

УДК 551.24

## ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАРУШЕНИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА КОТЛОВИНЫ НАНСЕНА: ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ

© 2024 г. С. Ю. Соколов<sup>1,\*</sup>, Г. Д. Агранов<sup>1,2</sup>, В. А. Куликов<sup>3</sup>,  
А. В. Зайончек<sup>1</sup>, А. Л. Грохольский<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН К. Е. Дегтяревым 16.08.2023 г.

Поступило 16.08.2023 г.

После доработки 20.08.2023 г.

Принято к публикации 30.08.2023 г.

Установлено, что разломы в осадочном чехле котловины Нансена и аномалии сейсмической записи типа “плоское пятно”, связанные со скоплением метана, группируются в три пространственные комбинации: 1 – синхронизированные разломы и пятна, 2 – пятна без разломов, 3 – разломы без пятен. Они распространены преимущественно между линейными магнитными аномалиями С20 и С12 над отрицательными вариациями плотности литосферы с глубинами до ~25–30 км и латеральной периодичностью ~50 км. Генезис комбинации 1 сводится к серпентинизации пород верхней мантии в присутствии воды, проникшей в глубину по сформированным ранее тектоническим нарушениям, увеличению объема пород и локальному подъему кристаллических блоков, приводящему к образованию разломов взбросовой кинематики, охватывающих весь осадочный чехол от акустического фундамента до поверхности дна. Комбинация 2 состоит в преобладании “плоских пятен” также флюидного генезиса при отсутствии разломов, которые при редкой сети наблюдений могут быть пропущены и не попадать в плоскость разрезов. Комбинация 3 состоит в наличии разломов без “плоских пятен” с шагом ~10 км над выступами акустического фундамента. В аномалиях Буге эта комбинация проявлена над депрессией ~80 км с перепадом значений ~25 мГал, сопоставимым с перепадом под осью хребта Гаккеля. Это связано не с линейной структурой хребта, а, возможно, с одиночным верхнемантийным плюмом. Из этого следует механизм образования разломов над ним, связанный не с серпентинизацией, а с подъемом вещества плюма к поверхности. Физическое моделирование структурообразования при замедлении скорости спрединга, которое имело место в интервале С20–С12, показало, что амплитуда перепадов рельефа фундамента при этом возрастает. Сопоставление с реальным акустическим фундаментом показывает сходство его рельефа в соответствующих временных интервалах торможения спрединга с областями изменения рельефа в физической модели. Увеличение амплитуд выступов фундамента, скорее всего, связано с образованием разломов, обеспечивающих циркуляцию воды, необходимой для серпентинизации.

**Ключевые слова:** котловина Нансена, разломы осадочного чехла, “плоские пятна”, серпентинизация, плотностной разрез, торможение скоростей спрединга, физическое моделирование

**DOI:** 10.31857/S2686739724010058

### ВВЕДЕНИЕ

В западной части Российского сектора котловины Нансена вблизи архипелага Земля Франца Иосифа отработано несколько сейсмических разрезов в рамках проекта Арктика-2011 [1, 15] (рис. 1). Эти данные в совокупности

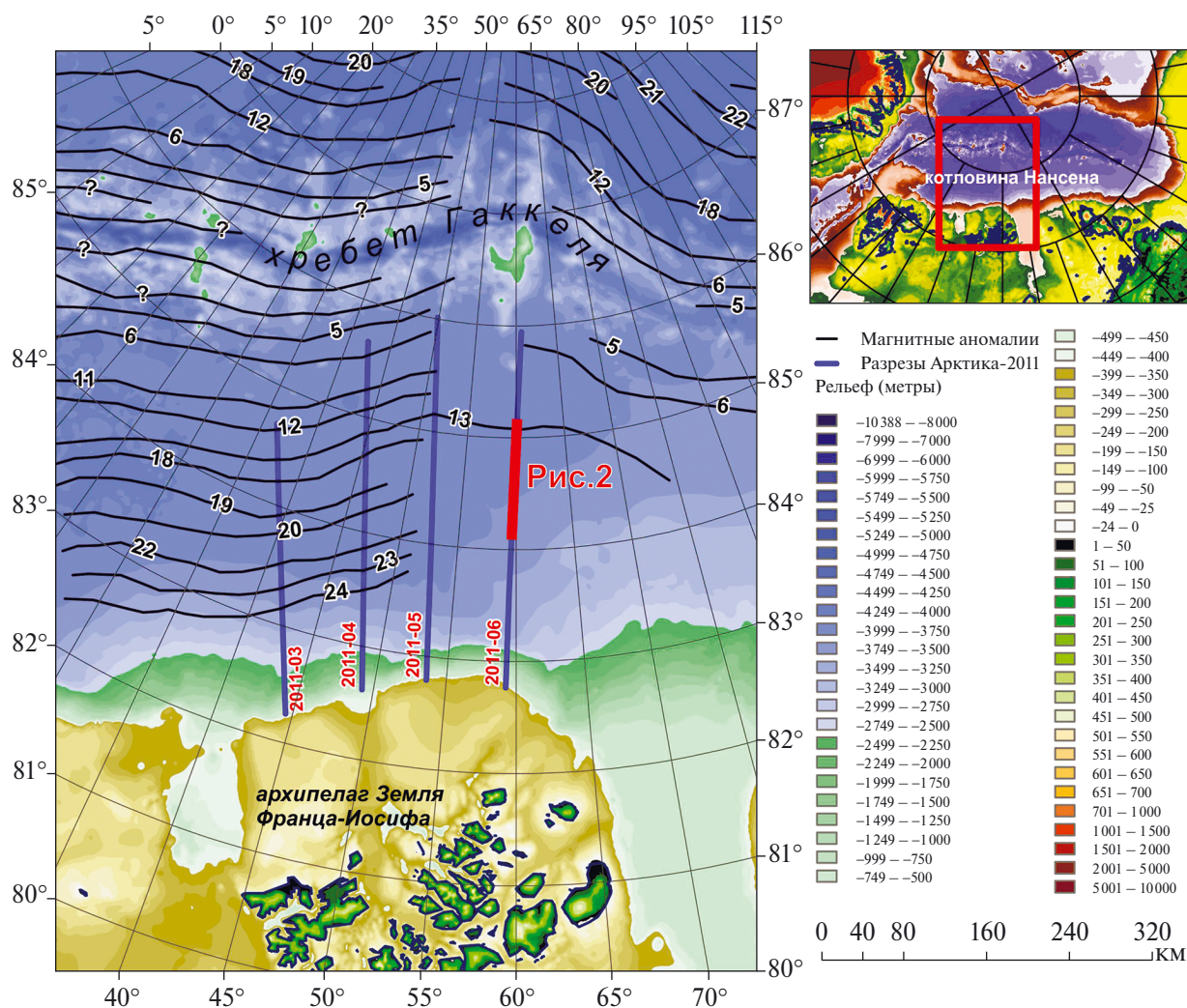
с российскими и зарубежными сейсмическими данными легли в основу увязанной сейсмографической модели котловин глубоководной части Арктики [6]. В разрезах нашего района исследований наблюдаются многочисленные аномалии типа “плоское пятно”, которые интерпретируются как пластовые метановые скопления, возникшие в результате серпентинизации пород верхней мантии [3] и взаимодействия выделившегося водорода с растворенным CO<sub>2</sub> в воде, поступающей в кристаллическую часть коры и верхней мантии по системе разломов [7]. Эти аномалии, как правило, связаны с вертикальными тектоническими нарушениями осадочного чехла, которые

