений четвертичного вулканизма в районе Бокк-фьорда (архипелаг Шпицберген) // *Геоморфология.* 2000. № 1. С. 95–106.
15. Соколов С.Ю. Тектоническая эволюция хребта Книповича по данным аномального магнитного поля // *ДАН.* 2011. Т. 437. № 3. С. 378–383.
16. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О., Добролюбова К.О. Современная тектоническая обстановка северной части хребта Книповича, Атлантика // *Геотектоника.* 2014. № 3. С. 16–29. <https://doi.org/10.7868/S0016853X14030060>
17. Соколов С.Ю., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О., Ефимов В.Н., Соколов Н.С. Пространственная неустойчивость рифта в полиразломной трансформной системе Сан-Паулу, Атлантический океан // *Геотектоника.* 2016. № 3. С. 3–18.
18. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. Амплитуды дизъюнктивных наруше-



- ний флангов хребта Книповича (Северная Атлантика) как индикатор современной геодинамики региона // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 769–789. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0316>
19. *Тевелев А.В.* Сдвиговая тектоника. М.: МГУ, 2005. 254 с.
  20. *Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В. и др.* Аномальный тепловой поток и природа желобов в северной части Свальбардской плиты // ДАН. 2009. Т. 424. № 2. С. 318–323.
  21. *Шайхулина А.А., Дубинин Е.П., Булычев А.А., Барановский М.С., Грохольский А.Л.* Строение литосферы и условия формирования Чагос-Лаккадивского хребта (плотностное и физическое моделирование) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. Т. 48. № 4. С. 36–48. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-36-48>
  22. *Шеменда А.И.* Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. № 10. С. 10–19.
  23. *Шпилов Э.В.* К тектоно-геодинамической эволюции континентальных окраин Арктики в эпохи молодого океанообразования // Геотектоника. 2004. № 5. С. 26–52.
  24. *Шкарубо С.И.* Особенности спрединга в северной части Норвежско-Гренландского бассейна. — В сб.: *Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона.* — Под ред. Аветисов Г.П., Погребницкий Ю.Е. — Спб.: ВНИИ-Океангеология, 1996. С. 101–114.
  25. *Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л.* Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмомографии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1261–1272.
  26. *Ямольский К.П.* Новые данные о строении хребта Книповича (Северная Атлантика) // Геотектоника. 2011. № 2. С. 17–31.
  27. *Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Vaganova N.V., et al.* Spatiotemporal relationship between Arctic Mid-Ocean Ridge system and intraplate seismicity of the European Arctic // Seismol. Res. Lett. 2021. Vol. 92. P. 2876–2890. <https://doi.org/10.1785/0220210024>
  28. *Balmino G., Vales N., Bonvalot S., Briais A.* Spherical harmonic modeling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies // J. Geodesy. 2012. Vol. 86. P. 499–520. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0533-4>
  29. *Crane K., Doss S., Vogt P., Sundvor E., Cherkashov I.P., Devorah J.* The role of the Spitsbergen shear zone in determining morphology, sedimentation and evolution of the Knipovich Ridge // Marine Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 22. P. 153–205.
  30. *Dumais M.-A., Gernigon L., Olesen O., Johansen S.E., Bronner M.* New interpretation of the spreading evolution of the Knipovich Ridge derived from aeromagnetic data // Geophys. J. Int. 2021. Vol. 224. P. 1422–1428. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa527>
  31. *Faleide J.I., Tsikalas F., Breivik A.J., Mjelde R., Ritzmann O., Engen Ø., Wilson J., Eldholm O.* Structure and evolution of the continental margin off Norway and the Barents Sea // Episodes. 2008. Vol. 31. No. 1. P. 82–91. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2008/v31i1/012>
  32. *Gernigon L., Franke D., Geoffroy L., Schiffer C., Foulger G.R., Stoker M.* Crustal fragmentation, magmatism, and the diachronous opening of the Norwegian–Greenland Sea // Earth-Sci. Rev. 2019. Vol. 206. No. 7. P. 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.011>
  33. *Mosar J., Eide E.A., Osmundsen P.T., et al.* Greenland–Norway separation: A geodynamic model for the North Atlantic // Norwegian J. Geol. 2002. Vol. 82. P. 281–298.
  34. NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin. 2012. <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/regional/> (last accessed November 15, 2012).
  35. *Olesen O.G., Gellein J., Habrekke H., et al.* Magnetic Anomaly Map. — Norway and adjacent ocean areas. — Scale 1 : 3000000. — Geological Survey of Norway, 1997. <https://www.ngu.no/en/publikasjon/magnetic-anomaly-map-norway-and-adjacent-areas-scale-13-mill>
  36. *Sanfilippo A., Sokolov S.Yu., Salters V.J.M., Stracke A., Peyve A.* Anciently depleted mantle at Knipovich Ridge? // Goldschmidt Conf. Abstr., Barcelona, August 2019. <https://goldschmidt.info/2019/abstracts/abstractView?id=2019002003>
  37. *Sanfilippo A., Salters V.J.M., Sokolov S.Yu., Peyve A.A., Stracke A.* Ancient refractory asthenosphere revealed by mantle re-melting at the Arctic Mid Atlantic Ridge // Earth Planet. Sci. Lett. 2021. Vol. 566. No. 116981. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116981>
  38. *Shemenda A.I., Grocholsky A.L.* Physical modeling of slow seafloor spreading // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 9137–9153.

