

УДК 551.432→551.24(470.21)

ПРИЗНАКИ ПОСЛЕДНИКОВОЙ АКТИВНОСТИ ИМАНДРА-КОЛВИЦКОГО РАЗЛОМА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) ПО ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ И ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ[#]

© 2025 г. С. В. Шварев^{1,2,*}, А. Л. Гуринов¹, П. А. Рязанцев³, Н. Н. Луговой^{1,4},
А. О. Королева^{1,2}, И. В. Бондарь²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

³Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: shvarev@igras.ru

Поступила в редакцию 13.12.2024 г.

После доработки 16.03.2025 г.

Принята к публикации 15.04.2025 г.

Статья посвящена исследованию постледниковой тектонической активности Имандра-Колвицкого разлома на юго-западе Кольского п-ова на основании синтеза признаков сейсмогенных деформаций в рельефе, коренных породах кристаллического фундамента и рыхлых отложениях. Изучаемая территория расположена в сквозной тектонической депрессии в низкогорном массиве Кандалакшские Тундры. Ранее здесь был установлен очаг палеоземлетрясений по наличию сейсмореформаций различного типа и возраста, распространенных на склонах депрессии и обрамляющих ее горных сооружений. При этом характер нарушений в центральной части очаговой зоны, в значительной части скрытой под акваторией оз. Ср. Лувеньгское и покровом рыхлых отложений на дне тектонической депрессии, остался не установленным. С целью выявления детальной структуры разломной зоны и связанных с ней сейсмогенных деформаций, осуществлено комбинирование геоморфологических и геофизических данных, полученных для субаэральных и субаквальных условий. В ходе комплексных работ: а) проведено морфогенетическое и морфотектоническое картографирование на основе комбинированной детальной модели рельефа дна акватории и прибрежной суши, созданной по батиметрическим и аэросъемочным данным высокого разрешения; б) установлено строение и мощность чехла, деформации четвертичных отложений и рельефа поверхности фундамента по данным георадиолокационного и электротомографического профилирования. В результате исследования определена пространственная структура сегментов Имандра-Колвицкого разлома и ее соотношение с современным рельефом, деформациями в толще рыхлых отложений и характером поверхности фундамента; установлена активизированная блоковая структура фундамента, сейсмореформации в толще рыхлых отложений и породах фундамента, в том числе разрывы с вертикальными смещениями амплитудой до первых метров, соотносимыми с вероятным периодом максимальной активности 14.9–10.3 тыс.л.н.

Ключевые слова: сейсмогенные деформации; постледниковая тектоническая активизация; цифровая модель рельефа; батиметрическая съемка; георадарные исследования; электротомография; Кандалакшские Тундры

DOI: 10.31857/S2949178925030044

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследуемая территория расположена на северной периферии субширотного низкогорного массива Кандалакшских Тундр на юго-западе Кольского п-ова (рис. 1). Низкогорный массив с высотами водоразделов до 600–800 м, сложенный габбро-анортозитами гранулитовой формации входит составной частью в Колвицкую новейшую морфоструктуру, объединяющую Кандалакшские и Колвицкие тундры — горы, расположенные

[#] Ссылка для цитирования: Шварев С.В., Гуринов А.Л., Рязанцев П.А., Луговой Н.Н., Королева А.О., Бондарь И.В. (2025) Признаки постледниковой активности Имандра-Колвицкого разлома (Кольский полуостров) по геоморфологическим и геофизическим данным. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 3. С. 397–417. <https://doi.org/10.31857/S2949178925030044>

южнее и ориентированные вдоль Кандалакшского залива в СЗ направлении и отделенные от Кандалакшских Тундр Колвицкой субширотной депрессией. Оба массива резко отличаются по своей высоте от образований того же возраста, развитых к востоку, что и позволило выделить положительную блоковую морфоструктуру, ограниченную по периферии разломами (Стрелков, 1973), начало формирования которой относится к концу олигоцена — началу миоцена (Стрелков и др., 1976). Морфоструктура активно развивалась и в постледниковье, о чем свидетельствуют

деформации раннеголоценовых береговых линий, в соответствии с которыми амплитуды постледниковых вертикальных дифференцированных смещений оцениваются величинами до 30 м (Кошечкин, 1979). Такие суммарные амплитуды, дискретизированные на периоды разной интенсивности, обеспечивают потенциал для проявлений постледниковой сейсмичности и ее внешних проявлений в виде сейсмореформаций различного типа, повышенная концентрация которых в массивах установлена по данным дистанционного зондирования (Николаева, 2001). Верифицирован-

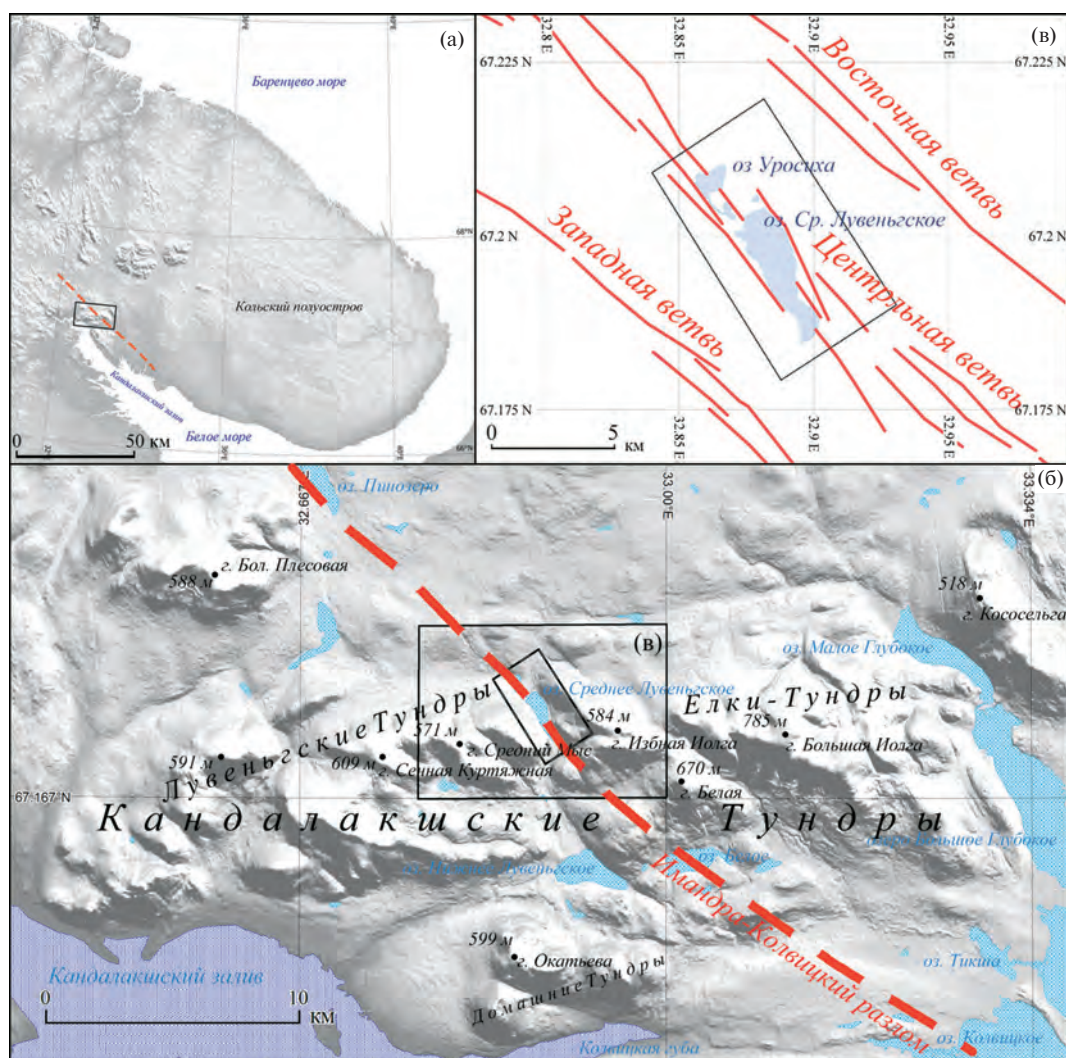


Рис. 1. Район исследований: (а) — расположение Имандра-Колвицкого разлома и массива Кандалакшских Тундр; (б) — пересечение Имандра-Колвицким разломом массива Кандалакшских Тундр; (в) — район детальных исследований и расположение основных ветвей Имандра-Колвицкого разлома. В наклонной рамке — участок построения комплексной модели рельефа дна и берегов озера Ср. Лувеньгское. Картографическая основа фрагментов (а) и (б) — цифровые модели рельефа GTOPO30 и FABDEM соответственно.

Fig. 1. Research area: (а) — the location of the Imandra-Kolvitsky fault and the Kandalaksha Tundra mountains; (б) — the intersection of the Imandra-Kolvitsky fault of the Kandalaksha Tundra mountains; (в) — the area of detailed research and the location of the main branches of the Imandra-Kolvitsky fault. In an inclined frame is a plot for constructing a complex relief model of the bottom and adjacent slopes of the lake Sredneye Luvengskoye. Cartographic basis of fragments (а) and (б) digital relief models GTOPO30 and FABDEM, respectively.

ные следы сильной постледниковой сейсмичности в виде разнообразных форм раздробления и смещения скальных пород были обнаружены на побережье Кандалакшского залива (Шевченко и др., 2007) и во внутренних районах возвышенностей (Николаева, Евзеров, 2018; Николаева и др., 2020).

По современным представлениям, активные тектонические структуры исследуемого района входят в обрамление Кандалакшского новейшего грабена (Балуев и др., 2012; Колодяжный и др., 2019). В тоже время идентификация сейсмогенерирующих разломов, обновленных в поздне-постледниковое время, остается проблематичной. Предложенные ранее варианты генеральных схем новейших нарушений (Карта ..., 1980; Карта ..., 1997; Кратц, 1978; Николаев и др., 1967; Карта ..., 1987; Бачманов и др., 2017; Zelenin et al., 2022) имеют существенные расхождения, иногда кардинальные.

Анализ данных по активизированному блоковому строению Кольского п-ова (Шварев, 2022) в сопоставлении с локализацией сейсмогенных деформаций в низкогорном массиве Кандалакшских Тундр (Николаева, Евзеров, 2018) и бассейне оз. Имандра (Николаева и др., 2017; 2018; Шварев, 2003) позволил выделить Имандра-Колвицкий разлом как единую структуру СЗ простирания, трассирующуюся от ЮЗ побережья оз. Имандра вдоль котловины оз. Пинозеро через массив Кандалакшских Тундр вдоль восточного обрамления Колвицких Тундр и западного борта котловины Колвицкого озера вплоть до основания п-ова Турий (Шварев и др., 2021) (рис. 1а). Его осевая зона трассируется от оз. Ср. Лувеньгское к западному побережью Колвицкого озера (рис. 1б). На пересечении с Кандалакшскими Тундрами Имандра-Колвицкий разлом представлен тремя ветвями — Западной, Центральной и Восточной (рис. 1в), кулисно подставляющими друг друга. Каждая из ветвей сопровождается сквозной тектонической долиной, крупнейшая из которых наследуется котловиной озера Ср. Лувеньгское и примыкающими участками долин рр. Верхняя и Нижняя Лувеньга. В сквозных долинах и на прилегающих территориях зафиксированы многочисленные сейсмодетекции, свидетельствующие об очаговой зоне поздне-постледниковых палеоземлетрясений (Шварев и др., 2023; 2024а; 2024б), пространственно сопряженной с котловиной озера. Параметры палеосейсмодетекций, наблюдающихся в очаговой зоне и включающих сеймотектонические, сейсмогравитационные и сейсмодетекционные образования, свидетельствуют о максимальной интенсивности землетрясений IX+ баллов и неоднократной активизации

разлома до последнего оледенения, а также в позднеледниковые и голоцене (Шварев и др., 2024б). Возраст четырех наиболее вероятных голоценовых землетрясений ≈ 10.5 тыс.л.н. (I); ≈ 7.5 тыс.л.н. (II); $\approx 2.8-3.0$ тыс.л.н. (III) и $0.3-0.5$ тыс.л.н. (IV) установлен с использованием радиоуглеродного датирования захороненной в сейсмогравитационных шлейфах и подпруженных водотоках органики. Возраст наиболее древнего события был определен по начальному накоплению органики в небольшой озерной котловине, продолжающей грабенообразную депрессию озера Ср. Лувеньгское к северо-западу (цепочка озер Уросиха и Рига-Ламбина) 10460 ± 180 кал.л.н. (LU-7573) (Николаева, Лаврова, 2021; Шварев и др., 2024б).

Морфологическая выраженность разлома, несомненно, свидетельствует о его активности, однако, существенный интерес представляет установление четких связей между выявленными по внешним признакам тектоническими нарушениями, распространением и внутренним строением рыхлых отложений, а также рельефом кристаллического фундамента и нарушениями коренных пород на всей исследуемой территории, включая субаквальную часть, занимающую значительную ее площадь.

Для прояснения этих вопросов необходимо решить ряд задач, связанных с: 1) детализацией выраженности разлома в современном субаэральном и субаквальном рельефе; 2) соотношением разлома с распределением четвертичных отложений, их генетических и морфологических типов, внутренним строением и возрастом; 3) проявлением разлома в рельефе поверхности фундамента.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Решение поставленных задач базируется на сочетании геоморфологических (морфогенетический, морфотектонический, морфологический, морфометрический) и геофизических (георадиолокационный, геоэлектрический) методов для построения взаимоувязанной поверхностной и глубинной модели.

