

УДК 551.248+550.34.09+550.343.4

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-4-15-24

ДИСЛОКАЦИИ В РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА ОНЕЖСКОЙ СТРУКТУРЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Антон Владимирович Полещук^{1✉}, Дмитрий Сергеевич Зыков²,
Алексей Олегович Агибалов³, Куляш Мусабековна Седаева⁴,
Алексей Андреевич Сенцов⁵

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия; anton302@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-7276-6107>

² Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН; Геологический институт РАН, Москва, Россия; zikov58@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6174-8920>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; agibalo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6742-3524>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sedaeva-mgu@mail.ru

⁵ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; alekssencov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6182-114X>

Аннотация. На юго-восточной окраине Балтийского щита, в северо-западной части Онежской структуры в толще песков нами выявлены и детально описаны дислокации, относимые ранее к складкам оползания. Установлено, что они образуют парагенез деформационных структур пластичных осадков. Рассмотрены возможные гипотезы, объясняющие их формирование, и предложена интерпретация этих структур как палеосейсмодислокаций.

Ключевые слова: Балтийский щит, сейсмиды, неустойчивость Рихтмайера-Мешкова, неустойчивость Рэ-ля-Тейлора

Для цитирования: Полещук А.В., Зыков Д.С., Агибалов А.О., Седаева К.М., Сенцов А.А. Дислокации в рыхлых отложениях позднего плейстоцена Онежской структуры как результат сейсмического воздействия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 4. С. 15–24.

DISLOCATIONS IN LATE PLEISTOCENE LOOSE DEPOSITS OF THE ONEGA STRUCTURE AS A RESULT OF SEISMIC IMPACT

Anton V. Poleshchuk^{1✉}, Dmitriy S. Zikov², Aleksey O. Agibalov³,
Kulyash M. Sedaeva⁴, Aleksey A. Sentsov⁵

¹ Geological Institute RAS, Moscow, Russia; anton302@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-7276-6107>

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS; Geological Institute RAS, Moscow, Russia; zikov58@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6174-8920>

³ Lomonosov Moscow State University; Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; agibalo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6742-3524>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sedaeva-mgu@mail.ru

⁵ Schmidt Earth Physics Institute RAS, Moscow, Russia; alekssencov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6182-114X>

Abstract. On the south-eastern edge of the Baltic Shield in the north-western part of the Onega structure, dislocations previously attributed to slump folds were identified in the sand unit, and their detailed description was carried out. It was established that these formations form a paragenesis of soft sediment deformation structures. Possible hypotheses are considered and a seismogenic model of their formation is proposed.

Keywords: Baltic Shield, seismites, Richtmyer-Meshkov instability, Rayleigh-Taylor instability

For citation: Poleshchuk A.V., Zikov D.S., Agibalov A.O., Sedaeva K.M., Sentsov A.A. Dislocations in Late Pleistocene loose deposits of the Onega structure as a result of seismic impact. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 4: 15–24. (In Russ.).

Введение. Работа посвящена проблеме генезиса дислокаций, изученных в одном из разрезов толщи позднелейстоценовых песков Прионежья. Подобные структуры могут возникать как в результате сейсмического воздействия, так и при формировании гравитационных складок оползания или в связи с мерзлотно-ледниковыми процессами. Понимание механизма структурообразования значимо для

оценки сейсмической опасности достаточно хорошо освоенной в инженерно-хозяйственном отношении территории Прионежья и северо-запада российской части Балтийского щита в целом. Решение поставленной задачи предполагает рассмотрение разных возможных причин формирования упомянутых дислокаций, наиболее вероятная из которых выбрана, исходя из результатов детального структурно-па-

рагенетического анализа. Такой подход основан на том, что структурные парагенезы, инициированные сейсмическими событиями, отличаются от таковых, сформировавшихся под воздействием атектонических факторов, хотя отдельные элементы этих парагенезов могут быть морфологически сходны.

Методы исследования. В основу работы положены полевые палеосейсмологические наблюдения, предполагающие детальное изучение разреза толщи песков, выявление и описание разномасштабных дислокаций. Особое внимание уделено анализу парагенетических ассоциаций разных типов дислокаций и их сопоставлению с известными аналогами, что позволило сделать выводы о наиболее вероятном механизме формирования изученных структур.

Краткое описание дислокаций. Район исследования расположен в юго-восточном борту Койкарского выступа Онежской палеопротерозойской структуры Балтийского щита. Здесь известно большое количество палеосейсмодислокаций, проявленных в скальных породах. Возраст дислокаций оценен как постледниковый, поскольку на участвующих в их строении нарушенных разломами бараньих лбах наблюдается ледниковая штриховка, сейсмогравитационные обвалы имеют «свежий» облик, а пространство между глыбами не заполнено материалом [Никонов и др., 2017]. Палеопротерозойские образования перекрыты толщей рыхлых песков — отложениями перигляциальной дельты. Их возраст определен как средний аллеред — конец позднего дриаса, т. е. конец позднего плейстоцена [Shelehova, et al., 2018]. Разрез этой песчаной толщи мощностью ~30 м вскрыт в северо-западном борту канала Пионерный Кондопожской ГЭС, в 1,3 км к северо-востоку от шлюза. В верхней части разреза залегают однородные крупнозернистые пески с неотчетливой параллельной однонаправленной слоистостью. В средней и нижней частях преобладают разномасштабные пески с прослоями алевритов с горизонтальной, волнистой и косой слоистостью, поверхностями размыва. Нами достаточно подробно изучен весь разрез, однако дислокации, ранее описанные в [Shelehova, et al., 2018] как складки оползания, наблюдались только в его центральной части. Отметим, что в этой работе вопросы морфологии и генезиса складок подробно не рассматривались. Детальное изучение нижней части разреза осложняется оползнями того же состава, что и вышележащие алеврито-песчаные толщи, и требует дополнительных исследований. Предварительные данные показывают, что дислокации в нижней части разреза не развиты, по крайней мере, в существенном объеме (рис. 1).

