

**TRACES OF SEISMIC ACTIVITY IN THE LAKE BOTTOM SEDIMENTS OF EASTERN FENNOSCANDIA**S.B. Nikolaeva  

Geological Institute of the Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, 14 Fersman St, Apatity 184209, Russia

ABSTRACT. This paper presents the results of a study on traces of ancient earthquakes in the lake bottom sediments of eastern Fennoscandia (Kola region and Karelia). Based on the sediment cores from six lake basins located within large active structures of the region, consideration is being given to the most typical features of sedimentation affected by neotectonic movements of the Earth's crust. The data presented here provide lithological-stratigraphical, paleobotanical and chronometrical evidence for lakes. The paper causes and mechanisms of formation of seismic structures in bottom sediments and their distinction from deformations of another origin.

Generalized earthquake history in provided an opportunity to organize the existing information on the time of paleoearthquake manifestations and distinguish three active periods in paleoseismicity. These are Late Glaciation-Early Holocene marked by the most rapid uplift after the retreat of the last ice sheet (13500–8100 cal yr BP), Middle Holocene (6800–6600 cal yr BP), and Late Holocene (3100–200 cal yr BP). The results of this study showed that the number and intensity of seismic events changed at different stages of sedimentation. Since the Younger Dryas, fault zones (or their segments) have been repeatedly activated. Combined with the data on paleoseismicity in adjacent parts of Fennoscandia, our studies indicate an irregular pattern of the Late Pleistocene-Holocene seismic activity in stable areas formerly covered by glaciers. The obtained data make further adjustments to the neogeodynamic and seismic estimates of intraplate areas.

KEYWORDS: earthquake-induced deformation; earthquake; bottom sediment; lake; fault; Fennoscandian Shield; Kola region; Karelia; Holocene

FUNDING: The research was carried out under research topics of the Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (project AAAA-A19-119100290145-3).

RESEARCH ARTICLE

Received: December 10, 2021

Revised: February 8, 2022

Accepted: February 14, 2022

Correspondence: Svetlana B. Nikolaeva, nikolaeva@geoksc.apatity.ru

FOR CITATION: Nikolaeva S.B., 2022. Traces of Seismic Activity in the Lake Bottom Sediments of Eastern Fennoscandia. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0676. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0676

СЛЕДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ОЗЕР ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

С.Б. Николаева

Геологический институт КНЦ РАН, 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлен обзор полученных в последние годы новых данных о следах древних землетрясений в донных осадках озер Восточной Фенноскандии (Кольский регион и Карелия). На примерах изучения осадочных кернов из шести озерных котловин, расположенных в зонах крупных активных структур региона, рассматриваются наиболее характерные особенности седиментации осадков в условиях новейших тектонических перемещений земной коры. Приводятся литолого-стратиграфические, палеоботанические, хронометрические данные по озерам. Обсуждаются различные причины и механизмы образования сейсмически индуцированных структур в донных осадках и признаки отличия их от деформаций, образованных иными процессами.

Обобщенные сведения о сейсмическом прошлом Карело-Кольского региона упорядочили ранее существующую информацию о времени проявления палеоземлетрясений: удалось выделить три активных возрастных рубежа. Это периоды позднеледникового – начала голоцена, ознаменовавшиеся наиболее быстрым поднятием территории после исчезновения последнего ледникового покрова (13500–8100 кал.л.н.), среднего (6800–6600 кал.л.н.) и позднего (3100–200 кал.л.н.) голоцена. Результаты исследований показали, что количество и интенсивность сейсмических событий менялись на разных этапах накопления осадочной толщи. Начиная с позднего дриаса фиксируется неоднократная активизация разломных зон (или их сегментов). В сочетании с данными о палеосейсмичности в смежных районах Фенноскандии наши исследования указывают на неравномерное проявление позднеплейстоцен-голоценовой сейсмической активности стабильных территорий, прежде покрывавшихся оледенениями. Полученные данные вносят дополнительные коррективы в оценку новейшей геодинамики и сейсмичности внутриплатформенных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмодетформация; землетрясение; донные осадки; озеро; разлом; Фенноскандинавский щит; Кольский регион; Карелия; голоцен

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках госзадания по теме НИР Геологического института КНЦ РАН АААА-А19-119100290145-3.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фенноскандинавский (Балтийский) кристаллический щит в настоящее время рассматривают как часть крупной Скандинавской сеймотектонической провинции с устойчивой, постгляциоизостатической, затухающей сейсмической активностью на уровне слабых и микроземлетрясений, с редкими сильными землетрясениями [Stepanov, 2001; Yudakhin et al., 2003]. Невысокий уровень инструментально регистрируемых землетрясений долгое время служил основанием для того, чтобы представлять российскую часть Фенноскандии (Мурманская область и Карелия) на картах сейсмического районирования практически асейсмичной. Положение стало меняться в начале 90-х годов, когда во всей Фенноскандии стали обнаруживаться следы сильных голоценовых землетрясений [Lagerbäck, 1992; Lukashov, 1995; Nikolaeva, 2001; Mörner, 2004; Lagerbäck, Sundh, 2008; Olesen et al., 2013; Sutinen et al., 2018; Smith et al., 2014; Shvarev, Rodkin, 2018; Nikolaeva et al., 2021b, 2021c]. Результаты этих и других современных исследований стали составной частью опубликованной в 2020 г. международной базы данных «International database of Glacially Induced Faults», в которой представлена сводка всех известных к настоящему времени поздне- и послеледниковых разломов и

связанных с ними очагов палеоземлетрясений [Munier et al., 2020].

При активно пополняющейся информации о голоценовой сейсмичности Фенноскандии вопросы определения возраста землетрясений и, следовательно, времени активизации разломов остаются все еще слабоосвещенными. Их решение имеет важное научно-практическое значение, особенно для Кольского региона, в пределах которого размещены особо ответственные объекты (АЭС, ГЭС и пр.), закрытые административно-территориальные образования, горнопромышленные предприятия.

Один из источников получения информации о возрасте голоценовых сейсмических событий – изучение донных осадков озер. Их разрезы представляют собой архивные записи климатических и природно-динамических обстановок, в том числе и различных катастрофических событий. Среди последних – цунами, сейши, подводные оползни, турбидитные течения, вызванные сейсмическим воздействием на окружающую среду. Следы землетрясений в осадочных разрезах, или «soft sediment deformation structures» (SSDS) [Seilacher, 1969; Owen, Moretti, 2011; Moretti et al., 2014], являются свидетельствами сейсмоактивности территорий в прошлом.

Первые единичные сведения о сейсмоявлениях в озерных кервах Карелии стали поступать с конца XX в., с началом развития палеосейсмологических исследований в Фенноскандии [Lukashov, 1995; Demidov et al., 1998]. К настоящему времени эти исследования расширились, наряду с изучением сейсмодетформаций в скальных породах, появились новые данные о сейсмически индуцированных структурах и в осадочном чехле, в том числе и в донных осадках озер Кольского региона [Nikolaeva et al., 2017, 2019; Tolstobrov et al., 2018, 2019]. Поскольку осадочный чехол исследуемого региона маломощен и представлен в основном продуктами ледникового ряда, бедного органикой, донные осадки озер вызывают наибольший интерес, а богатое содержание органики в них открывает хорошие перспективы для датирования сейсмических событий в отличие от сейсмодислокаций в скальных породах.

В статье представлены полученные в последние годы новые данные о следах голоценовых землетрясений в озерах. На примерах изучения осадочных кернов из шести озерных котловин, расположенных в зонах крупных активных структур региона: линеамента Карпинского, Кандалакшского грабена Белого моря, неотектонической Имандровской впадины и Западно-Онежского сейсмолинеамента, рассматриваются наиболее характерные особенности седиментации осадков в условиях новейших тектонических перемещений земной коры. При литолого-стратиграфическом анализе особое внимание уделяется критическому рассмотрению различных механизмов образования SSDS и выделению именно сейсмогенных признаков в отложениях. В сочетании с опубликованными данными о возрасте палеоземлетрясений в Западной Фенноскандии – Швеции, Финляндии и Норвегии – в работе обсуждаются причины неравномерного проявления позднеплейстоцен-голоценовой сейсмической активности стабильных территорий, прежде покрывавшихся оледенениями.

2. АКТИВНЫЕ ТЕКТНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Фенноскандинавский (Балтийский) щит расположен на северо-западе Восточно-Европейской платформы и представляет собой крупный выступ древнего архей-протерозойского фундамента. Эта территория отличается неоднородностью, отражающейся в отчетливом блоковом строении, изменении мощности коры, характере магнитных и гравитационных полей, что в значительной мере определяет новейший и современный режим литосферы региона [Yudakhin et al., 2003]. Одна из особенностей региона – затухающее гляциоизостатическое поднятие континента, скорость и амплитуда которого в разных районах региона были различными [Stroeven et al., 2016]. Такая тенденция сохранялась на протяжении конца позднего плейстоцена и всего голоцена. В периоды оледенений и дегляциации региона в земной коре возникали

напряжения, которые могли реализовываться как землетрясения.

На рис. 1, а, показаны основные сейсмолинеаменты и активные разломы Карело-Кольского региона [Nikonov, Shvarev, 2015; Nikolaeva et al., 2021b]. Наиболее протяженные и крупные зоны разломов ограничивают с двух сторон Кольскую глыбу и расположены в пределах акваторий Белого и Баренцева морей. Это сбросодвиг, известный как линеамент Карпинского на севере, и сбросы, сбросодвиги Кандалакшского грабена в Беломорском бассейне на юге [Trifonov, 1999; Baluev et al., 2012]. Эти разломы были заложены в докембрии и неоднократно оживлялись в последующие эпохи тектонической активизации, в том числе и в голоцене. На территории Карелии по протяженности выделяется Западно-Онежский (Воттоваара-Гирвасский) сейсмолинеамент [Shvarev, Rodkin, 2018]. Структуры меньшего ранга совпадают с неотектонической впадиной озера Имандра и палеозойским массивом Хибинских гор во внутренней части Кольского региона. Оперяющие разломы более низких порядков сопряжены с каждой из вышеперечисленных зон.

Зона Кандалакшского грабена – один из главных сейсмолинеаментов на северо-западе Фенноскандинавского щита. В акватории Белого моря располагается эпицентр сильнейшего исторического землетрясения 1627 г. с интенсивностью (I_0)=VIII баллов и магнитудой $M=6.5$ [Sharov et al., 2007]. Линеамент Карпинского, относящийся к Мурманской сейсмогенной зоне, маркируется эпицентрами современных, исторических и палеоземлетрясений [Sharov et al., 2007; Nikonov, Shvarev, 2015]. Слабые сейсмические события с $M=2-4$ регистрируются и в настоящее время, подтверждая продолжающуюся тектоническую активность этих зон.

Проявления сильных ($\geq VIII$ баллов) поздне- и послеледниковых землетрясений установлены к настоящему времени как в пределах линейных зон, так и вне их. На рис. 1, б, показаны области концентрации остаточных деформаций земной коры: очевидные сгущения наблюдаются в западной части, характеризующейся наиболее интенсивной величиной суммарных поздне- и послеледниковых поднятий по сравнению с восточной частью [Nikolaeva, Evzerov, 2018], при этом скорости поднятия территории повсеместно убывали во времени.

Котловины изученных озер расположены в пределах четырех участков, показанных на рис. 1, а. Участок I находится в районе Кольского фиорда побережья Баренцева моря и тяготеет к тектонической границе первого порядка между Баренцевой плитой и Балтийским кристаллическим щитом. Участок II относится к Имандровской неотектонической депрессии. Впадина озера, совпадающая с зоной длительно живущего разлома, обусловлена сопряжением новейших разломов субмеридионального и субширотного простираения. Участок III примыкает к северному борту активного Кандалакшского грабена. Участок IV относится к центральной части горы Воттоваара ($h=417.2$ м), одной из наиболее высоких возвышенностей Карелии, и расположен в

зоне Западно-Онежского (Воттоваара-Гирвас) сейсмолинеамента [Shvarev, Rodkin, 2018].

Все исследуемые озера находятся в хорошо обнаженной местности, где на поверхность выходят метаморфизованные докембрийские породы, местами перекрытые маломощным осадочным чехлом. Это в основном морены, флювиогляциальные, ледниково-морские, лимногляциальные осадки, реже морские, озерные, аллювиальные и биогенные отложения [Niemelä et al., 1993]. Сочетание различных форм – доледниковой денудационно-тектонической, структурно-тектонической,

ледниковой эрозионной и аккумулятивной – определяет современный рельеф участков.

При гляциоизостатическом поднятии региона происходила изоляция малых и средних озерных бассейнов от морей (Баренцево и Белое) или от крупных внутренних палеоводоемов – в центральных частях территории (озер Имандра, Ладожское и Онежское). Образование большинства озер Карело-Кольского региона и время начала накопления органики в них относят ко времени окончания дегляциации территории ~13000–10000 лет назад [Evzerov et al., 2010; Stroeven et al., 2016].