2.1. Геолого-геоморфологические исследования

Детальные исследования рельефа территории выполнены с помощью методов морфогенетического, морфотектонического и сеймотектонического дешифрирования комплексной цифровой модели на базе интегрирования данных цифровых моделей рельефа разного пространственного разрешения: ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>), FABDEM (<https://data.bris.ac.uk/data/dataset/>) с вертикальной точностью 2–10 м

и 30 м, батиметрической модели и съемки БПЛА. Батиметрическая съемка рельефа дна озера проведена с использованием эхолота Garmin Echomap plus 72sv по сетке ортогонально сопряженных галсов со средним шагом 30–40 м, позволившая построить цифровую модель дна озера с разрешением 1 м. Суммарная длина промерных галсов около 80 км (рис. 2). Съемка БПЛА (DJI Phantom 4 Pro v.2.0) проведена на отдельных, ключевых для дешифрирования и увязки цифровых моделей участках в нади́р с перекрытием 60% для получения объемной модели (рис. 3а, б).

Полученная комплексная цифровая модель (рис. 3) позволяет идентифицировать формы рельефа, вплоть до отдельных микроформ, уступы

и поверхности террас, дифференцировать территорию по уклонам, выделять линейные тектонические структуры протяженностью в первые десятки и сотни метров и с субметровыми перепадами высот, приуроченными к ним сейсмогенными деформациями (рвы, трещины, приразломные уступы, обвально-оползневые, каменно-лави́нные и селевые ниши, террасы и аккумулятивные тела и др.

Для верификации данных с учетом положения геофизических профилей осуществлялись геолого-геоморфологические и сейсмотектонические наблюдения с фиксацией параметров видимых сейсмодетекций различного типа. На участках поверхностных аномалий в рельефе четвертичных

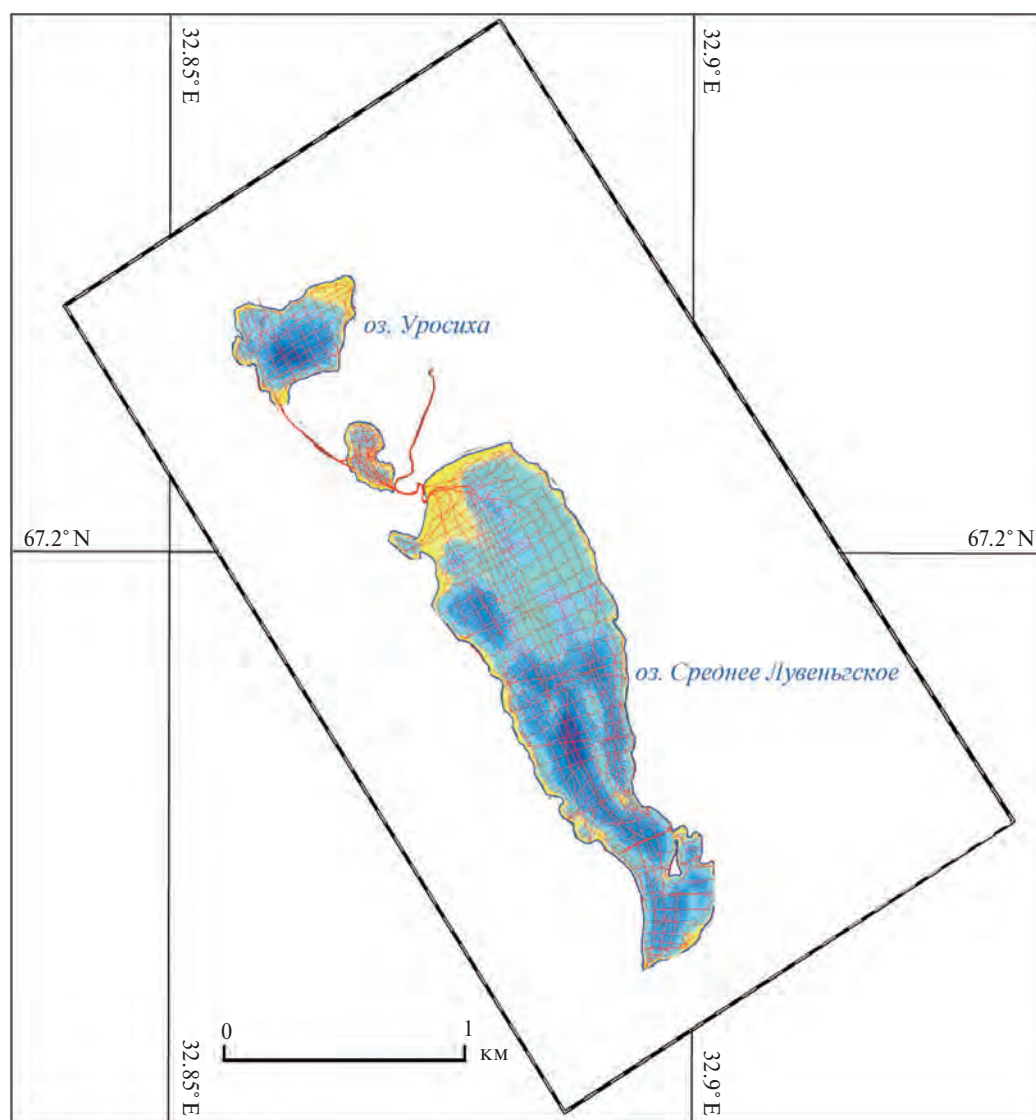


Рис. 2. Схема батиметрических профилей (тонкие красные линии) в акваториях озер Ср. Лувеньгское, Уросиха и прилегающих русел рек.

Fig. 2. Scheme of bathymetric profiles (thin red lines) in the areas of Lakes Srednee Luvengskoye, Urosikha and adjacent riverbeds.

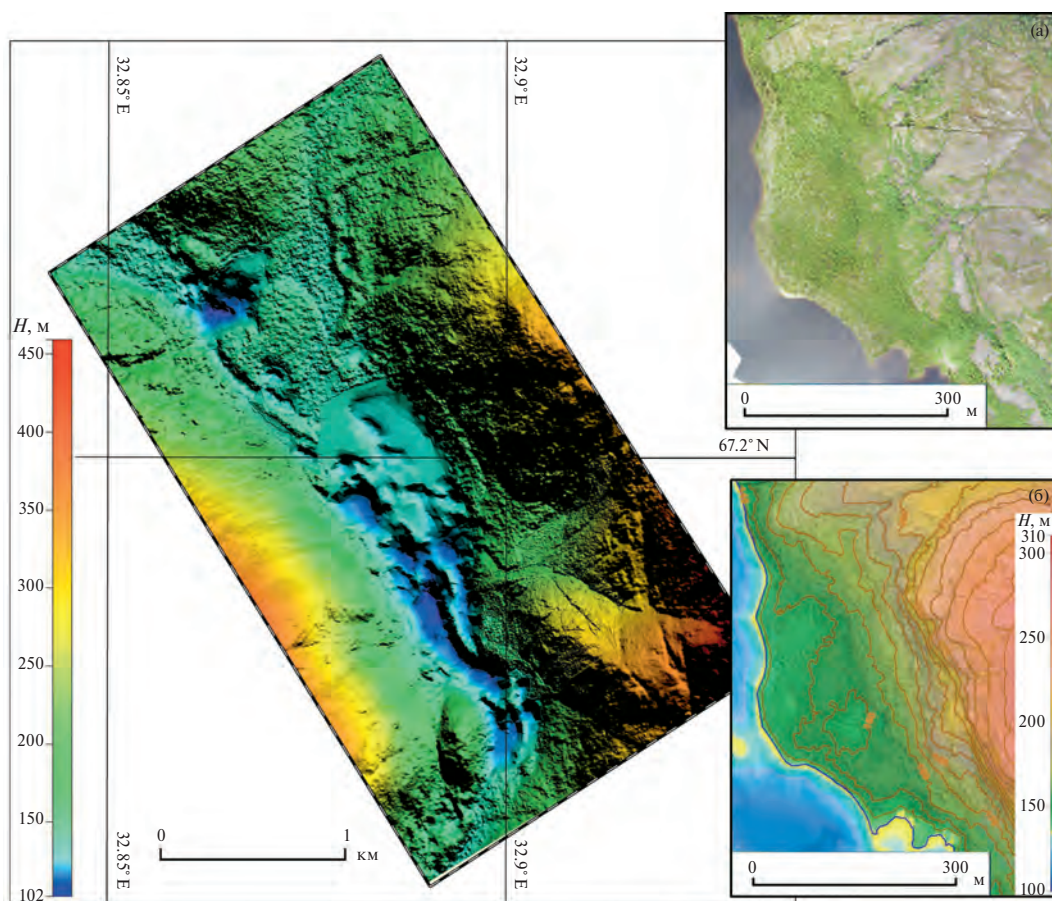


Рис. 3. Комбинированная цифровая модель рельефа дна озера и прибрежной территории. На врезках: (а) — фрагмент монтажа дистанционных изображений прибрежной территории оз. Ср. Лувеньгское; (б) — совмещенная цифровая модель рельефа по данным FABDEM и съемки БПЛА.

Fig. 3. Combined digital elevation model of the lake bottom and coastal territory. In the insets: (a) — fragment of the combination of remote images of the coastal territory of the lake. Middle Luvengskoye; (b) — combined digital elevation model according to FABDEM data and UAV surveys.

отложений в зонах разломов произведено изучение естественных обнажений и искусственных выемок с сейсмостратиграфической документацией разрезов. Для определения возраста сейсмодетформаций в рыхлых отложениях использован метод оптически стимулированной люминесценции (OSL) с обработкой образцов по стандартной методике в лаборатории OSL-датирования Института Карпинского (Санкт-Петербург).

2.2. Геофизические исследования

Геофизические исследования включали профилирование с использованием методов радиолокации и электротомографии с целью определения условий залегания четвертичных отложений, их соотношения с рельефом, а также выявления пространственной связи блоковой структуры кристаллического фундамента и деформаций в рельефе и рыхлых отложениях.

Георадиолокационные (далее ГРЛ) исследования осуществлялась при помощи георадара ОКО-3 с антенным блоком АБ-100М (центральная частота 100 МГц, заявленная вертикальная разрешающая способность ± 0.45 м) по профилям (рис. 4). Метод основан на излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от различных объектов исследуемой среды. В данном случае речь идет о границах раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью. В процессе экспедиционных работ проведена совмещенная георадиолокационная съемка на суше и в пределах акваторий. Обработка первичных (полевых) радарограмм проводилась с использованием специальных программных пакетов CartScan и GeoScan32. В ходе обработки применялись алгоритмы амплитудной коррекции, смещения нуля времени (фиксация времени первого вступления), вычитание среднего, редакция трасс и полосовая

фильтрация, ввод данных о превышениях (рельеф). Последняя операция проводилась с использованием высотных отметок, которые были получены по результатам ручной инструментальной съемки и были скорректированы с учетом данных с топографических карт и ЦМР ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>). Интерпретация радарограмм выполнена на основе анализа волновой картины по стандартной методике (Старовойтов, 2023).

Следует отметить, что георадиолокация служит одним из ведущих методов для поиска признаков палеоземлетрясений неглубокого залегания. Значительное количество научных работ, посвящен-

ных описанию параметров дислокаций в волновом поле георадара (Lunina, et al., 2016; Родионов и др., 2018; Ercoli, 2021; Лунина, Денисенко, 2021; Bricheva et al., 2021; Бричёва и др., 2024), способствует пониманию местоположения и кинематики разломных зон, оползней и т.п. даже в сложных геологических условиях.

Электротомография на постоянном токе (далее ЭТ) выполнялась при помощи электроразведочной станции Омега-48М с двумя 24 электродными косами с шагом 5 м. Для съемки была выбрана дипольная осевая электродная установка, которая имеет достаточно высокую детальность и чувствительность к субвертикальным неоднородностям.