Выявленные деформационные структуры, локализованные в пределах горизонта мощностью ~1,5 м, характеризуются чередованием крупных, длиной до первых метров корыто- и чашеобразных синформ. Всего в пределах расчистки вскрыто 6 синформ и 5 разделяющих их выступов. Ширина выступов

варьирует от 0,5 до 1,5 м, а высота — до 1,5 м. Ширина синформ достигает 3,0–3,5 м при высоте до 1,2 м.

В центральных частях синформ выявлены миниатюрные пламенивидные структуры (рис. 2, кв. А-1, А-3; рис. 3, *г-д*), апикальные части «язычков» которых либо вытянуты вверх, либо наклонены. Деформации локального масштабного уровня проявлены в маркирующем слое с «псевдоскорлуповатой» отдельностью (рис. 2, кв. А-7-9; рис. 3, *е*), сформировавшейся из-за разобщения алеврито-песчаного прослоя на изогнутые скорлупки, между которыми происходило выдавливание обводненного песка. На разных гипсометрических уровнях встречены крупные подушковидные обособления (рис. 2, кв. Б-1, Б-8-9, Б-14; рис. 3, *а-б*) длиной до 0,3–0,5 м. Небольшие удлиненные песчаные обособления развиты на разных участках горизонта (рис. 2, кв. Б-2, Б-12-13, БВ-9). Рулетовидные складки представлены небольшими структурами закатывания алеврито-песчаного материала (рис. 2, кв. А-11) и выявлены в нижней части выступа VI. Структуры, напоминающие складки волочения (рис. 2, кв. А-Б-2, АБ-6), развиты в бортах выступов I-III. Дизъюнктивные структуры представлены секущими спрямленными хрупкими разрывами (рис. 2, кв. А-Б-1; рис. 3, *г*) и сглаженными поверхностями раздела и скольжения (рис. 2, кв. Б-9). Они не выходят за пределы отдельных слоев и поэтому относятся к конседиментационному типу. Инъекционные образования представлены небольшими слепыми кластическими дайками и структурами вдавливания. Дайки малых размеров (длиной до 10 см и мощностью до 3 см) развиты как в центральных частях синформ (рис. 2, кв. А-3, Б-7; рис. 4), так и в апикальных частях выступов (рис. 4, *г*). Слепые дайки вытянуты вертикально вверх, располагаются субпараллельно друг другу и, в целом, согласно удлинениям соседних выступов. Структуры вдавливания представлены клиновидными образованиями сложной морфологии, разобщающими округлые подушковидные тела на части (рис. 2, кв. Б-8; рис. 3, *б*). К проблематичным структурам относятся вторичные выступы (рис. 2, кв. Б-2) и структуры сгущения материала (рис. 2, кв. А-Б-11-12).

Атектонические механизмы формирования дислокаций. Наши наблюдения показали, что рассмотренные выше дислокации образуют единый структурный парагенез и сформировались в результате разжижения и перераспределения неконсолидированных осадков (таблица). Существующие механизмы формирования структур разжижения разделяются на две крупные группы: атектонические и тектонические.

К основным атектоническим механизмам осадков относятся: 1) инверсия плотности и неравномерное распределение осадочной нагрузки [Belzyt, et al., 2021]; 2) штормовое воздействие или цунами [Johnson, 1977]; 3) воздействие льда в перигляциальных условиях [Шполянская, 1993].