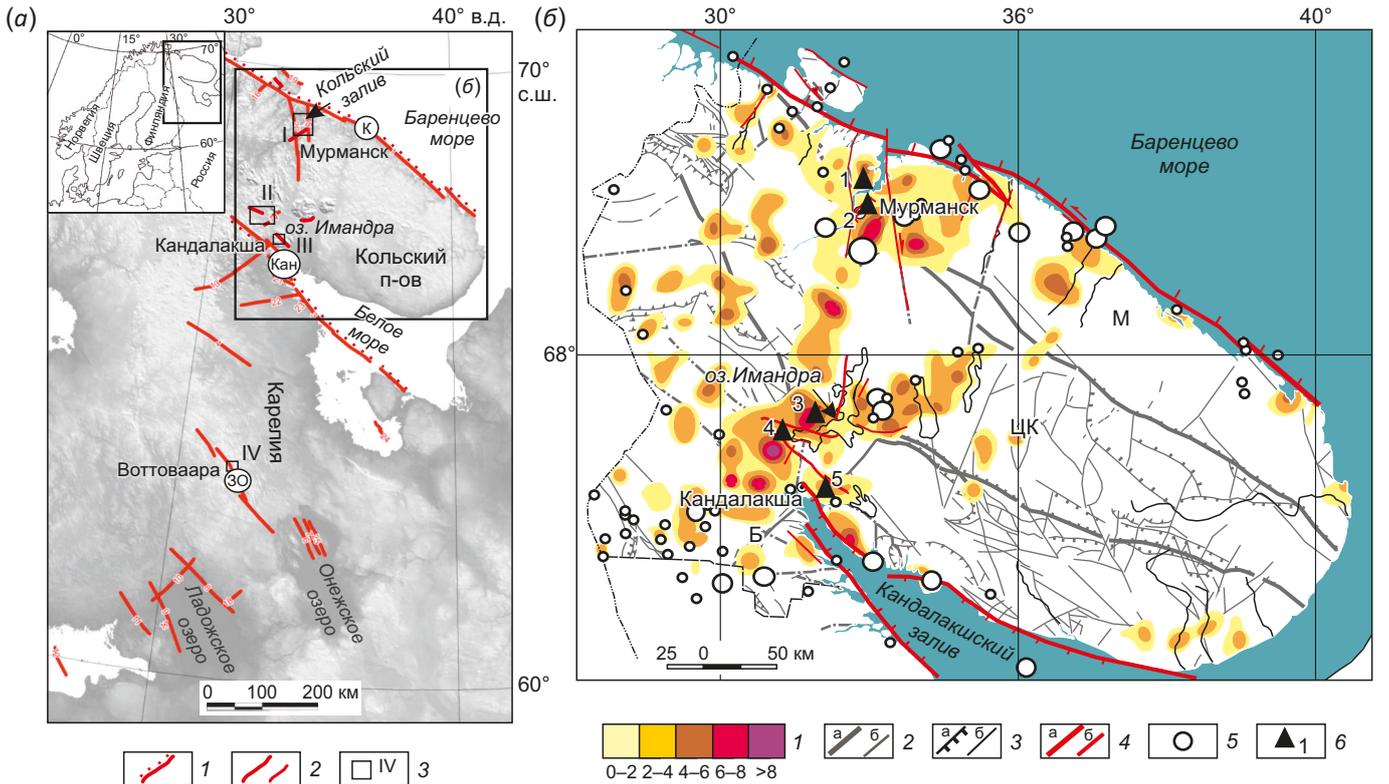


Рис. 1. Активные разломы Восточной Фенноскандии (по [Nikonov, Shvarev, 2015; Nikolaeva et al., 2021b], с дополнениями) и участки расположения озерных котловин, обсуждаемых в тексте (а). Схема плотностей остаточных деформаций и их соотношение с новейшими структурами и движениями (б) (по [Nikolaeva, 2001], с изменениями). Цифровая модель рельефа – на основе данных GTOPO-30.

(а): 1 – главные сейсмогенные зоны; 2 – сейсмолинеаменты и локальные разломы с проявлением поздне- и послеледниковой активизации; 3 – участки работ и их номера. Обозначения: К – линеамент Карпинского, Кан – Кандалакшский грабен, 30 – Западно-Онежский сейсмолинеамент.

(б): 1 – плотности остаточных деформаций, приходящихся на ед. площади (15×15 км); 2–4 – разломы: 2 – главные (а), второстепенные (б) по [Mitrofanov, 2001], 3 – сбросы и взбросы (а), сдвиги (б), 4 – разломы с признаками активизации в позднем плейстоцене и голоцене главные (а), второстепенные (б); 5 – эпицентры землетрясений по данным КоФ ФИЦ ЕГС РАН [Asming et al., 2010]; 6 – озера, обсуждаемые в тексте: 1 – Ретинское, 2 – Скалистое, 3 – Чунское, 4 – Уполокшское, 5 – Рига-Ламбина. Геоблоки (составные террейны): М – Мурманский, ЦК – Центрально-Кольский, Б – Беломорский по [Balagansky et al., 2016].

Fig. 1. Active faults of eastern Fennoscandia [Nikonov, Shvarev, 2015; Nikolaeva et al., 2021b] with additions and locations of lake basins referred to in the present study (a). An amended diagram showing the relationship between residual deformation densities neotectonic structures and movements (b) after [Nikolaeva, 2001]. Digital elevation model based on GTOPO-30 data.

(a): 1 – major seismicogenic zones; 2 – seismic lineaments and local faults with late- and post-glacial activation; 3 – study areas and their numbers. K – Karpinsky lineament, Кан – Kandalaksha graben, 30 – West Onega seismolineament.

(b): 1 – residual deformation densities per unit area (15×15 km); 2–4 – faults: 2 – major (a), minor (b) after [Mitrofanov, 2001], 3 – normal faults and reverse faults (a), strike-slip faults (b), 4 – late glacial and postglacial faults exhibiting evidence of activation major (a), minor (b); 5 – earthquake epicenters according to the Kola Branch of Geophysical Survey RAS, after [Asming et al., 2010]; 6 – lakes referred to in the present study: 1 – Retinskoe, 2 – Skalistoe, 3 – Chuna, 4 – Upoloksha, 5 – Riga-Lambina. Geoblocks (composite terranes): M – Murmansk, ЦК – Central Kola, Б – Belomorsk, after [Balagansky et al., 2016].

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследований строилась с учетом главной цели, направленной на выявление сейсмически индуцированных структур в донных осадках озер. Работы проводились в два этапа, включающие полевые работы и лабораторные исследования.

Полевые работы. При полевых работах производилось бурение и отбор проб как в летний период с катарана, так и в зимний со льда при помощи переносного отечественного поршневого бура. Бурение проводилось до коренных пород или морены. Длина каждого керна составляла 1 м, диаметр – 54 мм, керны отбирались с перекрытием в 5–10 см. По визуальным признакам (цвет, текстура, включения, механический состав) было проведено литологическое описание. Высотное положение озера определялось по топографическим картам масштаба 1:25000.

При литологическом изучении фиксировались все типы деформаций в осадках, производился критический анализ и перебор различных механизмов их образования и выявления сейсмогенных признаков [McCalpin, Nelson, 1996]. Основное внимание было сконцентрировано на изучении деформаций в литологии осадков, резких изменений в диатомовых сообществах и спорово-пыльцевых спектрах. При обнаружении предполагаемых сейсмогенных слоев проводилось опробование. Образцы отбирались как внутри выделенного горизонта, так и в перекрывающих и подстилающих его осадках, что позволяло оценить возраст события или его нижний и верхний возрастные пределы. Пробы на диатомовый и спорово-пыльцевой анализы отбирались размером 1.0–2.0 см, на радиоуглеродное датирование – размером 7.0–10.0 см.

Лабораторные исследования. В лабораторных условиях осуществлялось радиоуглеродное датирование органического материала (гиттия, торф, древесина) и изучение микрофоссилий. Радиоуглеродное датирование проб органогенных отложений проводилось в лаборатории палеогеографии и геохронологии четвертичного периода факультета географии и геоэкологии в Санкт-Петербургском государственном университете (г. Санкт-Петербург) по методике, описанной в работе [Arslanov, 1987]. Радиоуглеродные даты были откалиброваны по календарным годам с использованием

калибровочной программы OxCal 4.4 и калибровочного графика IntCal20 [Reimer et al., 2020]. Результаты диатомового, спорово-пыльцевого анализа также были учтены. Подробная методика этих исследований опубликована в монографии [Pokrovskaya, 1966; Kosova et al., 2020].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РАБОТ

Объекты исследования – шесть озерных котловин, общая характеристика которых приведена в табл. 1. Озера 3, 4 и 6 – безымянные и на топографических картах не имеют названий, для удобства изложения мы их обозначили как Уполокшское, Чунское и Воттоваарское. Стратиграфическая корреляция разрезов основана на значениях возраста радиоуглерода, данных спорово-пыльцевого и диатомового анализа.

Более детально рассмотрим полученные материалы по бурению донных осадков озер Кольского региона, которые позволили по-новому представить обнаруживаемые деформации в озерных кернах.

4.1. Деформации в донных осадках озер Кольского региона

Озеро Ретинское (табл. 1) имеет изометричную форму и находится на расстоянии 3 км от борта Кольского залива и в 15 км к югу от береговой линии Баренцева моря (рис. 1, б). На рис. 2, а, показан разрез, в базальной части которого залегают морские алевриты и глины со щебнем и галькой (слой 1), перекрытые пресноводной гиттией (слои 2, 4–5). После освобождения территории ото льда котловина озера была занята морем. В алевритах слоя 1 преобладает в основном морская диатомовая флора, которая заметно снижается выше по разрезу. Толща гиттии формировалась уже в пресноводных условиях.

О внезапном изменении гидродинамического режима в осадконакоплении свидетельствует образование слоя 3 – крупногубозернистого песка в органогенных осадках, залегающего с эрозионным несогласием на слое 2 (рис. 2, а). Размыв и образование прослоя песка, явно перемещенного, можно было бы связать с региональной трансгрессией Тапес, цунами или штормовым заплеском, либо же с обмелением и пересыханием водоема. Однако притока морской воды

Таблица 1. Участки исследований и характеристики озер
Table 1. Study sites and lake characteristics

Участок	Озеро/разрез	Координаты		Высота н.у.м., м	Площадь озера, м ²	Глубина, м	Длина керна, см
		с.ш.	в.д.				
I	Ретинское/Р	69°07'37.7"	33°18'55.4"	51.5	3.5	4.5	100
	Скалистое/СК	68°56'07.79"	33°09'19.78"	180.0	0.04	6.5	170
II	Уполокшское/Уп1	67°31'58.9"	31°45'10.8"	133.4	0.385	3.2	213
	Чунское/Ч1	69°34'94"	32°29'60"	204.9	0.11	3.5	200
III	Рига-Ламбина/РЛ	67°12'506"	32°51'929"	136.0	0.21	4.5	330
IV	Воттоваарское/V	63°04'27"	32°37'32"	400.0	0.09	6.0	350

в озеро в это время уже не было. Об этом свидетельствует анализ состава диатомовой флоры песка из слоя 3, выполненный А.Н. Толстобровой, в котором присутствуют только пресноводные диатомеи [Nikolaeva et al., 2019]. Уровень моря в период 7000–8500 л.н. в районе Кольского залива был уже значительно ниже, на высоте около 27 м [Corner et al., 2001], т.е. связь с каким-либо морским проникновением в котловину озера можно исключить. Диатомовые сообщества и спорово-пыльцевые спектры также не показали какие-либо изменения, связанные с пересыханием в этот

период времени достаточно глубокого (более 10–12 м) озерного бассейна [Kremenetski et al., 1997; Evzerov et al., 2017].

Если песок в органогенных отложениях приносной, прибрежной, то эта аномалия нормального осадконакопления могла возникнуть в результате землетрясения, при резком смещении минеральных осадков с берегов. Еще одной причиной мог быть процесс осаждения частиц, занесенных во взвеси с мелководья, вызванного сейсмическими волнами, которые затем отложились повторно.

