

УДК 55(1/9)

А.О. Агибалов¹

РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ КАК ИНДИКАТОР СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Установленные в ходе полевых исследований разрывные нарушения в четвертичных отложениях свидетельствуют о том, что на территории Северного Приладожья в новейшее время происходили сейсмические события магнитудой не менее 5. Данные компьютерного моделирования показали, что современная сейсмичность этой территории связана с новейшей активизацией докембрийских дизьюнктивных структур в обстановке северо-западного сжатия. С помощью анализа рельефа выделены разрывные нарушения, ограничивающие котловину Ладожского озера и относящиеся к активным неотектоническим структурам.

Ключевые слова: палеосейсмодислокации, компьютерное моделирование, Приладожье.

Faults in the quarterly deposits established during field investigations indicate that seismic events with magnitude of no less than 5 occurred in the Northern Ladoga region during neotectonic time. Computer modeling has shown that the modern seismicity of this territory is associated with the neotectonic activation of Precambrian disjunctive structures in conditions of NW compression. Relief analysis allows us to distinguish faults limiting the basin of the Ladoga Lake, which belongs to active neotectonic structures.

Key words: paleoseismodislocations, computer modeling, Ladoga region.

Введение. Территория Северного Приладожья (юго-восток Балтийского щита) отличается низкой сейсмической активностью на современном этапе: по приведенным в сейсмическом каталоге Хельсинского университета данным максимальная магнитуда землетрясений за исторический период времени достигала 3,2 [Сейсмический..., 2018]. Однако, по мнению А.А. Никонова и С.В. Шварева, на территории Северного Приладожья возможны сейсмические события с магнитудой ≥ 6 [Никонов, Шварев, 2015; Родкин и др., 2012]. Для проверки обоснованности высказанной точки зрения автором были изучены разрезы четвертичных отложений на предмет наличия следов древних землетрясений. Для того чтобы предложить решение проблемы о возможных механизмах возникновения сейсмических событий, выполнено компьютерное моделирование с помощью программы RMS 2013. Исследования, включающие изучение признаков древних землетрясений, компьютерное тектонофизическое моделирование, анализ рельефа, позволяют рассматривать Северное Приладожье как область проявления сейсмических событий с магнитудой ≥ 5 , связанных с неотектонической активизацией докембрийского структурного плана в обстановке северо-западного сжатия.

Материалы и методы исследований. Новые данные о разрывных нарушениях, проявленных в четвертичных отложениях Северного Приладожья, получены в ходе полевых наблюдений. В июле—

августе 2017 и 2018 гг. автором были изучены разрезы гляциолимнических отложений верхнего неоплейстоцена, вскрытых в заброшенных карьерах. В песках и гравелитах зафиксированы разрывные нарушения, видимая амплитуда смещения по которым варьирует от нескольких сантиметров до 0,7 м.

Компьютерное моделирование, выполненное с помощью программы RMS 2013, позволило рассчитать в относительных величинах значения амплитуды вертикальных и горизонтальных перемещений по разрывам в обстановке северо-западного сжатия (азимут простирации оси максимального сжатия 310°), которое, судя по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений, преобладает на рассматриваемой территории в новейшее время [Slunga, 1991]. В качестве исходных материалов для построения модели использованы отметки рельефа [Цифровая..., 2009; Карта., 1988], схема разрывных нарушений [Хазов и др., 2004], а также физико-механические характеристики среды (значения коэффициентов Пуассона и внутреннего трения). Выбор для моделирования схемы разрывных нарушений, приведенной в работе [Хазов и др., 2004], обусловлен тем, что на ней показаны крупные разрывные нарушения, находящие отражение в современном рельефе и проявляющие сейсмическую активность [Агибалов и др., 2017].

