

УДК 910.3

А.О. Агибалов¹, А.А. Сенцов², В.А. Зайцев³**ВЛИЯНИЕ АКТИВИЗИРОВАННЫХ ДОКЕМБРИЙСКИХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ НА РЕЛЬЕФ КОТЛОВИНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА**

Установленный характер взаимосвязи между пространственным рисунком линейных элементов рельефа и докембрийских разрывных нарушений котловины Ладожского озера позволяет предположить, что прямое отражение последних в рельефе может быть связано с неотектонической активизацией дизъюнктивных структур. По данным выполненного компьютерного и аналогового тектонофизического моделирования сделан вывод о том, что этот процесс происходит в обстановке северо-восточного растяжения и может рассматриваться как один из значимых факторов рельефообразования наряду с деятельностью ледника, гидроизостатическими движениями и другими процессами.

Ключевые слова: Ладожское озеро, тектонофизическое моделирование, рельеф

Введение. Ладожское озеро располагается в юго-западной части Кольско-Карельской провинции Восточно-Европейской равнины [Спиридонов, 1978]. Котловина озера, вытянутая в северо-западном направлении, имеет форму, близкую к прямоугольной. По среднемноголетним данным, Ладожское озеро приподнято на 5,1 м над уровнем моря. Оно относится к глубоким водоемам: максимальная глубина котловины достигает 230 м, средняя глубина составляет 46,9 м. Около 43% площади акватории приходится на районы с глубинами не менее 50 м, 12% площади – на участки с глубинами 100 м и более [Румянцев, Кудерский, 2010]. Проведенный М.А. Науменко морфометрический анализ показал, что северная, самая глубоководная часть котловины отличается резко расчлененным, контрастным рельефом, в то время как центральные и южные части впадины более пологие. Для них характерно развитие слабо расчлененных поверхностей, небольшие (1° – 2° в средней части и $0,2^{\circ}$ – $0,3^{\circ}$ в южной части) углы наклона склонов, в то время как на севере котловины встречаются крупные возвышенности, вытянутые в северо-северо-западном направлении, а углы наклона склонов в районе острова Валаам и в ладожских шхерах могут превышать 5° . Различия в строении рельефа обусловлены геологическими факторами – северная часть впадины располагается в пределах Балтийского щита, сложенного устойчивыми к размыву архей-протерозойскими образованиями, а южная часть находится в области развития чехла Восточно-Европейской платформы [Науменко, 2013].

В настоящее время существуют различные точки зрения по вопросу о том, какие процессы оказали влияние на облик рельефа котловины Ладожского озера. По мнению А.В. Амантова и М.В. Амантовой [2014], развитие впадины Ладожского озера можно объяснить с позиций ледниковой теории.

А.А. Никонов [2001; 2017] полагает, что в течение четвертичного периода множество разрывных нарушений испытывали тектоническую активизацию, что привело к увеличению контрастности рельефа котловины. А.И. Спиридонов [1978] отмечает влияние как экзогенных, так и тектонических факторов на рельеф Ладожского озера и его побережья. В.П. Юрковец [2011] считает, что впадина Ладожского озера является молодой астроблемой возрастом около 40 тысяч лет. Такое разнообразие точек зрения указывает на сложность и многофакторность процесса рельефообразования котловины. Выполненное авторами данной работы аналоговое и компьютерное тектонофизическое моделирование позволило оценить влияние неотектонических движений, связанных с активизацией докембрийских дизъюнктивных структур, на облик подводного рельефа впадины Ладожского озера. Полученные результаты позволяют рассматривать неотектоническую активизацию древних разрывных нарушений как один из важных факторов рельефообразования.