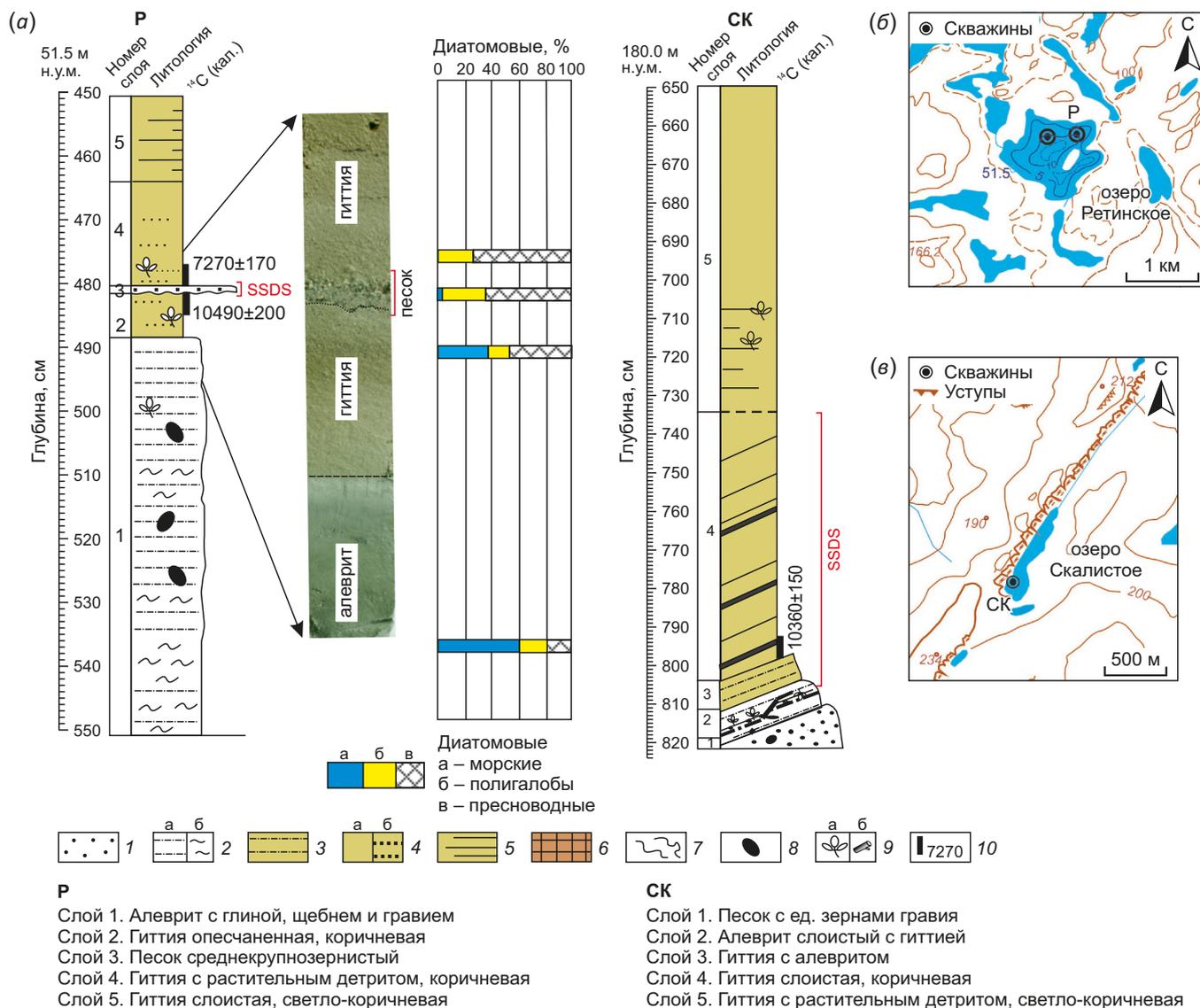


Рис. 2. Сейсмогенные проявления (SSDS) в колонках донных осадков озер Ретинского по [Nikolaeva et al., 2019] и Скалистого (а) и схемы расположения скважин (б, в).

Горизонталы рельефа на фрагментах (б) и (в) проведены через 100 м. 1 – песок; 2 – алеврит (а), глина (б); 3 – алеврит с гиттией; 4 – гиттия однородная (а), опесчаненная (б); 5 – гиттия слоистая; 6 – смесь гиттии, песка, алеврита и торфа; 7 – деформации; 8 – гравий, галька; 9 – растительный детрит (а), древесина (б); 10 – радиоуглеродные датировки в календарных годах.

Fig. 2. Soft sediment deformation strictures (SSDS) in the bottom sediment cores from Lakes Retinskoe after [Nikolaeva et al., 2019] and Skalistsoye (a) and borehole location (б, в).

Elevation (100 m contour interval) on fragments (б, в). 1 – sand; 2 – silt (a), clay (б); 3 – silt with gyttja; 4 – homogeneous gyttja (a), sandy gyttja (б); 5 – layered gyttja; 6 – mixture of gyttja, sand, silt and peat; 7 – deformations; 8 – gravel, pebbles; 9 – plant detritus (a), wood (б); 10 – radiocarbon dates in calendar years.

Прослой песка в гиттии был образован между 10400 ± 200 (ЛУ-7907) и 7200 ± 170 (ЛУ-7908) кал.л.н., т.е. средний возраст события можно отнести к ~ 8800 – 8900 кал.л.н.

Озеро Скалистое (см. рис. 1, б), с узкой приразломной котловиной, расположено в 0.5 км от юго-восточного борта Кольского залива. Оно находится в основании скального уступа ($h=20$ м), следующего в северо-восточном направлении (35 – 40°) на расстояние 2.8 км (рис. 2, а, в). Осадочный разрез СК состоит из минеральной (слои 1–3) и органогенной (слои 4 и 5) толщ. На начальных этапах формирования отложений происходило осаждение позднеледниковых песков и алевритов, обусловленных значительным выносом обломочного материала с сохранившихся еще массивов мертвого льда и интенсивными процессами эрозии отложений открытой поверхности суши.

Особенность разреза СК заключается в том, что его нижняя часть сильно дислоцирована. Алевриты и гиттия слоев 2–4 имеют отчетливо выраженный наклон к восток-юго-востоку под углом 25° к горизонту. Образование почти метровой толщи наклонно залегающих осадков явно имеет вторичный постседиментационный характер. Судя по полученной радиоуглеродной дате, возраст гиттии на контакте с алевритами составляет $\sim 10360 \pm 150$ (ТА-2293) кал.л.н. [Nikolaeva, 2008]. Учитывая расположение озерной котловины в очаговой области сильных палеоземлетрясений, а также присутствие скальных сейсмогравитационных обвалов в основании уступа, сопряженного с озерной котловиной, полученную дату можно рассматривать как возраст раскрытия сейсморва и образования обвалов.

Озеро Уполокшское (табл. 1) с песчано-каменистыми, частично заболоченными берегами находится

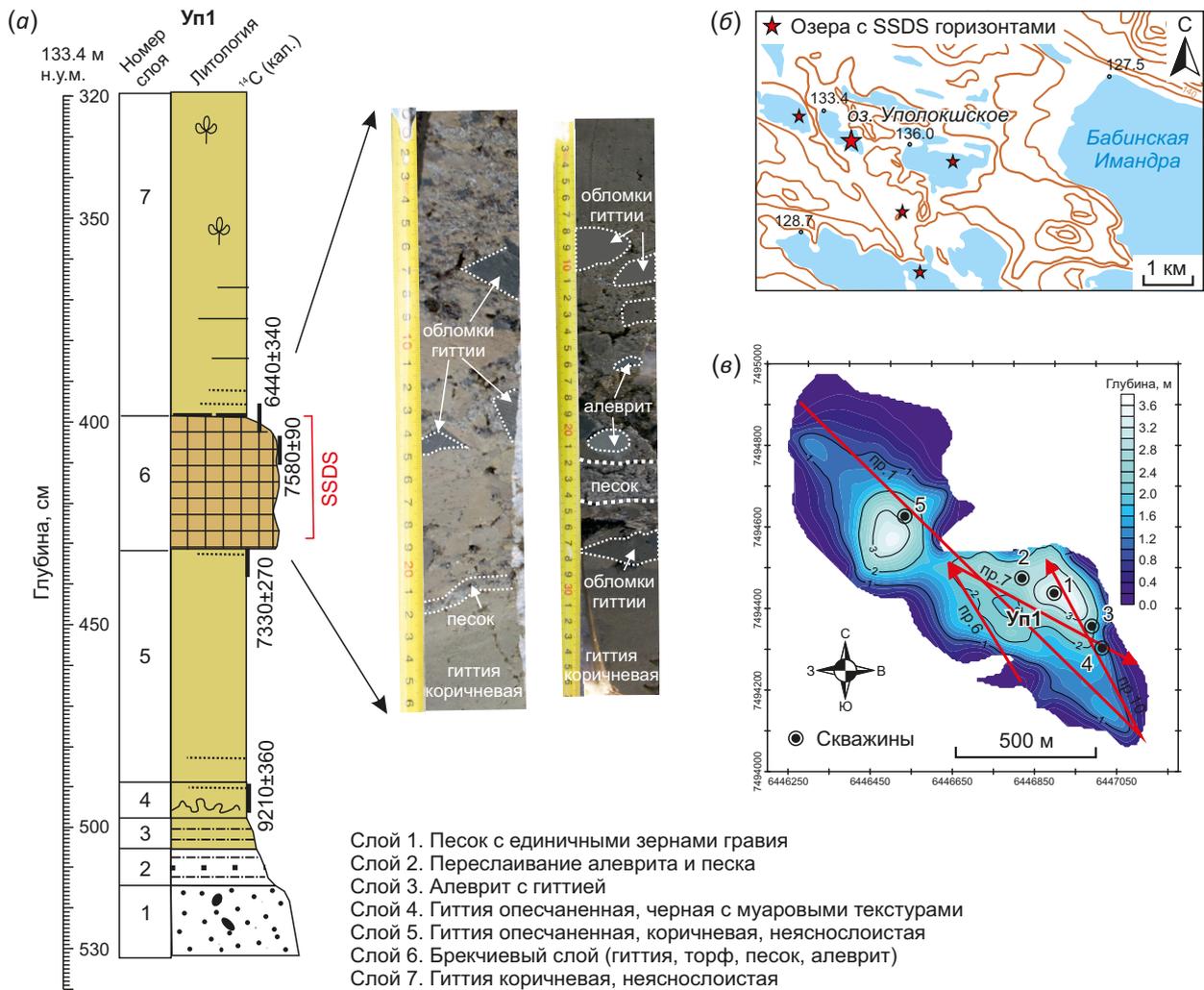


Рис. 3. Положение брекчиевого горизонта в донных осадках разреза Уп1 (а), схема расположения озер с сейсмогенными горизонтами на западном побережье озера Бабинская Имандра (б), батиметрия озера Уполокшское по [Rodionov et al., 2018] (в) и расположение скважин. Условные обозначения к фрагменту (а) см. на рис. 2. На фрагменте (в) красными стрелками показаны георадарные профили к рис. 4.

Fig. 3. Position of the breccia horizon in the sedimentary sequence of Up1 (a), location of lakes with seismogenic horizons on the western coast of Lake Babinskaya Imandra (b), bathymetry of Lake Upoloksha after [Rodionov et al., 2018] (c) and location of boreholes. Legend for (a) see Fig. 2. Red arrows on (c) show GPR profiles for Fig. 4.

в 4 км к западу от Уполокшской губы озера Бабинская Имандра. Донные осадки были изучены пятью скважинами [Nikolaeva et al., 2017]. Скважиной Уп1 (рис. 3) вскрыты разнозернистые пески (слой 1), алевриты (слой 2), сменяющиеся гиттией от неотчетливо слоистой до неслоистой (слои 3–7). Цвет гиттии меняется от черного в основании разреза, у контакта с алевритами, до коричневого и светло-коричневого вверх разреза.

Характерная особенность осадков – брекчиевый горизонт в толще гиттии (рис. 3, а). Он состоит из перемешивания отдельных обломков и фрагментов гиттии черного и коричневого цвета разной формы и размеров («разноцветная гиттия»), алевритов, торфа, песка, растительных остатков, обломков древесины (4–5 см), заключенных в сапропелевую матрицу. Присутствие в разрезах брекчиевого горизонта указывает на катастрофические изменения условий отложения осадков в начале периода спокойного осадконакопления.

Заметные изменения наблюдаются и в структуре диатомовых комплексов [Kosova et al., 2020]. Они выражены резким снижением общего обилия диатомей,

связываемым с поступлением огромного количества терригенного материала с водосборной площади. В спорово-пыльцевых спектрах, по данным Н.Б. Лавровой, этот слой выделяется в виде локальной пыльцевой зоны [Nikolaeva et al., 2017].

Георадарное зондирование дна озера также показало различные нарушения и дислокации в осадках. Вертикальные смещения слоев по кровле толщи песков и алевритов с амплитудой 1.3–1.7 м, а также участки оползания отложений отчетливо отражаются и на полученных радарограммах, фрагменты которых показаны на рис. 4 (см. подробнее в [Rodionov et al., 2018]).