Методика моделирования заключалась в том, что на поверхность рельефа, построенную в формате Grid, была нанесена сетка разрывных нару-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; e-mail: Agibalo@yandex.ru

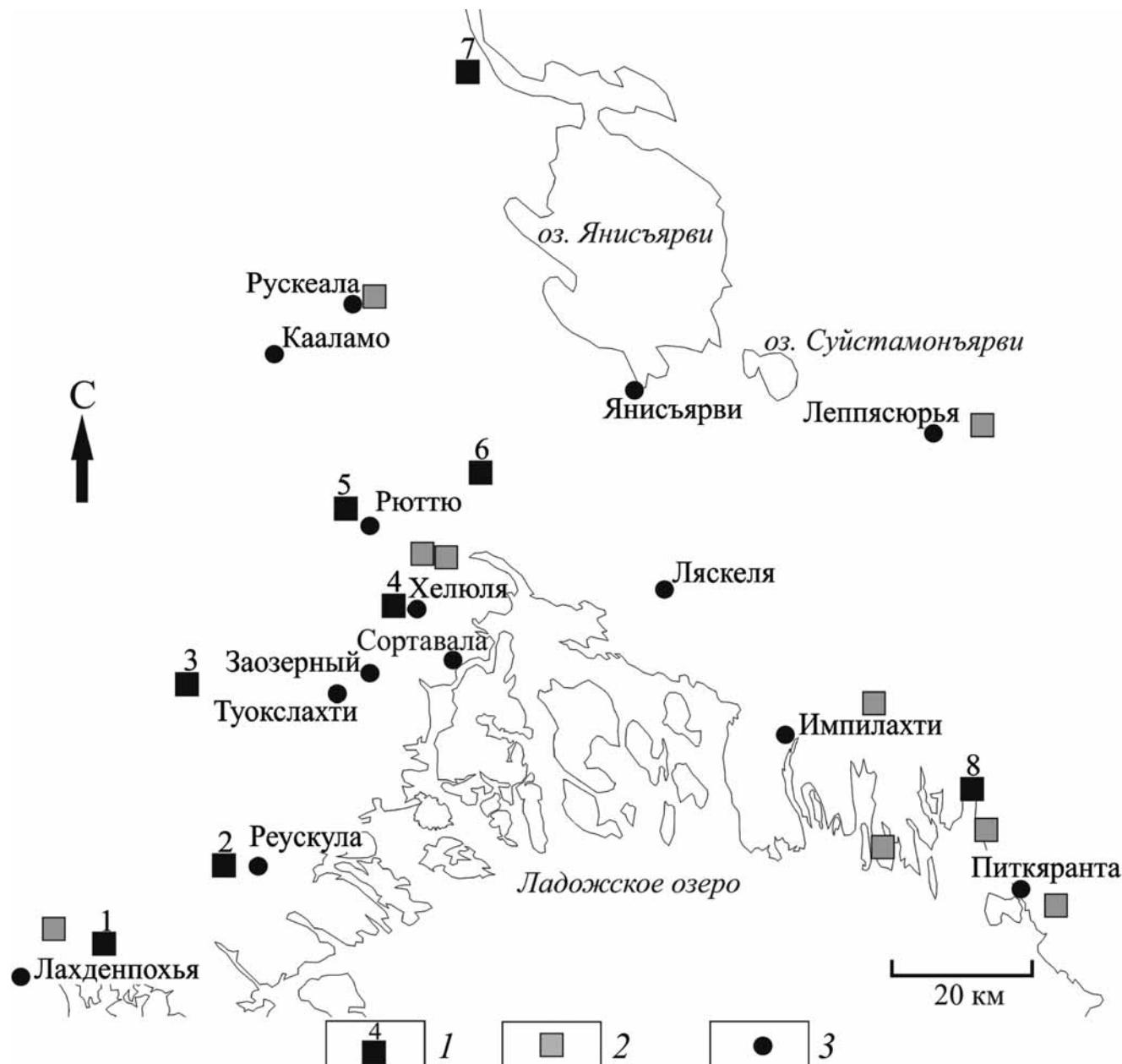


Рис. 1. Схема расположения песчаных карьеров, в которых изучены разрывные нарушения: 1 — точки наблюдения и их номера; 2 — каменные карьеры, в которых проводились взрывные работы; 3 — населенные пункты

шений и задана ориентировка оси максимального сжатия. С помощью модуля «Fracture modeling» выполнен расчет относительных величин перемещений по осям X , Y , Z , взятых по модулю. Все величины перемещений вычислены без учета знака и приняты как положительные, чтобы выявить участки, в пределах которых горизонтальные и вертикальные смещения максимальны. Построенная схема суммарных перемещений по осям X , Y , Z сопоставлена с характером распределения современной сейсмичности. При проведении расчетов сделаны определенные допущения о геометрии разрывных нарушений (которые считаются непересекающимися) и величинах напряжений, принятых как достаточные для возникновения новых разрывов малой протяженности. Более

