

Генезис и условия формирования деформационной слоистости в позднеледниковых отложениях Мурманского побережья (СЗ Кольского региона)

Николаева С.Б. 

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, s.nikolaeva@ksc.ru

Аннотация. В ледниково-морских отложениях долины реки Ура (Мурманское побережье Кольского региона) было обнаружено шесть горизонтов со специфическими типами деформационных структур (SSDS). Они представлены отпечатками нагрузки, структурами пламени, осадочной брекчией, структурами выхода воды и явлениями ликвифакции. Детальный литологический анализ этих структур показал, что деформации были образованы в результате гравитационных потоков (обломочных и мутьевых) и разжижения. В пределах двух из шести слоев с SSDS также были обнаружены следы повторного разжижения. Предположительно триггером для образования горизонтов с деформациями были землетрясения и афтершоки, возникающие вслед за дегляциацией территории и активизация крупного разлома Карпинского, разграничивающего Баренцево-море-плиту и Балтийский щит.

Ключевые слова: сейсмодетформации, гравитационные потоки, землетрясения, поздний плейстоцен, Баренцево море, Кольский регион.

Genesis and conditions of formation of soft-sediment deformation structures in Late Glacial deposits on the Murmansk coast (NW Kola Region)

Nikolaeva S.B. 

Geological Institute of Kola Science Center RAS, Apatity, s.nikolaeva@ksc.ru

Abstract. Six sandy-clay layers in the glacial-marine sediments in the Ura river valley (Murmansk coast of the Kola region), show specific types of deformations (SSDS). They are represented by load cast and flame structures, water escape structures, horizons with sedimentary breccias, various faults and liquefaction phenomena. Detailed lithological analysis of these deformed layers indicate that gravity-flows (turbidity currents, debris flow) and liquefaction was responsible for the development of SSDS. Traces of re-liquefaction were also recognised within two of the six layers with SSDS. Formation of horizons with deformations might be triggered by earthquakes and aftershocks that followed fast deglaciation of the area and activation of the major Karpinsky fault separating the Barents Sea plate from the Baltic Shield.

Keywords: seismically-induced deformations, gravity-flows, earthquakes, Late Pleistocene, Barents Sea, Kola region.

Введение

Активное развитие палеосейсмогеологических исследований в последние десятилетия позволило выделить следы сильных древних землетрясений как в скальных породах, так и в рыхлых отложениях практически на всей территории Фенноскандии (Stewart et al., 2000; Morner, 2003; Николаева, 2006; Lagerbäck, Sundh, 2008; Kukkonen et al., 2010; Шварев, Родкин, 2017; Nikolaeva et al., 2021). Эти исследования изменили и существовавшие долгое время представления о генезисе многочисленных и разнообразных деформаций слоистости в четвертичных осадках, обнаруживающих не только гляциотектонические, мерзлотные, криогенные, и седиментационные признаки, но и следы прошлых сильных сейсмических воздействий. Однако определение генезиса деформаций нередко вызывает существенные затруднения, поскольку многие из них обладают сходной морфологией независимо от того, образовались ли они в результате гляциотектоники, сейсмического или любого другого механизма. Кроме того, наблюдаемые деформации могли быть образованы в результате нескольких процессов, действовавших одновременно. Особенно это касается гравитационного перемещения материала, включающего отложения турбидитных и обломочных потоков, широко разви-

тых на континентальных морских склонах, а также в осадках флювиогляциальных дельт и морских глинистых толщ (Евзеров, 2007). В предыдущие годы интерес к изучению флювиогляциальных и морских отложений Кольского региона, был связан с приуроченностью к ним крупных месторождений глин и песчано-гравийных смесей, и не рассматривался в связи с сейсмотектоникой. Между тем известно, что наиболее часто спусковым механизмом для образования гравитационных потоков являются землетрясения (Ботвинкина, 1966; Градзинский и др., 1980; Крапивнер, 2007; McCalpin, 2009).

Целью исследований является выявление и изучение следов палеоземлетрясений в разрезах рыхлых отложений и определение характерных особенностей седиментации осадков в условиях новейших тектонических перемещений земной коры. Еще одна задача исследования – получение новой информации о критериях отличия деформаций сейсмогенного генезиса от аналогичных, но образованных иными процессами.