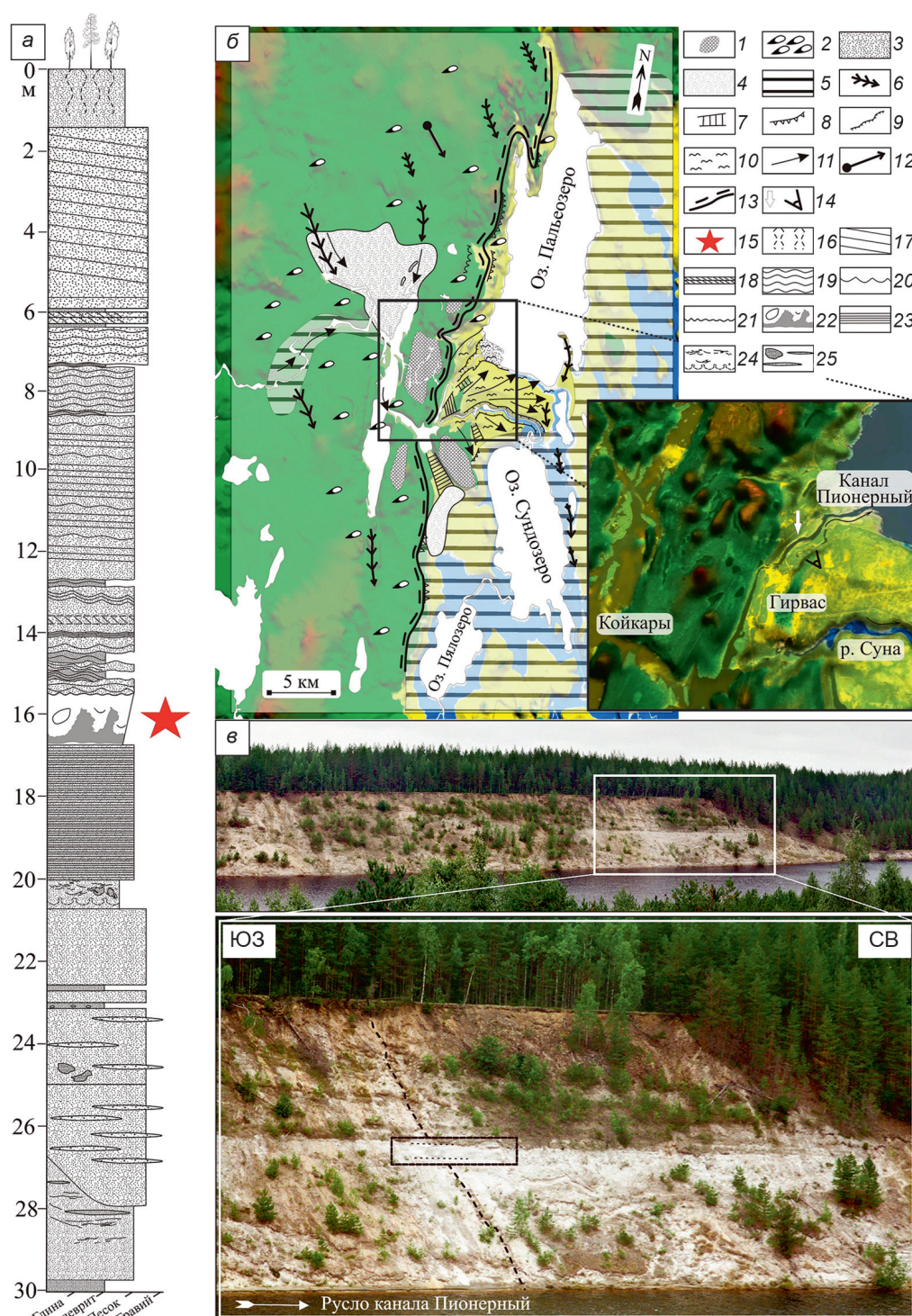


Рис. 1. Особенности строения четвертичных отложений в районе исследований: а — колонка изученных песчаных отложений в левом борту канала Пионерный, скорректированная с учетом угла склона. Подчеркнуты особенности слоистости и текстуры; б — схема развития четвертичных образований (с изменениями по данным [Shelehova et al, 2018]). На врезке показаны особенности рельефа в районе исследований; в — общий вид на песчаные толщи в левом борту канала Пионерный и положение расчистки. Пунктиром показана линия, вдоль которой строилась колонка. Условные обозначения к рисункам а и б: 1 — выходы коренных пород; 2 — морена последнего оледенения; 3–13 — позднеплейстоценовые образования этапа дегляциации северо-западной части Онежского озера: 3 — пески; 4 — флювиогляциальные гравийно-песчаные отложения; 5 — озерно-ледниковые илы и глины; 6 — озы; 7 — русла потоков разгрузки талых ледниковых вод; 8 — береговые уступы; 9 — эрозионные уступы; 10 — дюны; 11 — направление переноса талого ледникового материала; 12 — направление движения льда; 13 — береговая линия приледникового Онежского озера; 14 — точка наблюдения и направление экспозиции фотосъемки. На колонке: 15 — положение сейсмогенного горизонта; 16 — почвенный слой, корни деревьев; 17–19 — слоистость: 17 — наклонная параллельная; 18 — косая однонаправленная; 19 — волнистая; 20 — знаки ряби; 21 — поверхность размыва; 22 — деформационные структуры; 23–25 — слоистость: 23 — горизонтальная параллельная; 24 — фрагментарная неотчетливая; 25 — линзовидная с прослоями гравелито-песчаного материала и обособлений алевритов