подробно методика моделирования рассмотрена в [Руководство..., 2012] и в статье [Агибалов и др., 2017]. Анализ рельефа позволил оценить, насколько отчетливо докембрийские дизьюнктивные структуры проявлены в современном рельефе по комплексу признаков: крутизне склонов; плотности вертикальных стенок и уступов (вычисленной с помощью программы ArcGis как отношение длины линейных объектов к площади расчетной ячейки); суммарной длине рек и линеаментов, ориентированных вдоль направлений простирации соответствующих разрывов. Исходными материалами для исследований служили цифровая модель рельефа [Цифровая..., 2009], топографические карты масштаба 1 : 200 000, а также ранее опубликованные схемы блоковой делимости

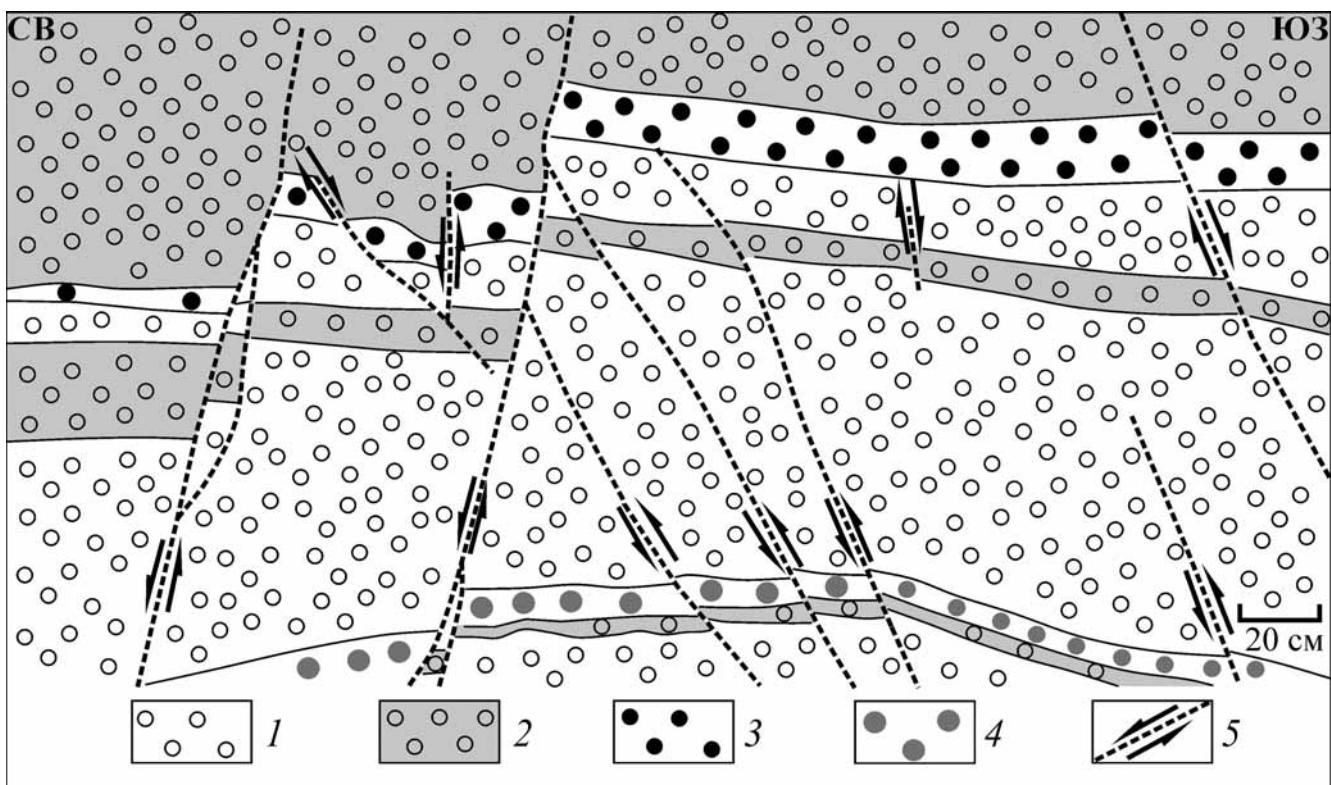


Рис. 2. Разрывные нарушения в песках верхнего неоплейстоцена, зафиксированные в районе оз. Янисъярви: 1 — тонкослоистые пески; 2 — маркирующий слой серых среднезернистых песков; 3 — маркирующий слой желтых средне-крупнозернистых песков; 4 — маркирующий слой светло-желтых средне — мелкозернистых песков; 5 — разрывные нарушения и направления смещения по ним