<sup>1</sup>Геологический институт Российской Академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Музей земледения, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

\*E-mail: sysokolov@yandex.ru



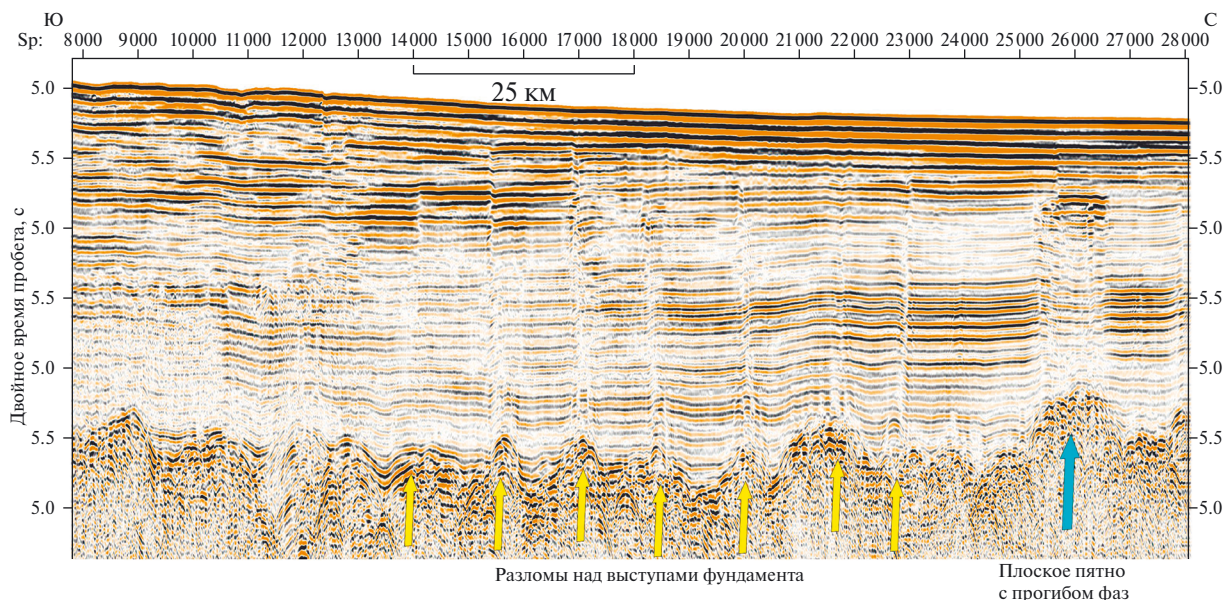
**Рис. 1.** Изученность сейсморазведкой по проекту Арктика-2011 [1, 19] в западной части Российского сектора котловины Нансена. Оси линейных магнитных аномалий даны по [16]. Красной линией показано положение фрагмента сейсмического разреза рис. 2.

охватывают всю толщу осадков от поверхности до выступов акустического фундамента (рис. 2), и над которыми они проявлены. Флюидная природа “плоских пятен” подтверждается прогибанием рефлекторов в осадочном чехле под аномалиями данного типа.

Определение генезиса тектонических нарушений при помощи анализа гравитационного поля для выявления плотностных неоднородностей в коре и верхней мантии, способных вызвать вертикальную изостатическую адаптацию коры и, соответственно, нарушения накопленного на фундаменте кайнозойского осадочного чехла, является задачей исследования. Существенное изменение в топографии фундамента в районе линейных магнитных аномалий (ЛМА) С21, С20

и С13 проявляется в пределах всего Евразийского бассейна [15]. “Плоские пятна” и разломы в разрезе изученных сейсмических профилей в пространстве расположены преимущественно между линейными магнитными аномалиями (ЛМА) С20 и С12 [7], в интервале между которыми имел место первый этап торможения скорости спрединга и образование более высокоамплитудного рельефа фундамента [4]. Поэтому мы проведем сопоставление выявленных особенностей сейсмических разрезов с распределением скоростей спрединга в котловине Нансена и результатами физического моделирования структурообразования при замедлении спрединговых процессов.

Внутриплитные явления в котловинах, связанные с тектонической активизацией областей



**Рис. 2.** Фрагмент разреза Арктика-2011–06. Желтыми стрелками показано положение выступов акустического фундамента под разломами в осадочном чехле. Голубой стрелкой показан широкий выступ фундамента под плоским пятном с прогибанием рефлекторов в осадочном чехле. Положение фрагмента показано на рис. 1.