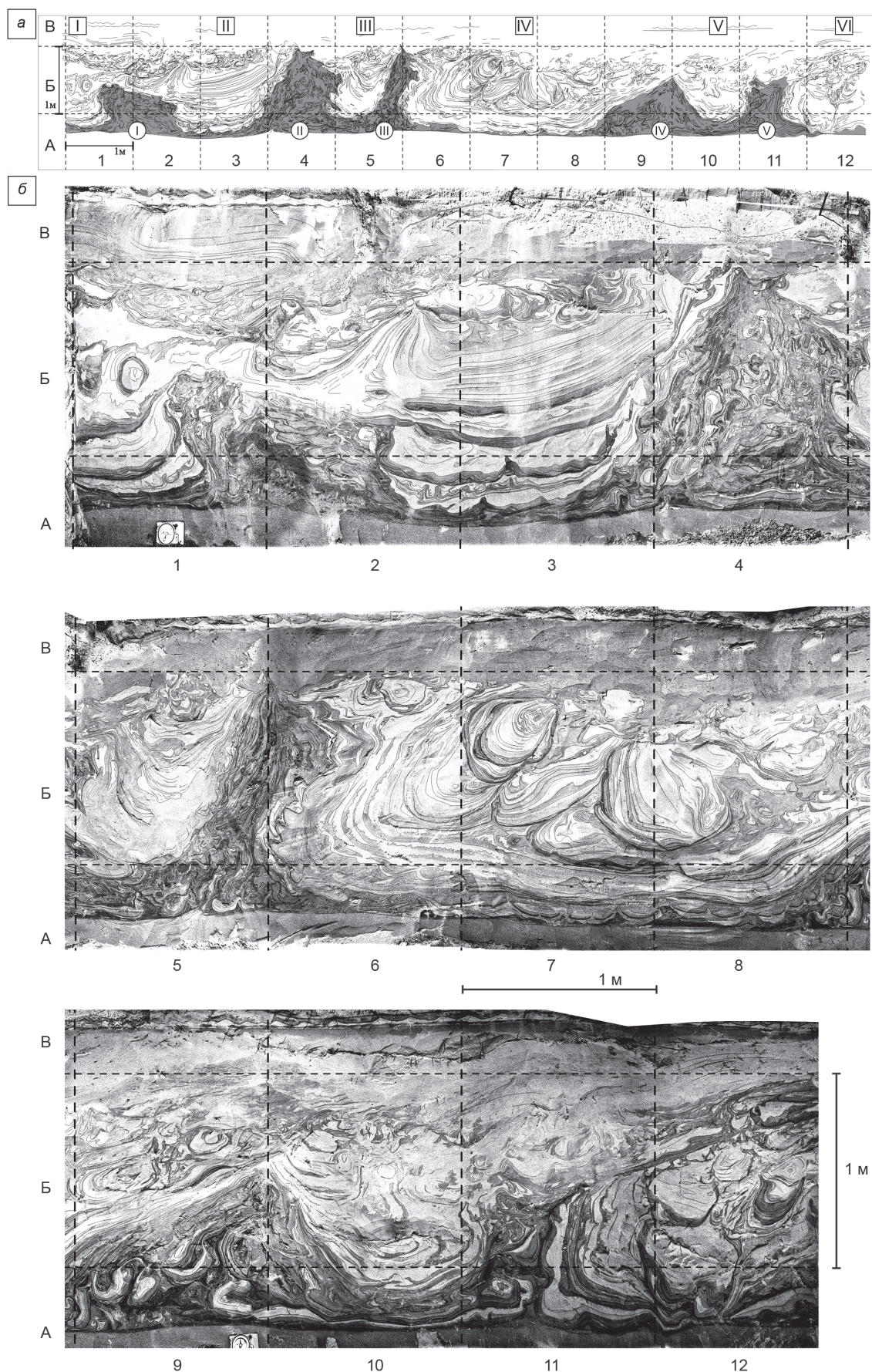


Рис. 2. Разрез с деформационными структурами, вскрытый расчисткой: *а* — общий вид разреза, длиной 12 м, для удобства описания разделенный на три горизонтальные (А–В) и 12 вертикальных частей. Вверху римскими цифрами в прямоугольниках (I–VI) показаны номера синформ; внизу римскими цифрами в кругах (I–V) показаны номера выступов (темная заливка). *б* — увеличенный вид этого же разреза, разделенный на части: 1–4; 5–8; 9–12

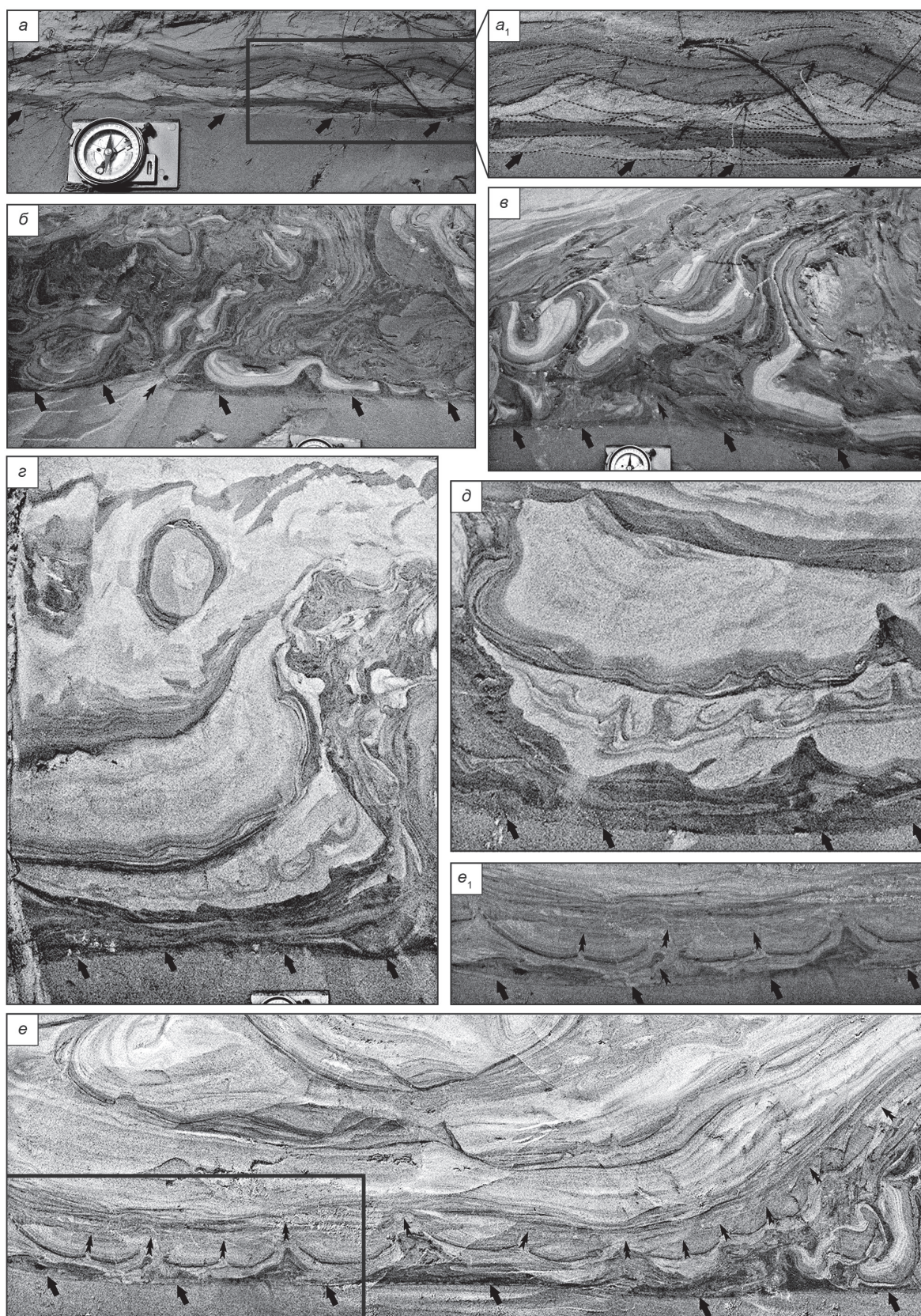


Рис. 3. Детали строения горизонта с деформационными структурами: *a-a₁* — эрозионный характер верхней границы (рис. 2, кв. В-5-6); *a* — общий вид, *a₁* — увеличенный фрагмент; *б-в* — характер нижней границы (крупные стрелки указывают на кровлю и подошву горизонта; маленькие стрелки показывают направление движения материала); *б-в* — затягивание материала из подстилающего слоя в горизонт с деформациями (рис. 2, кв. А-5, 9); *г* — парагенез структур: подушковидные структуры, хрупкие конседиментационные разрывы, миниатюрные пламеобразные структуры (рис. 2, кв. АБ-1); *д* — миниатюрные пламеобразные структуры и слепые дайки (рис. 2, кв. А-2-3); *е* — общий вид и *е₁* — увеличенный фрагмент слоя с «псевдоскорлуповатой отдельностью» (рис. 2, кв. А-7-8)