Район исследований и объекты

Район исследований расположен на северо-западе Кольского региона в долине реки Ура, впадающей в крупный залив Баренцева моря (рис. 1 А). Здесь, как и в других районах побережья, интенсивная расчлененность поверхности суши линейными депрессиями, наклоненными и открытыми в сторону Баренцева моря, в сочетании с сейсмотектонической активностью разломов благоприятствовали накоплению представительных толщ рыхлых осадков. Осадки аккумулировались в морских заливах, занятых в настоящее время крупными долинами рек благодаря привносу потока-

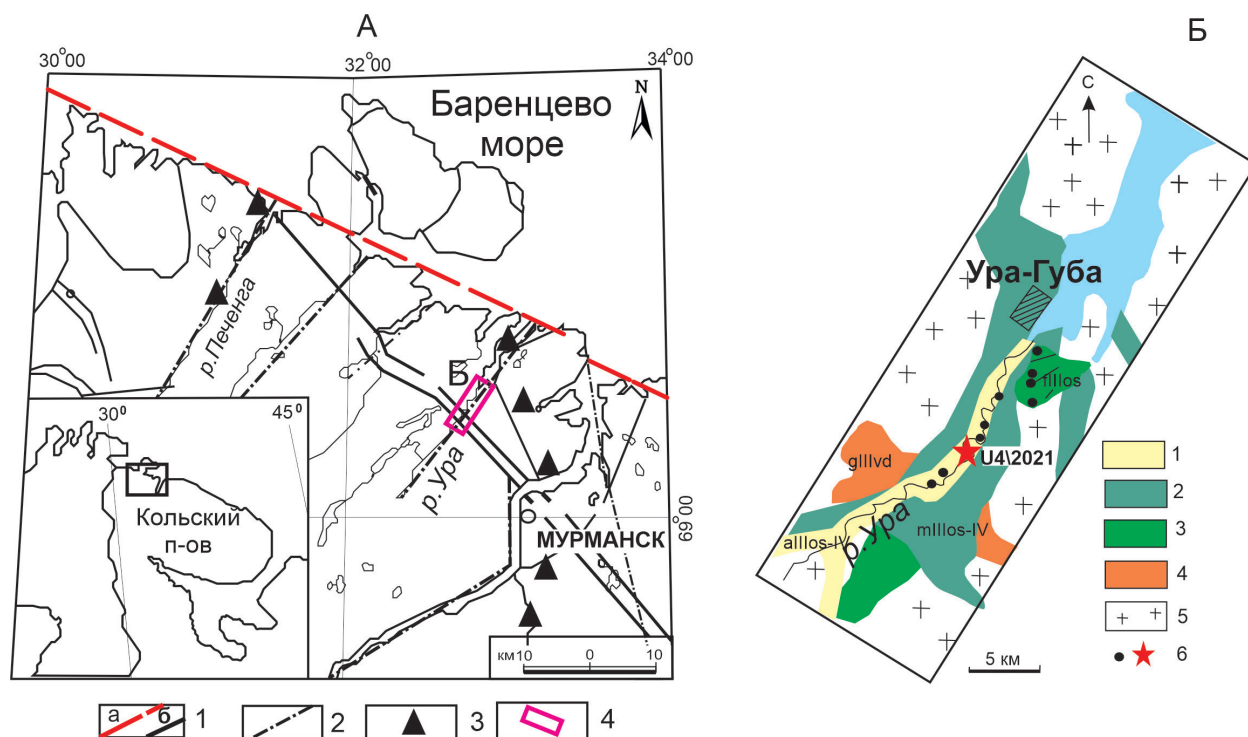


Рис. 1. Расположение участка работ и изученных разрезов в долине реки Ура.

Условные обозначения на врезке А: 1 – разлом Карпинского (а), главные разломы по (Митрофанов, 2001); 2 – разломы, реактивированные в поздне- и послеледниковое время по (Nikolaeva et al., 2021); 3 – палеосейсмодислокации; 4 – участок работ. На врезке Б: отложения: неоплейстоцен-голоцена, верхнее звено: 1 – аллювиальные, 2 – морские, 3 – флювиогляциальные, 4 – ледниковые основной морены (пункты 1–4 по Государственная..., 2007), 5 – дочетвертичные породы, 6 – изученные разрезы (звездочками показаны разрез U4/2021 обсуждаемый в статье).