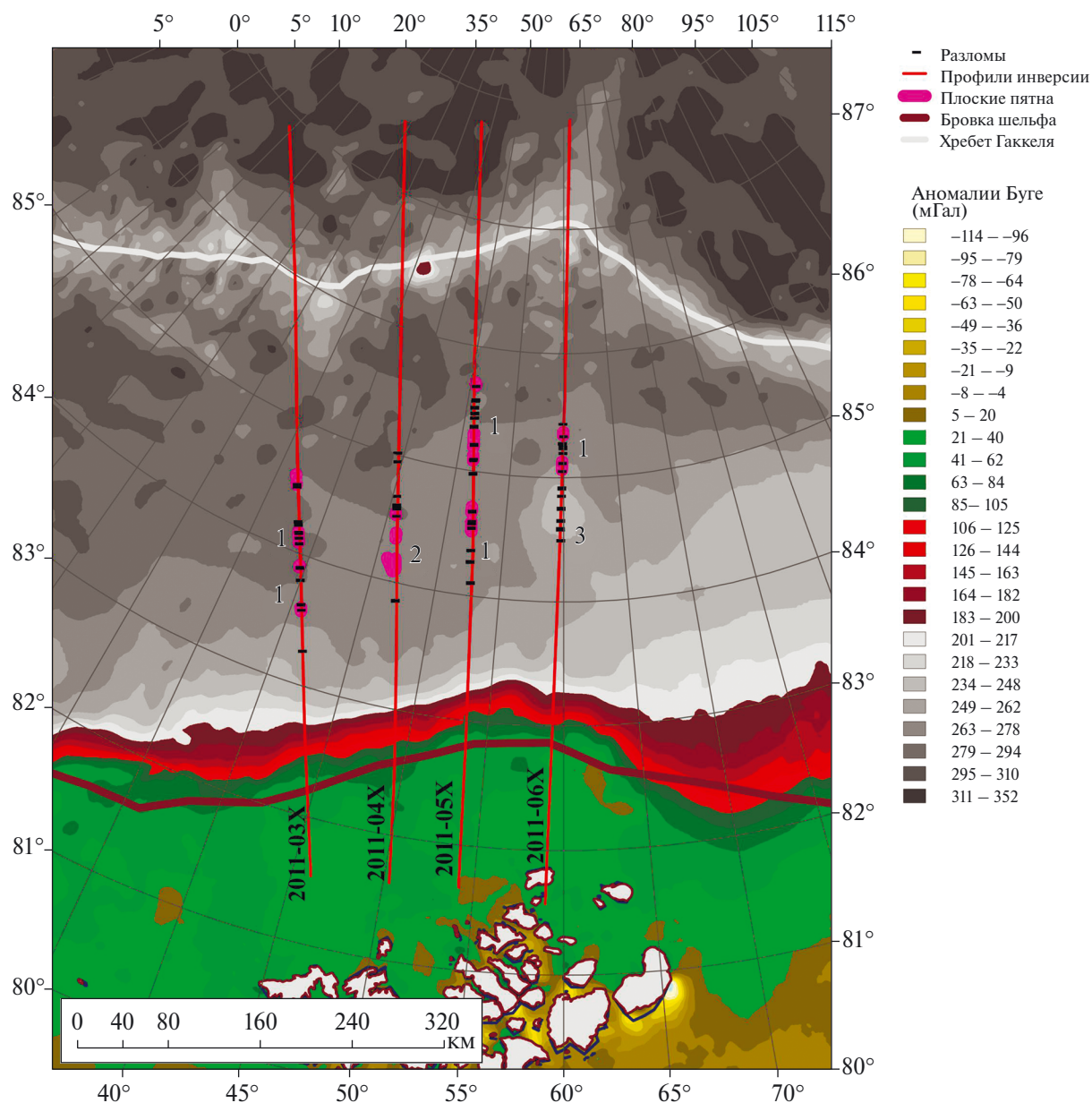
без проявлений основных активных геодинамических процессов, обычно наблюдаемых на границах плит, представляют фундаментальный интерес с позиций расслоенного и блокового строения океанических литосферных плит [9]. При отсутствии активных факторов структура котловин должна быть стагнирующим объектом, в котором идет накопление осадочного чехла на спрединговом фундаменте с фоновыми океанографическими процессами, влияющими на характер переноса осадочного материала. Внутриплитные процессы в котловинах развиваются при наличии внеосевого магматизма либо при развитии процессов серпентинизации по существующей разломной сети, которая может быть активизирована при вариациях параметров тектонического режима.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В основе решения поставленных задач лежит интерпретация волнового поля разрезов проекта Арктика-2011 [1, 15]. Кроме стратиграфической привязки основных рефлекторов разреза котловин в фокусе исследований находятся такие элементы разрезов, как “плоские пятна” и тектонические нарушения осадочного чехла. Выделение этих объектов в интерпретационных

программных средах формирует специфическую базу данных, дающую возможность построения карт их пространственного распределения. Ранее была проведена интерпретация аномалий типа “плоское пятно”, образующихся при скоплении свободного газа под локальным приповерхностным флюидоупором [7] (рис. 3). В настоящей работе к картографической компиляции добавлено выделение тектонических нарушений осадочного чехла котловины (рис. 3).

Возможность серпентинизации, приводящей к образованию метана и проходящей с разуплотнением пород до 20% и аналогичным увеличением объема с вертикальными движениями блоков коры, доказывалась в работе [7] решением прямой гравитационной задачи с добавлением подобных тел в верхнюю мантию для сходимости наблюдаемого и рассчитанного аномально поля. Мощность кристаллической части коры при этом предполагалась фиксированной — 4000 м. Выявлялось наличие неуравновешенного плотностного источника вертикальных движений, связанного с увеличением объема пород верхней мантии при серпентинизации, запускающего изостатический отклик с образованием нарушений в покрывающем фундамент осадочном чехле. Поскольку кровля 2-го океанического слоя в разрезах проекта Арктика-2011 является акустическим фундаментом и более глубокие



**Рис. 3.** Пространственное распределение выявленных по сейсмическим данным разломов и аномалии “плоское пятно” по данным [7]. Аномалии Буге рассчитаны по данным Arctic Gravity Project [12] на сетке грида 2500 м с использованием рельефа ИВСАО v.3 [14]. Красными линиями показаны профили, вдоль которых была рассчитана инверсия гравитационного поля (рис. 4). Профили проведены вдоль положения сейсмических разрезов (рис. 1) с продолжением на шельф и к пересечению с хребтом Гаккеля. Цифрами обозначены пространственные комбинации наблюдаемых на разрезах аномалий и разломов: 1 – разломы в сочетании с плоскими пятнами; 2 – плоские пятна без разломов; 3 – разломы без плоских пятен.