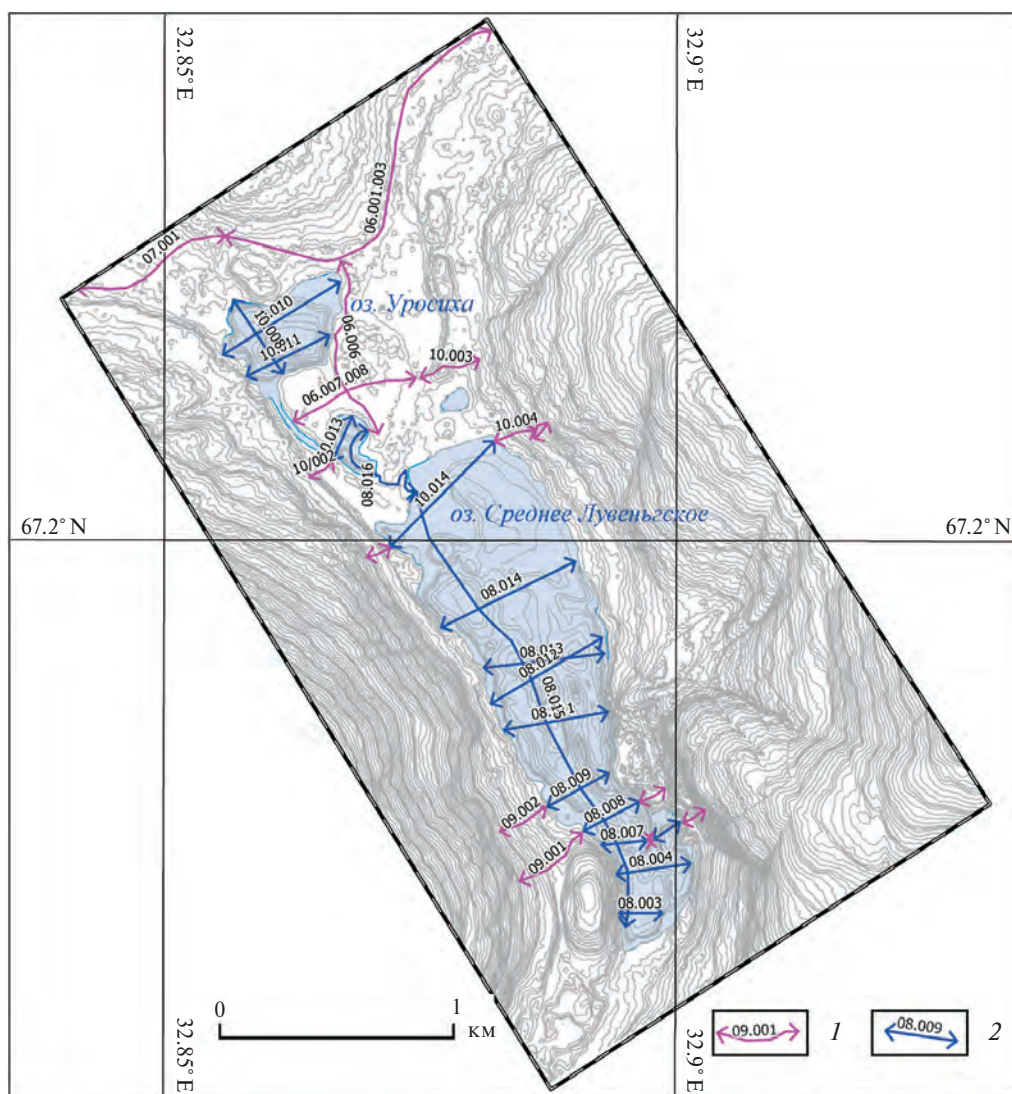


Рис. 4. Расположение геофизических профилей в акватории оз. Ср. Лувеньское, оз. Уросиха, на прилегающих прибрежных территориях и в долинах реки Верхняя Лувеньга и Безымянного ручья: 1 — на суше, 2 — в акватории. Горизонталы проведены через 2 м на основе обработки данных ЦМР FABDEM.

Fig. 4. Location of geophysical profiles in the areas of Srednee Luvengskoye Lake, Urosikha Lake, in the adjacent coastal territories and in the valleys of the Verkhnyaya Luvenga River and the Nameless Stream: 1 — on land, 2 — in the water area. The horizontals are drawn through 2 m based on the data of FABDEM.

родностям. Профиль наблюдения был привязан к георадарной съемке по пикетажу и высотным отметкам. Инверсия данных выполнялась в программе Zondres2d с ограничением гладкости для исключения случайных отклонений. Результатом обработки данных электротомографии служит двухмерный геоэлектрический разрез удельных электрических сопротивлений (УЭС).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Элементы геоморфологического строения

Территория исследований представляет собой сквозную тектоническую депрессию, по диагонали пересекающую низкогорный массив Кандалакских Тундр и отделяющую горы Лувеньгские Тундры на западе от гор Елки-Тундры на востоке (рис. 16). Тектоническая депрессия имеет корытообразный поперечный профиль с выпуклыми скальными бортами крутизной 10–20° (с увеличением до 30–40°) с местами отвесными уступами в нижних частях. Дно депрессии горизонтальное, плоскоступенчатое, шириной от 300–400 м в южном замыкании до 1–1.5 км — в северном. Центральная часть депрессии занята акваторией озера Ср. Лувеньгское, разделяющейся на две неравные части. Северная, шириной до 800–900 м и протяженностью до 1.5 км, ориентирована на СЗ, южная, шириной 200–300 м и длиной 500–600 м — на СВ. Отделены части узкой перемычкой шириной и длиной 250–300 м. Раскрытие депрессии на север сопровождается разделением ее останцовым предгорным скальным массивом на два сегмента с СЗ и СВ ориентировками, занятых долинами Безымянного ручья на западе и р. Верхняя Лувеньга на востоке (рис. 5). Дно и борта тектонической депрессии предопределяют дифференциацию территории на два основных типа рельефа — структурно-аккумулятивный и структурно-денудационный. В пределах первого типа дна депрессии на суше по морфологическим признакам выделяется несколько уровней террас и террасовидных поверхностей, среди которых наиболее выдержанный пространственно и четко идентифицируемый генетически 1-й уровень — поймы рек и ручьев ($H_{\text{над у.м.}} = 136\text{--}138$ м на севере территории и $134\text{--}136$ м — на юге), относительной высотой над уровнем озера ($H_{\text{над у.м.}} = 136$ м) до 2 м. Остальные уровни в разной степени фрагментированы и их происхождение и строение достаточно неопределенны: 2-й уровень — $H_{\text{над у.м.}} = 140\text{--}144$ м, $H_{\text{отн.}} = 4\text{--}8$ м; 3-й — $H_{\text{над у.м.}} = 150\text{--}154$ м, $H_{\text{отн.}} = 14\text{--}18$ м; 4-й — $H_{\text{над у.м.}} = 156\text{--}160$ м, $H_{\text{отн.}} = 20\text{--}24$ м; 5-й — $H_{\text{над у.м.}} = 170\text{--}172$ м, $H_{\text{отн.}} = 24\text{--}26$ м; 6-й — $H_{\text{над у.м.}} = 180\text{--}182$ м, $H_{\text{отн.}} = 34\text{--}38$ м;

7-й — $H_{\text{над у.м.}} = 184\text{--}190$ м, $H_{\text{отн.}} = 40\text{--}44$ м. В естественных обнажениях вскрываются толщи до 4 уровня, и можно утверждать, что эти образования носят аккумулятивный характер. В террасе 3-го уровня в расчистке на южном замыкании озера Ср. Лувеньгское вскрывается монотонная параллельно-слоистая тонко-мелкозернистая песчаная толща, свидетельствующая о бассейновом режиме осадконакопления. Возможно, это голоценовые морские осадки, доминирующие здесь по данным государственного геологического картирования (Государственная..., 2003). В сегментах террас 4 уровня по берегам озера вскрываются грубообломочные, в разной степени сортированные и окатанные осадки, очевидно, флювиогляциального происхождения. По бортам озерной котловины они образуют озовые гряды, в особенности хорошо выраженные по западному обрамлению. Возможно, что близкие отметки их выровненных поверхностей связаны со вторичной моделировкой, о чем свидетельствуют достаточно распространенные следы отмопки. На это указывают и озовые гряды с первичным рельефом поверхности на более низких уровнях, такие как ундулирующая озовая гряда в южной части озера, отделяющаяся от обширной террасы по восточному борту и погружающаяся под уровень озера в ЮЗ направлении. В расчистке на пологом склоне террасы 4 уровня на сопряжении с пойменным уровнем (рис. 5, 6) вскрывается преимущественно песчаная параллельно-слоистая толща с гравием, галькой и валунами, возраст которой по данным OSL-датирования (RGI-1319) 13.7 ± 1.2 тыс. л. н. Таким образом, с достаточной степенью условности можно отнести все вышележащие циклические поверхности к позднеледниковым образованиям водно-ледникового генезиса или с флювиогляциальной трансформацией, а нижележащие — к голоценовым морским и аллювиальным.

Наиболее высокие уровни 5–7 распространены фрагментарно. Они в основном маркируют периферические части структурно-аккумулятивной зоны на контакте с коренными склонами. Во внешней части депрессии ступени представляют собой эшелонированные, развернутые к северу сегменты, обрамляющие южный склон горного массива и, по-видимому, являются реликтами единой поверхности. В отличие от них высокая ступень на восточном борту депрессии в ее центральной части занимает относительно закрытый кулуар на сопряжении тектонического и гравитационно-тектонического уступов. Вероятно, и происхождение у нее иное — преимущественно структурное, и связано оно с экзогенной моделировкой изначально сейсмогравитационной формы (обвально-оползневое тело).

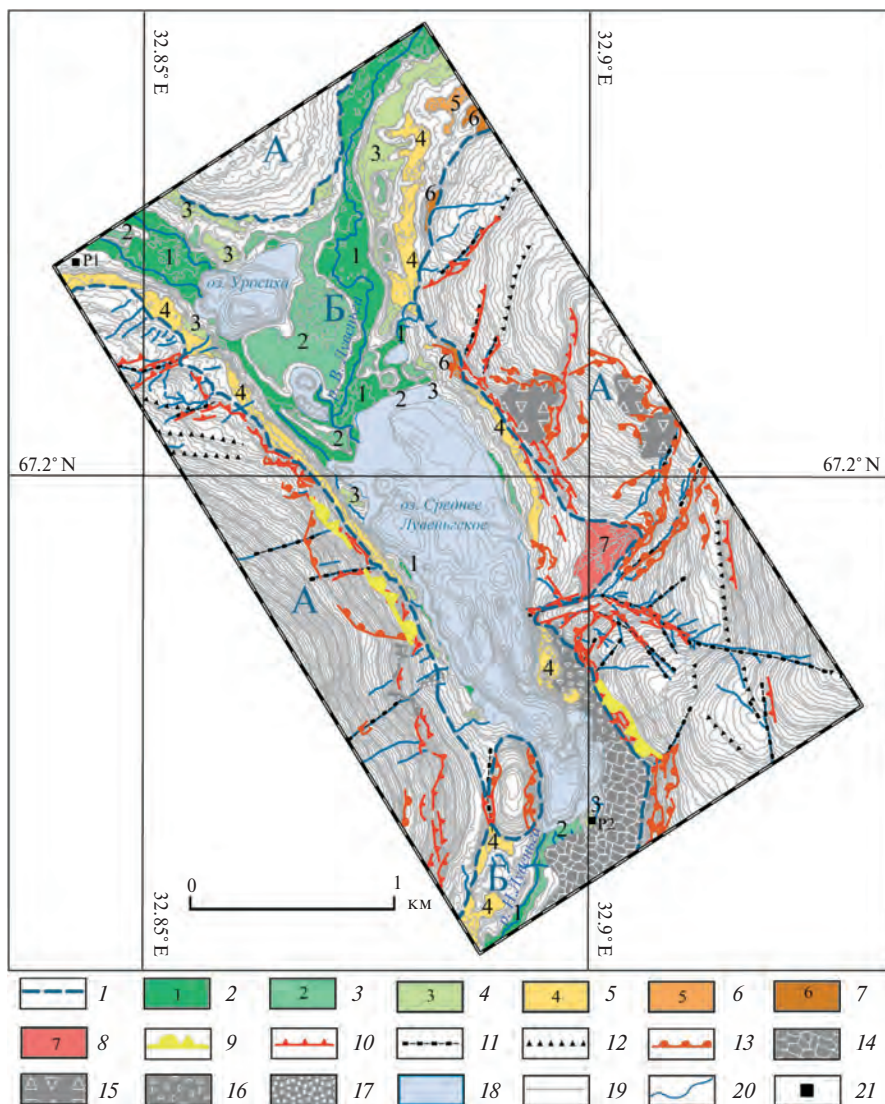


Рис. 5. Геоморфологическая схема сквозной тектонической долины, унаследованной гидрографической системой р. Верхняя Лувеньга — оз. Ср. Лувенгское — р. Нижняя Лувеньга.

1 — граница структурно-денудационного (А) и структурно-аккумулятивного (аккумулятивного) (Б) рельефа; элементы аккумулятивного рельефа, аккумулятивные и цокольные террасы и террасовидные поверхности: 2 — 1-й уровень — поймы рек и ручьев, 3 — 2-й уровень, 4 — 3-й уровень, 5 — 4-й уровень, 6 — 5-й уровень, 7 — 6-й уровень, 8 — 7-й уровень; элементы структурно-денудационного рельефа: тектонические (сеймотектонические) формы: 9 — главные сеймотектонические уступы, 10 — тектонические уступы с признаками обновления, 11 — тектонические рвы, траншеи, 12 — тектонические швы, подножья тектонических уступов; гравитационные (сейсмогравитационные) формы: 13 — обвальные и оползневые уступы, 14 — сейсмогравитационные комбинированные (оползне-обвальные) шлейфы, 15 — коллювиальные крупноглыбовые шлейфы, 16 — оползневые тела, 17 — конусы каменных лавин; прочие обозначения: 18 — акватории озер; 19 — изогипсы (по данным комбинированной ЦМР, сечение горизонталей 4 м); 20 — реки и ручьи; 21 — разрезы рыхлых отложений.

Fig. 5. Geomorphological scheme of a tectonic valley inherited by the hydrographic system of Upper Luvenga River — Lake Srednee Luvengskoye — Lower Luvenga River.