Т а б л и ц а

Деформационные структуры в рыхлых отложениях Прионежья

Выявленные структуры	Интерпретация
Корытообразные, чашеобразные синформы	Структуры нагрузки. Возникновение синформ связано с инверсией плотности. На периферии синформ происходит движение поровой воды вверх. Это движение приводит к изгибу структурных линий вверх на периферии синформ
Субвертикальные нерегулярные крупные выступы; миниатюрные пламеобразные структуры	Структуры отведения жидкости, генетически тесно связаны с соседними структурами нагрузки. Формирование вследствие выталкивания осадка вверх между синформами вплоть до образования опрокинутых складок
Подушковидные обособления (ПО) песчаных тел	Структуры нагрузки. Вышележащие отложения опускаются в мягкий нижележащий слой, часто с полным разрушением верхнего «материнского» слоя. В процессе опускания формируется вогнутый контакт между выше- и нижележащими отложениями. Далее образуется ПО, верхние боковые части, которого все еще связаны с материнским слоем. Далее ПО может потерять контакт с материнским слоем, полностью отделиться и обособиться
Искривленные структуры, рулетовидные структуры, складки оползания	Конволютные структуры и складки оползания могут возникать на склонах с очень небольшим уклоном
Хрупкие дизъюнктивные структуры	Конседиментационные разрывы. Формируются после обезвоживания осадка
Поверхности скольжения	Поверхности, вдоль которых происходило смещение вышележащих песчаных обособлений
Инъекционные структуры	Структуры отведения жидкости. Слепые дайки. Быстро заполняются разжиженными отложениями под действием гидравлического давления. Поступление материала происходит снизу
Проблематичные структуры	Вторичные выступы и структуры сгущения материала, наподобие структур «подушка в подушке», когда более крупное ПО содержит несколько мелких ПО

Рассмотрим эти механизмы более подробно. Первый из них характеризует необходимые предварительные условия для формирования выявленных деформационных структур, а два других характеризуют триггеры, которые запускают процесс их формирования. В нашем случае предпосылкой служит накопление относительно тяжелых влажных песков (плотностью 2,04 г/см³) поверх более легких влажных алевритистых отложений (плотностью 1,86 г/см³). Такое соотношение характеризуется проявлением неустойчивости Рэлея-Тейлора и чувствительно к существованию возмущений на границе слоев. Развитие процесса идет в сторону минимализации потенциальной энергии и установления плотностного равновесия, при этом более плотные отложения (пески) начинают опускаться, вытесняя менее плотные (алевритовые), которые начинают всплывать. Далее процесс идет в зависимости от параметров вязкости верхнего и нижнего слоев [Шполянская, 1993]. Если в условной ячейке вязкость верхнего слоя будет меньше вязкости нижнего слоя, то в центре ячейки будет опускаться слой 1 (пески), а по краям подниматься вверх слой 2 (алевриты), а если вязкость верхнего слоя больше нижнего, то слой 2 (алевриты) будет подниматься в центре, а слой 1 (пески) опускаться по краям, формируя более узкие синформы проседания. В нашем случае общая картина чередования более широких синформ и узких разделяющих выступов говорит о первом типе вязкостных соотношений.

Следующий из атектонических механизмов, запускающих процесс перераспределения осад-

ков — это штормовое воздействие. Шторма порождают микросейсмы, которые сопровождаются сложением волн различных направлений в мелководных морских обстановках и могут вызвать разжижение осадков [Johnson, 1977]. В нашем случае механизм штормового воздействия не применим по причине многостадийности формирования выявленного парагенеза структур, что подразумевает постепенную деформацию, появление свободного пространства, заполняемого теми же осадками, но с иным структурным рисунком, что свидетельствует об отсутствии существенной перестройки в области накопления осадков, как в случае штормового воздействия. Последнее должно было бы оставить и иные свидетельства, например, линзы и прослои крупнозернистого материала или заполненные гравелитами и конгломератами эрозионные карманы, которых нет в разрезе. При этом в пользу штормового воздействия может свидетельствовать эрозионный верхний контакт, знаки ряби и структуры облекания над поверхностью размыва, однако их формирование происходило уже после формирования горизонта с деформационными структурами.

Последний из атектонических механизмов связывает деформации осадков с промерзанием в перигляциальных условиях. Учитывая, что рассматриваемый горизонт дислокаций находится в пределах реконструируемой перигляциальной дельты [Shelehova, et al., 2018], важно проанализировать критерии отличия деформационных структур промерзания от сейсмогенных структур, заключающиеся в характере их вертикального и горизонтального распределения,