Северного Приладожья [Агибалов и др., 2017] и линеаментов дна Ладожского озера [Анохин и др., 2016]. Методика работ включала в себя построение расчетных ячеек прямоугольной формы размером $3,2 \times 11,2$ км. Каждая ячейка была расположена таким образом, что поверхность сместителя разрыва разделяла ее короткие стороны на отрезки равной длины. Построенным ячейкам присвоены значения упомянутых выше параметров рельефа. Таким образом были выделены наиболее четко выраженные в рельефе разрывные нарушения, которые относятся к геодинамически активным неотектоническим структурам. С некоторыми из них связаны современные сейсмические события малой магнитуды [Сейсмический..., 2018].

Результаты исследований и их обсуждение. В ходе полевых наблюдений зафиксированы разрывные нарушения, проявленные в верхне-неоплейстоценовых отложениях, разрезы которых изучены в заброшенных карьерах (таблица; рис. 1). Выявленные дизьюнктивные структуры можно разделить на три кинематические группы, отличающиеся по типу напряженного состояния. К первой группе относятся сбросы запад-юго-западного простириания, зафиксированные в районах пос. Хелюля, оз. Янисъярви (рис. 2), г. Лахденпохья (рис. 3), а также сбросы северо-восточного простириания, наблюдавшиеся в районе г. Питкяранта. Эти разрывы, сформировавшиеся в обстановке

субмеридионального растяжения, наиболее распространены, хорошо выражены в обнажениях и характеризуются высокими значениями видимой амплитуды смещения (до 0,7 м). Поверхности сместителей разрывов этой группы часто разветвляются, образуя сложные структурные формы. Во вторую кинематическую группу объединены сбросы северо-восточного простириания, изученные в районе оз. Рюттюярви и пос. Рейускула, возникшие в обстановке юго-западного растяжения. К третьей группе отнесены редкие малоамплитудные взбросы запад-северо-западного простириания, которым соответствует обстановка пологого север-северо-восточного сжатия. Они были встречены в районе оз. Янисъярви и пос. Туокслахти. Более подробное описание разрывных нарушений для каждой точки наблюдения приведено в статье [Агибалов и др., 2018].

Изученные разрывные нарушения можно интерпретировать как первичные палеосейсмодислокации, возникающие при землетрясениях с магнитудой ≥ 5 [Палеосейсмология, 2011]. Это значение превышает магнитуду Восточно-Ладожского землетрясения 1921 г., составляющую, по оценкам А.А. Никонова, $4,5 \pm 0,3$ [Никонов, 2005]. По другим оценкам наибольшее значение магнитуды, установленное за исторический период времени на территории Приладожья, достигает 3,2 [Сейсмический..., 2018]. Промышленные взрывы