отражения, которые могли бы задать геометрию для плотностных вариаций, не прослеживаются, было решено провести расчет обратной задачи (инверсии) для редукции Буге без какой-либо пространственной регуляризации.

Аномалии Буге рассчитывались по данным Arctic Gravity Project [12] на сетке грида 2500 м

с использованием рельефа ИВСАО v.3 [14], сглаженном в плавающем окне 10 км до состояния, при котором амплитудный пространственный спектр рельефа стал сопоставим со спектром гравитационного поля. Значения плотностей использовались следующие: вода –  $1.03 \text{ г/см}^3$ , континентальная кора –  $2.67 \text{ г/см}^3$ , океаническая

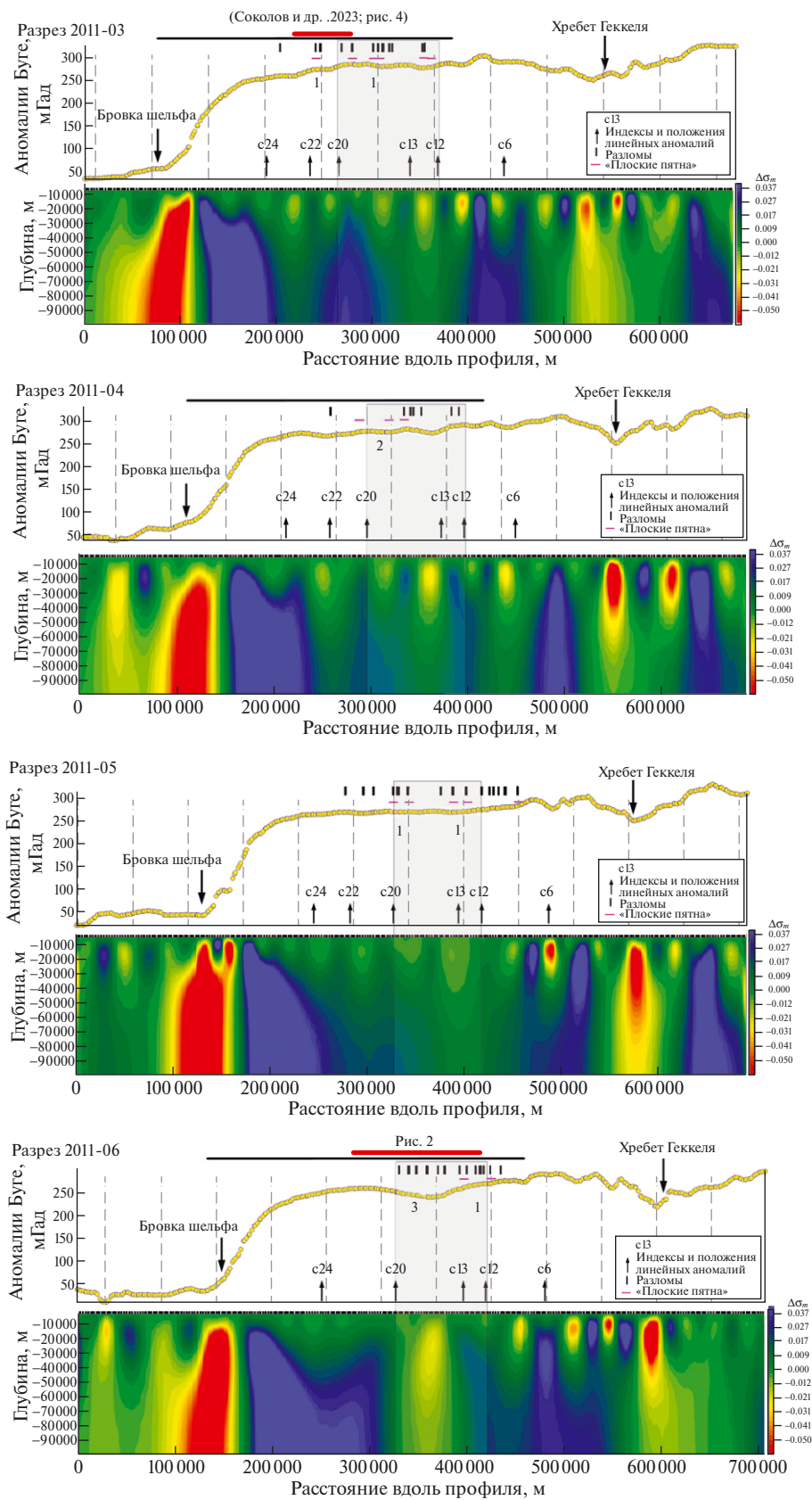
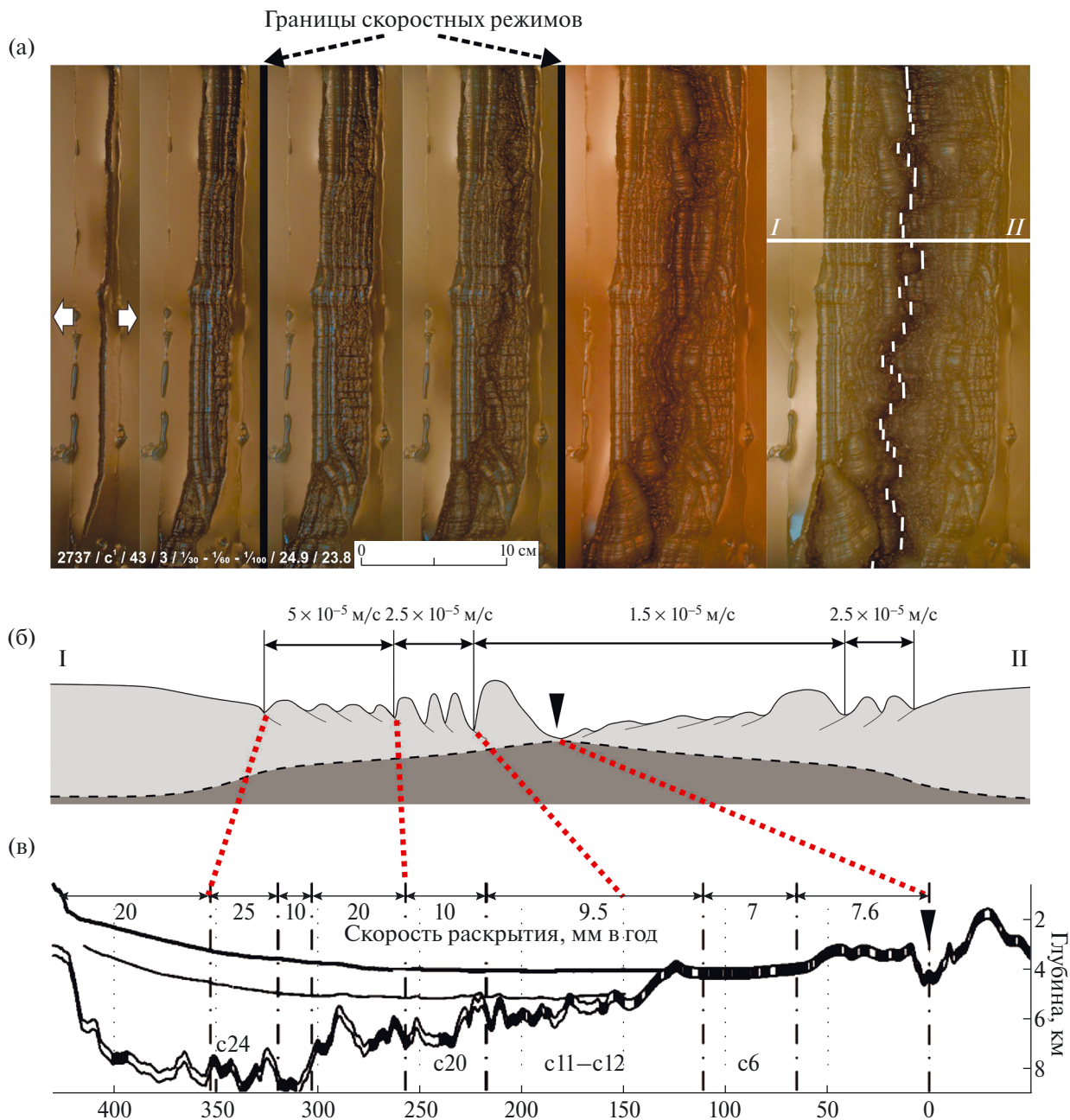