Fig. 1. Location of the study area and the sedimentary succession of the Ura River.

A) 1 – Karpinsky fault (a), main faults after (Mitrofanov et al., 2001); 2 – fault segment activated during the late- and postglacial period (Nikolaeva et al., 2021); 3 – paleoseismic dislocations; 4 – study area. B) 1–4. Sediments: Neo-Pleistocene and Holocene, after (State card..., 2007): 1 – alluvial, 2 – marine, 3 – fluvioglacial, 4 – till, 5 – pre-Quaternary rocks, 6 – studied sections (asterisks show sections U4/2021 discussed in the article).

ми талых вод больших масс обломочного материала (Евзеров, 2016). Следует отметить, что вся зона Мурманского берега сопряжена с крупным разломом Карпинского, вдоль которого фиксируется повышенная историческая и палеосейсмическая активность (Никонов и др., 2015; Nikolaeva et al., 2021). Эта структура разграничивает Баренцевоморскую (Свальбардскую) плиту и Балтийский щит. Здесь поверхность кристаллического основания ступенчато погружается к северу и северо-востоку под покров позднепротерозойских осадочных образований.

Разработка карьеров и детальное обследование естественных обнажений в районе реки Ура, позволило нам более детально изучить различные деформационные текстуры в гляциоморских отложениях, выделить неизвестные ранее для этих осадков типы деформаций слоистости, а также определить условия их формирования. Изученные разрезы расположены в 20 км к югу от береговой линии Баренцева моря и показаны на рис. 1 Б.

Методика исследований

Для изучения континентальных осадков были использованы литологические и геолого-геоморфологические методы исследований. Изучение разрезов рыхлых отложений производилось с помощью расчисток естественных обнажений в береговых обрывах рек и в карьерах. Литологический анализ осадков включал выделение и прослеживание в латеральном направлении седиментационных пачек и слоев, которые характеризуются специфическими седиментационными признаками, отражающими конкретные условия осадконакопления (Страхов, 1962). Основные литологические критерии включали вещественный состав отложений и их цвет, структурные и текстурные особенности, типы слоистости, наличие или отсутствие проявлений цикличности и мощности в напластовании. Текстурно-структурные особенности отложений и деформаций, для определения их генезиса, были описаны с учетом представлений, изложенных в монографиях Л. Ботвинкиной (1965), А. Полякова (2001), Р. Градзинского с соавторами (1980). Основное внимание уделялось морфологии деформационных структур, наличию перерывов в осадконакоплении, рассмотрению и перебору различных механизмов их образования и выявлению признаков спонтанного образования, с использованием критериев выделения сейсмитов (McCalpin, 2009; Owen, Moretti, 2011).

Результаты и обсуждение

В течение нескольких полевых сезонов было изучено 8 разрезов, высотой от 2.5 до 27 м, вскрывших ледниково-морские отложения в 5 км полосе долины реки Ура (рис. 1 Б). Эти осадки развиты на гипсометрических отметках ниже 80 м, часто перекрывают флювиогляциальные дельты в их средней части и замещают их в дистальном направлении. Они подстилаются или мореной, или флювиогляциальными осадками, реже залегают на кристаллических породах фундамента. Результаты геологических съемок четвертичных отложений относят образование морских отложений к верхнему звену неоплейстоцена – начала голоцена (Государственная ..., 2007).

Литология и условия формирования позднеледниковых отложений. Изученные разрезы имеют однотипное строение: ленточные или однородные глины, перекрытые тонко-мелкозернистыми песками. В отдельных случаях толщи песка заключены в глины. Особенностью изученных обнажений является то, что практически во всех разрезах обнаруживаются различные синседиментационные и раннедиагенетические деформации. Наиболее representative с точки зрения изучения основных текстурных типов осадков это разрез U4/2021 (N 69°13'51.9''; E 32°43'44.7''). Он расположен на правом берегу реки Ура, в борту террасы, высотой 25 м. В строении разреза, общей мощностью 13.5 м, принимают участие три толщи:

(I) – серо-синие глины с неотчетливой ленточной слоистостью, мощностью 3 м;

(II) – слоистые мелко-тонкозернистые пески и алевриты с прослоями супесей и глин, мощностью 2.5 м;

(III) – однородные серо-зеленые глины, видимой мощностью 8 м.