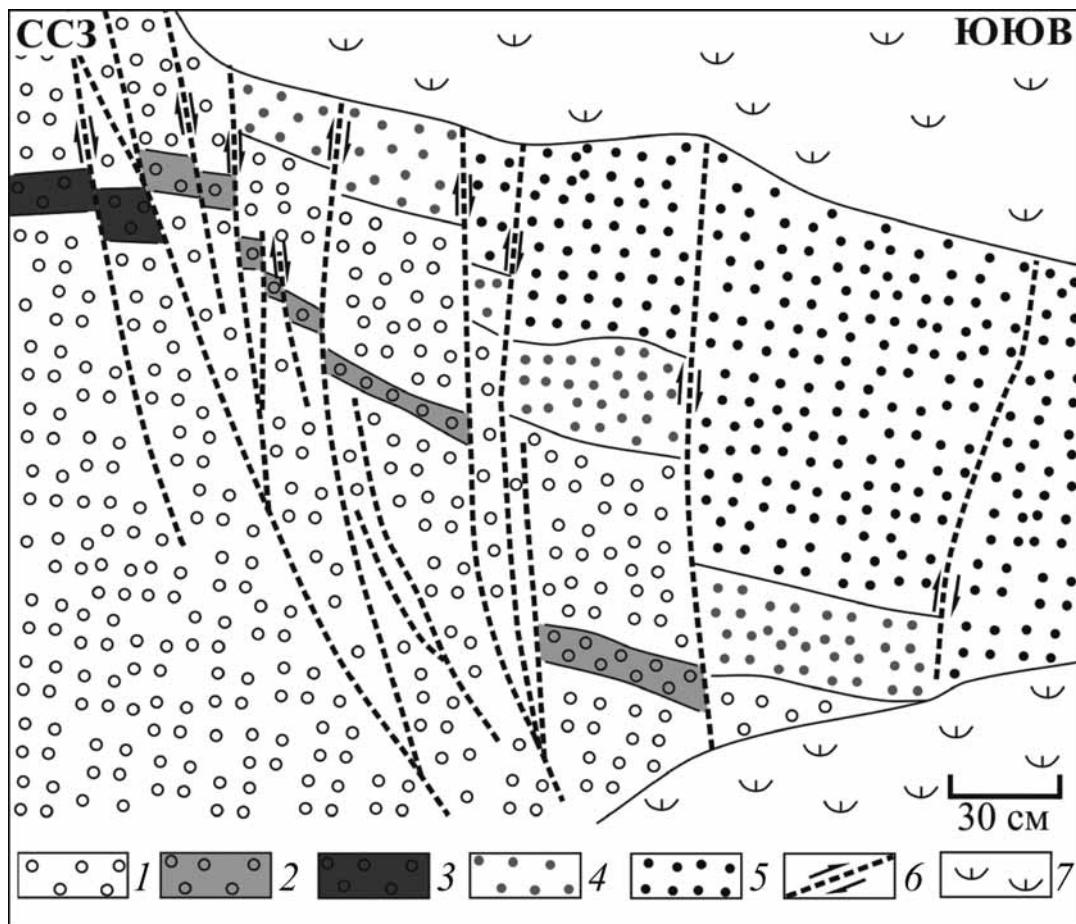


Рис. 3. Разрывные нарушения в песках верхнего неоплейстоцена, зафиксированные в районе г. Лахденпохья: 1 — пески с плохо выраженной слоистостью; 2 — маркирующий слой светло-серых песков с плохо выраженной слоистостью; 3 — маркирующий прослой серых слоистых крупнозернистых песков; 4 — маркирующий слой серых тонкослоистых среднезернистых песков; 5 — маркирующий прослой серых тонкослоистых среднекрупнозернистых песков; 6 — разрывные нарушения и направления смещения по ним; 7 — задернованные участки

в карьерах нельзя рассматривать в качестве причины формирования рассматриваемых разрывных структур по следующим соображениям. Самые сильные взрывы в Карелии производятся в карьере г. Костомукша [Шаров, 2011], не показанном на карте очагов сейсмичности, индуцированной инженерной деятельностью [Землетрясения..., 2007]. Ближайшие источники техногенной сейсмичностью — рудники в городах Заполярный и Ковдор [Землетрясения..., 2007], максимальные магнитуды взрывов на территории которых достигали 3,3 в 1990-х гг. [Асминг и др., 2010].

Кроме того, некоторые каменные карьеры, в которых проводились взрывные работы, а также ряд песчаных карьеров (где находятся точки наблюдения) расположены вблизи населенных пунктов. Эти участки не могли подвергаться значительному техногенному сейсмическому воздействию, связанному с промышленными взрывами, утилизацией боеприпасов и т.п. по соображениям безопасности. В работах [Ассиновская, 2011; Шаров, 2011] показано, что локальные сотрясения на территории Карелии в ряде случаев обусловлены нетектоническими факторами: морозобойными ударами, происходившими при резкой смене температуры воздуха на берегах крупных озер; и колебаниями уровня воды в Ладожском озере, связанными с изменением атмосферного давления. Однако интенсивности этих событий недостаточно

для возникновения дизьюнктивных нарушений в рыхлых грунтах [Палеосейсмология, 2011].