Рис. 4. Расчет инверсии гравитационного поля вдоль сейсмических разрезов Арктика-2011 3, 4, 5, 6 (рис. 1) по пролонгированным профилям, положение которых указано на рис. 3. Расчет выполнен в ПО ZondGM2D [5]. На разрезах вариаций плотностей показаны пересечения с линейными магнитными аномалиями по данным [16], разломы и плоские пятна. Красными линиями показаны положения фрагмента разреза на рис. 2 и [7, рис. 4]. Цифрами 1, 2 и 3 обозначены комбинации аномалии и разломов по карте рис. 3. Серыми прямоугольниками показаны области области JMA C20 и C12.



**Рис. 5.** Особенности структурообразования на южном фланге хребта Гаккеля при двухэтапном замедлении скорости спрединга по данным физического моделирования (эксперимент № 2737). а – поэтапные фотографии структур моделируемого рифта при направлении растяжения, ортогональном первичной ослабленной зоне; б – схематический разрез сформированного рельефа вдоль линии I–II с указанием скоростей в физической модели; в – сопоставление разреза рельефа с результатами идентификации магнитных аномалий для профиля Арктика-2011-3, рельефом фундамента и определением скоростей спрединга по данным [4].

кора –  $2.8 \text{ г/см}^3$ . Результат расчета показан в качестве топосновы на рис. 3. На этом же рисунке показаны профили, вдоль которых проводился расчет инверсии. Краевые части профилей пролонгированы с выходом на шельф и пересечением оси хребта Гаккеля, что шире пределов

сейсмических данных, показанных на рис. 3. Расчет проводился в ПО ZondGM2D [5] с использованием деконволюционных методов и метода Ньютона с фокусирующей регуляризацией. Вертикальная сетка формировалась с фактором увеличения 1.2, что при стартовой глубине 1 км

позволяло сформировать грид с глубиной до 100 км на 18 узлах. Рассчитанные вариации плотности по 4 профилям показаны на рис. 4.

Поскольку проявления “плоских пятен” и разломов преимущественно между ЛМА С20 и С12 имеют место над фундаментом, сформированным в условиях замедления спрединга, мы провели физическое моделирование этого геодинамического режима для двухэтапного снижения скорости с целью выяснения особенностей структурообразования консолидированной коры (рис. 5). Указанный временной интервал по данным [4] в рельефе акустического фундамента вдоль разреза Арктика-2011-3 выражен характерными высокоамплитудными формами, занимающими промежуточное гипсометрическое положение между рельефом фундамента древнее интервала С20–С12 со сравнительно высокой скоростью спрединга и моложе, но с ультразамедленными значениями. Это обстоятельство создает предпосылки для проведенного моделирования.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея Землеведения МГУ в соответствии с условиями подобия и методиками, описанными в работах [2, 19]. В них на основе экспериментов по растяжению двухслойной модели литосферы была предложена модель рельефо- и сбросообразования на хребтах с медленной или ультразамедленной скоростью растяжения. Модельное вещество представляет собой сложную коллоидную систему, основой которой являются жидкие (минеральное масло) и твердые (церезин, парафин) углеводороды с различными поверхностно-активными добавками. Материал удовлетворяет критерию подобия по модулю сдвига [10]. 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. При поэтапном снижении скорости спрединга в 2 и 1.6 раза, проведенном при моделировании (рис. 5 а), был получен рельеф с характерным структурным стилем (рис. 5 б), который сравнивался с реальным акустическим фундаментом (рис. 5 в).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате картографической компиляции разломов и аномалий типа “плоское пятно” (рис. 3) определяются три пространственные комбинации этих элементов сейсмических