1 — boundary of structural-denudation (A) and structural-accumulative (accumulative) (B) relief; elements of accumulative relief, accumulative and erosion terraces and terrace-like surfaces: 2 — 1st level — floodplains of rivers and streams ($H_{m.a.s.l.} = 136\text{--}138\text{ m}$ (north); $134\text{--}136\text{ m}$ (south)), 3 — 2nd level ($H_{m.a.s.l.} = 140\text{--}144\text{ m}$), 4 — 3rd level ($H_{m.a.s.l.} = 150\text{--}154\text{ m}$), 5 — 4th level ($H_{m.a.s.l.} = 156\text{--}160\text{ m}$), 6 — 5th level ($H_{m.a.s.l.} = 170\text{--}172\text{ m}$), 7 — 6th level ($H_{m.a.s.l.} = 180\text{--}182\text{ m}$); 8 — 7th level ($H_{m.a.s.l.} = 184\text{--}190\text{ m}$); structural and denudation relief elements: tectonic (seismotectonic) forms: 9 — main seismotectonic scarps, 10 — tectonic scarps with signs of renewal, 11 — tectonic ditches, trenches, 12 — tectonic seams, foothills of tectonic ledges; gravitational (seismogravitational) forms: 13 — rockfall and rockslide scarps, 14 — seismogravitational combined (rockslide-rockfall) plumes, 15 — colluvial large-block plumes, 16 — rockslide bodies, 17 — cones of rock avalanches; other designations: 18 — lakes; 19 — isohypses (according to the combined DEM data, the horizontal section is 4 m); 20 — rivers and streams; 21 — sections of sediments.

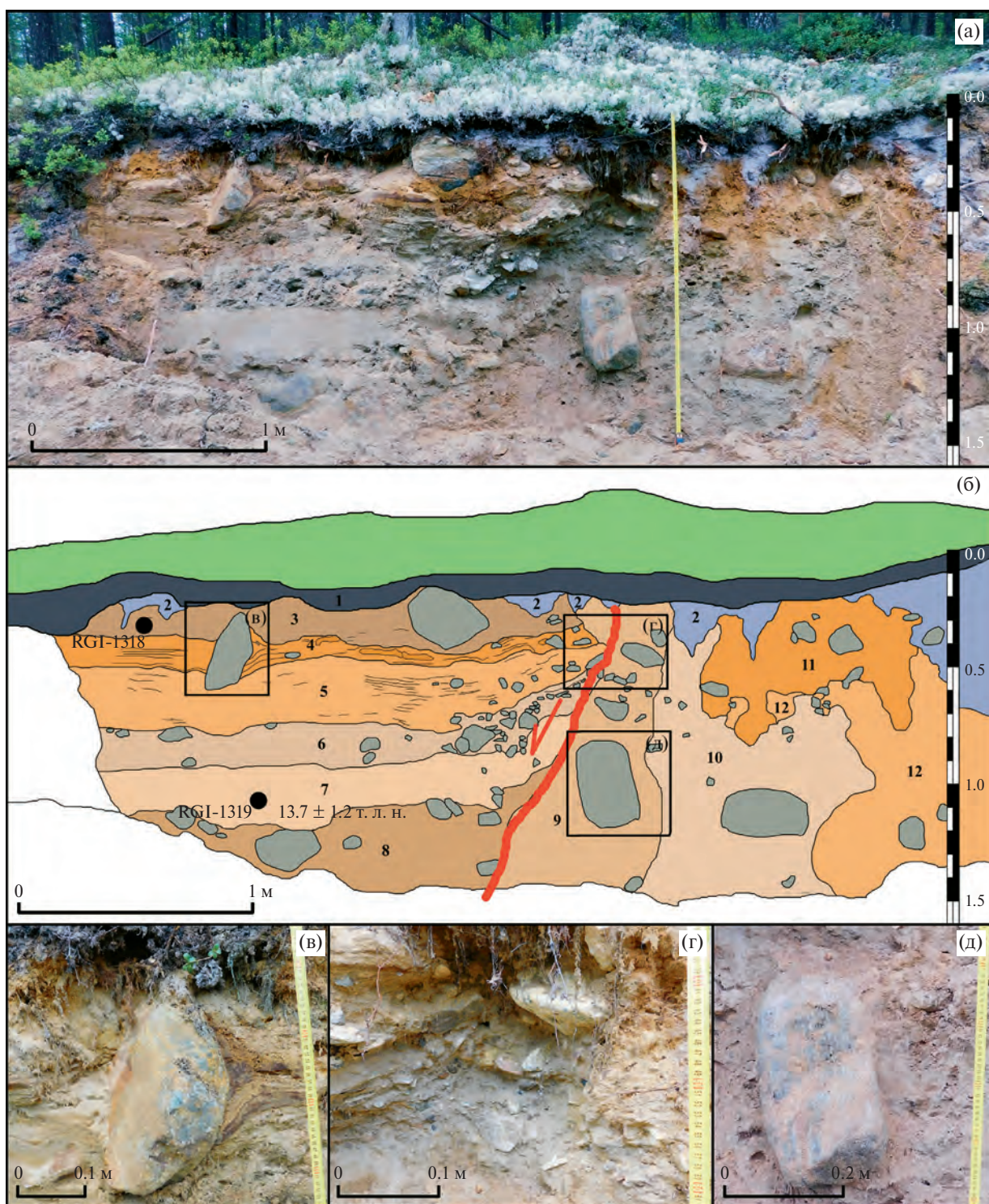


Рис. 6. Разрез флювиогляциальной толщи в северной части тектонической депрессии: (а) — общий вид; (б) — интерпретация разреза; (в) — криогенно-деформированная часть толщи с развернутым валуном; (г) — верхняя часть разломной зоны; (д) — вертикально ориентированный валун вблизи плоскости разрыва. На фрагменте (б) цифры обозначают отдельные слои или изометричные гомогенизированные участки разреза, хорошо отличающиеся по гранулометрическому составу и цвету (пояснение в тексте); черные кружки — места отбора проб OSL.

Fig. 6. Section of fluvio-glacial strata in the northern part of the tectonic depression: (a) — general view; (б) — interpretation of the section; (в) — cryogenically deformed part of the strata with an upturned boulder; (г) — the upper part of the rupture zone; (д) — vertically oriented boulder near the fault plane. The numbers on fragment б indicate individual layers or isometric homogenized parts of the cross-section, which differ well in granulometric composition and color (explanation in the text). The black circles on fragment б are the OSL sampling sites.

Подводный рельеф в акватории озера Ср. Лувеньгское можно охарактеризовать как крайне неоднородный, ступенчатый, с резкими перепадами глубин. Выделяются две узкие продольные котловины в центральной и южной его частях и две мелководные ступени — в северной (рис. 3). Границы между отдельными участками в значительной степени линейные, СЗ и СВ простирания.

В пределах структурно-денудационной зоны четко выделяются крупные блоки, отделенные друг от друга структурными перегибами и ступенями. В северной части территории наблюдается ступенчатость коренных склонов по нарушениям СВ простирания (по восточному борту) и ЗВЗ простирания (по западному борту).

3.2. Сейсмогенные деформации в рельефе и скальных породах

На бортах сквозной тектонической депрессии развиты многочисленные тектонические деформации, часть из которых можно отнести к доледниковым, проявляющимся только в структурных швах, перегибах, ложбинах, а часть — к постледниковым сейсмогенным проявлениям (Шварев и др., 2024б). Среди последних — сейсмотектонические (уступы, трещины, рвы), сейсмогравитационные (оползни, обвалы, каменные лавины) и сейсмовибрационные (зоны дробления, глыбовые развалы). Крупнейшие формы и наибольшая концентрация деформаций сосредоточены в нижних частях склонов. Распределение деформаций на бортах депрессии асимметричное. На западном борту крупнейшие формы — сейсмотектонический уступ высотой до 10–20 м и крупноглыбовые обвальные шлейфы — сосредоточены в северной части котловины, с выходом зоны крупных трещин на северный пьедестал низкогорного массива. На восточном борту основные деформации сосредоточены на юге, где расположены сейсмотектонический уступ высотой до 50 м и крупноглыбовые обвалы, сливающиеся в южном замыкании котловины в гигантский шлейф (рис. 5).

3.3. Деформации в рыхлых толщах

Деформации в рыхлых толщах обнаружены единично. В разрезе тонко-мелкозернистых хорошо сортированных песков с горизонтальной слоистостью, вскрывающихся в абразионном уступе сегмента 14-метровой террасы на южном замыкании озера (разрез № 2 на рис. 5) наблюдаются микросбросы амплитудой до первых сантиметров. Характер отложений, присущий относительно спокойным глубоководным условиям, и их местная стратиграфическая позиция свидетельствуют о вероятном морском генезисе

и о голоценовом возрасте осадков (Легкова и др., 2003). С учетом полученных нами ранее данных о нескольких голоценовых землетрясениях небольшой силы, установленных по захороненной органике в сейсмоколлювии и седиментационных ловушках в подпруженных долинах ручьев на склонах тектонической долины (Шварев и др., 2024б) позволяют с известной осторожностью отнести микросбросы к этим событиям. Более выразительные высокоамплитудные деформации вскрываются на севере территории (разрез № 1 на рис. 6). В субширотно ориентированном разрезе флювиогляциальной толщи, вскрытой в эрозионном уступе террасы относительной высотой 20–24 м над уровнем озера, непосредственно под почвенно-растительным слоем (рис. 6б, слой 1) по простиранию выделяются две части: левая (восточная) и правая (западная). Для восточной части характерна субгоризонтальная слоистость — переслаивание песков разной крупности с галькой и валунами (рис. 6б, слои 3–8). В западной части слоистость полностью отсутствует, пески разного цвета и гранулометрического состава перемешаны с образованием изометричных тел (рис. 6б, толщи 10–12). Контакт между западной и восточной частями представляет собой крутонаклонную к востоку плоскость, вдоль которой с восточной стороны (в восточном крыле) слои подвернуты вверх по разрезу (рис. 6, фрагмент г), а с западной стороны — валуны и галька имеют субвертикальное положение (рис. 6б, г, толщина 9). Контакт между флангами разреза представляет собой тектоническую плоскость разлома сбросового типа. В верхней части разреза наблюдается тонкий прослой, не нарушенный разрывом и многочисленные следы криогенеза в виде широких и неглубоких клиньев (рис. 6б, толщина 2). Возраст песков в нижней части разреза, установленный по данным OSL-датирования, — 13.7 ± 2 тыс. л. н. — определяет нижний предел, по которому можно оценить момент развития постседиментационных трансформаций.

3.4. Элементы тектонического строения

Анализ линейных элементов рельефа и приуроченных к ним деформаций показывает, что вся территория, включая дно озерной котловины, разбита на блоки разрывами двух ортогонально сопряженных систем: ССЗ-ВЗВ и ЗСЗ-ССВ. Доминирует ССЗ система, к которой принадлежат сегменты Имандра-Колвицкого разлома. Наряду с выделенными ранее (Шварев и др., 2022; 2024а) зонами бортовых разломов западного (I-1) и восточного (I-3) флангов, на основе материалов батиметрических исследований выделяется

центральная зона (I-2) по осевой части депрессии, состоящая из двух параллельных сегментированных ветвей, на севере сливающихся в один разрыв, а на юге — примыкающих к восточной зоне (рис. 7). В пределах дна озерной котловины разломы центральной зоны определяют продольную ступенчатость, а в сопряжении с западной зоной — основную глубоководную продольную котловину. Ортогонально сопряженные

с Имандра-Колвицким разломом структуры имеют явно незначительную выраженность и подчиненное положение в общей структуре. В то же время разломы второй системы играют второстепенную, по сравнению с Имандра-Колвицким разломом, но, тем не менее, весьма значимую роль в морфоструктуре. Разлом А ЗСЗ простирания в западной части отделяет пьедестальную ступень, в центральной части — сегментирует структуры