Подосва глин не вскрыта. Толща песков II, заключенная в глины, сильно дислоцирована (рис. 2).

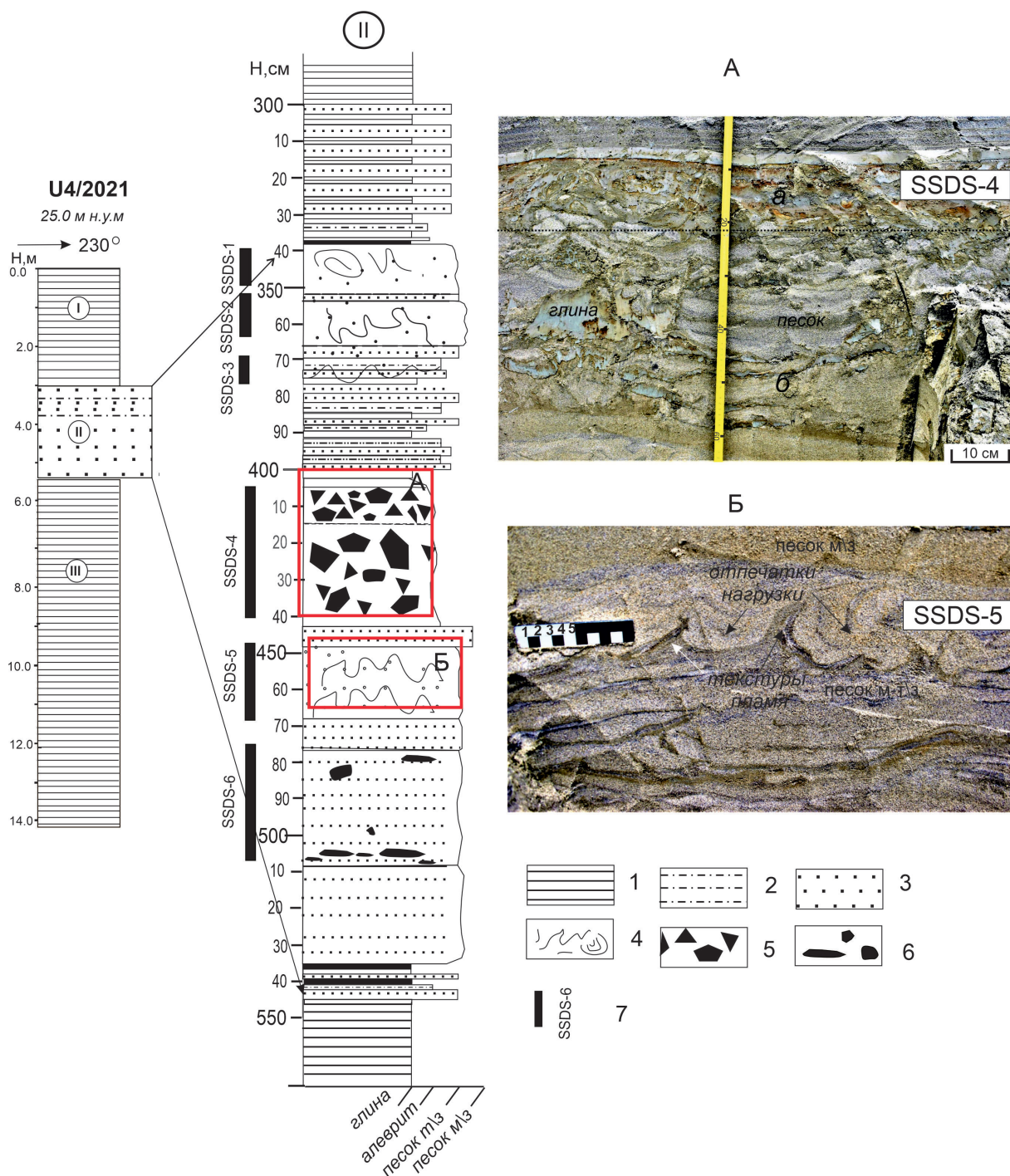


Рис. 2. Разрез морских позднеледниковых осадков в долине реки Ура.