Наиболее вероятный механизм образования аномального горизонта – эрозия и резкое одномоментное смещение (оползание) осадков с бортов котловины в более глубокую часть водоема. При этом процессе произошло «взламывание» осадков, что повлекло за собой суспензирование их и последующее переотложение на уже ранее сформированные и недеформированные слои. Этим объясняется и присутствие фрагментов черной гиттии в брекчиевом горизонте на глубине 410–430 см, расположенном значительно выше по

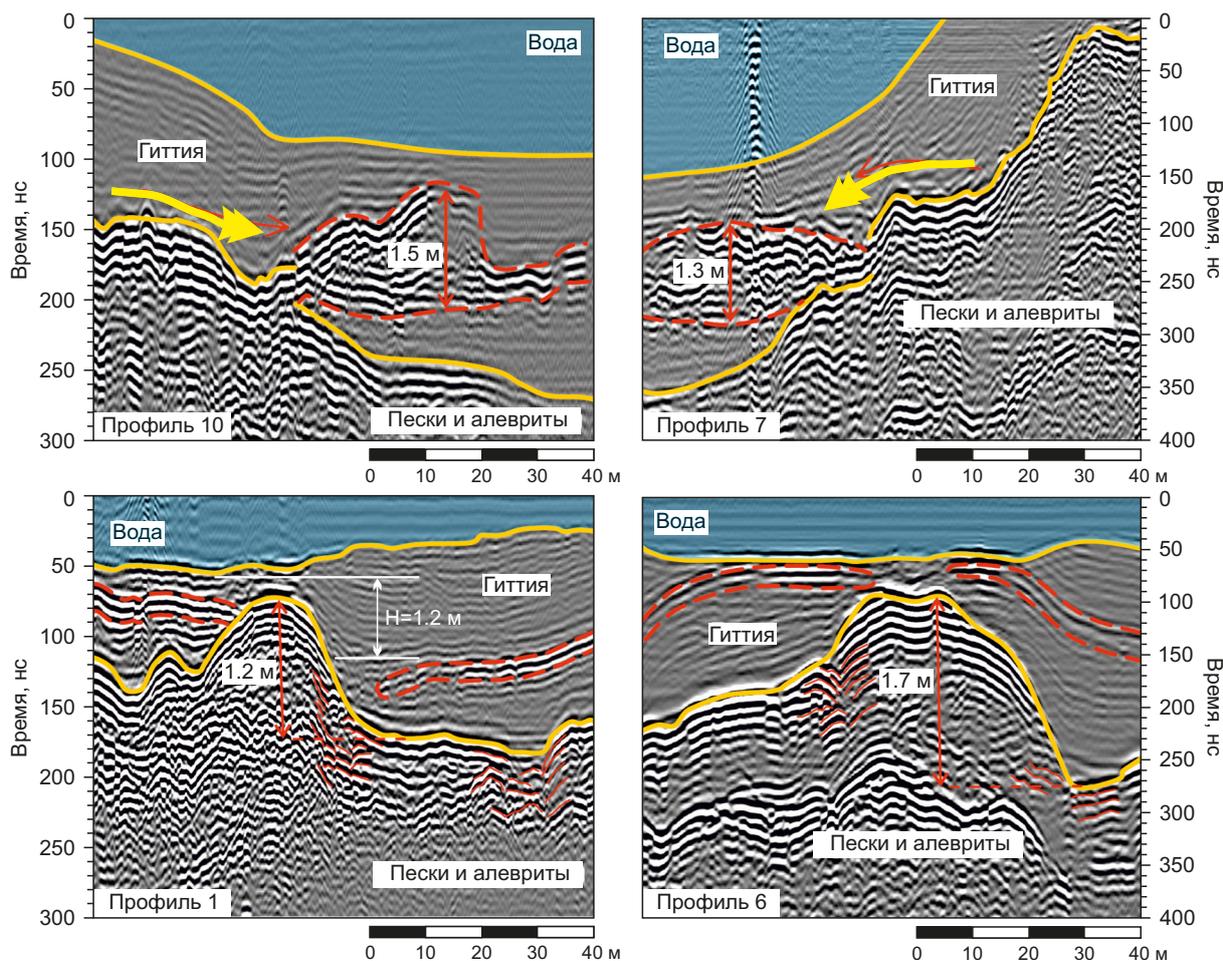


Рис. 4. Фрагменты георадарных профилей, отражающие нарушения в донных осадках озера Уполокшского по [Rodionov et al., 2018]. Желтыми стрелками показано направление смещения материала. Расположение профилей см. на рис. 3, в.

Fig. 4. Fragments of GPR profiles reflecting disturbances in bottom sediments of Lake Upoloksha after [Rodionov et al., 2018]. The yellow arrows indicate the direction in which the material is displaced. For the location of the profiles, see Fig. 3, v.

разрезу, чем черная гиттия, залегающая в основании разрезу на глубине 490–500 см (см. рис. 3, а).

Возраст аномального горизонта устанавливается по радиоуглеродному датированию органического материала над слоем 6, под ним и внутри него. Полученные даты соответствуют атлантическому периоду голоцена – 7330±270 (ЛУ-7364) – 6440±340 (ЛУ-7365) кал.л.н. Приблизительно в это же время были образованы аналогичные горизонты в ряде других озер

(см. рис. 3, б). С учетом неотектонической и сейсмической активности Имандровской впадины связь обнаруживаемых нарушений в осадках с сейсмическими процессами вполне ожидаема.

Озеро Чунское выполняет ложбину кристаллического фундамента, расположенную в 6 км от западного борта впадины озера Экостровская Имандра, в зоне сейсмогенного разрывного нарушения [Nikolaeva et al., 2018]. Донные осадки озера были изучены в 2014 г.

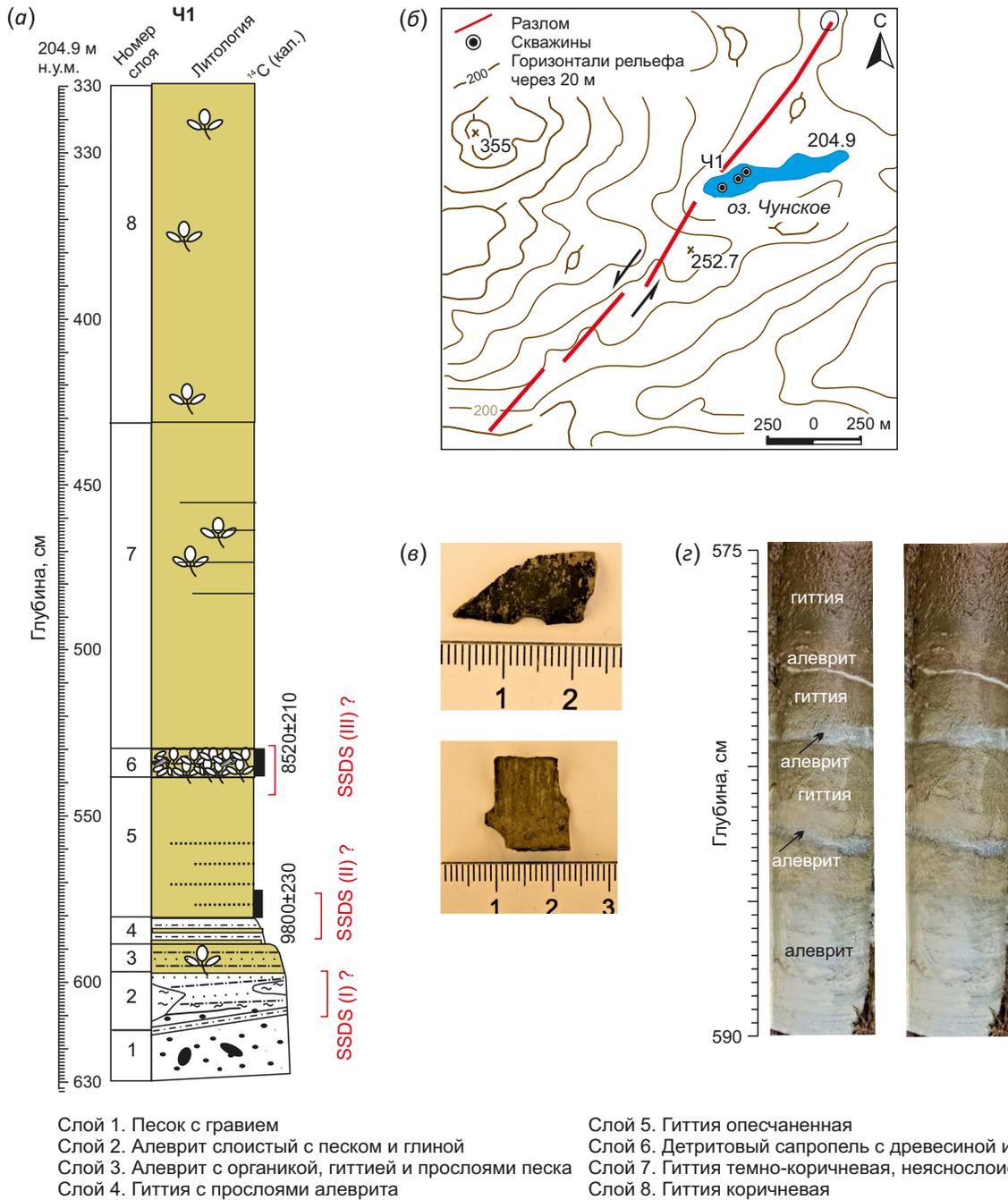


Рис. 5. Литостратиграфия донных осадков озера Чунского (а), расположение озерной котловины и скважин (б), фрагменты коры березы из слоя 6 (в), фрагменты кернов в интервале глубин 575–590 см (д). Условные обозначение к фрагменту (а) см. на рис. 2.

Fig. 5. Lithostratigraphy of bottom sediments of Lake Chuna (a), location of the lake basin and boreholes (b), birch bark *Betula sp.* from layer 6 (c), cores from interval 575–590 cm (d). Legend for (a) see Fig. 2.

С целью уточнения литологии отложений и выявления сейсмогенных горизонтов в августе 2020 г. было проведено дополнительное бурение скважин, заданных в ближней к ущелью наиболее глубокой юго-западной части озера (рис. 5, а, б).

В разрезе Ч1 явного нарушения нормальной стратификации или перерывов в осадконакоплении выявлено не было. Однако в колонках обращают на себя внимание три интервала (рис. 5, а). Два из них находятся в базальной части разреза: слой 2, в котором присутствует наклон слойка алеврита в 15° и фиксируются включения фрагментов прямоугольной и неправильной формы глин в алевритах, и слой 4, отличающийся от нормального осадконакопления присутствием тонких прослоев терригенного материала (алеоврита) в органогенных сапропелях. Выше по разрезу привлекает внимание прослой детритового сапропеля (*detritus gyttja*) с обилием фрагментов коры березы (*Betula sp.*) размерами 2×3 см (рис. 5, в), единичными отдельными обломками древесины и зернами гравия.

Дислоцированность осадков в базальной части разреза могла быть обусловлена оползанием материала со склона и перемешиванием его. Это явление естественно связывать со вторичным эффектом от сильного землетрясения в результате активизации близко расположенного сейсмотектонического разлома «Чуна» [Nikolaeva et al., 2018]. Само событие произошло еще до начала накопления органики в озере, ранее чем 9800 ± 230 (ЛУ-7572) кал.л.н. С учетом этого, а также ОСЛ-даты (оптически стимулированное люминесцентное датирование) и палеогеографической обстановки района возраст одного из сейсмических событий, более раннего, был отнесен к периоду позднеледниковья ~ 13500 кал.л.н.

Еще об одном событии может свидетельствовать образование слоя 6, насыщенного растительными остатками, березовой корой и древесиной. Этот слой мог быть образован в результате разных событий – климатических флуктуаций или эрозионных процессов. Однако палинологический анализ разреза, по данным Н.Б. Лавровой, особых климатических изменений не выявил [Nikolaeva et al., 2021a]. Одновременность землетрясения с эпицентром в зоне разлома Чуна и водного возмущения в близко расположенном озере не исключает возможности образования горизонта, насыщенного растительными остатками за счет обрушения деревьев и кустарников с близлежащего сбросового уступа в озерную депрессию во время землетрясения.

Образец гиттии из слоя 6 показал возраст 8520 ± 210 кал.л.н. или $7720 \pm 170^{14}\text{C}$ (ЛУ-10115), а обломок древесины из этого же горизонта – $8078-8168$ кал.л.н. (7235 ± 25 ^{14}C) (ИГАН_{AMS}-8221) [Nikolaeva et al., 2021a]. Полученные даты близки и позволяют существенно уточнить возраст ранее установленного сейсмического события, определенного в широком интервале от 10300 до 7100 л.н. ^{14}C , и отнести его к периоду $\sim 8000-8100$ кал.л.н.

Озеро Рига-Ламбина находится в районе низкогорных массивов Лувеньгских тундр, осложненных многочисленными сейсмодислокациями [Shvarev et al., 2021]. В настоящее время это озеро соединяется заболоченной протокой с приразломной котловиной озера Среднее Лувеньгское (рис. 6).

Вскрытые двумя скважинами разрезы РЛ и Ур1 обладают сходным двучленным строением. Базальная часть сложена переслаивающимися песками, алевритами и глинами, перекрытыми сверху гиттией, что можно видеть на рис. 6, а. Пески и алевриты накапливались в перигляциальных условиях вблизи приледникового водоема в период конец позднего дриаса – начало пребореала в условиях деградирующего на запад ледника. Котловины озер Рига-Ламбина и Среднее Лувеньгское в это время представляли собой единый глубокий водоем, сформировавшийся в ложбине доледникового заложения. Дальнейший седиментогенез осадков происходил на протяжении всего голоцена.

В изученных колонках обращают на себя внимание следующие особенности: изгиб и наклонные слойки алевритов слоя 3 и явления разжижения в виде размытых слоев и фестончатых узоров в гиттии слоя 5 разреза Ур1 (рис. 6). В керне скважины РЛ обнаружен прослой сконцентрированного детритового сапропеля (слой 4 разреза РЛ, рис. 6).

Как и в кернах озера Чунского, в разрезах РЛ и Ур1 отсутствуют явные стратиграфические нарушения, которые можно было бы связать напрямую с сейсмическими событиями. Изгибные деформации и наклон слойков в алевритах разреза Ур1 могли быть образованы в результате гравитационного (сейсмогравитационного?) оползания со склона. Прослой *detritus gyttja* в разрезе РЛ могли возникнуть в результате падения уровня воды в озере вследствие ксерофитизации климата [Nikolaeva, Lavrova, 2021]. Однако SSDS, видимые в нижней части слоя 5 разреза Ур1, могут интерпретироваться как следы ожигения и флюидизации, вызванные сейсмическим воздействием на окружающую среду, поскольку обладают явными признаками сейсмогенности [Seilacher, 1969; Sims, 1973].