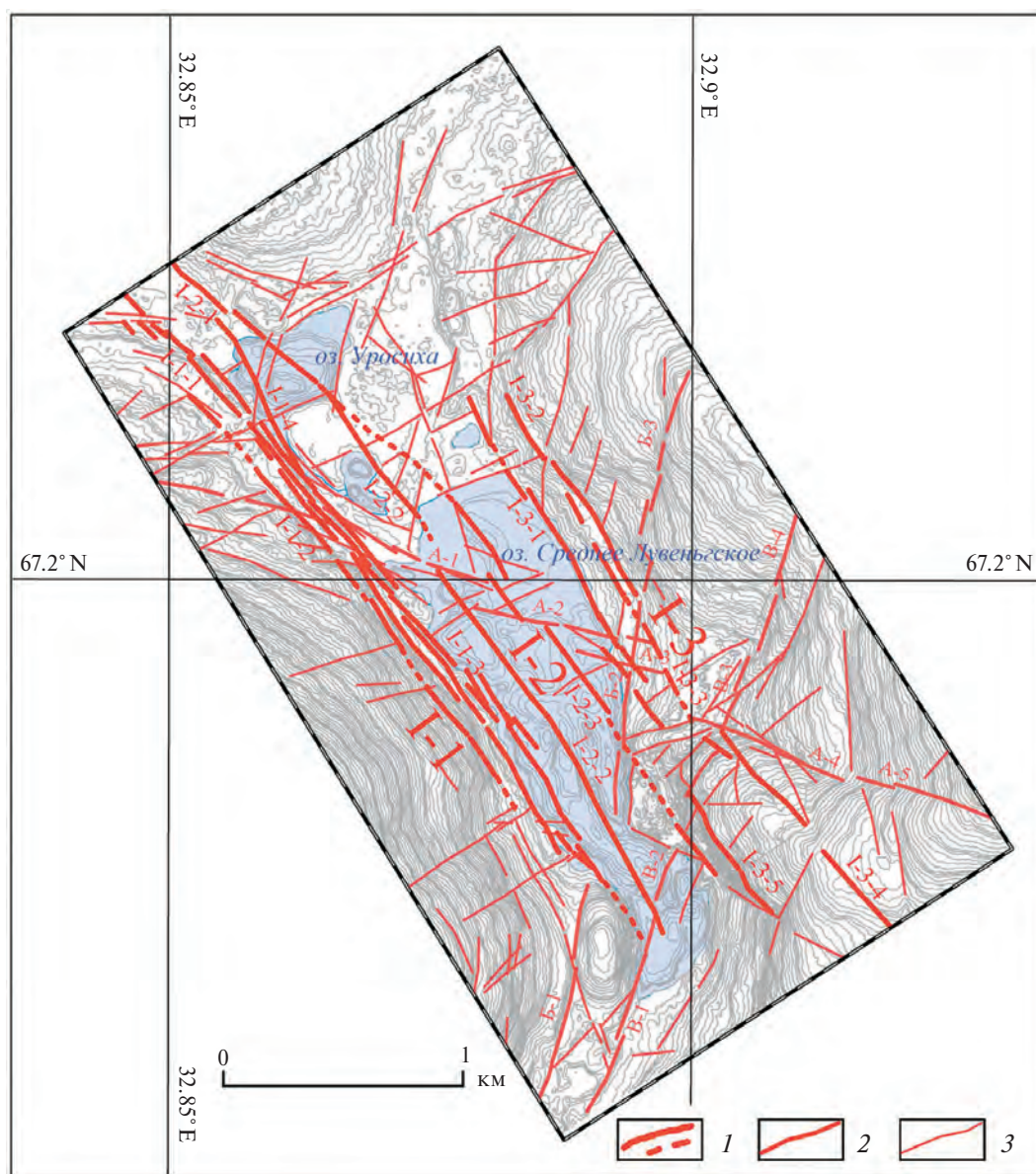


Рис. 7. Схема разрывных нарушений системы Имандра-Колвицкого разлома в сквозной тектонической долине, унаследованной гидрографической системой: р. Верхняя Лувеньга — оз. Ср. Лувенгское — р. Нижняя Лувеньга. 1 — элементы главных ветвей системы Имандра-Колвицкого разлома (I-1 — Западная (I-1-1 — I-1-5); I-2 Центральная (I-2-1 — I-2-4); I-3 Восточная (I-3-1 — I-3-5); 2 — второстепенные нарушения (А, Б, В) и их сегменты; 3 — прочие разрывы.

Fig. 7. Scheme of ruptures of the Imandra-Kolva fault system in a water-gap tectonic valley inherited by the hydrographic system: Upper Luvenga River — Lake Srednee Luvengskoye — Lower Luvenga river.

1 — elements of the main branches of the Imandra-Kolvitsky fault system (I-1 — Western (I-1-1 — I-1-5); I-2 Central (I-2-1 — I-2-4); I-3 East (I-3-1 — I-3-5); 2 — minor faults (A, B, C) and their segments; 3 — other ruptures.

центральной зоны (I-2) и четко прослеживается в рельефе дна (рис. 3) по узким линейным понижениям, диагонально секущим дно котловины, а в восточной — определяет положение крупной тектонически обусловленной долины. Два разлома ССВ простирания, расположенные на юго-востоке исследуемой территории — Б и В, определяют разворот конфигурации озерной ванны с СЗ на СВ и отсечение южной части акватории от северной. Между сегментами этих разломов (Б-1 и В-1) “зажата” осевая часть долины верхнего течения р. Нижняя Лувеньга, вытекающей из озера, и останцовый массив к западу от его южного замыкания. В акватории они контролируют конфигурацию восточного берега (Б-2) и южной котловины (В-2) с параллельно расположенной озовой грядой, а на восточном борту — отделяют основные блоки, ступенями снижающиеся к северу. Следует отметить, что и нарушения меньших масштабов проявляются в морфоструктуре, определяя прямолинейные участки русел (р. Верхняя Лувеньга), берегов озер (Уросиха, Воче-Ламбина), отдельных уступов, линейных котловин, тыловых швов и пр.

3.5. Строение рыхлых отложений и поверхности фундамента

Акватория озера Ср. Лувеньгское. В ходе интерпретации полученных данных по наличию высокоамплитудных отражений и характеру волновых картин на акваторных профилях было выделено четыре основных георадарных комплекса: 1) донные отложения (гиттия); 2) песчаные отложения; 3) глинистые осадки; 4) кристаллический фундамент (габбро-анортозиты).

Органическим донным отложениям (гиттии) соответствует параллельно-слоистая волновая картина, оси синфазности, несмотря на слабую интенсивность, непрерывно прослеживаются по всей длине слоя. В свою очередь, песчаные оползневые отложения имеют более сложную “хаотичную” волновую картину. Местами оси синфазности отраженных волн прослеживаются непрерывно, местами обрываются, также в структуре записи наблюдаются множество дифрагированных волн. Вероятно, этот георадарный комплекс соответствует разнотекстурным пескам с включениями валунов, перемешанным вследствие оползания толщи. В центральной, наиболее глубокой части георадарного разреза, выделяются взмученные и разуплотненные глинистые осадки. На радарограмме они отображаются в виде области нерегулярного сигнала, представленного фрагментами изогнутых осей синфазности. Эта область по своим характеристикам контрастирует с георадарными

ми комплексами, полученными при зондировании однородных ненарушенных толщ. По сравнению с гиттией не наблюдается протяженных осей синфазности, а для чисто глинистых осадков отражения слишком интенсивные. По всей видимости, такие области сформировались с частичным граничным перемешиванием гиттии и подстилающих алевроитов, причиной чего могло стать сейсмическое событие. Кристаллический фундамент на радарограмме установлен по неоднородной, местами “прозрачной” волновой картине только в прибрежной части. На профилях в восточной части озера наблюдается увеличение амплитуды отраженного сигнала, что связано с уменьшением к берегам мощности донных отложений.

Всего в пределах акватории озера выполнено 11 георадарных профилей, 4 из которых продолжены на суше. На рис. 8 представлены 3 наиболее показательные радарограммы. Работы на акватории выполнялись с резиновой лодки. По горизонтальной оси радарограммы указано положение зондирующих трасс (дистанция, м), а по вертикальной — время прихода отраженных импульсов (нс). Для перехода от временного разреза к глубинному каждому георадарному комплексу присваивалось соответствующее значение диэлектрической проницаемости (ϵ). Для этого использовались значения, полученные путем определения гиперболической дифрагированной волны, а в случае отсутствия гиперболической — общепринятые табличные значения (ϵ воды = 81, ϵ органической гиттии = 50, ϵ обводненного песка = 28, ϵ глинистых осадков = 30).

На всех профилях выделены оползневые тела песчаного состава, как у западного и восточного берегов озера Ср. Лувеньгское (рис. 8а, б), так и в центральной котловине (рис. 8в). По всей видимости они образованы вследствие сейсмогравитационных смещений со склонов озерной котловины. Оползневые тела отчетливо выделяются на радарограммах, так как имеют отличную от вмещающих донных отложений волновую картину, а также по интенсивным осям синфазности отраженных волн на границе контакта двух георадарных комплексов.

Помимо оползневых тел на радарограммах выделены разрывные (сбросовые и сдвиговые) деформации, которые проявляются в нарушениях осадочной толщи. На всех трех профилях наблюдаются перегибы и сеймотектонические рвы, заполненные глинистыми осадками. Деформации были выделены по следующим признакам: а) разрывы и вертикальное смещение осей синфазности отраженных волн; б) изменение наклонов осей синфазности; в) уменьшение амплитуды отражений; г) гиперболы и полугиперболы (от точек

разрыва). На профиле 10_010 отчетливо наблюдается смещение осей синфазности отраженных волн в интервале дистанции 100–150 м. Также над сбросовым нарушением на профиле 10_010 наблюдаются так называемые “усы дифракции”, что также является одним из признаков разрывных нарушений. На врезках (рис. 8б, в) показано, что, помимо смещения осей синфазности отраженных волн, признаком для выделения разрывного нарушения является и смена типа волновой картины.

Мощность осадков, заполняющих сейсмоструктурные рвы, составляет от 2 до 2.6 м. В местах, где выделяются дислокации, регистрируется падение амплитуды отраженного сигнала, что может быть связано с вышележащими глинистыми осадками. Красными пунктирными линиями обозначены предполагаемые оси сбросовых деформаций. Сейсмоструктурные рвы были выделены и в северной (рис. 8а), и в центральной (рис. 8б), и в южной (рис. 8в) частях озера, а также прослеживались на суше.

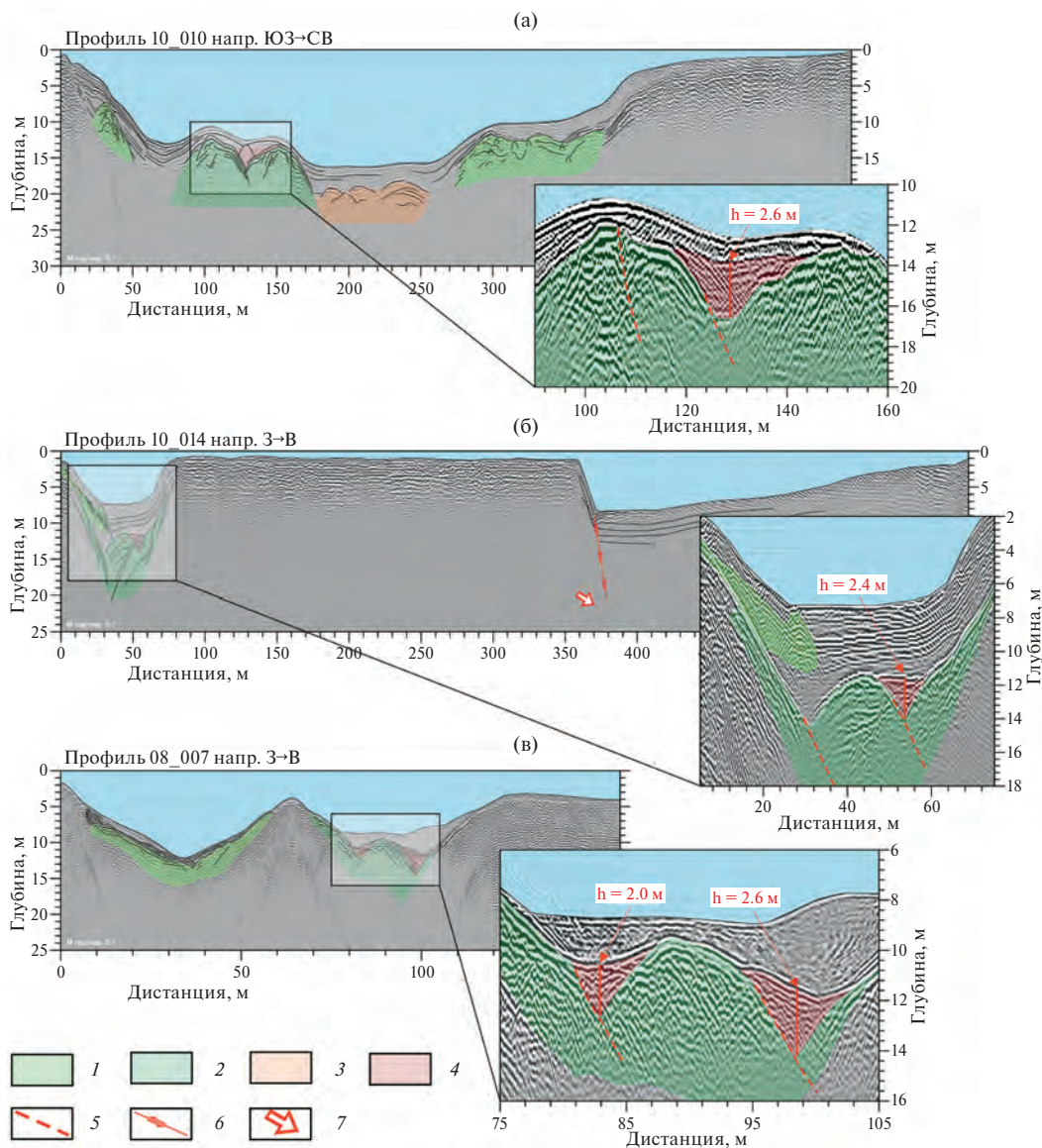


Рис. 8. Поперечные профили оз. Ср. Лувеньгское (расположение профилей см. рис. 4).

1 — оползневые тела песчаного состава; 2 — смещенные участки дна; 3 — взмученные и разуплотненные глинистые осадки; 4 — сейсмоструктурный ров, заполненный переотложенным материалом (аналогичный выявлен на GPR профиле по суше); 5 — сбросовые нарушения; 6 — предполагаемый сбросо-сдвиг; 7 — кратное отражение скальных пород.

Fig. 8. Transverse profiles of the lake Srednee Luvengskoye: (a) — 10_010; (б) — 10_014; (в) — 08_007.