разрезов осадочного чехла. Наиболее распространенной комбинацией является пространственная синхронизация разломов и пятен (рис. 3, п. 1). Ее очевидной интерпретацией, сформулированной на основании решения прямой гравитационной задачи [7], является серпентинизация пород верхней мантии в присутствии воды, проникшей в глубину по сформированным ранее тектоническим нарушениям, увеличение объема пород и локальный подъем кристаллических блоков, приводящий к образованию разломов взбросовой кинематики, охватывающих весь осадочный чехол от акустического фундамента до поверхности дна (рис. 2). Также по этим разломам выводится метан – продукт взаимодействия растворенного в воде  $\text{CO}_2$  и водорода [3]. Попадая в зону стабильности газогидратов, метан трансформируется в это агрегатное состояние и сам образует флюидоупор, под которым продолжает накапливаться. На это указывают сходные значения глубин кровли плоских пятен –  $390 \pm 75$  м на всех анализируемых разрезах [7], которые примерно соответствуют теоретической мощности зоны стабильности в глубоководной Арктике [20]. Отсутствие пятен над фундаментом моложе С12 объясняется редуцированием осадочного чехла, в котором они могут образоваться. Отсутствие пятен над фундаментом древнее С20 объясняется возможной миграцией флюидов к континентальному склону.

Комбинация 1 (рис. 3, п. 1), распространенная преимущественно между ЛМА С20 и С12, расположена над отрицательными вариациями плотности на всех разрезах (рис. 4) с глубинами до  $\sim 25$ – $30$  км. Это значение имеет такой же порядок, как и глубина серпентинизации, определенная в котловине к юго-западу от Зондского желоба по отсутствию сейсмичности в верхней мантии [17] за счет более пластичного состояния пород. Более интересным фактом является латеральная периодичность отрицательных вариаций плотности  $\sim 50$  км. При средней скорости спрединга в указанный интервал времени  $\sim 10$  мм/год [4] получается, что формирование литосферы сопровождается такими плотностными аномалиями каждые  $\sim 5$  млн лет. Возможной интерпретацией этой плотностной периодичности может быть воздействие переменной геодинамической активности на параметры спрединга. Известно [8], что интенсивность тектонических процессов в зоне океанского рифтогенеза напрямую влияет на колебания уровня моря. Спектр мощности эвстатической кривой [13] содержит максимум в районе периодов  $\sim 5$  млн лет. Несмотря на то, что Евразийская котловина приобрела связь с Мировым океаном всего  $\sim 18$  млн лет

назад, общепланетарная периодичность колебаний уровня моря зависит от общепланетарных геодинамических процессов, которые должны проявляться в Арктике при рифтогенезе на хребте Гаккеля вне зависимости от наличия или отсутствия водной перемычки между океанскими бассейнами. Это также подтверждается характером изменения скорости спрединга в котловине Нансена с периодом  $\sim 5$  млн лет по данным [1].

Комбинация 2 (рис. 3, п. 2) состоит в преобладании “плоских пятен” при отсутствии разломов. Ее интерпретация может состоять в следующем. По данным [1], на разрезе Арктика-2011–4 аномалии содержат прогибание рефлекторов под ними, что однозначно указывает на их флюидный генезис. Кроме того, эти аномалии расположены над широкими (от 20 до 30 км), с большим перепадом высот (600 и 900 мс) выступами акустического фундамента, что указывает на их связь с коровыми (и мантийными) структурами. Отсутствие видимых смещений рефлекторов по разломам в пределах этих аномалий разреза Арктика-2011–4, скорее всего, говорит о том, что разломы могут находиться вне его плоскости. Учитывая, что шаг между разрезами составляет от 50 до 80 км (рис. 1), пропуск разломов вполне реален. “Плоское пятно” пропустить сложнее, так как флюид после миграции вверх по разрезу распределяется под флюидоупором и создает аномалии с шириной от 2 до 12 км [7]. Также нельзя исключать миграцию флюидов в сторону континентального склона от разломных зон при наличии небольшого градиента приповерхностных рефлекторов.

Комбинация 3 (рис. 3, п. 3) по сейсмическим данным уникальна и состоит в наличии разломов без “плоских пятен”. Они представляют собой (рис. 2) пространственную серию смещений с шагом  $\sim 10$  км, расположенных над выступами акустического фундамента и поднимающихся в приповерхностные слои около дна выше уровня “плоского пятна” 490 мс под дном в северной части фрагмента разреза, которое находится вне данной серии смещений. В аномалиях Буге эта серия расположена над изометричной депрессией в значениях редукции диаметром  $\sim 80$  км (рис. 3). Перепад значений в центре и на краях депрессии составляет  $\sim 25$  мГал, что сопоставимо с отрицательным перепадом аномалий Буге в оси хребта Гаккеля  $\sim 50$  мГал. Эти особенности хорошо видны на профилях рис. 4. Разрезы по этим профилям показывают, что комбинация 3 на разрезе Арктика-2011–6 расположена в области, сильно отличающейся от верхнемантийных

латеральных вариаций плотности с шагом  $\sim 50$  км и глубинами  $\sim 25$  км. Характер плотностного разреза под область комбинации 3 имеет больше сходства с областью разуплотнения под хребтом Гаккеля. Тот факт, что аналогичные разуплотнения в центральной части котловины Нансена на других разрезах отсутствуют, указывает на локальный подъем менее плотного вещества. Оно связано не с линейной структурой хребта Гаккеля, а, возможно, с одиночным верхнемантийным плюмом, который является приповерхностным ответвлением от другой, более крупной системы прогретых субвертикальных каналов в мантии. Косвенно это подтверждается данными сейсмотомографии [11], в которых на разрезе через котловину Нансена восточнее плотностного разреза Арктика-2011–6 выявлен мантийный плюм, поднимающийся с глубин  $\sim 550$  км. Из плюмовой интерпретации плотностного разреза следует механизм образования разломов над ним, связанный не с серпентинизацией и увеличением объема в остывшей менее  $500$  °С мантии, а с подъемом вещества плюма к поверхности в котловине с осадочным чехлом, залегающим на сформированном ранее спрединговом фундаменте, при котором происходит изостатическая адаптация среды с вертикальными движениями положительного знака.