Вместе с этим сопряженность озерных котловин с приразломной межгорной депрессией, имеющиеся палеосейсмологические и палеогеографические данные не исключают возможности рассматривать эти озерные котловины как прежде существующие тектонические (палеосейсмогенные) рвы. В таком случае именно с началом накопления органики в озерах нужно связывать если не раскрытие, то моделирование бортов и подновление Среднелувеньгской депрессии. Судя по полученному возрасту начала осадконакопления в озере Рига-Ламбина, активизация разлома произошла на границе пребореала – начала бореала, около 10460 ± 180 кал.л.н. (ЛУ-7573) [Nikolaeva, Lavrova, 2021]. Вероятно, к этому же возрастному рубежу приурочено образование крупных скальных оползней и многочисленных обвалов, обрамляющих с двух сторон Среднелувеньгскую впадину [Shvarev et al., 2021].

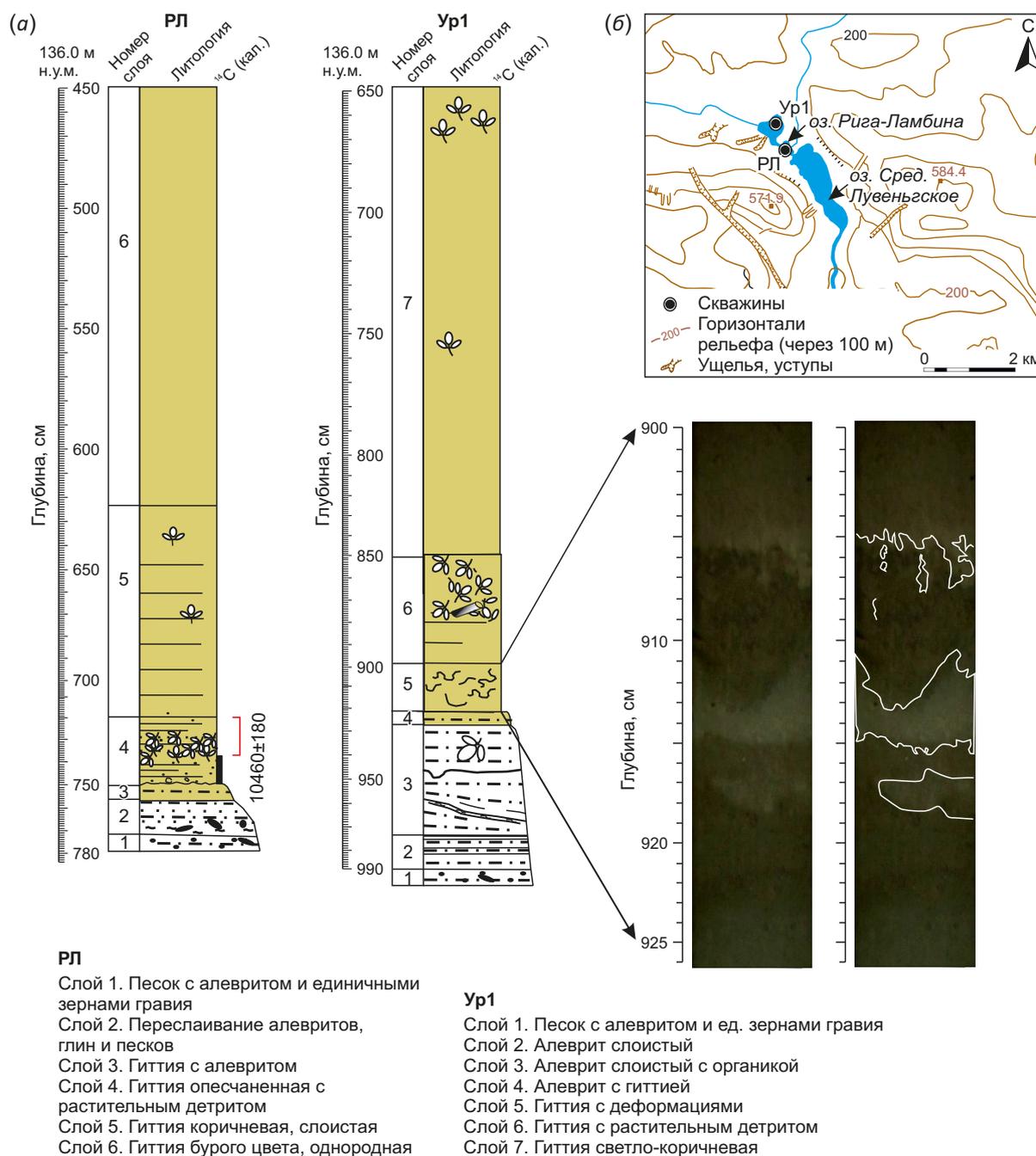


Рис. 6. Литостратиграфия донных осадков (а) и схема расположения озерных котловин Рига-Ламбина и Среднее Лувеньгское (б). Условные обозначение к фрагменту (а) см. на рис. 2.

Fig. 6. Lithostratigraphy of bottom sediments (a) and location of the lake basins Riga-Lambina and Srednee Luvengskoe (b). Legend for (a) see Fig. 2.

4.2. Деформации в донных осадках озер Карелии

Различные сейсмонарушения были обнаружены в разрезах озер Карелии (рис. 7, а). Среди деформаций – опрокинутое залегание слоев, складки и разрывы, нарушающие как ленточные глины, так и позднеголоценовые глины и алевриты. По данным сейсмоакустического профилирования на дне оз. Путкозеро (разрез р6 на рис. 7) вдоль береговой зоны были выявлены сейсмогравитационные обвалы [Lukashov, 2004].

Примечателен тот факт, что они являются продолжением обвалов, располагающихся в прибрежной части озера (рис. 7, б).

Еще одно озеро, **Воттоваарское** (табл. 1) (разрез р7 на рис. 7), расположено в Западной Карелии, в 300 м к юго-западу от вершины горы Воттоваара [Demidov et al., 1998; Lukashov, 2004]. Котловина озера заболочена и находится в понижении кристаллических пород, имеющем форму амфитеатра. По данным А.Н. Лукашова [Lukashov, 2004], на дне амфитеатра и по его бортам

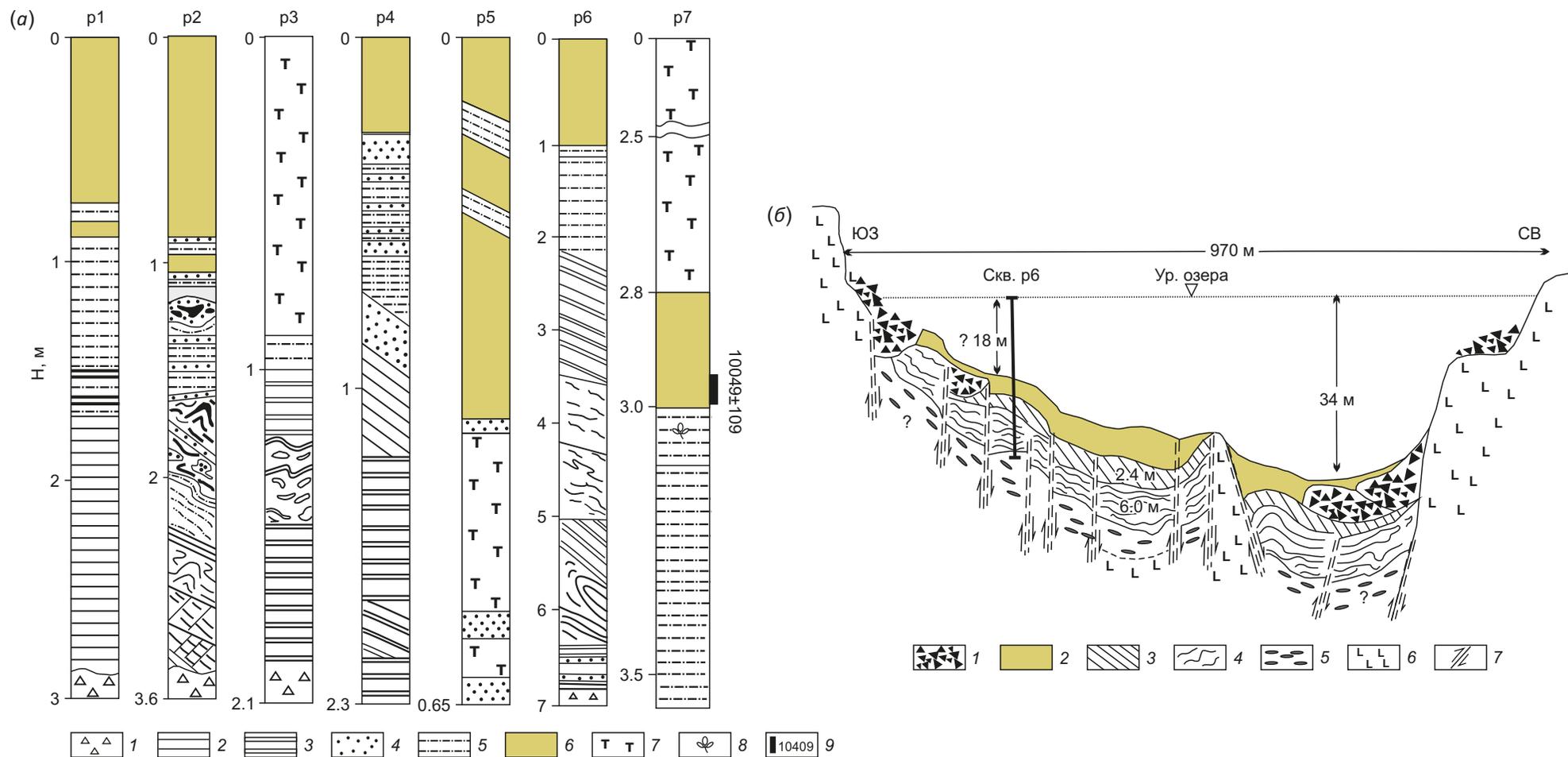


Рис. 7. Деформации и нарушения в разрезах донных осадков Карелии (а) и интерпретация сейсмоакустического профиля через озеро Путкозеро (б) по [Lukashov, 2004].
 (а): 1 – морена; 2 – ленточные глины; 3 – гомогенные глины; 4 – песок; 5 – алеврит; 6 – гиттия; 7 – торф; 8 – растительные остатки; 9 – радиоуглеродные даты календарные. Расположение разрезов: p1 – разрез озера, находящегося за пределами участков развития сейсмодислокаций, p2 – сейсморов губы Церковной (Онежское озеро), p3– p4 – остров Пуутсаари (Ладожское озеро), p5 – сейсморов озера Пизанец (Заонежский п-ов), p6 – озеро Путкозеро (Заонежский п-ов), p7 – озеро Воттоваарское по [Shelekhova, Lavrova, 2019]. (б): 1 – сейсмогравитационный обвал; 2 – гиттия; 3 – гомогенные глины и алевриты; 4 – деформированные ленточные глины; 5 – морена; 6 – габбро-долериты; 7 – разрывы.

Fig. 7. Disturbances in the sections of bottom sediments in Karelia (a) and seismoacoustic profile (Lake Putkzero) (b) after [Lukashov, 2004].
 (a): 1 – till; 2 – varved clay; 3 – homogeneous clays; 4 – sand; 5 – silt; 6 – gyttja; 7 – peat; 8 – plant detritus; 9 – radiocarbon dates in calendar years. The location of the lakes: p1 – cross-section through bottom sediments outside the area of local seismodislocations, p2 – Tserkovnaya Bay (Lake Onega), p3– p4 – Puutsaari Island (Ladoga Lake), p5 – Lake Pizanets (Zaonezhsky Peninsula), p6 – Lake Putkzero (Zaonezhsky Peninsula), p7 – Vottovaara lake after [Shelekhova, Lavrova, 2019]. (b): 1 – seismogravitational rockfall; 2 – gyttja; 3 – homogeneous clays and silts; 4 – deformed varved clay; 5 – till; 6 – gabbro-dolerites; 7 – fractures.

отмечаются сейсмодислокации в виде раздробленных и смещенных скал, провалов и трещин, а сам участок горы принадлежит Сегозерской палеосейсмогенной структуре.

Литолого-стратиграфический, спорово-пыльцевой и диатомовый анализ разреза свидетельствует о том, что относительно глубокое озеро начало формироваться в позднем дриасе [Demidov et al., 1998; Shelekhova, Lavrova, 2019]. С этого времени стали накапливаться алевриты (рис. 8, разрез р7). В бореальное время и в начале атлантического периода уровень воды в озере значительно понизился, климат стал теплее и в озере стали отлагаться сапропели. В конце атлантического периода произошло обмеление и зарастание озера. Оно перешло в болотную стадию эволюции с накоплением торфа.

Крупное сейсмическое событие связывается с перерывом в осадконакоплении и резкой сменой доминирующего диатомового комплекса [Shelekhova, Lavrova, 2019]. Это указывает на катастрофический и быстрый спад уровня озера. Радиоуглеродная дата, полученная из основания гиттии, показала, что событие произошло на границе пребореала – бореала, 10049 ±109 кал.л.н. (SU-2824). Водоем практически прекратил свое существование в момент образования сейсмодетформации.