1 — landslide bodies of sandy composition, 2 — displaced sections of the bottom, 3 — agitated and decompressed clay sediments, 4 — seismotectonic trench filled with redeposited material (a similar one was detected on the GRL profile on land), 5 — discharge disturbance, 6 — suspected displacement, 7 — multiple reflection of rocks.

Отдельного внимания заслуживает профиль 10_014 из-за нетипичного рельефа дна (рис. 8б), проведенный в наиболее широкой части озера Ср. Лувеньгское. На интервале дистанции 360–380 м наблюдается скальный уступ высотой 7 м, детально закартированный батиметрической съемкой. Под уступом выделяется сеймотектонический ров, по всей видимости, в скальных породах, о чем свидетельствует высокая контрастность записи. Вследствие чего в этом месте радарограммы отчетливо выделяется кратное позднее отражение (до 1000 нс), что не наблюдается в других частях профиля (выделено красной стрелкой на рис. 8б). Под уступом отмечается угловое несогласие, которое маркирует примыкание гиттии к породам кристаллического фундамента. На данном участке представляется возможным выделить место предполагаемого сбросо-сдвига.

Аккумулятивная равнина в северной части тектонической депрессии. В этой части территории исследований расположен наиболее протяженный профиль, пересекающий почти всю депрессию и выполненный с использованием методов георадиолокации (ГРЛ) и электротомографии (ЭТ). Совместная интерпретация данных ГРЛ и ЭТ позволила решить задачу прослеживания дислокаций как в рыхлых, так и в скальных грунтах (рис. 9).

В общем виде по геофизическим данным отчетливо выделяются 4 крупных литологических комплекса — косослоистые пески, обводненные пески, насыщенная обломочным материалом морена и подстилающие их габбро-анортозиты. Каждый комплекс обладает индивидуальной характеристикой как в волновом поле, так и по уровню УЭС. Между ними находятся комплексы (грунты) с менее очевидными признаками. Кососло-

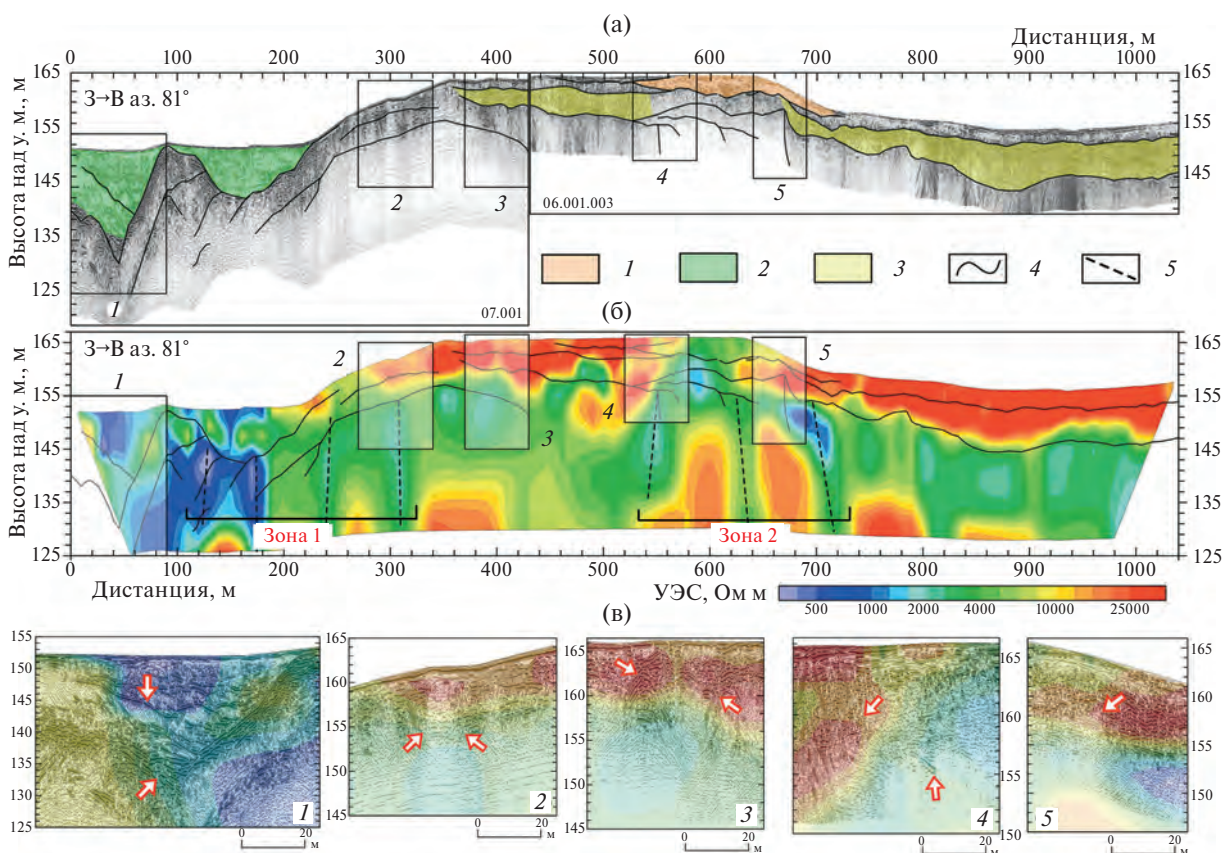


Рис. 9. Геофизические разрезы аккумулятивной равнины в северной части тектонической депрессии (расположение профилей см. рис. 4): (а) — георадиолокационный; (б) — геоэлектрический; (в) — фрагменты георадиолокационного разреза (1–5) с тектоническими (сейсмогенными) деформациями в рыхлых отложениях.

1 — пески косослоистые; 2 — пески сильно обводненные (местами с прослоями торфа и включениями грубообломочного материала); 3 — морена; границы: 4 — достоверные, 5 — предполагаемые.

Fig. 9. Geophysical sections of the accumulative plain in the northern part of the tectonic depression (07.001; 06.001–003 (partially)): (а) — georadiolocation; (б) — geoelectric; (в) — fragments of the georadiolocation section (1–5) with tectonic (seismogenic) deformations in loose sediments).

1 — obliquely layered sands; 2 — heavily saturated sands (in places with layers of peat and inclusions of coarse-grained material); 3 — moraine; boundaries: 4 — reliable, 5 — assumed.

истые пески верхней части разреза выделяются по сериям наклонных рефлекторов в волновом поле и высоким УЭС порядка 4000–8000 Ом·м, обусловленным их очень сухим состоянием. Обводненные пески с прослоями торфа фиксируются по извилистым и интенсивным осям синфазности с локальными участками затухания и УЭС порядка 1000–2000 Ом·м. Морена насыщенная грубообломочным материалом на георадарной записи имеет “хаотичный” облик волнового поля — короткие и извилистые рефлекторы с множеством дифрагированных волн, а также отличается крайне высокими уровнем УЭС до 30000 Ом·м. Такие экстремальные значения связаны со слабой обводненностью морены, включениями крупных валунов и выполнением работ в засушливую погоду с плохим контактом электродов. Коренные породы на радарограммах фиксируются по протяженным осям синфазности, сформированным от их кровли, которые, однако, зачастую прерываются, особенно в областях развития нарушений. Тогда как в поле УЭС габбро-анортозиты кристаллического фундамента имеют относительно устойчивые значения около 3000–4000 Ом·м.

По данным ГРЛ установлены границы как по протяженным осям синфазности отраженного сигнала, так и по смене георадарных фаций, которые можно соотнести со сменой пород, а также различным внутренним неоднородностям и несогласиям. Эти границы в большинстве случаев находят свое отражение в виде зон наиболее резкого градиента УЭС на геоэлектрическом разрезе. На обоих геофизических разрезах уверенно прослеживаются две относительно более нарушенные зоны, которые подверглись сейсмотектоническому воздействию (рис. 9а, б): 1) в западной части на пикетах 100–320 м, и 2) в восточной на пикетах 530–730 м. Для этих зон характерно присутствие серии субвертикальных аномалий УЭС шириной 10–20 м, которые идентифицируются как разрывные нарушения. Места выхода этих нарушений к дневной поверхности сопровождаются развитием дислокаций осадочной толщи, обнаруженных по данным ГРЛ.

Более детально комплекс обводненных песков приводится на врезке (рис. 9в, 1), где показана депрессия тектонического генезиса, а стрелками отмечены рефлектор (отражающая граница), маркирующий угловое несогласие, и область скопления обломочного материала в сейсмотектоническом рве. При этом указанные дислокации слабо влияют на уровень УЭС рыхлых грунтов, который в большей степени контролируется обводненностью. Проекция разрывной тектоники в осадочную толщу на частично обнаженном скло-

не возвышенности демонстрируется на рис. 9в, 2. На радарограмме она выражена в виде чередования субвертикальных областей с высокой интенсивностью отражений и локальными зонами затухания сигнала (выделены стрелками), прерывающих слоистую толщу, а также присутствием ансамбля “усов” дифрагированной волны, которые являются признаком вертикальных неоднородностей. Тогда как на геоэлектрическом разрезе под слоем рыхлых отложений по аномалии пониженных УЭС уверенно читается разломная зона. Подобная картина зарегистрирована и в месте отложения морены большей мощности (рис. 9в, 3), где также выявлены признаки вертикальных дислокаций. В местах поднятий кровли коренных пород на высоту 2–3 м на радарограмме обнаружены участки бокового примыкания морены, характеризующейся волновым полем высокой интенсивности, к коренным породам, в которых сигнал сильно затухает, но при этом видны отдельные наклонные оси синфазности, связанные с трещиноватостью (рис. 9, 4). Такая конфигурация в общих чертах наблюдается и на геоэлектрическом разрезе. Еще более представительный пример вертикального смещения пород с амплитудой до 4.5 м вдоль тектонического нарушения показан на врезке рис. 9, 5. В этом случае ось синфазности от кровли кристаллических пород прослеживается непрерывно. К сейсмотектоническому уступу с углом падения порядка 60° с востока прилегает ненарушенная толща морены, о чем свидетельствует пачка протяженных и волнистых осей синфазности. Тогда как осадки над уступом характеризуются прерывистыми осями синфазности с локальными пятнами затухания; такая конфигурация может быть следствием разуплотнения грунта из-за его смещения по склону уступа. В поле УЭС данная зона тяготеет к низкоомной аномалии, связанной с разломной зоной.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Поскольку одной из основных задач исследования является прослеживание тектонических (сейсмотектонических) нарушений от кровли фундамента к деформациям в толще рыхлых отложений и дневной поверхности, то в первую очередь следует оценить объективность оценки признаков нарушений по геофизическим данным. Очевидно, что сейсмотектонические нарушения в рыхлых отложениях и, в том числе, в грунтах ледникового и водно-ледникового генезиса, преобладающих на территории исследований, характеризуются менее выраженными геофизическими аномалиями в сравнении с отражением тектонически

нарушенных зон в подстилающих магматических породах, что обусловлено контрастом электрофизических свойств. При анализе радарограмм (рис. 8а, 9) были отмечены характерные признаки изменения волновой картины, которые можно интерпретировать как сейсмотектонические. Эти признаки были обнаружены как в комплексах, соответствующих толще рыхлых четвертичных отложений, так и в нижнем комплексе, который соответствует породам кристаллического фундамента. К таким признакам, по нашему мнению, следует относить следующие (рис. 9, 1–5): 1) смещение осей синфазности, маркирующих кровлю толщи рыхлых отложений; наклон и пересечение осей синфазности (угловые несогласия), которые нельзя объяснить действием экзогенных процессов; 2) резкое изменение амплитуды (затухание), а также усиление низкочастотной составляющей сигнала (последнее связано, вероятно, с локальной повышенной обводненностью пород); 3) структуры заполнения провалов/просадок (варианты интерпретации: гляциокарст и/или криогенные и/или сейсмотектонические); 4) наклон и пересечение осей синфазности (угловые несогласия) в кровле пород кристаллического фундамента.

Похожие изменения волновой картины (reflection patterns) были отмечены и другими исследователями, применявшими ГРП при изучении сейсмо- и тектоногенных нарушений в строении толщи рыхлых отложений и скального основания как в Фенноскандии (Ojala et al. 2017, 2020; Mattila et al., 2019; Родинов и др., 2018), так и в других регионах (Ercoli et al., 2021; Бричёва и др., 2024). Следует отметить, что георадарными маркерами постледниковых разрывных дислокаций могут служить как участки нарушения корреляции осей синфазности (Ojala et al., 2020), так и локальные области затухания сигнала (Markovaara-Koivisto et al., 2020), что, вероятно, связано как с кинематикой разломов, так и со строением вмещающих пород. В свою очередь поисковые критерии для разломных зон в кристаллических породах Фенноскандинавского щита на инверсных геоэлектрических разрезах достаточно хорошо известны (Rønning et al., 2014; Рязанцев, 2015). При этом, как показывает практика, наиболее полную информацию о параметрах активированных разломов, скрытых по чехлом четвертичных отложений, можно получить комплексом методов геофизики (Malehmir et al., 2016).

Объективное, основанное на четких критериях, выделение на геофизических разрезах зон сейсмогенных нарушений, прослеживающихся в фундаменте и в рыхлых осадках, позволяет сопоставить эти локальные участки профилей с про-

странственным распределением основных черт рельефа (рис. 5) и морфологически выраженных разрывных нарушений (рис. 7) и, в результате, определить тектоническую обусловленность постледникового рельефообразования и степень активности выделенных нарушений.