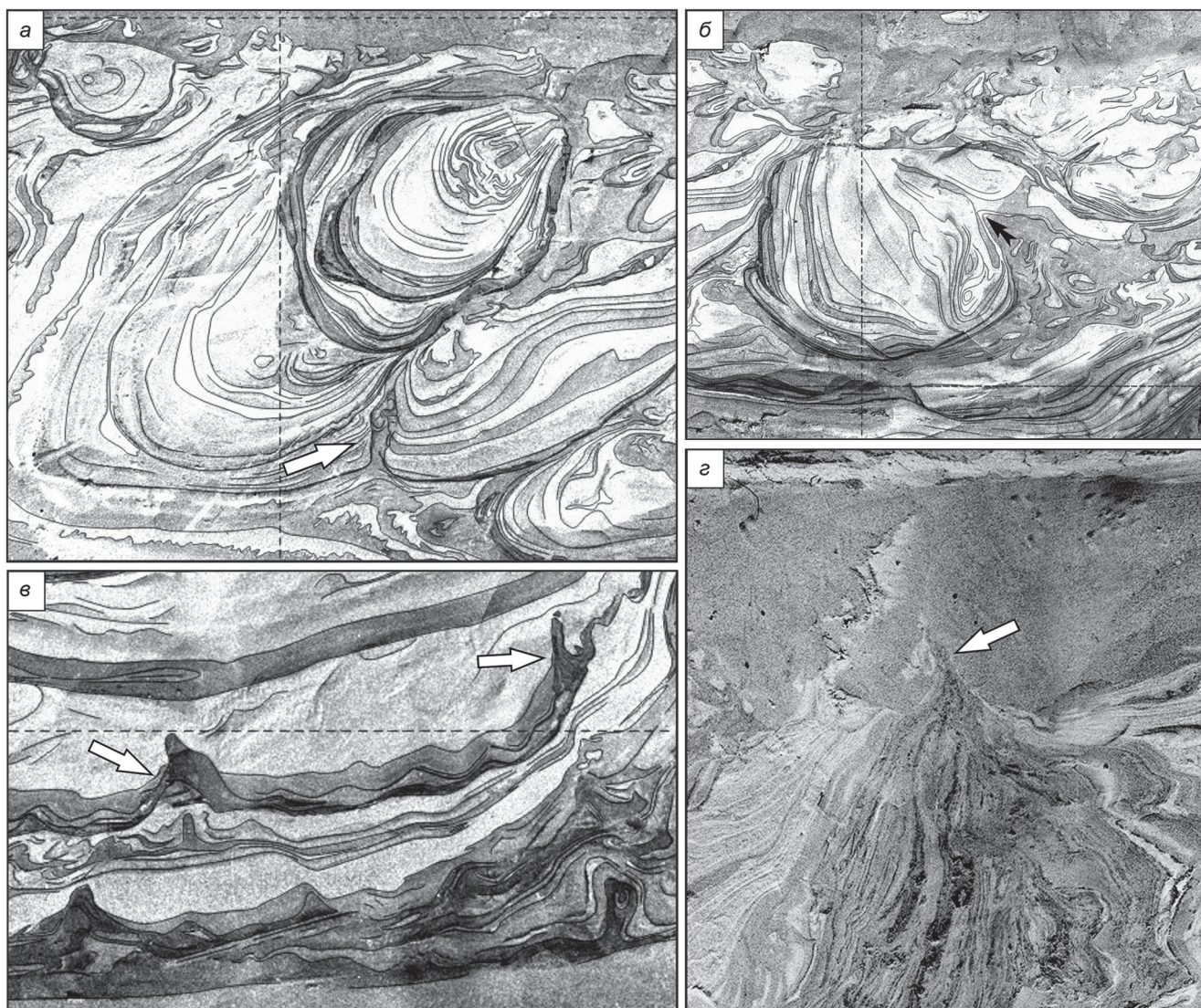


Рис. 4. Подушковидные обособления и инъекционные структуры: а-б — подушковидные обособления (рис. 2, кв. АБ-7-8); а-г — инъекционные структуры (рис. 2, кв. АБ-3, БВ-5). Белыми стрелками указаны слепые дайки, а черной — направление движения вещества

а также особенностях внутреннего строения [Van Loon, et al., 2020].

Если структуры нагрузки ограничены одним или несколькими горизонтами с ярко выраженными нижними и верхними границами, то эти структуры чаще всего являются сейсмическими. В случае, если различные типы структур нагрузки пересекают стратиграфические границы с недеформированными или по-разному деформированными слоями, они являются гляциогенными. Это объясняется тем, что процессы промерзания затрагивают отложения до определенной глубины без четкого стратиграфического контроля, не ограничиваясь конкретными слоями. В нашем случае все структуры расположены в пределах определенного горизонта с отчетливо выраженной кровлей и подошвой, что свидетельствует в пользу сейсмогенного механизма.

Гляциогенные структуры нагрузки имеют тенденцию развиваться через относительно одинаковые горизонтальные расстояния, образуя в разрезе регулярную повторяемость. Такая закономерность

объясняется наличием начальных трещин (например, ранее существовавшей полигональной системы морозных трещин), которые действуют как ослабленные зоны, через которые осадки движутся вверх, образуя структуры, напоминающие выступы [Vandenberghe, 2013]. Рост таких выступов сопровождается одновременным опусканием смежных синформ. А поскольку выступы следуют через регулярные интервалы, то и синформы, разделяющие их, также будут расположены на одинаковых расстояниях. В нашем случае характерно нерегулярное горизонтальное распределение синформ и выступов, свидетельствующее в пользу сейсмогенного механизма.

Если вся внутренняя слоистость структур нагрузки следует внешней границе более-менее точно, происхождение может быть как гляциогенным, так и сейсмическим, однако, если в структурах нагрузки устанавливаются эрозионные срезания или иные признаки многофазной деформации, или если подушковидные обособления залегают на разной глубине

в деформированном горизонте, то происхождение их чаще всего сейсмогенное. А если «подушки» сосредоточены на одном уровне, происхождение их, скорее всего, гляциогенное. В нашем случае многоуровневый характер распределения «подушек» в горизонте, а также наличие многочисленных эрозионных поверхностей как в синформах, так и внутри подушковидных обособлений однозначно указывает на сейсмогенный механизм.

В обстановке перигляциальной дельты логично было бы ожидать появления деформационных структур, связанных с мерзлотными процессами, например, морозобойных клиньев, которые, однако, не были выявлены. Учитывая установленные особенности горизонтального распределения и внутреннего строения деформационных структур, а также наличие структур сгущения материала, подобных структурам «подушка в подушке» (которые формируются вследствие афтершоков [Van Loon, et al., 2020]), гляциогенный механизм, вероятно, можно исключить.