4.3. Генезис деформаций в донных осадках озер

Одним из основных вопросов обсуждения является генезис деформаций и нарушений в осадках озер Карело-Кольского региона. В настоящее время разработан ряд критериев отличия сейсмогенных проявлений в рыхлых несвязных осадках от несейсмогенных [Sims, 1973; Allen, 1986; Owen, Moretti, 2011; Moretti et al., 2014]. Общими являются значительная латеральная протяженность; сходство структур, образованных экспериментально, со структурами, возникшими в результате известных современных землетрясений; независимость возникновения деформаций от строения осадка и типа слоистости; спонтанный характер возникновения. Авторы работы [Moretti et al., 2014] к этому перечню добавили расположение осадочных бассейнов в областях (районах) палеосейсмической и/или современной сейсмической активности и тот факт, что интенсивность и количество SSDS должны изменяться в латеральном направлении в зависимости от расстояния до эпицентра землетрясения. Многочисленные примеры свидетельствуют о том, что микроразрывы, оползни, турбидиты, гомогениты, конволютные структуры, присутствующие в озерных ядрах, часто напрямую связаны с современными или историческими землетрясениями [Chapron et al., 1999; Monecke et al., 2006; Guyard et al., 2007; Lajeunesse et al., 2017; Vologina et al., 2021].

Исследуемые озера, в которых были обнаружены SSDS, находятся непосредственно в пределах очагов сильных палеоземлетрясений, приуроченных к зонам активных разломов [Lukashov, 2004; Nikolaeva, 2008;

Nikolaeva et al., 2018]. Так что вполне ожидаемо, что в их донных осадках могли остаться следы этих сильных событий. Однако только в четырех из них (Ретинское, Скалистое, Уполокшское и Воттоваарское) выявлены нарушения, которые указывают на сейсмогенный характер их возникновения. Нарушения, как мы показали выше, резко отличаются от деформаций, вызванных климатическими, биогенными или эрозионными процессами. Прослой терригенных отложений в сапропелях озера Ретинского не мог быть вызван трансгрессией Тапес или осушением водоема. Этому противоречат палеогеографические и климатические условия в этот временной интервал и распределение диатомовых сообществ. Судя по характеру нарушений в осадках озера Уполокшского (хаотичное расположение обломков разных пород, привнесенные торф и куски древесины), перемещение было быстрым и одномоментным, что возможно в результате сейсмического импульса, способного иметь определенную силу, чтобы нарушить слои алеврита, песка и гиттии. Наклонное залегание осадочных толщ часто встречается в осадках озер, сопряженных с сейсморавами [Lukashov, 2004]. Не вызывает сомнений связь перерывов в осадконакоплении озерных осадков и последующий спуск озера в районе горы Воттоваара в Карелии с сильным сейсмическим событием [Demidov et al., 1998]. Кроме того, аналогичные деформации в виде микроразломов со смещением, подводно-оползневых структур и разноцветной гиттии в осадках озер Финляндии интерпретируют как следы голоценовых землетрясений ~6700 л.н. и ~10000 л.н. (например [Ojala et al., 2019]).

Отсутствие отчетливых нарушений литологии в озерах Чунском и Рига-Ламбина могло быть обусловлено как возникновением землетрясений до начала накопления органики в озерах, так и иными факторами, например сложной литологией разрезов, недостатком пробуренных скважин и вспомогательных геофизических исследований и пр. Ряд исследователей считает, что в зависимости от интенсивности и продолжительности землетрясения не все сейсмические события оставляют свои следы в осадочных разрезах в виде деформационных структур, вызванных сжижением [Moretti et al., 2014]. То есть следует признать, что в настоящее время архив наблюдаемых SSDS в отложениях озер далеко не полный и недостаточно изучен.

Тем не менее при различиях геолого-тектонических условий возникновения землетрясений и SSDS, присутствующих в озерных ядрах, общими являются явные свидетельства нарушения спокойной гидродинамической обстановки, спонтанный характер и нарушения свойств водной среды на нескольких участках до сейсмического события и во время него. Последующее осаднение взвешенного материала способствовало возникновению прослоев терригенного или иного чуждого материала с иными спектрами диатомовых.

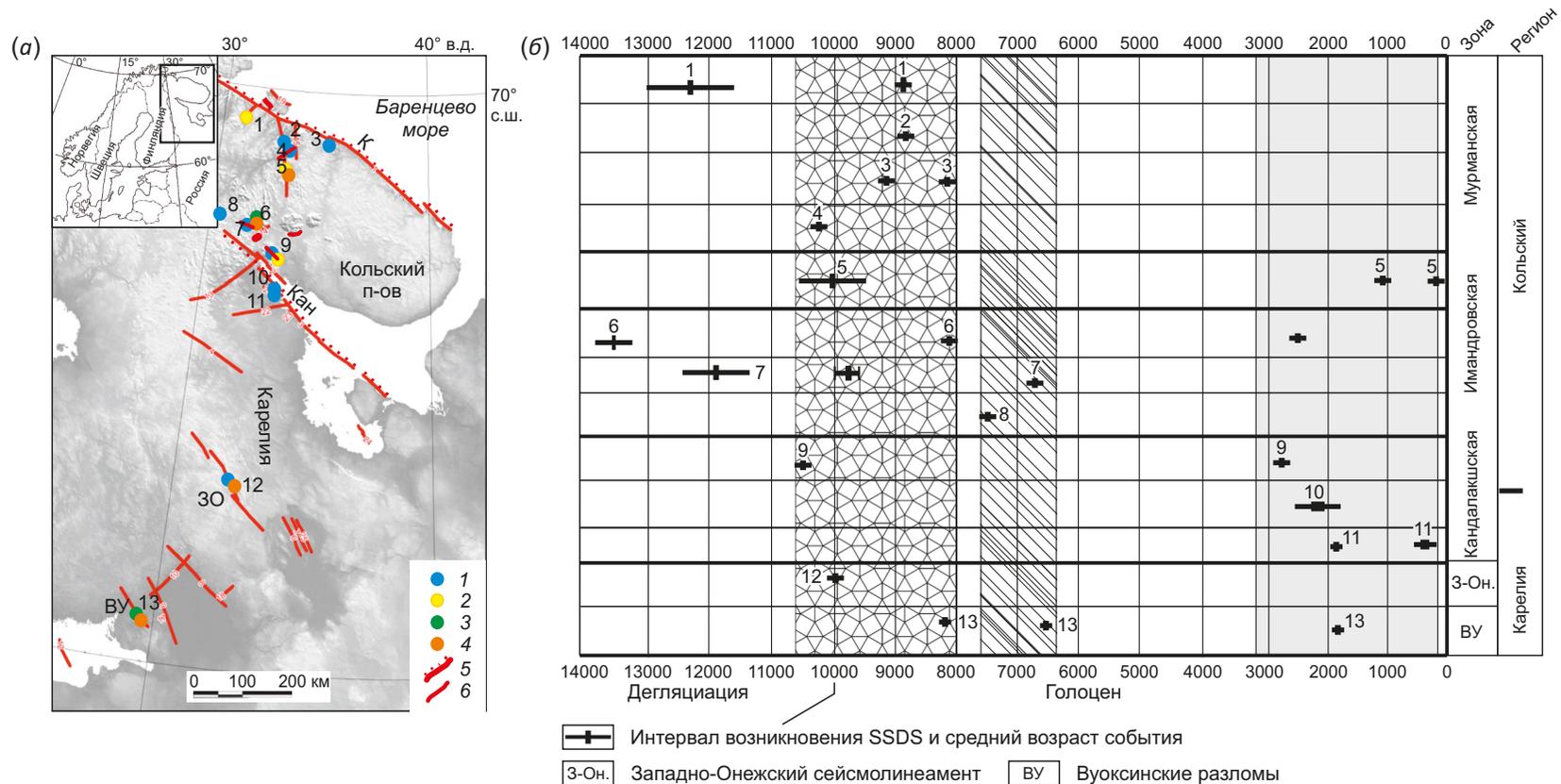


Рис. 8. Пространственное распространение следов палеоземлетрясений в восточной части Фенноскандинавского щита (а) и откалиброванный радиоуглеродный возраст событий (б). 1–4 – пункты определения возраста палеоземлетрясений: 1 – по донным осадкам озер, 2 – по захороненной органике под обвалами и в ущельях, 3 – по SSDS во флювиогляциальных, лимногляциальных, дельтовых и морских отложениях, 4 – по палеогеографическим реконструкциям и корреляциям; 5 – главные сейсмогенные зоны, 6 – сейсмолинементы и локальные разломы с проявлением поздне- и послеледниковой активизации. Номера участков на карте соответствуют таковым на фрагменте (б). Участки: 1 – Печенга [Nikolaeva, 2009], 2 – Кольский фиорд [Nikolaeva et al., 2019], 3 – Териберка [Tolstobrov et al., 2018], 4 – Мурманск [Nikolaeva, 2008], 5 – Шонгуй [Nikolaeva et al., 2021c], 6 – Чуна [Nikolaeva et al., 2018], 7 – Уполокша [Nikolaeva et al., 2017], 8 – Ковдор [Nikonov, 2007], 9 – Лувеньга [Nikolaeva, Lavrova, 2021], 10 – Кереть [Tolstobrov et al., 2019], 11 – Великая Салма [Marakhanov, Romanenko, 2014], 12 – Воттоваара [Shelekhova, Lavrova, 2019], 13 – Вуокса [Shvarev et al., 2018].

Fig. 8. Spatial distribution of paleoearthquake traces (a) and calibrated radiocarbon age of events in the eastern part of the Fennoscandian Shield (b). 1–4 – sites of age determination of paleoearthquakes: 1 – from bottom sediments of lakes, 2 – buried organic matter under rock falls and in gorges, 3 – SSDS in fluvio-glacial, limno-glacial, deltaic and marine sediments, 4 – paleogeographic reconstructions and correlations; 5 – major seismogenic zones; 6 – seismic lineaments and local faults with late- and post-glacial activation. The numbers of the sites on the map a correspond to those in Fragment (b). Sites: 1 – Pechenga, after [Nikolaeva, 2009], 2 – Kola fiord, after [Nikolaeva et al., 2019], 3 – Teriberka, after [Tolstobrov et al., 2018], 4 – Murmansk, after [Nikolaeva, 2008], 5 – Shongui, after [Nikolaeva et al., 2021c], 6 – Chuna, after [Nikolaeva et al., 2018], 7 – Upoloksha, after [Nikolaeva et al., 2017], 8 – Kovdor, after [Nikonov, 2007], 9 – Luvenga, after [Nikolaeva, Lavrova, 2021], 10 – Keret, after [Tolstobrov et al., 2019], 11 – Velikaya Salma, after [Marakhanov, Romanenko, 2014], 12 – Vottovaara, after [Shelekhova, Lavrova, 2019], 13 – Vuoksa, after [Shvarev et al., 2018].

4.4. Пространственное распространение, магнитуды и возраст палеоземлетрясений

Большинство исследователей пришли к выводу, что для возникновения явлений ликвифакции в рыхлых несвязных осадках необходима магнитуда $M_w \geq 5$ [Ambraseys, 1988; Galli, 2000; Obermeier et al., 2005]. Согласно [Moretti et al., 1995] землетрясение с $M_w > 8$ потенциально может создать деформации в рыхлых осадках SSDS на максимальном расстоянии до 100 км. В работе [Galli, 2000] приведены данные о том, что 90 % всех эффектов разжижения наблюдаются на расстоянии 40 км от эпицентра. Однако возникновение SSDS в осадках при более низких значениях интенсивности и магнитуд практически игнорируется, хотя эффекты разжижения в отдельных случаях имели место при интенсивности в VI–VII баллов [Keefer, 1984; McCaLpin, Nelson, 1996].

Исследуемые озера расположены вблизи активных тектонических структур: Мурманской, протягивающейся на 100–110 км вдоль побережья Баренцева моря, Кандалакшского грабена, протяженностью ~90 км, суббассейна Имандровской неотектонической впадины, следующей в субширотном направлении на 50–55 км, Западно-Онежского линеамента, протяженностью более 30 км (см. рис. 1, а). Такие параметры разломов соответствуют магнитудам $M_w = 6.5–7.5$, характерным для поздней послеледниковой сейсмичности Фенноскандии [Olesen et al., 2013; Sutinen et al., 2018; Shvarev, Rodkin, 2018].

Обобщение разрозненных данных о радиоуглеродном возрасте палеоземлетрясений Карело-Кольского региона, а также изучение SSDS в донных осадках озер (рис. 8, а) позволили обновить ранее существующую информацию и выделить три активных возрастных рубежа (рис. 8, б). Это периоды позднеледниковья – начала голоцена, ознаменовавшиеся наиболее быстрым поднятием территории после исчезновения последнего ледникового покрова, когда сейсмические события происходили более часто и были наиболее сильными (13500–8100 кал.л.н.), среднего (6800–6600 л.н) и позднего (3100–200 л.н.) голоцена. При этом на рис. 8, б, можно видеть, что сейсмические события происходили и в период дегляциации. Обращает на себя внимание и период среднего голоцена – он характеризуется более спокойной сейсмической активностью. В целом, выделенные возрастные интервалы хорошо согласуются с данными по западной части Фенноскандии. В работе финских исследователей, обобщивших данные о возрасте сейсмической активности Фенноскандии, эти рубежи сосредоточены около 12000–10000, 5000–7000 и 1500–3000 л.н. [Ojala et al., 2019].