Альтернативный вариант интерпретации рассмотренных дизьюнктивных структур предполагает, что они возникли в результате просадок и оползания грунтов при таянии погребенного льда [Горбатов, Никонов, 2015]. Однако этот механизм не позволяет объяснить наличие определенных закономерностей ориентировки поверхностей смещителей разрывных нарушений, которые можно подразделить на кинематические группы. Кроме того, просадки и оползания грунтов не могли привести к формированию разрывов со взбросовой кинематикой, зафиксированных в районах пос. Рюттю, оз. Рюттюярви, пос. Туокслахи и оз. Янистяярви. [Агабалов и др., 2018]. Поскольку поздне-неоплейстоценовые гляциолимнические отложения не перекрыты мореной [Степанов и др., 2014], изученные деформации не относятся к криогенным дислокациям. Оползневые процессы также нельзя рассматривать в качестве универсального механизма формирования рассматриваемых разрывных нарушений, так как в некоторых песчаных карьерах, расположенных рядом с крутыми склонами, не зафиксированы дизьюнктивные структуры в четвертичных образованиях.

Таким образом, анализ разрывных нарушений указывает на то, что на территории Северного Приладожья в новейшее время происходили

сейсмические события магнитудой ≥ 5 . По данным [Палеосейсмология, 2011], это минимальное значение магнитуды, необходимое для формирования первичных палеосейсмодислокаций. Сейсмические события могли быть обусловлены гляциоизостатическими движениями [Родкин и др., 2012], интенсивность которых снижается со времени последнего оледенения, поэтому параметры отмеченных палеосейсмодислокаций неправомерно использовать для характеристики современной сейсмичности [Несмелянов и др., 2011].

Для решения задачи о возможных механизмах проявления сейсмичности за исторический период наблюдений выполнено компьютерное моделирование. Установлено, что при северо-западной ориентировке оси максимального сжатия наибольшие значения суммарных относительных величин горизонтальных и вертикальных смещений, взятых по модулю, приурочены к восточной части котловины Ладожского озера (рис. 4). В пределах этой области расположен эпицентр Восточно-Ладожского землетрясения, произошедшего 30 ноября 1921 г. магнитудой 4,5 — самого крупного сейсмического события, зафиксированного за исторический период наблюдений [Никонов, 2005]. Выявлена численная корреляция между суммарными величинами перемещения по осям X , Y , Z , взятыми по модулю, и магнитудами землетрясений, интерполированными на всю рассматриваемую территорию. Коэффициент корреляции Пирсона составляет 0,72, что указывает на взаимосвязь сейсмичности и дизьюнктивных структур, развивающихся в современном поле напряжений.

О геодинамической активности древних разрывных нарушений свидетельствуют следующие соображения. Северо-западное и юго-восточное ограничения котловины Ладожского озера выделены в качестве активных разломов [Бачманов и др., 2017; Trifonov, 1996]. Этим структурам соответствуют сейсмолинеаменты [Никонов, Шварев, 2015] и наиболее проницаемые зоны по данным гелиевой съемки [Схема.., 1983]. Выполненный

автором статьи анализ рельефа позволяет сделать вывод о том, что разломы, ограничивающие впадину Ладожского озера с северо-запада и востока, относятся к числу наиболее отчетливо проявившихся в рельефе дизьюнктивных структур, выделенных по комплексу геоморфологических признаков: крутизне склонов, плотности вертикальных стенок и уступов, длине линеаментов, ориентированных вдоль направлений простирации разрывов (рис. 5). Приуроченность эпицентров современных землетрясений к этим разломам указывает на то, что прямое отражение последних в рельефе обусловлено не только экзогенными факторами, но и неотектоническими процессами.

Заключение. Данные полевых наблюдений, в ходе которых были изучены разрывные нарушения в рыхлых четвертичных отложениях, позволяют сделать вывод о том, что на территории Северного Приладожья в новейшее время происходили сейсмические события магнитудой ≥ 5 . Вероятно, они были обусловлены гляциоизостатическими движениями. Согласно данным компьютерного моделирования современная сейсмичность связана с активизацией древних разрывных нарушений в новейшее время. Этот процесс реализуется в обстановке северо-западного сжатия. По комплексу геоморфологических признаков выделяются разрывные нарушения, которые ограничивают впадину Ладожского озера с северо-запада и востока. Они относятся к развивающимся неотектоническим структурам, проявляющим сейсмическую активность.