Материалы и методы исследования. С целью проведения анализа подводного рельефа и компьютерного моделирования были оцифрованы карты глубин Ладожского озера, масштаб которых варьирует от 1:100 000 до 1:10 000 для детально изученных участков, расположенных вблизи береговой линии [Ладожское озеро, 2002]. С помощью программы «ArcGis» построена карта уклонов рельефа дна, сопоставленная со схемами плотности разрывных нарушений, опубликованных в работах [Амантов, 2014; Анохин с соавт., 2016]. Для того чтобы оценить, насколько отчетливо древние разрывные нарушения выражены в рельефе, рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между плотностями разломов и линеаментов разных порядков, выделенных путем визуального дешифрирования В.М. Ано-

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

² Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, лаборатория сейсмогеологии и сейсмического микрорайонирования, науч. с.; e-mail: alekssencov@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, зав. лабораторией исследования геокатастроф, канд. геол.-мин. н.; e-mail: v.zaitsev@mail.ru

хиным с соавт. [2016]. По комплексу признаков (очертаниям береговой линии, пространственному рисунку гидросети и горизонталей рельефа) построена схема блоковой делимости острова Валаама. Методика подобного геоморфологического анализа изложена в работе [Костенко, 1999]. Кроме того, авторами данной статьи была рассчитана численная корреляция между плотностями границ блоков и разрывных нарушений Валаама, рассмотренных в монографии [Свириденко, Светов, 2008].

Для того чтобы оценить возможное влияние неотектонических движений по древним разрывным нарушениям на облик рельефа дна Ладожского озера, проведено компьютерное и аналоговое тектонофизическое моделирование. В качестве исходных данных для компьютерного моделирования с помощью программы «RMS 2013» использовались отметки глубин [Ладожское озеро, 2002], схемы разрывных нарушений [Амантов, 2014; Анохин с соавт., 2016; Свириденко, Светов, 2008], физико-механические характеристики среды (коэффициенты Пуассона и внутреннего трения), а также ориентировка внешних осей максимального сжатия и растяжения. В связи с тем, что представления разных исследователей [Амантов, 2014; Анохин с соавт., 2016; Свириденко, Светов, 2008] о пространственном рисунке дизъюнктивных структур акватории Ладожского озера различаются, авторами были построены 3 модели с использованием различных схем разрывных нарушений (рис. 1). Для каждой модели проводился расчет вероятности формирования новых разрывов малой протяженности, относительных амплитуд вертикальных и горизонтальных смещений при разных ориентировках главных нормальных осей напряжений. В ходе моделирования были последовательно заданы азимуты простирания сжатия от 0° до 180° с шагом 10° . Оценка полученных результатов моделирования и выбор наиболее достоверных моделей проводился путем сопоставления рассчитанных показателей с реальными параметрами географической среды. Схемы вероятности формирования новых разрывов малой протяженности сопоставлялись с характером распределения эпицентров землетрясений [Earthquake database ..., 2018] и плотностью линейментов, относительные амплитуды вертикальных перемещений – с отметками глубин, суммарные величины относительных перемещений по осям X, Y, Z, взятых по модулю, – с плотностью осей линейных форм рельефа. Методика расчета упомянутых параметров моделей заключается в том, что по отметкам глубин строится поверхность в формате «Grid», на которую наносится сетка разрывных нарушений, после чего в меню «Fracture modeling» указываются ориентировки внешних главных нормальных осей напряжений и осредненные значения коэффициентов Пуассона и внутреннего трения. При проведении расчетов сделаны определенные допущения о геометрии разрывных нарушений (которые считаются непересекающимися) и величинах напряжений, принятыми как достаточные для возникновения новых разрывов малой протяженности. Более подробно ме-