Отметим также, что несколько атектонических механизмов могли проявиться одновременно, например, вытаивание линз льда при активизации гидроизостатических движений, обусловленных падением уровня воды в Онежском приледниковом озере. Однако и такое сочетание представляется нам маловероятным из-за отсутствия признаков наличия линз льда, вытаивание которых привело бы к нарушению четкой горизонтальной стратификации разреза и появлению «раздувов» мощностей отдельных слоев. Локализация дислокаций в пределах горизонта малой мощности указывает на кратковременность их формирования, поэтому упомянутые гидроизостатические движения должны были быть достаточно интенсивными и инициировать сейсмические события.

Таким образом, атектонические механизмы являются неудовлетворительными для объяснения генезиса выявленных дислокаций. На наш взгляд, они обусловлены, прежде всего, сейсмотектоническими процессами. Рассмотрим соответствующий механизм более подробно.

Тектонический сейсмогенный механизм формирования дислокаций. В работе [Sims, 1973] приведены следующие условия формирования структур разжижения, связанных с землетрясениями: 1) объекты находятся вблизи сейсмоактивных зон; 2) присутствуют отложения, склонные к разжижению; 3) деформационные структуры аналогичны тем, которые образуются во время сейсмических событий; 4) структуры относятся к одному стратиграфического интервалу; 5) зоны развития структур коррелируются на значительных площадях; 6) отсутствует влияние склоновых или иных деформационных процессов. В нашем случае уверенно соблюдены критерии 1–4, а два последних требуют дополнительных исследований.

Формирование изученных нами деформационных структур в соответствии с тектоническим

механизмом должно было происходить в приповерхностном слое осадков. Стратифицированные водонасыщенные тяжелые пески накапливались поверх более легких алевритовых осадков, что порождало неустойчивый характер границы двух сред с разной плотностью. Землетрясение, связанное с активизацией древних разломных зон при освобождении Балтийского щита от ледовой нагрузки, породило серию сейсмических волн. Последние вызывали сотрясения в водосодержащих неуплотненных осадках вследствие эффекта Рихтмайера-Мешкова, при котором массовые силы имеют не только чисто гравитационное, как в случае реализации неустойчивости Рэлея-Тейлора, но и инерционное происхождение [Ивашнев, 2011]. Эти сейсмические волны инициировали процессы прогибания синформ и роста разделяющих их пламенеvidных выступов. Верхний предельный уровень роста выступов маркируют их апикальные части, не затронутые эрозией. В понижениях появлялось пространство, в которое под действием гравитационных сил устремились подушковидные обособления (рис. 2, кв. Б-5–7). Часть из них перемещалась вниз по слабо наклонным поверхностям скольжения (рис. 2, кв. Б-9-12), в том числе образуя структуры сгущения типа «подушка в подушке», которые считаются надежными индикаторами сейсмитов [Van Loon, et al., 2020]. Далее горизонт с выступами, разделяющими их понижениями, и подушковидными образованиями захоронился алеврито-песчаными осадками прослая 5 (рис. 2, кв. В-1-12), однако вертикальные движения продолжились, на что указывают слепые дайки, нарушающие основание прослая 5; кровля этого прослая была впоследствии была размыта (рис. 3, а-а₁; рис. 5).

Заключение. В северо-западной части Онежской структуры, в пределах Пальеозерско-Койкарской зоны складчато-разрывных дислокаций изучен горизонт, содержащий разнообразные деформационные структуры перераспределения обводненных пластичных «мягких» алеврито-песчаных осадков, которые ранее относились к складкам оползания [Shelehova, et al., 2018].

Установлено, что спектр этих деформационных структур более широк: часть из них формировались *in situ*, испытывая только вертикальное перемещение, а часть структур, которые с определенной долей условности можно отнести к складкам оползания, претерпела также и горизонтальное перемещение в пространстве. Процесс формирования этого горизонта был кратковременным, но не одноактным, и завершился вскоре после потери осадками пластичности. Все деформационные структуры образуют парагенез, особенности строения которого отвечают таковым, установленным для горизонтов сейсмитов. Их формированию способствовало накопление осадков разной плотности, при этом более плотные (пески) перекрывали менее плотные (алевриты), создавая предпосылки