1 – глины, 2 – алевриты, супеси и суглинки, 3 – пески, 4 – деформации, 5 – осадочная брекчия, 6 – обломки глин в песке, 7 – слои с деформациями, обсуждаемые в тексте. А) слои осадочной брекчии в горизонте SSDS-4. В слое (а) видны интенсивно деформированные и мелкокомасные фрагменты глин и песков, в слое (б) видны фрагменты более крупные, с частично сохранившейся слоистостью в песке. Б) Структуры пламя в сочетании с текстурами нагрузки в тонкозернистых песках SSDS-5.

Fig. 2. Sedimentary succession at the Ura River outcrop.

1 – clays, 2 – silts, sandy loams and loams, 3 – sands, 4 – deformations, 5 – sedimentary breccia, 6 – clay fragments in sand, 7 – layers with soft-sediment deformation structures discussed in the text. A) Double layers of sedimentary breccia layer SSDS-4. In sublayer (a), there are intensely deformed and small-scale fragments of clays and sands; in sublayer (b), there are larger fragments with partially preserved layering in the sand. B) Flame structures combined with load cast in fine sands of SSDS-5.

Седиментация осадков представлена двумя основными типами: (1) осаждением тонких глинистых частиц и (2) крупнозернистых (песчаных) частиц. Ленточность осадков, состав и текстуры свидетельствуют о том, что часть из них была образована в результате подводных гравитационных потоков. Общее понятие этого термина «*гравитационный поток*» включает смесь, состоящую из жидкости и осадка, в которых сила тяжести действует непосредственно на зерна, чтобы вызвать перемещение вниз по склону (Градзинский и др., 1980). Среди них чаще всего выделяют следующие основные типы: обломочный (*debris flow*), в котором большие зерна поддерживаются матриксом; зерновой (*grain flow*), где отложения поддерживаются взаимодействиями зерен (*grain-to-grain*); ожижаемого осадка (разжиженный или флюидизированный поток) (*liquefied and fluidized*), в котором зерна поддерживаются направленным вверх просачиванием жидкости между зернами; турбидитный (или мутьевой) (*turbidity currents*), в котором обломочный материал поддерживается во взвешенном состоянии турбулентностью (Градзинский и др., 1980; Поляков, 2001).

Формирование толщ I и III, судя по горизонтальной слоистости и составу отложений (глины, алевроиты), происходило в приледниковом спокойном водоеме путем непосредственного осаждения из мутьевого потока. Это подтверждается и присутствием в изученных разрезах слойков с градиционной слоистостью, которая определяется чередованием слоев обломочного материала. При этом наблюдается уменьшение размера зерен снизу вверх в пределах слоя при прямой градиции, или вниз по разрезу при обратной градиции. Ленточная слоистость глин свидетельствует о том, что при седиментации поступление обломочного материала происходило в основном из периодически функционировавших мутьевых потоков, а суглинки и глины отлагались из суспензий (Колька, 2004).

Наибольший интерес представляют крупнозернистые отложения толщи II, сложенной в основном разнозернистыми песками. Механизм образования этих осадков связан с двумя потоками: обломочными и разжиженными. Основными диагностическими признаками обломочных потоков являются концентрация обломков вблизи кровли слоев, плоскостная ориентировка обломков, обратная градиация, детритовый матрикс (Поляков, 2001). К разжиженным потокам относятся те, в которых структурные связи (контакты) между частицами ослаблены или полностью отсутствуют, в результате чего масса осадков переходит в текучее состояние и начинает перемещаться даже при незначительных уклонах дна (Поляков, 2001). Все эти типы были обнаружены в изученном разрезе. Рассмотрим их более детально.

Характеристика деформационной слоистости. По характеру деформаций, степени дислоцированности и механизму перемещения осадочного материала в разрезе U4\2021 отчетливо выделяется 6 горизонтов деформаций (SSDS-1–SSDS-6), мощностью от 5 до 38–40 см, разделенных ненарушенными отложениями (рис. 2).