## Southeastern Flank of Knipovich Ridge (Northern Atlantic): Basement Structure and Neotectonics from Geophysical Data and Experimental Modeling

S. Yu. Sokolov<sup>a, \*</sup>, G. D. Agranov<sup>a, b</sup>, S. I. Shkarubo<sup>c</sup>, A. L. Grokholsky<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., bld. 7, 119017 Moscow, Russia

<sup>b</sup>Earth Science Museum — Moscow State University, Leninsky Gory, bld. 1, 119991 Moscow, Russia

<sup>c</sup>JSC “Marine Arctic Geological Expedition”, Sofia Perovskaya str., bld. 26, 183038 Murmansk, Russia

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

Acoustic basement of the Knipovich Ridge southeastern flank was interpreted on the time-domain CDP seismic sections and calibration of Bouguer gravity anomalies to depth was done with construction of basement structural map for the area with an oceanic crust type. On this map, to the east from Knipovich Ridge, there

is the longitudinal uplift, which is the northern continuation of the Senja fracture zone and interpreted as a transverse ridge on the transform fault board. This uplift is framed by linear clusters of the off-axis seismicity epicenters, indicating the activation of this area structures. The CDP seismic data above the identified uplift show deformations of the Pliocene–Quaternary sedimentary cover with reverse fault and shear kinematics. Physical modeling of structure formation in the area of the Knipovich Ridge clearly demonstrated the features of the main tectonic elements during oblique spreading. The result, especially close to reality, was obtained by conducting combined experiments with bending the weakened zone to large angles between the direction of stretching and perpendicular to the axis of the weakened zone. At the same time, the appearance of typical accretion swells and nontransform axis displacements simulating the structures of the southeastern flank of the Knipovich Ridge is close to reality. The series of experiments conducted to study the possible formation of the spreading axis jump in an easterly direction to the continuation of the Senja fracture zone showed the fundamental possibility of this structure activation, which we consider as one of the reasons for the formation of features observed in geophysical data. The current position of the active zones of the region, seismicity, the structure of the basement and the structure of the sedimentary cover indicate a shift in the activity of the main tectonic elements in the east direction relative to the current position of the extension axis. The likely scenario for further development of the region will be the transformation of the Knipovich Ridge into one or the series of transform faults parallel to the western edge of the Barents Sea shelf and the series of short spreading segments between them.

*Keywords:* Knipovich Ridge, transform fault, spreading, physical modelling, sedimentary cover deformations, seismicity, Bouguer anomalies, structure activation