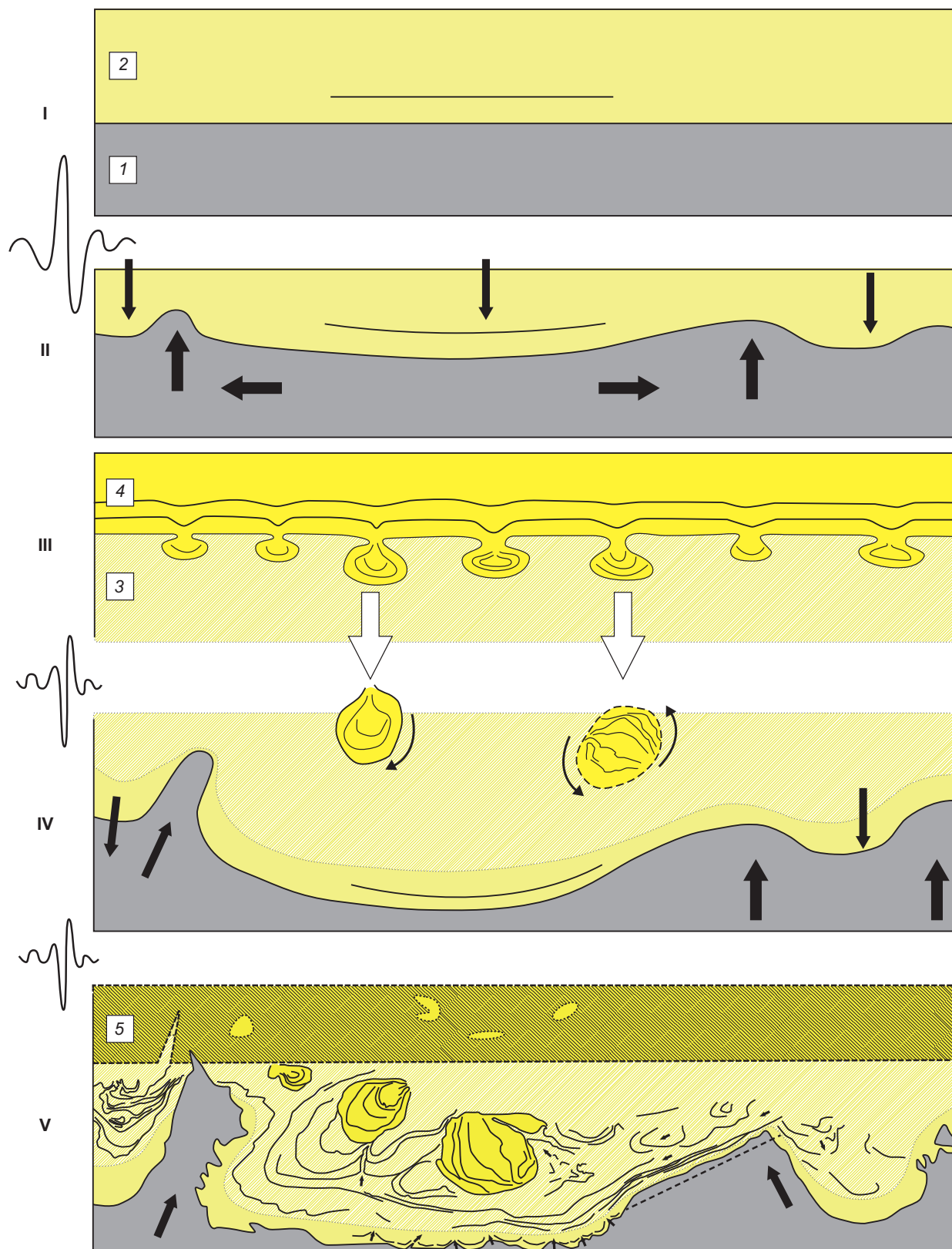


Рис. 5. Реконструируемый сейсмогенный механизм формирования горизонта с деформационными структурами. Римские цифры — стадии развития. Арабские цифры — последовательность формирования прослоев горизонта. I — стадия накопления прослоев 1 (алевриты) и 2 (пески), формирование неустойчивости Релея-Тейлора. Линией показано положение слоя «псевдоскорлуповатой» отдельности; II — начальная стадия развития инверсии плотности, вызванная сейсмическим событием вследствие проявления эффекта Рихтмайера-Мешкова; III — стадия формирования прослоев 3 (вмещающих для песчаных «подушковидных» обособлений) и 4 (песчаный прослой, образовавший и сохранившийся в «подушковидных» обособлениях, по данным [Selley, 2000]); IV — стадия отрыва «подушковидных обособлений» вследствие афтершоков и перемещения их в освободившееся пространство; V — стадия формирования заполнения перекрывающего слоя, 5 содержащего редкие песчаными обособления (псевдонодули). Основание этого слоя протыкается апикальной частью выступа № III и слепыми дайками, что указывает на продолжающиеся вертикальные движения. Окончательное разобщение слоя «псевдоскорлуповатой» отдельности с выдавливанием разжиженного песчаного материала вверх, в промежутки между «скорлупками». Стрелками показано направление движения материала. Между римскими цифрами показаны реконструируемые эпизоды сейсмогенного воздействия — основного события и афтершоков

для нарушения равновесия. Наиболее приемлемым представляется сейсмогенный механизм, запускающий процессы перераспределения пластичных осадков вследствие проявления эффекта Рихтмайера-Мешкова, при котором границы сред с разной плотностью испытывают ускорение под воздействием проходящей ударной волны, а выявленные структуры, таким образом, следует интерпретировать как сейсмиты.

Благодарности. Авторы выражают благодарность к. г. н. О.А. Дружининой, д. г.-м. н. В.М. Маке-

еву и к. г.-м. н. М.Ю. Чудецкому за конструктивные замечания.

Финансирование. Исследования проведены в рамках госзаданий ГИН РАН, ИГЭ РАН, ИФЗ РАН, НИР «Динамика процессов осадочного породообразования (современного и в геологическом прошлом) в различных структурно-геологических условиях и их эволюция» и «Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ» (МГУ имени М.В. Ломоносова).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ивашнев О.Е. Механизм неустойчивости Рихтмайера-Мешкова // Механика жидкости и газа. 2011. № 4. С. 13–23.

Никонов А.А., Полещук А.В., Зыков Д.С. О новейших разрывах и палеосейсмодислокациях в Онежской палеопротерозойской структуре Балтийского щита (Восточно-Европейская платформа) // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 11. С. 3–18.

Шполянская Н.А. Конвективная природа дислокаций в отложениях с пластовыми льдами на севере Западной Сибири // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1993. № 3. С. 94–103.

Belzyt S., Pisarska-Jamrozy M., Bitinas A., et al. Repetitive Late Pleistocene soft-sediment deformation by seismicity-induced liquefaction in north-western Lithuania // Sedimentology. 2021. V. 68, No. 7. P. 3033–3056.

Johnson H.D. Sedimentation and water-escape structures in some Late Precambrian shallow marine sandstones from Finnmark, North Norway // Sedimentology. 1977. V. 24. P. 389–411.

Shelekhova T.S., Svetov S.A., Medvedev P.V. Trip to Girvas. Lateglacial–Interglacial transition: glaciectonic, seismic activity, catastrophic hydrographic and landscape changes. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, 2018. P. 24–37.

Sims J.D. Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California // Science. 1973. V. 182. P. 161–163.

Selley R. Applied Sedimentology. San Diego: Academic Press, 2000. 523 p.

Vandenbergh J. Cryoturbation structures // The Encyclopedia of Quaternary Science. 2013. P. 430–435.

Van Loon A.J., Pisarska-Jamrozy M., Woronko B. Sedimentological distinction in glacial sediments between load casts induced by periglacial processes from those induced by seismic shocks // Geol. Quart. 2020. V. 64, No. 3. P. 626–640.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 28.08.2025