Благодарности. Автор выражает благодарность чл.-корр. РАН Ю.А. Морозову, научному сотруднику ИФЗ РАН А.А. Сенцову и студенту МГУ имени М.В. Ломоносова Г.П. Барышеву за помощь в проведении полевых исследований.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-35-00359 «Оценка новейшей и современной геодинамической активности докембрийских купольно-надвиговых структур Приладожья»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агабалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Девяткина А.С. Оценка влияния современных движений земной коры и активизированного в новейшее время докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 791–807.
- Агабалов А.О., Сенцов А.А., Барышев Г.П., Зайцев В.А. Разрывные нарушения в четвертичных отложениях Северного Приладожья как индикатор новейшей сейсмотектонической активности территории // Мат-лы науч. конф. «Восточно-Европейская платформа: геология, неотектоника, геоморфология» (10–11 сентября 2018 г.). М.: Пере, 2018. С. 38–56.
- Анохин В.М., Науменко М.А., Нестеров Н.А. Особенности направленности линейных форм рельефа дна Ладожского озера // География: развитие науки и обра-
- зования. Ч. I / Отв. ред. В.П. Соломин, В.А. Румянцев, Д.А. Субетто. СПб.: Изд-во РГПУ имени А.И. Герцена. 2016. С. 108–117.
- Асминг В.Э., Кременецкая Е.О., Виноградов Ю.А., Евтугина З.А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения сейсмической опасности региона // Вестн. Мурманского гос. техн. ун-та. 2010. Т. 13, № 4–2. С. 998–1007.
- Ассиновская Б.А., Карпинский В.В., Недошивин С.А. Необычное землетрясение 30 июля 2010 года на Ладожском озере // Геориск. 2011. № 1. С. 58–62.
- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 711–736.
- Горбатов Е.С., Никонов А.А. Дислокации в озерно-ледниковых отложениях Ленинградской области:

феноменология, типизация, вопросы генезиса // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Мат-лы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара / Отв. ред. Ю.Л. Ребецкий. М.: ИФЗ, 2015. С. 67–73.

Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Кн. 2. Микросейсмичность. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 96 с.

Карта глубин Ладожского озера. Масштаб 1 : 250 000. М.: ГУГК, 1988.

Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Войкова О.А., Донцова Г.Ю. Сейсмичность северо-западной части Русской плиты и ее гляциоизостатическая природа // Геоэкология, инженерная геология, геокриология. 2011. № 2. С. 141–156.

Никонов А.А. Восточно-Ладожское землетрясение 30 ноября 1921 года // Физика Земли. 2005. № 7. С. 1–5.

Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинеаменты и разрушительные землетрясения в российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет // Мат-лы междунар. конф. «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности» (23–25 сентября 2015 г.) / Ред. В.С. Имаев. Нерюнгри: Изд-во Технического ин-та (ф) СВФУ, 2015. С. 243–251.

Палеосейсмология / Под ред. Д.П. Мак-Калпина. Т. 1. М.: Научный мир, 2011. 560 с.

Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика, 2012. Т. 3, № 3. С. 203–237.

Руководство пользователя «Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)», 2012. URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2 (дата обращения: 10.10.2018).

Сейсмический каталог Хельсинского университета. URL: <http://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php> (дата обращения: 10.10.2018).

Степанов К.И., Санин Д.М., Санина Г.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. 2-е изд. Карельская серия. Листы Р-35–XXIV, Р-36–XIX. Объясн. записка. СПб., 2004. 230 с.

Схема проницаемости земной коры европейской части СССР по данным гелиевых исследований. Масштаб 1 : 2 500 000 / Ред. А.Н. Еремеев. М.: ВИМС, 1983.

Хазов Р.А., Шаров Н.В., Исанина Э.В. Глубинное строение и металлогенез Приладожья // Геол. и полезные ископаемые Карелии. 2004. Вып. 7. С. 55–74.

Цифровая модель рельефа. URL: http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi (дата обращения: 10.10.2018)

Шаров Н.В. Сейсмический мониторинг природных и техногенных событий на территории Карелии // Геология Карелии от архея до наших дней: Мат-лы докл. всеросс. конф., посвященной 50-летию Института геологии КарНЦ РАН (24–26 мая 2011 г.). Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2011. С. 199–203.

Slunga R.S. The Baltic shield earthquakes // Tectonophysics. 1991. Vol. 189. P. 323–331.

Trifonov V.G. The Map of Active Faults in Eurasia: Principles, Methods, and Results // J. Earthquake Prediction Res. 1996. Vol. 5, N 3. P. 326–347.

Поступила в редакцию 18.10.2018

Поступила с доработки 00.00.2019

Принята к публикации 00.00.2019