Геофизические профили в северной части тектонической депрессии (рис. 4, 9) пересекают последовательно с запада на восток поверхность 1-го уровня (пойменную равнину), а также 3-й и 2-й террасовидные уровни. Судя по установленным выше временным рамкам, эти поверхности сформировались в постледниковое время. Однако наличие мореноподобных осадков в толщах 2-го и 3-го уровней свидетельствует об их цокольном характере, с голоценовым переывом более древних отложений и бассейновых песков только в верхней части. Что касается пойменного уровня, то здесь отложения достаточно однородные, имеют аномальную мощность (10–20 м) и заполняют узкие депрессии в коренном цоколе, ложась непосредственно на фундамент.

В целом разрез закономерно изменяется с запада на восток: от резких глубоких провалов, сопряженных с крупными нарушениями на западе, к средней части с малоамплитудными разрывами, не нарушающими кардинально общего стиля горизонтально-слоистой толщи, и к восточной части без ощутимых разрывных деформаций. Эта картина вполне отвечает установленной по морфологическим признакам иерархической структуре тектонических нарушений (рис. 7). На западе узкие и глубокие депрессии в коренном ложе сопряжены с основными ветвями Имандра-Колвицкого разлома (I-1-1 и I-2-1). В центральной части разрывы меньшей амплитуды связаны с небольшими разнонаправленными структурами. А в восточной части отсутствие нарушений объясняется, с одной стороны, общим снижением плотности разрывов, а с другой — с их ориентировкой вдоль борта депрессии по долине р. Верхняя Лувеньга и, соответственно, параллельно геофизическому профилю.

Судя по отсутствию подстилающих отложений под аллювиально-болотными (пески с торфом) отложениями приразломных депрессий, их заполнение произошло в результате смещений по нарушениям основных ветвей Имандра-Колвицкого разлома, возможно, во время или непосредственно после сейсмогенной активизации. Вероятный период этих смещений можно оценить диапазоном от ≈ 12.5 – 14.9 тыс.л.н. (возраст сейсмогенно деформированных флювиогляциальных отложений) до ≈ 10.3 – 10.6 тыс.л.н. (возраст начала накопления илов в озере Уросиха (Николаева, Лаврова, 2018).

Амплитуда вертикальных смещений по основной ветви Имандра-Колвицкого разлома, по-видимому, сопоставима с глубиной погребенных депрессий, достигая первых метров или их десятков.

В соотношении с субаквальным рельефом озер Уросиха и Ср. Лувеньгское (рис. 3) участки выделенных на радарограммах (рис. 8) сейсмогенных рвов, заполненных переотложенным материалом, сопряжены с линейными ложбинами и уступами, интерпретированными как участки активизированных тектонических нарушений (рис. 7) — I-1-4 (рис. 8а); I-1-1 и I-2-1 (рис. 8б); I-2-2 (рис. 8в). В то же время часть морфологически выраженных нарушений на радарограммах четко не идентифицируется. На наш взгляд, это связано с несколькими причинами. Поскольку тектоническая депрессия сформирована в процессе многоэтапного тектонического обновления, то возможно, что часть разрывных нарушений на последниковом этапе не активизирована и представлена только зонами селективной денудации без тектонических смещений, затрагивающих позднеледниковый и голоценовый чехол. Но, с другой стороны, очевидным представляется сочетание двух причин: а) недостаток глубинности и потеря радиосигнала в ряде случаев; б) расположение активных нарушений ниже поверхностного ненарушенного слоя отложений, либо препятствующего проникновению радиосигнала. В том числе, с большой долей вероятности ветвь разлома I-2-1, пересекающая оз. Уросиха в наиболее глубокой части, перекрыта взмученными и разуплотненными глинистыми осадками (рис. 8а), дезинтегрированными именно в результате активизации этой тектонической структуры. По-видимому, эта же ветвь прослеживается в котловине оз. Ср. Лувеньгское в виде крутого уступа, некомпенсированного осадконакоплением. Заполнение приразломной впадины здесь двучленное: нижняя часть — глубокий и узкий карман (желоб), заполненный нестратифицированной толщей, а верхняя — параллельно-слоистая толща озерных осадков. Это строение соответствует центральной котловине оз. Уросиха, где нарушенная толща перекрыта донными озерными отложениями, датированными в подошве 10.3 тыс.л.н. (Николаева, Лаврова, 2021). Кроме того, что эта зона является активизированной в позднеледниковье, но не оживлявшейся в голоцене. Сопоставление ее выраженности в разрезе с расположенной в непосредственной близости к западу ветвью I-1-4 (рис. 8а) может указывать на более позднюю активизацию последней, поскольку над ней отсутствует соответствующий чехол ненарушенных голоценовых осадков. Однако этот вопрос требует дальнейшего изучения.

В результате проведенных комплексных геолого-геоморфологических, палеосейсмических и геофизических исследований на основе детального анализа (а) *рельефа* по совмещенной субаквальной и субаэральной цифровой модели рельефа и (б) *подстилающего субстрата* по геофизическим профилям установлена активизированная в последниковое время блоковая структура, проявляющаяся в характере поверхности фундамента, рыхлых отложениях, рельефе и сейсмогенных деформациях на поверхности и в толще отложений в четких пространственных взаимоотношениях.

Главные элементы деформации поверхности фундамента, блокоразделы, аномальные участки четвертичного чехла соответствуют основным элементам структуры Имандра-Колвицкой разломной зоны. Иерархия установленных нарушений отвечает пространственной концентрации сейсмогенных деформаций в рельефе и зонах максимальных трансформаций осадочного чехла и дифференцированности поверхности фундамента.

Судя по соотношению деформированных толщ с их геоморфологической позицией и установленным возрастом сейсмогенно-деформированных позднеледниковых флювиогляциальных отложений и постсейсмического накопления озерных осадков, вероятный период максимальной последниковой активизации Имандра-Колвицкого разлома ограничен временными рамками 14.9–10.3 тыс.л.н. Заполнение сейсморов свидетельствует, что вертикальные тектонические смещения в этот временной интервал достигали 2–4.5 м, но, опираясь на высоты приразломных уступов, некомпенсированных постсейсмогенной аккумуляцией, мы можем говорить и о том, что они превышали 7–10 м.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 23-27-00205.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н. и др. (2012) Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к “Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий” масштаба 1:1500000). М.: ГЕОС. 104 с.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г., Прижигловский Е.С. (2017). База данных активных разломов Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 8. № 4. С. 711–736.
<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
- Бричёва С.С., Деев Е.В., Сафронов О.В. и др. (2024) Строение поверхностных разрывов палеоземлетрясений в зоне Кубадринского разлома (Горный Алтай)

- по данным георадиолокации. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. Т. 69. № 2. С. 303–320.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.205>
- Государственная геологическая карта РФ (нов. серия). Карта четвертичных образований. Лист Q-(35)-37 (Кировск). Масштаб 1:1000000. (2003). Под ред. Е.П. Зарриной. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 1 л.
- Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий. Масштаб 1:8000000. (1987). Под ред. В.Г. Трифонова. М.: ГИН. 48 с.
- Карта геоморфолого-неотектонического районирования Нечерноземной зоны РСФСР масштаба 1:1500000. (1980). Гл. ред. В.И. Бабак. М.: Мингео РСФСР–МВ и ССО СССР — МГУ. 4 л.
- Карта новейшей тектоники Северной Евразии. Масштаб: 1:5000000. (1997). Под ред. А.Ф. Грачева. М.: ВИМС МПР России, ОИФЗ РАН. 1 л.
- Кошечкин Б.И. (1979) Голоценовая тектоника восточной части Балтийского щита. Л.: Наука. 109 с.
- Колодяжный С.Ю., Балуев А.С., Зыков Д.С. (2019) Структура и эволюция северо-запада Беломорско-Северодвинской зоны сдвига в позднем протерозое и фанерозое (Восточно-Европейская платформа). *Геотектоника*. № 1. С. 62–86
<https://doi.org/10.31857/s0016-853x2019162-86>
- Кратц К.О., Глебовицкий В.А., Былинский Р.В. и др. (1978) Земная кора восточной части Балтийского щита. Л.: Наука. 231 с.
- Николаев Н.И., Бабак В.И., Медянцев А.И. (1967) Вопросы неотектоники Балтийского щита и норвежских каледонид. *Советская геология*. № 3. С. 3–23.
- Николаева С.Б. (2001) Палеосейсмические проявления в северо-восточной части Балтийского щита и их геолого-тектоническая позиция. *Геоморфология*. № 4. С. 66–74.
- Николаева С.Б., Евзеров В.Я. (2018) К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. № 1. С. 5–14.
- Николаева С.Б., Лаврова Н.Б. (2021) Палеоклиматические и природно-динамические изменения окружающей среды в голоцене на юге Мурманской области: результаты изучения донных осадков озер в районе Лувеньгских Тундр. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. № 18. С. 310–315.
<https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.058>
- Николаева С.Б., Лаврова Н.Б., Денисов Д.Б. (2017) Катастрофическое событие голоцена в донных осадках озер Кольского полуострова (СВ Фенноскандинавского щита). *Доклады академии наук*. Т. 473. № 1. С. 88–92.
<https://doi.org/10.7868/s0869565217070209>
- Николаева С.Б., Толстобров Д.С., Вашков А.А. (2020) Палеосейсмогеологические исследования в европейской субарктике (Кольский регион): полевые экспедиционные работы 2018–2020 гг. В сб.: *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. Вып. 7. С. 129–133.
<https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10719>
- Родионов А.И., Николаева С.Б., Рязанцев П.А. (2018) Оценка возможностей георадиолокации при изучении сейсмогенных нарушений и деформаций в донных осадках (на примере озера Уполокшское, северо-восток Фенноскандинавского щита). *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 9. № 4. С. 1–15.
- Рязанцев П.А. (2015) Оценка трещиноватости скального массива на основе моделей электротомографии. *Геофизика*. № 1. С. 41–50.
- Старовойтов А.В. (2023) Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие по курсу “Георадиолокация”. М.: КДУ, Добросвет. 258 с.
- Стрелков С.А. (1973) Морфоструктуры северо-восточной части Балтийского щита и основные закономерности их формирования. В сб.: *Палеогеография и морфоструктуры Кольского полуострова*. Л.: Наука. С. 5–80.
- Стрелков С.А., Евзеров В.Я., Кошечкин Б.И. и др. (1976) История формирования рельефа и рыхлых отложений северо-восточной части Балтийского щита. Л.: Наука. 164 с.
- Шварев С.В. (2003) Последледниковые тектонические движения и формирование террас оз. Имандра (Кольский полуостров). *Геоморфология*. № 4. С. 97–105.
- Шварев С.В. (2022) Морфотектоника, сейсмичность и экзогенные процессы Кольского полуострова. *Геология и геофизика*. Т. 63, № 8. С. 1135–1152.
<https://doi.org/10.15372/gig2021126>
- Шварев С.В., Николаева С.Б., Королева А.О. (2021) Морфологические проявления постледниковой сейсмической активности Имандра-Колвицкого активного разлома в Лувеньгской очаговой зоне (Мурманская область). *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. № 18. С. 425–429.
- Шварев С.В., Бондарь И.В., Гуринов А.Л. и др. (2023) Комплексные геолого-геоморфологические, тектонофизические и геофизические исследования на озере Среднее Лувеньгское (юго-запад Кольского полуострова). В сб.: *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований*. Т. 10. Вып. 10. СПб.: ВНИИ Океангеология. С. 292–298.
- Шварев С.В., Бондарь И.В., Гуринов А.Л. и др. (2024a) Комплексные исследования тектонических деформаций в зоне Имандра-Колвицкого активизированного разлома (Кольский полуостров). *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. № 21. С. 259–268.
- Шварев С.В., Николаева С.Б., Бондарь И.В. и др. (2024b) Морфотектоника Имандра-Колвицкого разлома и параметры очаговой зоны палеоземлетрясений в Лувеньгских Тундрах (Кольский полуостров). *Вопросы инженерной сейсмологии*. Т. 51. № 2. С. 74–101.
<https://doi.org/10.21455/VIS2024.2-5>
- Шевченко Н.В., Кузнецов Д.Е., Ермолов А.А. (2007) Сейсмотектонические проявления в рельефе бере-

- гов Белого моря. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. № 4. С. 44–48.
- Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C. et al. (2021) Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. Vol. 12. Iss. 11. P. 2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
- Malehmir A., Andersson M., Mehta S. et al. (2016) Post-glacial reactivation of the Bollnäs fault, central Sweden—a multidisciplinary geophysical investigation. *Solid Earth*. Vol. 7. Iss. 2. P. 509–527. <https://doi.org/10.5194/se-7-509-2016>
- Markovaara-Koivisto M., Ojala A.E., Mattila J. et al. (2020) Geomorphological evidence of paleoseismicity: Surficial and underground structures of Pasmajärvi postglacial fault. *Earth Surf. Processes Landforms*. Vol. 45. Iss. 12. P. 3011–3024. <https://doi.org/10.1002/esp.4948>
- Mattila J., Ojala A.E.K., Ruskeeniemi T. et al. (2019) Evidence of multiple slip events on postglacial faults in northern Fennoscandia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 215. P. 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.05.022>
- Ojala Antti E.K., Mattila Jussi, Ruskeeniemi Timo et al. (2017). Postglacial seismic activity along the Isovaara-Riikonkumpu fault complex. *Global and Planetary Change*. Vol. 157. P. 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.08.015>
- Ojala A.E.K., Mattila J., Middleton M. et al. (2020) Earthquake-induced deformation structures in glacial sediments — evidence on fault reactivation and instability at the Vaalajärvi fault in northern Fennoscandia. *J. of Seismology*. Vol. 24. No. 3. P. 549–571. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09915-6>
- Rønning J.S., Ganerød G.V., Dalsegg E. et al. (2014) Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model. *Bull. Eng. Geol. Environ.* Vol. 73. P. 1225–1244. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0555-7>
- Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S. et al. (2022) The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*. Vol. 14. Iss. 10. P. 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>