Основные типы текстур слоев SSDS1, SSDS2 и SSDS3 представлены закручиванием слоев песка и глин в рулоны, размерами до 10–20 см, складками, будинированностью слоев суглинка, гофрировкой и волновыми деформациями слоев песка с признаками их разжижения.

В SSDS-4 развиты деформации осадочной брекчии, ранее не выделяемые в этих отложениях (рис. 2 А). Это сильно дислоцированные пески и глины, состоящие из отдельных фрагментов разной формы и размеров. Важным наблюдением является двоякость слоев брекчии: более мелкие фрагменты, размерами 2–4 см, развиты ближе к кровле слоя, в интервале глубин 405–415 см, с глубиной (415–440 см) фрагменты глин более крупные, размерами 9×25 см (рис. 2 А). Граница между слоями а и б внутри комплекса неровная, нечетко выражена, с карманами. Поскольку их характеристики идентичны (за исключением меньшего размера обломков в верхнем слое) и наложены один на другой, можно предположить, что оба слоя имеют один и тот же источник. Отдельные обломки отличаются от матрицы и по их внутренней волнистой слоистости, а также по цветовой рыжей окантовке, образованной осаждением гидроокислов железа. В этом слое присутствуют перевернутые крупные фрагменты песков с частично сохранившейся, еще не окончательно «размытой» первоначальной слоистостью.

В слое SSDS-5 развиты отпечатки нагрузки и генетически связанные с ними структуры пламя и выхода воды (рис. 2 Б). Большинство отпечатков нагрузки имеют ширину 5–10 см в попереч-

ном сечении, располагаются вертикально по всему слою. Текстуры пламени до 7–10 см высотой и 0.5–2.5 см шириной имеют как вертикальное положение, так и иногда загнутые наклонные вершинки.

Песчаный слой SSDS-6 содержит включения угловатых, иногда со слегка закругленными краями обломки глин, размерами от 0.8 см до 6–8 см в диаметре. Эти обломки встречаются как в виде отдельных редких крупных включений, «плавающих» в песчаной матрице, так и образуют отдельные уплощенные обломки, линейно распределенные в толще песков, приуроченные к кровле слоя.

Аналогичные деформационные горизонты в морских толщах были изучены и в других разрезах, вскрытых как на правом, так и на левом берегу реки Ура (рис. 1). Они прослеживаются в разрезах вдоль долины реки Ура на расстояние более 5 км.

Условия образования осадков и их литология свидетельствует о том, что часть деформаций могла быть образована в результате гравитационных потоков, без участия сейсмотектоники. Характерный пример отложений одного из таких обломочных потоков это слой SSDS-6 (рис. 2). Однако деформации горизонтов 1-5, такие как пламя и отпечатки нагрузки вероятнее всего были образованы в результате возможно нескольких процессов, действовавших одновременно, в том числе и сейсмических.

Особенности генезиса деформаций и критерии выделения сейсмитов. Исследуемые деформации были образованы в результате нескольких наложенных друг на друга процессов: седиментационных (обломочных потоков), оползневых, сейсмогравитационных и сейсмогенного разжижения. Детальный литологический анализ показал, что изученные слои, во всяком случае, 2 из них (SSDS 4 и 5), имеют признаки постседиментационного разжижения и флюидизации осадков, то есть следы ре-ликвификации. Этот факт невозможно объяснить без участия сейсмотектонической составляющей. Достаточно сильное сейсмическое встряхивание могло привести и к брекчированию слоя SSDS-4, после того, как они были уже отложены. Фрагменты сохранившейся первоначальной горизонтальной слоистости наглядно иллюстрируют это (рис. 2 А). Аналогичные брекчиевые горизонты были описаны в озерно-ледниковых отложениях на западе Польши (Pisarska-Jamroży et al., 2019), а также в осадочных отложениях активной грабенообразной структуры в центральной Польше (Gruska, Van Loon, 2007). Их образование авторы рассматривают как отложения гравитационных потоков, обусловленных сейсмическими процессами.

Еще одно важное наблюдение заключается в следующем. Как показали наши исследования, деформации, морфологически сходные с отпечатками нагрузки, не всегда образуются в системах с инверсией плотностей (рис. 2). Нередко можно встретить системы алевроиты-тонкозернистые пески на мелкозернистых песках, или глины на песках, что исключает седиментационный характер образования деформаций и свидетельствует в пользу сейсмогенного происхождения. Аналогичные системы мы наблюдали в разрезах вдоль долины реки Печенга (Николаева, 2006) и в осадках флювиогляциальных дельт Ура-Губы и Сайда-Губы (Николаева, 2013).