Результаты изучения позднеледниковой и голоценовой сейсмичности Кольского региона и Карелии свидетельствуют о том, что в пределах одного и того же разлома (или зоны) могло происходить несколько разновременных событий. Так, например, Вуоксинская зона разломов в Карелии была реактивирована неоднократно [Shvarev et al., 2018]. Тектоническая активизация

разлома и сопряженные с ней землетрясения с интенсивностью 7–9 баллов происходили не только в позднеледниковье и голоцене (11600–8300, 5700–5100 и 1900–1800 л.н.), но и в позднемикулинско-ранневалдайское время. Неоднократная активизация системы сдвигов и сбросов фиксируется вдоль зоны Кандалакшских разломов: от первых столетий до 12 тыс. лет назад [Nikonov, Shvarev, 2015]. Три разновозрастных импульса сильных сейсмических воздействий (13500, 8100–8300, ~2500 л.н.) с $M_w \approx 6.0$ приурочено к зоне Чунского разлома на западном борту Имандровской впадины Кольского региона [Nikolaeva et al., 2018]. В зоне разломов, простирающихся на север-северо-запад вдоль долины р. Кола [Nikolaeva et al., 2021c], по данным радиоуглеродного анализа, а также по результатам палеогеографических исследований, выявлены три эпизода повышенной сейсмической активности: 9500–10500, 892–1182, 200–300 л.н.

Обобщение полученных палеосейсмических данных показывает, что высокомагнитудный пик и частота землетрясений имели место в позднеледниковье и раннем голоцене, после отступления покровного ледника. Большинство исследователей объясняет это гляциоизостатическим эффектом, играющим немаловажную роль в формировании послеледниковой сейсмичности землетрясений [Mörner, 2004; Olesen et al., 2013; Lagerbäck, Sundh, 2008; Kukkonen et al., 2010; Ojala et al., 2019]. Однако более поздние проявления сейсмичности (средний и поздний голоцен), которые имели место через несколько тысячелетий после дегляциации, обусловлены в большей степени уже тектоническим фактором и переходом ведущей роли от вертикально направленных сил гляциоизостазии к горизонтально сжимающим напряжениям.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании данных о времени проявления косейсмических деформаций в донных осадках озер, а также сведений о палеосейсмичности Карело-Кольского региона выделены основные рубежи сейсмической активности счита в прошлом и существенно уточнены временные интервалы возникновения отдельных событий. Время проявления палеоземлетрясений соответствует трем основным интервалам: 13500–8100, 6800–6600, 3100–200 л.н. Полученные значения возраста отражают неравномерное распределение сейсмоактивности территории во времени: ранний голоцен характеризуется наиболее высокой сейсмической активностью, средний голоцен представляет более спокойный в сейсмическом отношении период по сравнению с поздним голоценом. Установлено, что в пределах одного и того же разлома (разломной зоны) фиксируются признаки многократной активизации и разновременных сейсмических событий, происходивших на протяжении позднеледниковья и в голоцене. При этом пространственное распределение изученных озер с SSDS оказывается неравномерным: они коррелируют как с линейными разломными зонами новейшей

и молодой активизации, так и с отдельными блоками вне зон.

Следует отметить, что дальнейшее изучение нарушений и деформаций в донных осадках озер будет способствовать развитию палеосейсмогеологических исследований в регионах и областях, долгое время считавшихся асейсмичными. Полученные данные вносят дополнительные коррективы в оценки новейшей геодинамики и сейсмичности внутриплатформенных территорий.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность д.г.-м.н, профессору ОИФЗ РАН А.А. Никонову за полезные консультации, сотрудникам ФИЦ КНЦ РАН Д.С. Толстоброву, Д.А. Максимову и А.И. Родионову – за помощь при проведении полевых работ, рецензентам – за внимательное прочтение рукописи и критические замечания.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Автор заявляет об отсутствии у него конфликта интересов. Автор прочитал рукопись и согласен с опубликованной версией.

The author has no conflicts of interest to declare. The author has read and agreed to the published version of the manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Allen J.R.L., 1986. Earthquake Magnitude-Frequency, Epicentral Distance and Soft-Sediment Deformation in Sedimentary Basins. *Sedimentary Geology* 46 (1–2), 67–75. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(86\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0037-0738(86)90006-0).

Ambraseys N.N., 1988. *Engineering Seismology. Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 17 (1), 1–105. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290170101>.

Arslanov Kh.A., 1987. *Radiocarbon: Geochemistry and Geochronology*. Publishing House of Leningrad State University, Leningrad, 294 p. (in Russian) [Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 294 с.].

Asming V.E., Kremenetskaya E.O., Vinogradov Yu.A., Evtyugina Z.A., 2010. Using Criteria of Explosions and Earthquakes Identification for Estimation of Seismic Danger of the Region. *Vestnik of MSTU*. 13 (4–2), 998–1007 (in Russian) [Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. № 4–2. С. 998–1007].

Balagansky V.V., Gorbunov I.A., Mudruk S.V., 2016. Palaeoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian Orogens (Baltic Shield). *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 3 (26), 5–11 (in Russian) [Балаганский В.В., Горбунов И.А., Мудрук С.В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) // Вестник КНЦ РАН. 2016. Т. 3. № 26. С. 5–11].

Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Terekhov E.N., Przhivalgovskii E.S., 2012. *Tectonics of the White Sea and Adjacent Areas. The Explanatory Notes to the Tectonic Map of the White Sea and Adjacent Areas, at a Scale of 1:500000*. Proceedings of GIN RAS. Iss. 597. GEOS, Moscow, 104 p. (in Russian) [Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов А.Н., Пржиалговский Е.С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий: Объяснительная записка к Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий масштаба 1:500000 // Труды ГИН РАН. М.: GEOS, 2012. Вып. 597. 104 с.].

Chapron E., Beck C., Pourchet M., Deconninck J.-F., 1999. 1822 Earthquake-Triggered Homogenite in Lake Le Bourget (NW Alps). *Terra Nova* 11 (2–3), 86–92. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1999.00230.x>.

Corner G.D., Kolka V.V., Yevzerov V.Y., Møller J.J., 2001. Postglacial Relative Sea-Level Change and Stratigraphy of Raised Coastal Basins on Kola Peninsula, Northwest Russia. *Global and Planetary Change* 31 (1–4), 155–177. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00118-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00118-7).

Demidov I.N., Lukashov A.D., Lavrova N.B., Shelekhova T.S., Vyahirev S.A., 1998. Paleoeecology and Paleoseismology of the Vottovaara Area (West Karelia) in the Late Glacial and Postglacial Time. In: *Paleoclimates and Evolution of Paleogeographic Environments during the Geological History of the Earth. Abstracts of the International Symposium (August 27–31, 1998)*. KarRC RAS, Petrozavodsk, p. 28–30 (in Russian) [Демидов И.Н., Лукашов А.Д., Лаврова Н.Б., Шелехова Т.С., Вяхирев С.А. Палеоэкология и палеосейсмология района горы Воттоваара (Западная Карелия) в поздне- и послеледниковье // Палеоклиматы и эволюция палеогеографических обстановок в геологической истории Земли: Тезисы докладов международного симпозиума (27–31 августа 1998 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. С. 28–30].

Evzerov V.Ya., Kolka V.V., Korsakova O.P., Nikolaeva S.B., 2010. Reconstruction of Pleistocene-Holocene Palaeoecological Settings in the Kola Region. In: Yu.G. Leonov (Ed.), *Structure and History of the Development of the Lithosphere*. Paulsen, Moscow-Saint Petersburg, p. 491–505 (in Russian) [Евзеров В.Я., Колька В.В., Корсакова О.П., Николаева С.Б. Реконструкция палеоэкологических обстановок позднего плейстоцена – голоцена в Кольском регионе // Строение и история развития литосферы / Ред. Ю.Г. Леонов. М.-СПб.: Paulsen, 2010. С. 491–505].

Evzerov V.Ya., Nikolaeva S.B., Shelekhova T.S., 2017. Loose Cover and Newest Geodynamics of the Kola Bay (First Results and Prospects for Further Work). *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 1 (9), 24–33 (in Russian) [Евзеров В.Я., Николаева С.Б., Шелехова Т.С. Рыхлый покров и новейшая геодинамика Кольского залива (первые результаты и перспективы дальнейших работ) // Вестник КНЦ РАН. 2017. Т. 1. № 9. С. 24–33].

Galli P., 2000. New Empirical Relationships between Magnitude and Distance for Liquefaction. *Tectonophysics* 324 (3), 169–187. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00118-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00118-9).

- Guyard H., St-Onge G., Chapron E., Anselmetti F.S., Francus P., 2007. The Ad 1881 Earthquake-Triggered Slump and Late Holocene Flood-Induced Turbidites from Proglacial Lake Bramant, Western French Alps. In: V. Lykousis, D. Sakellariou, J. Locat (Eds), *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Advances in Natural and Technological Hazards Research. Vol. 27. Springer, Dordrecht, p. 279–286. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6512-5_29.
- Keefer D.K., 1984. Landslides Caused by Earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95 (4), 406–421.
- Kosova A.L., Denisov D.B., Nikolaeva S.B., 2020. Taxonomic Diversity of Diatom Complexes of Holocene Bottom Sediments of Small Reservoirs in the Depression of Lake Imandra. *Biosphere* 12 (1–2), 19–31 (in Russian) [Косова А.Л., Денисов Д.Б., Николаева С.Б. Таксономическое разнообразие диатомовых комплексов голоценовых донных отложений малых водоемов депрессии озера Имандра // Биосфера. 2020. Т. 12. № 1–2. С. 19–31]. <http://doi.org/10.24855/biosfera.v12i1.538>.
- Kremenetski C.V., Vaschalova T., Goriachkin S., Sulerzhitsky L., 1997. Holocene Pollen Stratigraphy and Bog Development in the Western Part of the Kola Peninsula, Russia. *Boreas* 26 (2), 91–102. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1997.tb00656.x>.
- Kukkonen I.T., Olesen O., Ask M.V.S., the PFDP Working Group, 2010. Postglacial Faults in Fennoscandia: Targets for Scientific Drilling. *GFF* 132 (1), 71–81. <https://doi.org/10.1080/11035891003692934>.
- Lagerbäck R., 1992. Dating of Late Quaternary Faulting in Northern Sweden. *Journal of the Geological Society* 149 (2), 285–291. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.149.2.0285>.
- Lagerbäck R., Sundh M., 2008. Early Holocene Faulting and Paleoseismicity in Northern Sweden. *Geological Survey of Sweden*, 80 p.
- Lajeunesse P., Sinkunas B., Morissette A., Normandeau A., Joyal G., St-Onge G., Locat J., 2017. Large-Scale Seismically-Induced Mass-Movements in a Former Glacial Lake Basin: Lake Témiscouata, Northeastern Appalachians (Eastern Canada). *Marine Geology* 384, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.04.007>.
- Lukashov A.D., 1995. Paleoseismotectonics in the Northern Part of Lake Onega (Zaonezhskij Peninsula, Russian Karelia). Nuclear Waste Disposal Research Report YST-90. Geological Survey of Finland, Espoo, 36 p.
- Lukashov A.D., 2004. Geodynamics of Recent Times. In: N.V. Sharov (Ed.), *Deep Structure and Seismicity of the Karelian Region and Its Margins*. KarRC RAS, Petrozavodsk, p. 150–178 (in Russian) [Лукашов А.Д. Геодинамика новейшего времени // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 150–178].
- Marakhanov A.V., Romanenko F.A., 2014. New Data on Postglacial Seismic Dislocations of the Northern Karelia (Karelian Coast of the White Sea). In: *Geodynamics and Ecology of the Barents Region in the XXI Century*. Yudakhin Readings. Proceedings of the All-Russian Conference with an International Participation (September 15–18, 2014). Institute of Ecological Problems of the North UrB RAS, Arkhangel'sk, p. 137–140 (in Russian) [Мараханов А.В., Романенко Ф.А. Новые данные о послеледниковых сейсмодислокациях Северной Карелии (Карельский берег Белого моря) // Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI в. Юдахинские чтения: Материалы Всероссийской конференции с международным участием (15–18 сентября 2014 г.). Архангельск: Институт экологических проблем севера УРО РАН. С. 137–140].
- McCalpin J.P., Nelson A.R. (Eds), 1996. *Paleoseismology*. First Edition. Vol. 62. Academic Press, 588 p.
- Mitrofanov F.P. (Ed.), 2001. *Geological Map of the Kola Region*. Scale 1:1000000. Kola Science Centre of RAS, Apatity (in Russian) [Геологическая карта Кольского региона. Масштаб 1:1000000 / Ред. Ф.П. Митрофанов. Апатиты: КНЦ РАН, 2001].
- Monecke K., Anselmetti F.S., Becker A., Schnellmann M., Sturm M., Giardini D., 2006. Earthquake-Induced Deformation Structures in Lake Deposits: A Late Pleistocene to Holocene Paleoseismic Record for Central Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 99, 343–362. <https://doi.org/10.1007/s00015-006-1193-x>.
- Moretti M., Pieri P., Tropeano M., Walsh N., 1995. Tyrrhenian Seismites in Bari Area (Murge-Apulia Foreland). In: *Earthquakes in Italy – Forecasting and Prevention of Damage*. Proceedings of the Conference (1–2 December 1994). Vol. 122. Lincean Academy, Roma, Italy, p. 211–216.
- Moretti M., van Loon A.J., Liu M., Wang Yu., 2014. Restrictions to the Application of 'Diagnostic' Criteria for Recognizing Ancient Seismites. *Journal of Palaeogeography* 3 (2), 162–173. DOI:10.3724/SPJ.1261.2014.00050.
- Mörner N.-A., 2004. Active Faults and Paleoseismicity in Fennoscandia, Especially Sweden. Primary Structures and Secondary Effects. *Tectonophysics* 380 (3–4), 139–157. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.018>.
- Munier R., Adams J., Brandes C., Brooks G., Dehls J., Gibbons S.J., Hjartardóttir Á.R., Hogaas F. et al., 2020. International Database of Glacially Induced Faults. PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.922705>.
- Niemelä J., Ekman I., Lukashov A. (Eds), 1993. *Map of Quaternary Deposits of Finland and Northwestern Part of Russian Federation and Their Resources*. Scale 1:1000000. Map Center, Helsinki, 2 Sheets.
- Nikolaeva S.B., 2001. Paleoseismic Features in the Northeastern Part of the Baltic Shield and Their Geological and Tectonic Positions. *Geomorphology* 4, 66–74 (in Russian) [Николаева С.Б. Палеосейсмические проявления в северо-восточной части Балтийского щита и их геолого-тектоническая позиция // Геоморфология. 2001. № 4. С. 66–74].
- Nikolaeva S.B., 2008. Disastrous Earthquakes in the Vicinities of the Town of Murmansk: Paleoseismological and Geological Evidence. *Journal of Volcanology and Seismology* 2, 189–198. <https://doi.org/10.1134/S0742046308030068>.
- Nikolaeva S.B., 2009. Seismites in Late Pleistocene and Holocene Deposits of the Northwestern Kola Region (Northern Baltic Shield). *Russian Geology and Geophysics* 50 (7), 644–650. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.12.009>.