FEATURES OF POSTGLACIAL ACTIVITY OF THE IMANDRA-KOLVITSKY FAULT (KOLA PENINSULA) ACCORDING TO GEOMORPHOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA¹

S. V. Shvarev^{a,b,#}, A. L. Gurinov^a, P. A. Ryazantsev^c,
N. N. Lugovoy^{a,d}, A. O. Koroleva^{a, b}, and I. V. Bondar^b

^a Institute of Geography of the RAS, Moscow, Russia

^b Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia

^c Institute of Geology of the Karelian Scientific Center of the RAS, Petrozavodsk, Russia

^d Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

[#] E-mail: shvarev@igras.ru

The article is devoted to the study of the postglacial tectonic activity of the Imandra-Kolvitsky fault in the south-west of the Kola Peninsula based on the synthesis of signs of seismogenic deformations in the relief, bedrock of the crystalline basement and loose sediments. The studied area is located in a through-tectonic depression, in the low-mountain Kandalaksha Tundra massif, occupied by the basin of Lake Sredne Luvengskoye. Previously, a focus of paleoearthquakes was established here due to the presence of seismic deformations of various types and ages. The tasks of the work included the creation of a combined detailed digital relief model in the lake bed and on the coastal territory; analysis of the structure of the relief and the distribution of tectonic deformations on the surface; analysis of the structure and hierarchy of segments of the Imandra-Kolvitsky fault and minor ruptures; analysis of the deep structure of the quaternary cover and its relationship with the relief of the basement with the identification of zones of faults and deformation anomalies. The main methods used were geological and geomorphological (morphogenetic, morphotectonic, morphodynamic, paleoseismic) and geophysical (ground penetration radar (GPR) and electrotomography (ET)). The spatial and deep structure of the segments of the Imandra-Kolvitsky fault in relation to deformations of sediments and the surface of the basement and the probable period of maximum activity of 14.9–10.3 thousand years have been determined.

Keywords: seismogenic deformations; postglacial tectonic activation; digital elevation model (DEM); bathymetric survey; ground penetration radar (GPR); electrotomography (ET)

¹ For citation: Shvarev S.V., Gurinov A.L., Ryazantsev P.A., Lugovoy N.N., Koroleva A.O., and Bondar I.V. (2025) Features of postglacial activity of the Imandra-Kolvitsky fault (Kola Peninsula) according to geomorphological and geophysical data. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 3. P. 397–417 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/S2949178925030044>

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project 23-27-00205.

REFERENCES

- Babak V.I. (Ed.). (1980) Karta geomorfologo-neotektonicheskogo raionirovaniya Nechernozemnoi zony RSFSR mashtaba 1:1500000 (Map of the geomorphological-neotectonic zoning of the Non-Chernozem zone of the RSFSR in scale 1:1500000). Moscow: Mingeo RSFSR—MB i SSO SSSR — MGU (Publ.). 4 p (in Russ).
- Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G. (2017) Database of active faults of Eurasia. *Geodinamika i tektonofizika*. Vol. 8. No. 4. P. 711–736 (in Russ). <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
- Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Terekhov E.N., Przhivalgovskij E.S. (2012) Tektonika Belogo morya i prilegayushchikh territorii (Ob"yasnitel'naya zapiska k "Tektonicheskoi karte Belogo morya i prilegayushchikh territorii" masshtaba 1:1500000) (Tectonics of the White Sea and adjacent territories (Explanatory Note to the "Tectonic Map of the White Sea and Adjacent Territories". Scale 1:1500000)). Moscow: GEOS (Publ.). 104 p (in Russ).
- Brichyova S.S., Deev E.V., Safronov O.V., Entin A.L. (2024) The structure of surface fractures of paleoearthquakes in the Kubadrinsky fault zone (Gornyy Altai) according to georadiolocation data. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. Vol. 69. No. 2. P. 303–320 (in Russ). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.205>
- Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C. et al. (2021) Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. Vol. 12. Iss. 11. P. 2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
- Grachev A.F. (Ed.). (1997) Karta noveishei tektoniki Severnoi Evrazii. Masshtab: 1:5000000. (Map of the neotectonics of Northern Eurasia. Scale: 1:5000000). Moscow: VIMS MPR Rossii, OIFZ RAN (Publ.). 1 p (in Russ).
- Kolodyazhnyy S. Yu., Baluev A.S., Zykov D.S. (2019) Structure and evolution of Belomorian-Severodvinsk shear zone in the Late Proterozoic and Phanerozoic, East-European Platform. *Geotektonika*. No. 1. P. 62–86 (in Russ). <https://doi.org/10.31857/s0016-853x2019162-86>
- Koshechkin B.I. (1979) Golotsenovaya tektonika vostochnoi chasti Baltiiskogo shchita (Holocene tectonics of the eastern part of the Baltic Shield). Leningrad: Nauka (Publ.). 109 p (in Russ).
- Kratk K.O., Glebovickij V.A., Bylinskij R.V. et al. (1978) Zemnaya kora vostochnoi chasti Baltiiskogo shchita (The Earth's crust of the eastern part of the Baltic Shield). Leningrad: Nauka (Publ.). 231 p (in Russ).
- Malehmir A., Andersson M., Mehta S. et al. (2016) Post-glacial reactivation of the Bollnäs fault, central Sweden—a multidisciplinary geophysical investigation. *Solid Earth*. Vol. 7. Iss. 2. P. 509–527. <https://doi.org/10.5194/se-7-509-2016>
- Markovaara-Koivisto M., Ojala A.E., Mattila J. et al. (2020) Geomorphological evidence of paleoseismicity: Surficial and underground structures of Pasmajärvi postglacial fault. *Earth Surf. Processes Landforms*. Vol. 45. Iss. 12. P. 3011–3024. <https://doi.org/10.1002/esp.4948>
- Mattila J., Ojala A.E.K., Ruskeenieni T. et al. (2019) Evidence of multiple slip events on postglacial faults in northern Fennoscandia. *Quat. Sci. Rev.* Vol. 215. P. 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.05.022>
- Nikolaeva S.B. (2001) Paleoseismic manifestations in the northeastern part of the Baltic Shield and their geological and tectonic position. *Geomorfologiya*. No. 4. P. 66–74 (in Russ).
- Nikolaev N.I., Babak V.I., Medyanecv A.I. (1967) Issues of neotectonics of the Baltic Shield and the Norwegian Caledonides. *Sovetskaya geologiya*. No. 3. P. 3–23 (in Russ).
- Nikolaeva S.B., Evzerov V. Ya. (2018) On the geodynamics of the Kola region in the Late Pleistocene and Holocene: a review and research results. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. No. 1. P. 5–14 (in Russ).
- Nikolaeva S.B., Lavrova N.B. (2021) Paleoclimatic and natural-dynamic environmental changes in the Holocene in the south of the Murmansk region: results of studying bottom sediments of lakes in the Luvenga Tundra region. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNC RAN*. No. 18. P. 310–315 (in Russ). <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.058>
- Nikolaeva S.B., Lavrova N.B., Denisov D.B. (2017) A Catastrophic Holocene Event in the Lake Bottom Sediments of the Kola Region (Northeastern Fennoscandian Shield). *Doklady Earth Sci.* Vol. 473. No. 1. P. 308–312. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17030072>
- Nikolaeva S.B., Tolstobrov D.S., Vashkov A.A. (2020) Paleoseismogeological research in the European Subarctic (Kola region): field expeditionary work 2018–2020. In: *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii*. Vol. 7. P. 129–133 (in Russ). <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10719>
- Ojala A.E.K., Mattila J., Middleton M. et al. (2020) Earthquake-induced deformation structures in glacial sediments — evidence on fault reactivation and instability at the Vaalajärvi fault in northern Fennoscandia. *J. of Seismology*. Vol. 24. No. 3. P. 549–571. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09915-6>
- Ojala A.E.K., Mattila J., Ruskeenieni T. et al. (2017) Post-glacial seismic activity along the Isovaara—Riikonkumpu fault complex. *Global and Planetary Change*. Vol. 157. P. 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.08.015>
- Rodionov A.I., Nikolaeva S.B., Ryazancev P.A. (2018) Assessment of the possibilities of georadiolocation in the study of seismogenic disturbances and deformations in bottom sediments (on the example of Lake Uplokshskoye, northeast of the Fennoscandian Shield). *Geodinamika i tektonofizika*. Vol. 9. No. 4. P. 1–15 (in Russ).
- Rønning J.S., Ganerød G.V., Dalsegg E. et al. (2014) Resistivity mapping as a tool for identification and

- characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model. *Bull. Eng. Geol. Environ.* Vol. 73. P. 1225–1244. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0555-7>
- Ryazancev P.A. (2015) Assessment of fracturing of the rock mass based on electrotomography models. *Geofizika*. No. 1. P. 41–50 (in Russ).
- Shevchenko N.V., Kuznecov D.E., Ermolov A.A. (2007) Seismotectonic manifestations in the relief of the shores of the White Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. No. 4. P. 44–48 (in Russ).
- Shvarev S.V. (2003) Postglacial tectonic movements and the formation of the lake Imandra terraces (Kola Peninsula). *Geomorfologiya*. No. 4. P. 97–105 (in Russ).
- Shvarev S.V. (2022) Morphotectonics, seismicity, and exogenous processes of the Kola Peninsula. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 63. No. 8. P. 940–954. <https://doi.org/10.2113/rgg20204310>
- Shvarev S.V., Bondar' I.V., Gurinov A.L. et al. (2023) Comprehensive geological, geomorphological, tectono-physical, and geophysical studies on Lake Srednee Luvengskoye (southwest of the Kola Peninsula). In: *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii. Materialy ezhegodnoi konferentsii po rezul'tatam ekspeditsionnykh issledovaniy*. Vol. 10. Iss. 10. Sankt-Peterburg: VNIIOkeangeologiya (Publ.). P. 292–298 (in Russ).
- Shvarev S.V., Bondar' I.V., Gurinov A.L. et al. (2024a) Comprehensive studies of tectonic deformations in the Imandra-Kolvitsky activated fault zone (Kola Peninsula). *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNC RAN*. No. 21. P. 259–268 (in Russ).
- Shvarev S.V., Nikolaeva S.B., Bondar' I.V. et al. (2024b) Morphotectonics of the Imandra-Kolvitsky Fault and parameters of the focal zone of paleoearthquakes in the Luvenga Tundra (Kola Peninsula). *Voprosy inzhenernoi seismologii*. Vol. 51. No. 2. P. 74–101 (in Russ). <https://doi.org/10.21455/VIS2024.2-5>
- Shvarev S.V., Nikolaeva S.B., Koroleva A.O. (2021) Morphological manifestations of postglacial seismic activity of the Imandra-Kolvitsky active fault in the Luvenga focal zone (Murmansk region). *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNC RAN*. No. 18. P. 425–429 (in Russ).
- Starovojtov A.V. (2023) Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh: uchebnoe posobie po kursu “Georadiolokatsiya” (Interpretation of georadiolocation data: a textbook for the course “Georadiolocation”). Moscow: KDU; Dobrosvet (Publ.). 258 p (in Russ).
- Strelkov S.A. (1973) Morphostructures of the northeastern part of the Baltic Shield and the main patterns of their formation. In: *Paleogeografiya i morfostruktury Kol'skogo poluostrova*. Leningrad: Nauka (Publ.). P. 5–80 (in Russ).
- Strelkov S.A., Evzerov V. Ya., Koshechkin B.I. et al. (1976) Istoriya formirovaniya rel'efa i rykhlykh otlozhenii severo-vostochnoi chasti Baltiiskogo shchita (The history of the formation of relief and loose sediments of the northeastern part of the Baltic Shield). Leningrad: Nauka (Publ.). 164 p (in Russ).
- Trifonov V.G. (Ed.). (1987) Karta aktivnykh razlomov SSSR i sopredel'nykh territorii. Mashtab 1:8000000 (Map of active faults of the USSR and adjacent territories. Scale 1:8000000). Moscow: GIN (Publ.). 48 p (in Russ).
- Zarrina E.P. (Ed.). (2003) Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF (nov. seriya). Karta chetvertichnykh obrazovaniy. List Q-(35)-37 (Kirovsk). Masshtab 1:1000000 (The State Geological Map of the Russian Federation (new series). Map of quaternary formations. Sheet Q-(35)-37 (Kirovsk)). Sankt-Peterburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI (Publ.). 1 p (in Russ).
- Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S. et al. (2022) The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Sci. Data*. Vol. 14. Iss. 10. P. 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>