Кроме того, экспериментальные исследования Owen и Moretti (2011) показали, что сейсмические волны, ответственные за развитие SSDS в водонасыщенных рыхлых отложениях в самых верхах осадочной толщи, представляют собой S-волны. Эти S-волны приводят к чередованию напряжений сжатия и растяжения в отложениях, таким образом, позволяя материалу погружаться в нижележащий слой, даже если практически не существует разницы в плотности. Морфологически сходные текстуры слою SSDS-5 достаточно часто наблюдались в эпицентральных зонах исторических и современных землетрясений, например (Tuttle et al., 1990).

Большинство деформационных текстур по нескольким признакам удовлетворяет основным критериям, разработанным группой международных авторов для сейсмогенных проявлений в осадочных разрезах (McCalpin, 2009; Owen, Moretti, 2011; Moretti and van Loon, 2014).

1. Все исследуемые горизонты образованы в осадках, наиболее подверженных ликвификации (тонко- и мелкозернистые пески, алевроиты, глины), залегают между ненарушенных отложений и имеют вертикальное расположение в разрезе, обладают явным сходством с деформациями, образованными в результате исторических и современных землетрясений.

2. Присутствует цикличность проявления деформированных горизонтов в одном разрезе, что может указывать на повторяемость сейсмических событий, а их близкое друг к другу положение возможно связано с афтершоками, часто сопровождающими каждое сильное землетрясение. Выделенные 5 горизонтов могут являться несколькими сближенными сейсмическими событиями, запечатленными в одном разрезе.

3. Приуроченность изученных разрезов к крупной сеймотектонической структуре, разграничивающей Балтийский щит и Баренцевоморскую плиту и зоне разлома Карпинского еще один важный критерий распознавания деформаций сейсмогенного генезиса. Следует отметить, что Мурманское побережье Баренцева моря - это одна из главных сейсмогенных зон Кольского региона, вдоль которой наряду со слабыми современными землетрясениями фиксируется повышенная историческая и палеосейсмичность (Никонов, Шварев, 2015).

Заключение

На Мурманском побережье Кольского региона в ледниково-морских отложениях долины реки Ура выявлен комплекс сейсмогенных деформаций и выделено не менее 5 сближенных эпизодов сейсмической активности в период позднеледниковья. Деформации представлены отпечатками нагрузки, структурами пламени, осадочной брекчией, структурами выхода воды. Они образуют отдельные горизонты, разделенные ненарушенными отложениями, и прослеживаются вдоль долины реки Ура на расстояние нескольких км. Детальный литологический анализ показал, что деформационные горизонты были образованы в основном в результате сейсмогравитационных потоков, а также ликвифакции и ре-ликвифакции. В качестве основной сейсмогенерирующей зоны рассматривается крупный линеймент Карпинского, разграничивающий Баренцевоморскую плиту и Балтийский щит.

Насыщенность береговой зоны Мурманского побережья особо ответственными объектами и значительная плотность населения придают особую значимость исследованиям, направленным на изучение палеосейсмичности и опасных геологических процессов в связи с обеспечением экологической безопасности и снижением негативных последствий от различных природных катастроф.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме НИР ГИ КНЦ РАН г. Апатиты, (проект АААА-А19-119100290145-3, FMEZ-2022-0027).