Nikolaeva S.B., Evzerov V.Ya., 2018. On Geodynamics of the Kola Region in the Later Pleistocene and Holocene: The Review and Results of the Studies. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology 1, 5–14 (in Russian) [Николаева С.Б., Евзеров В.Я. К геодинамике Кольского региона в позднем плейстоцене и голоцене: обзор и результаты исследований // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 5–14].

Nikolaeva S.B., Lavrova N.B., 2021. Reconstruction of Palaeoenvironmental Changes in the South of Murmansk Region during the Holocene: Results of Study the Lake Sediments in the Luvenga Mountains Area. Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS 18, 310–315 (in Russian) [Николаева С.Б., Лаврова Н.Б. 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. 2021. Т. 18. С. 310–315]. <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 Sciences* 473, 308–312. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17030072>.

Nikolaeva S.B., Lavrova N.B., Tolstobrov D.S., Shvarev S.V., 2021a. Dynamics of the Natural Environment and Extreme Events in the European Subarctic in the Late Pleistocene and Holocene: Results of Study the Bottom Sediment of Lakes in the Chuna and Luvenga Mountains Area. In: *Routes of Evolutionary Geography. Proceedings of the All-Russia Scientific Conference Dedicated to the Memory of Professor A.A. Velichko* (November 22–25, 2021). Institute of Geography RAS, Moscow, p. 264–270 (in Russian) [Николаева С.Б., Лаврова Н.Б., Толстобров Д.С., Шварев С.В. Динамика природной среды и экстремальные события в Европейской субарктике в позднем плейстоцене и голоцене: результаты изучения донных осадков озер в районах Чуна- и Лувеньгских тундр (Кольский регион) // Пути эволюционной географии: Материалы II всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко (22–25 ноября 2021 г.). М.: Институт географии РАН, 2021. С. 264–270].

Nikolaeva S.B., Nikonov A.A., Shvarev S.V., 2021b. Late Glacial and Postglacial Faulting in the Russian Part of the Fennoscandian Shield. In: H. Steffen, O. Olesen, R. Sutinen (Eds), *Glacially-Triggered Faulting*. Cambridge University Press, p. 246–260. <https://doi.org/10.1017/9781108779906.018>.

Nikolaeva S.B., Nikonov A.A., Shvarev S.V., Rodkin M.V., 2018. Detailed Paleoseismogeological Studies in the Side Zone of the Imandra Lake Depression (Kola Region): New Approaches and Results. *Russian Geology and Geophysics* 59 (6), 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.05.008>.

Nikolaeva S.B., Rodkin M.V., Shvarev S.V., 2021c. Late Glacial and Postglacial Seismicity in the Northeastern Fennoscandian Shield: Tectonic Position and Age of Paleo-

Earthquakes near Murmansk. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 93, 53–72. <https://doi.org/10.17741/bgsf/93.1.004>.

Nikolaeva S., Tolstobrov D., Tolstobrova A., 2019. Disturbances in the Primary Stratigraphy of Lake Sediments on the Murmansk Coast (Russia): Their Identification and Relationship with Catastrophic Events. *Baltica* 32 (2), 156–169. <https://doi.org/10.5200/baltica.2019.2.3>.

Nikonov A.A., 2007. Tsunami in the Heart of Kola Peninsula. *Priroda* 1 (1097), 35–38 (in Russian) [Никонов А.А. Цунами в глубине Кольского полуострова // Природа. 2007. № 1 (1097). С. 35–38].

Nikonov A.A., Shvarev S.V., 2015. Seismolineaments and Destructive Earthquakes in the Russian Part of the Baltic Shield: New Solutions for the Past 13 Thousand Years. In: *Geological and Geophysical Environment and Diverse Manifestations of Seismic Activity. Proceedings of the International Conference* (September 23–25, 2015). Technical Institute NEFU, Neryungri, p. 243–251 (in Russian) [Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинеаменты и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет // Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности: Материалы международной конференции (23–25 сентября 2015 г.). Нерюнгри: Технический институт СВФУ, 2015. С. 243–251].

Obermeier S.F., Olson S.M., Green R.A., 2005. Field Occurrences of Liquefaction-Induced Features: A Primer for Engineering Geologic Analysis of Paleoseismic Shaking. *Engineering Geology* 76 (3–4), 209–234. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.07.009>.

Ojala A.E.K., Mattila J., Hämäläinen J., Sutinen R., 2019. Lake Sediment Evidence of Paleoseismicity: Timing and Spatial Occurrence of Late- and Postglacial Earthquakes in Finland. *Tectonophysics* 771, 228227. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228227>.

Olesen O., Bungum H., Dehls J., Lindholm C., Pascal C., Roberts D., 2013. Neotectonics, Seismicity and Contemporary Stress Field in Norway – Mechanisms and Implications. In: L. Olsen, O. Fredin, O. Olesen (Eds), *Quaternary Geology of Norway*. Geological Survey of Norway Special Publication 13, p. 145–174.

Owen G., Moretti M., 2011. Identifying Triggers for Liquefaction-Induced Soft-Sediment Deformation in Sands. *Sedimentary Geology* 235 (3–4), 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.10.003>.

Pokrovskaya I.M. (Ed.), 1966. *Paleopalynology. Vol. 1: Methods of Palynological Research and Morphology of Some Fossil Spores, Pollen and Other Plant Microfossils*. Proceedings of VSEGEL. Iss. 141. Nedra, Moscow, 351 p. (in Russian) [Палеопалинология. Т. 1: Методика палинологических исследований и морфология некоторых ископаемых спор, пыльцы и других растительных микрофоссилий // Труды ВСЕГЕИ / Ред. И.М. Покровская. М.: Недра, 1966. Вып. 141. 351 с.].

Reimer P., Austin W., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Ramsey Ch.B., Butzin M., Cheng H. et al., 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve

(0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62 (4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>.

Rodionov A.I., Nikolaeva S.B., Ryazantsev P.A., 2018. Evaluation of GPR Capabilities in the Study of Seismogenic Faulting and Deformation in the Bottom Sediments of Lake Upoloksha (Northeast of the Fennoscandian Shield). *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1189–1203 (in Russian) [Родионов А.И., Николаева С.Б., Рязанцев П.А. Оценка возможностей георадиолокации при изучении сейсмогенных нарушений и деформаций в донных осадках (на примере озера Уполокшское, северо-восток Фенноскандинавского щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1189–1203]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0390>.

Seilacher A., 1969. Fault-Graded Beds Interpreted as Seismites. *Sedimentology* 13 (1–2), 155–159. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1969.tb01125.x>.

Sharov N.V., Malovchinko A.A., Shukin Yu.K. (Eds), 2007. Earthquakes and Microseismicity in Relation to Problems of Recent Geodynamics of the East European Platform. Book I. Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, 381 p. (in Russian) [Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Ред. Н.В. Шаров, А.А. Маловчинко, Ю.К. Щукин. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. Кн. 1. 381 с.].

Shelekhova T.S., Lavrova N.B., 2019. Paleoenvironmental Reconstructions and Sedimentological Evidence of Paleoseismic Activity ca 9000 yr BP in Karelia, NW Russia, Based on Lake Sediment Studies on Mount Vottovaara. *Baltica* 32 (2), 90–201. <https://doi.org/10.5200/baltica.2019.2.6>.

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). *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS* 18, 425–429 (in Russian) [Шварев С.В., Николаева С.Б., Королева А.О. Морфологические проявления постледниковой сейсмической активности Имандра-Колвицкого активного разлома в Лувеньгской очаговой зоне (Мурманская область) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. Т. 18. С. 425–429]. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.080>.

Shvarev S.V., Nikonov A.A., Rodkin M.V., Poleshchuk A.V., 2018. The Active Tectonics of the Vuoksi Fault Zone in the Karelian Isthmus: Parameters of Paleoeearthquakes Estimated from Bedrock and Softsediment Deformation Features. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90, 257–273. <https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.009>.

Shvarev S.V., Rodkin M.V., 2018. Structural Position and Parameters of the Paleoeearthquakes in the Area of Vottovaara Mountain (Middle Karelia, Eastern Part of the Fennoscandian Shield). *Seismic Instruments* 54, 199–218. <https://doi.org/10.3103/S0747923918020093>.

Sims J.D., 1973. Earthquake-Induced Structures in Sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California. *Science* 182 (4108), 161–163. <https://doi.org/10.1126/science.182.4108.161>.

Smith C.A., Sundh M., Mikko H., 2014. Surficial Geology Indicates Early Holocene Faulting and Seismicity, Central Sweden. *International Journal of Earth Sciences* 103, 1711–1724. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1025-6>.

Stepanov V.V., 2001. Geodynamic Danger of Industrial Facilities. Moscow, 100 p. (in Russian) [Степанов В.В. Геодинамическая опасность промышленных объектов. М., 2001. 100 с.].

Stroevev A.P., Hättestrand C., Kleman J., Heyman J., Fabel D., Fredin O., Goodfellow B.W., Harbora J.M. et al., 2016. Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 147, 91–121. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.016>.

Sutinen R., Hyvönen E., Middleton M., Airo M.-L., 2018. Earthquake-Induced Deformations on Ice-Stream Landforms in Kuusamo, Eastern Finnish Lapland. *Global and Planetary Change* 160, 46–60. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.11.011>.

Tolstobrov D.S., Kolka V.V., Vashkov A.A., 2019. Records of the Catastrophic Event in Bottom Sediments of Lakes near Keret Village, Karelia. *Proceedings of KSC RAS* 10 (6–1), 260–266 (in Russian) [Толстобров Д.С., Колька В.В., Вашков А.А. Следы катастрофического события в донных осадках озер в районе села Кереть, Карелия // Труды КНЦ РАН. 2019. Т. 10. № 6–1. С. 260–266]. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.038>.

Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N., Kolka V.V., Korsakova O.P., Subetto D.A., 2018. Possible Traces of Holocene Tsunamis in Lake Sediments in the Area of the Settlement Teriberka (Kola Peninsula). *Transactions of KarRC RAS* 9, 92–102 (in Russian) [Толстобров Д.С., Толстоброва А.Н., Колька В.В., Корсакова О.П., Субетто Д.А. Возможные следы голоценовых цунами в озерных отложениях в районе пос. Терiberка (Кольский полуостров) // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 9. С. 92–102]. <http://doi.org/10.17076/lim865>.

Trifonov V.G., 1999. Neotectonics of Eurasia. Nauchny Mir, Moscow, 243 p. (in Russian) [Трифонов В.Г. Неотектоника Евразии. М.: Научный мир, 1999. 243 с.].

Vologina E.G., Sturm M., Radziminovich Ya.B., 2021. Traces of High Seismic Activity in the Uppermost Sediments of Lake Baikal, Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 544–562. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0538>.

Yudakhin F.N., Shchukin Yu.K., Makarov V.I., 2003. Deep Structure and Recent Geodynamic Processes in the Lithosphere of the East European Platform. Publishing House of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, 299 p. (in Russian) [Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. 299 с.].