Временной интервал С20–С12 характерен снижением скорости спрединга в  $\sim 2$  раза [1, 4] по сравнению с интервалом С24–С21. После С20–С12 скорость спрединга падает еще в  $\sim 1.6$  раза. Так как изученные разломы и “плоские пятна”, сопровождающиеся отрицательными вариациями плотности, попадают на этот интервал, было проведено физическое моделирование структурообразования в таком геодинамическом режиме. Эксперименты показали следующее. Сформированный на начальной стадии растяжения грядовый рельеф имеет типичную для спрединговых зон картину (рис. 5 а). В области двухэтапного уменьшения скорости амплитуда перепадов рельефа сильно возрастает. Для медленноспрединговых сегментов рифтов известно, что высокоамплитудные грядовые выступы фундамента, как правило, сопровождаются разломами, уходящими под границу Мохо [18], по которым идет циркуляция флюидов и серпентинизация. Далее, при продолжении, в модели формировался существенно асимметричный рельеф фундамента. Схематичный структурный профиль вдоль линии I–II (рис. 5 б) показывает характерный стиль, в котором просматриваются структуры типа простого сдвига в осевой зоне рифта и высокая вероятность перескока оси растяжения. Этот стиль сопоставлялся с реальным акустическим



фундаментом (рис. 5 в) и показывает сходство высот его рельефа в соответствующих временных интервалах с областями изменения рельефа в физической модели. Торможение спрединга в два этапа вызывает увеличение амплитуд выступов фундамента в два этапа, которое связано с образованием разломов в условиях низкого магматического дебета, свойственного медленноспрединговым хребтам. Возможно также влияние инерции движения плиты и скорости корообразования, приводящее к скучиванию сформированных блоков коры в зависимости от соотношения скоростей дрейфа и подъема магмы.

## ВЫВОДЫ

1. В работе исследованы разломы в осадочном чехле котловины Нансена и аномалии сейсмической записи типа “плоское пятно” на разрезах проекта Арктика-2011. Установлено, что эти элементы группируются в три пространственные комбинации: 1 – синхронизированные разломы и пятна, 2 – пятна без разломов, 3 – разломы без пятен.

2. Интерпретацией генезиса комбинации 1 является серпентинизация пород верхней мантии в присутствии воды, проникшей в глубину по сформированным ранее тектоническим нарушениям, увеличение объема пород и локальный подъем кристаллических блоков, приводящий к образованию разломов взбросовой кинематики, охватывающих весь осадочный чехол от акустического фундамента до поверхности дна. Эта комбинация распространена преимущественно между ЛМА С20 и С12 над отрицательными вариациями плотности с глубинами до ~25–30 км и латеральной периодичностью ~50 км, что при средних скоростях спрединга в котловине Нансена означает формирование таких аномалий в литосфере каждые ~5 млн лет за счет вариаций геодинамической активности.

3. Комбинация 2 состоит в преобладании “плоских пятен” при отсутствии разломов. Интерпретация генезиса этих аномалий сейсмической записи сводится к скоплениям флюидов, под которыми наблюдается прогибание рефлекторов и широкие, с большим перепадом высот выступы акустического фундамента. Разломы, по которым осуществляется циркуляция флюидов, могут быть пропущены из-за редкой сети наблюдений и находиться вне плоскости разреза. Также не исключена миграция флюидов в сторону континентального склона от разломных зон при наличии небольшого градиента приповерхностных рефлекторов.

4. Комбинация 3 состоит в наличии разломов без “плоских пятен” с шагом ~10 км над выступами акустического фундамента. В аномалиях Буге эта комбинация на разрезе Арктика-2011–6 расположена над изометричной депрессией ~80 км, в которой перепад значений в центре и на краях депрессии составляет ~25 мГал. Это сопоставимо с отрицательным перепадом аномалий Буге из-за разуплотнения под осью хребта Гаккеля ~50 мГал и сильно отличается от верхнемантийных латеральных вариаций, преобладающих на основных данных в котловине Нансена. Аналогичные разуплотнения в центральной части котловины Нансена на других разрезах отсутствуют, что указывает на локальный подъем менее плотного вещества. Это связано не с линейной структурой хребта Гаккеля, а, возможно, с одиночным верхнемантийным плюмом. Из этого следует механизм образования разломов над ним, связанный не с серпентинизацией, а с подъемом вещества плюма к поверхности и вертикальными движениями положительного знака, нарушающими весь осадочный чехол от спредингового фундамента до дна.