Литература

1. Ботвинкина Л.Н. Методическое руководство по изучению слоистости // Тр. ГИН АН СССР. Вып. 119. М.: Наука, 1965. 259 с.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта четвертичных отложений. Новая серия. Масштаб 1: 1 000 000. Лист R-35(37) Мурманск. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007.
3. Градинский Р., Костецкая А., Радомский А., Унруг Р. Седиментология / пер. с польского. М.: Недра, 1980. 646 с.
4. Евзеров В.Я. Породные парагенезисы флювиогляциальных дельт (на примере крайнего северо-запада России) // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 6. С. 563–574.
5. Евзеров В.Я. Геология четвертичных отложений Кольского региона. Мурманск: Изд-во МГТУ. 2016. 210 с.
6. Колька В.В. Некоторые аспекты формирования ленточных глин на Северо-востоке Балтийского щита // Известия РГО. 2004. Т. 136. Вып. 5. С. 69–78.
7. Крапивнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.
8. Митрофанов Ф.П. Геологическая карта Кольского региона. Масштаб 1:1000000 / Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2001. 1 л.
9. Николаева С.Б. Сейсмогенные деформации в отложениях раннеголоценовой террасы реки Печенга (Кольский полуостров) // ДАН Т.406. № 1. 2006. С. 69–72.
10. Николаева С.Б. Свидетельства сейсмических событий на побережье Мурман в позднеледниковье и голоцене (северо-восток Балтийского щита) // Известия РГО. 2013. Т. 145. Вып. 4. С. 53–65.

11. Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинементы и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет // Материалы Международной конференции «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности». Нерюнгри: Изд-во Техн. Ин-та (ф) СВФУ, 2015. С. 243–251.
12. Никонов А.А., Николаева С.Б., Шварев С.В. Мурманское побережье – крупнейшая в Российской Арктике сейсмогенерирующая зона: новейшие разработки // Природные ресурсы и комплексное освоение прибрежных районов Арктической зоны: Сб. научных трудов / ред. В.И. Павленко. Архангельск. 2015. С. 34–40.
13. Поляков А.С. Гранулированные среды и седиментогенез // Общая и региональная геология, геология морей и океанов, геологическое картирование. М.: Геоинформмарк, 2001. 59 с.
14. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. М., 1962. Т. 1. 212 с.; Т. 2. 574 с.
15. Шварев С. В., Родкин М.В. Структурная позиция и параметры палеоземлетрясений в районе горы Воттоваара (Средняя Карелия, Восточная часть Фенноскандинавского щита) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2017. Т. 44. № 2. С. 35–60. DOI: 10.21455/VIS2017.2-3.
16. Gruszka B. & Van Loon A.J. Pleistocene glaciolacustrine breccias of seismic origin in an active graben (Central Poland) // *Sedimentary Geology*. 2007. V. 193. P. 93–104. doi:10.1016/J.SEDGEO.2006.01.009.
17. Kukkonen I.T., Olesen O., Ask M.V.S. & the PFDP Working Group, 2010. Postglacial Faults in Fennoscandia: Targets for scientific drilling. GFF 132, 71–81. <https://doi.org/10.1080/11035891003692934>.
18. Lagerbäck R., Sundh M., 2008. Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. SGU Research Paper C836, 80 p.
19. McCalpin J.P. Paleoseismology. *International Geophysics*. V. 95. Elsevier. 2009. 802 p.
20. Moretti M. & Van Loon A.J. Restrictions to the application of ‘diagnostic’ criteria for recognizing ancient seismites // *Journal of Palaeogeography*. 2014. V. 3 (2). P. 162–173. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1261.2014.00050>.
21. Mörner N.-A. Paleoseismicity of Sweden – a novel paradigm. P&G-unit, Stockholm University, 2003. 320 p.
22. Nikolaeva S.B., Nikonov A.A. and Shvarev S.V. Late Glacial and Postglacial Faulting in the Russian Part of the Fennoscandian Shield. Chapter No 14. In: *Glacially-Triggered Faulting* Eds: Steffen H., Olesen O., Sutinen R. Publisher: Cambridge University Press. 2021. P. 246–260. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108779906.018>.
23. Owen G. & Moretti M. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands // *Sedimentary Geology*. 2011. V. 235. P. 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.10.003>.
24. Pisarska-Jamroży M., (Tom) Van Loon A.J., Mleczak M., Roman M. Enigmatic gravity-flow deposits at Ujście (western Poland), triggered by earthquakes (as evidenced by seismites) caused by Saalian glacioisostatic crustal rebound // *Geomorphology*. 2019. V. 326. P. 239–251. doi:10.1016/j.geomorph.2018.01.010.
25. Tuttle M., Law K.T., Seeber L., Jacob K. Liquefaction and ground failure induced by the 1988 Saguenay Quebec, earthquake // *Canad. Geotech. J.* 1990. V. 27. P. 580–589.