5. Временной интервал С20–С12 с основным проявлением разломов и пятен характеризуется снижением скорости спрединга в ~2 раза. Физическое моделирование структурообразования при таком геодинамическом режиме показало, что при двухэтапном уменьшении скорости спрединга амплитуда перепадов рельефа сильно возрастает. Высокоамплитудные грядовые выступы фундамента сопровождаются разломами, уходящими под границу Мохо. По ним идет циркуляция флюидов и серпентинизация. При продолжении растяжения был получен существенно асимметричный рельеф фундамента на оси растяжения. Сопоставление с реальным акустическим фундаментом показывает сходство его рельефа в соответствующих временных интервалах замедления спрединга с областями изменения рельефа в физической модели. Показано увеличение амплитуд выступов фундамента, которое связано с образованием разломов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность: Российскому Федеральному Геологическому Фонду (<https://rfgf.ru>) за доступ к сейсмическим данным; Кафедре Геофизики Геологического факультета МГУ за консультацию и возможность расчета инверсии гравитационного поля.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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. Арктический бассейн (геология и морфология) / под ред. В.Д. Каминского, А.Л. Пискарева, В.А. Поселова. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. 291 с.
2. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П., Агранов Г.Д., Барановский М.С., Данилов Я.А., Доманская П.А., Максимова А.А., Макушкина А.И., Ращупкина А.О., Толстова А.И., Филаретова А.Н., Шепталина 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. DOI 10.29003/m1778.0514-7468.2020\_42\_4/485-501
3. Дмитриев Л.В., Базылев Б.А., Силантьев С.А., Борисов М.В., Соколов С.Ю., Буго А. Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 511–519.
4. Зайончек А.В., Меркурьев С.А. Новые результаты идентификации линейных магнитных аномалий западной части котловины Нансена и их применение при сейсмостратиграфическом анализе // Геология морей и океанов. Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ИО РАН, 2021. С. 70–74. ISBN 978-5-6045110-7-7. DOI: 10.29006/978-5-6045110-7-7
5. Каминский А.Е. Пакет программ ZOND. 2017. (<http://zond-geo.ru>)
6. Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф., Родина Е.А., Посаментьер Х., Фоулджер Дж., Глумов И.Ф., Морозов А.Ф., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Фрейман С.И., Афанасенков А.П., Безьязыков А.В., Доронина М.С., Никишин В.А., Сколотнев С.Г., Черных А.А. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов. // Труды ГИН. Вып. 632. М.: Геос, 2022. 156 с.
7. Соколов С.Ю., Geissler W.H., Абрамова А.С., Рыжова Д.А., Патина И.С. “Плоские пятна” в кайнозойских осадках котловины Нансена (Северный Ледовитый Океан): индикаторы процессов серпентинизации, генерации газа и его аккумуляции // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 1. С. 3–20. DOI: 10.31857/S0024497X22060076
8. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. М.: Изд-во, МГУ, 2002. 560 с.
9. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
10. Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. № 10. С. 10–19
11. Яковлев А.В., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л. Структура верхней мантии Арктического региона по данным региональной сейсмографии // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 10. С. 1261–1272
12. Forsberg R., Skourup H. Arctic Ocean gravity, geoid and sea-ice freeboard heights from ICESat and GRACE // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L21502. P. 1–4. doi:10.1029/2005GL023711
13. Harrison C.G.A. Power spectrum of sea level change over fifteen decades of frequency // Geochemistry Geophysics Geosystems G<sup>3</sup>. 2002. V. 3. № 8. P. 1–17. DOI: 10.1029/2002GC000300
14. Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39(12). L12609. P. 1–6.
15. Nikishin A.M., Gaina C., Petrov E.I., et al. Eurasia Basin and Gakkel Ridge, Arctic Ocean: Crustal asymmetry, ultra-slow spreading and continental rifting revealed by new seismic data // Tectonophysics. 2017. V. 746. № 10. P. 64–82.
16. Jokat W., Micksch U. Sedimentary structure of the Nansen and Amundsen basins, Arctic Ocean // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L02603. DOI: 10.1029/2003GL018352.
17. Qin Y., Singh S.C. Seismic evidence of a two-layer lithospheric deformation in the Indian Ocean // Nature Communications. 2015. V. 6:8298. DOI: 10.1038/ncomms9298
18. Rajan A., Mienert J., Büinz S., Chand S. Potential serpentinization, degassing, and gas hydrate formation at a young (<20 Ma) sedimented ocean crust of the Arctic Ocean ridge system // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. B03102. DOI: 10.1029/2011JB008537
19. Shemenda A.I., Grocholsky A.L. Physical modeling of slow seafloor spreading // Journal Geophysical Research. 1994. V 99. P. 9137–9153.
20. Wallmann K., Pinero E., Burwicz E., et al. The global inventory of methane hydrate in marine sediments: a theoretical approach // Energies. 2012. V. 5. P. 2449–2498.

## TECTONIC DISPLACEMENTS OF THE NANSEN BASIN SEDIMENTARY COVER: CAUSES AND CONSEQUENCES

S. Yu. Sokolov<sup>a, #</sup>, G. D. Agranov<sup>a, b</sup>, V. A. Kulikov<sup>c</sup>, A. V. Zayonchek<sup>a</sup>,  
A. L. Grokholsky<sup>b</sup>

Presented by Academician of the RAS K. E. Degtyarev August 16, 2023

Received August 16, 2023

After revision August 20, 2023

Accepted August 30, 2023

<sup>a</sup>*Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Lomonosov Moscow State University, Earth Science Museum, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: sysokolov@yandex.ru*

It is established that faults in the sedimentary cover of the Nansen basin and seismic anomalies of the “flat spot” type associated with the methane accumulation are grouped into three spatial combinations: 1 – synchronized faults and spots, 2 – spots without faults, 3 – faults without spots. They are distributed mainly between linear magnetic anomalies C20 and C12 over negative variations of the lithosphere density with depths up to ~25–30 km and lateral periodicity ~50 km. The genesis of combination 1 is provided by serpentinization of upper mantle rocks in the presence of water that has depth penetration through previously formed tectonic displacements, an increase in the rock volume and local rise of crystalline blocks, leading to the formation of faults of thrust kinematics, crossing the entire sedimentary cover from the acoustic basement to the ocean bottom. Combination 2 consists in the predominance of “flat spots” also of fluid genesis in the absence of faults, which, with a rare seismic observations, may be missed and not appear in the plane of the sections. Combination 3 consists in the presence of faults without “flat spots” with a spatial step of ~ 10 km above the highs of the acoustic basement. In the Bouguer anomalies this combination is manifested over ~80 km depression of ~25 mGal depth, comparable to the gravity depth under the axis of the Gakkel ridge. This is not due to the linear structure of the ridge, but, perhaps, to a single upper mantle plume. From this follows the mechanism of faults formation above it, associated not with serpentinization, but with the rise of the plume body to the surface. Physical modeling of the structure formation during the slowdown of the spreading rate, which took place in the range C20–C12, showed that the amplitude of the relief drops increases greatly. Comparison with a real acoustic basement shows the similarity of its relief in the corresponding time intervals of spreading slowdown with the areas of relief change in the physical model. The increase in the amplitudes of the basement highs is most likely due to the formation of faults that provide the circulation of water necessary for serpentinization.

*Keywords:* Nansen basin, sedimentary cover faults, “flat spots”, serpentinization, density section, spreading rates slowdown, physical modeling