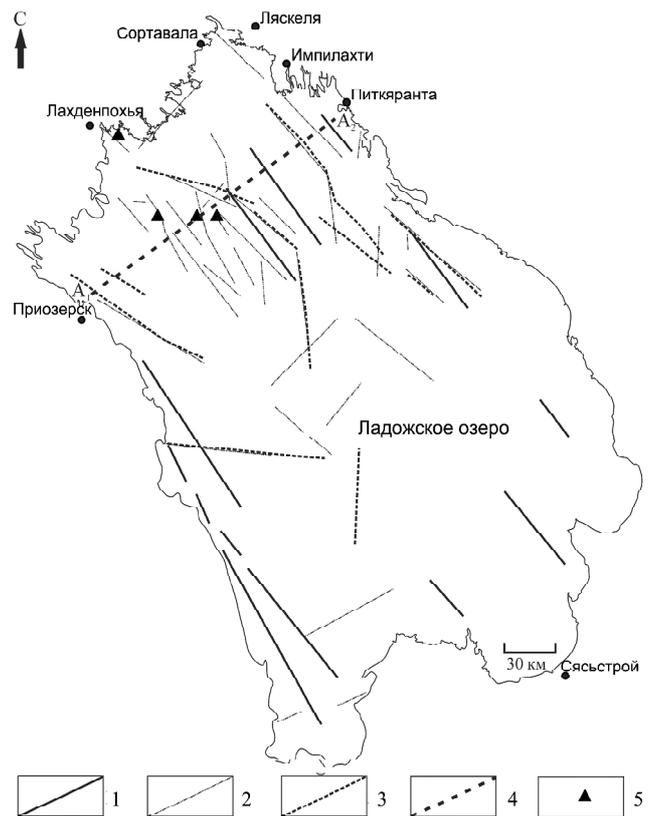


Рис. 1. Схема разрывных нарушений, использовавшихся в качестве исходных данных при компьютерном моделировании. Обозначения: 1–3 разрывные нарушения по данным разных исследователей: 1 – по: [Свириденко, Светов, 2008]; 2 – по: [Анохин с соавт., 2016]; 3 – по: [Амантов, 2014]; 4 – линия профиля глубин, показанного на рис. 2; 5 – эпицентры землетрясений (по: [Earthquake database ..., 2018])

Fig. 1. Scheme of faults used as initial data in computer modeling: 1 – 3 faults according to different researchers: 1 – after: [Sviridenko, Svetov, 2008]; 2 – after: [Anokhin et al., 2016]; 3 – after: [Amanov, 2014]; 4 – line of the depth section shown in Fig. 2; 5 – epicenters of earthquakes (after: [Earthquake database ..., 2018])

тодика моделирования рассмотрена в статье [Агибалов с соавт., 2017].

Помимо компьютерного моделирования, авторами данной работы проведено аналоговое тектонофизическое моделирование, необходимым условием которого является соблюдение принципа подобия. В литературе рассмотрены разные подходы к реализации этого принципа: одни исследователи полагают, что соблюдение качественного подобия между моделью и природным объектом является достаточным условием для получения результата, не предполагающего количественной оценки параметров структурообразования [Гончаров, 2010]. Сторонники второго подхода считают, что подобие должно осуществляться на количественной основе [Борняков с соавт., 2014]. В качестве модельных материалов авторы настоящей работы использовали вязкую каолиновую глину и смесь среднезернистого песка с силиконом (2%). Глина традиционно применяется при проведении аналогового моделирования; обоснованность выбора глины как модельного

материала подтверждается расчетами условий подобия, изложенными в работе [Шерман с соавт., 1991]. Для того чтобы получить корректное масштабирование экспериментальной модели из смеси песка с силиконом, испытывающей хрупкие деформации, требуется соблюдение условий подобия, предполагающих близость значений углов внутреннего трения эквивалентного материала и пород, слагающих верхнюю часть земной коры, а также выполнение соотношения $C_c = C_p \times C_g \times C_L$, где C – безразмерные множители подобия по когезионной прочности (C_c), плотности (C_p), силы тяжести (C_g), длины (C_L) для модели и природного объекта [Dooley, Schreurs, 2012]. Множители подобия рассчитываются по формуле $C_i = i_m / i_n$, где C_i – множитель подобия по параметру i , i_m – значение параметра i в экспериментальной модели, i_n – аналогичное значение в природном объекте [Гончаров с соавт., 2005]. В статье [Dooley, Schreurs, 2012] показано, что при значениях $C_L = 10^{-5}$ (1 сантиметр модели соответствует одному километру природного объекта) при аналоговом моделировании целесообразно использовать гранулированные несвязные (сыпучие) материалы, к которым относится смесь песка с силиконом. Она имитирует, в первом приближении, блочную структуру, характерную для верхней части земной коры [Гончаров с соавт., 2014]. Таким образом, выбор каолиновой глины и смеси песка с силиконом в качестве эквивалентных материалов при тектонофизическом моделировании является обоснованным.

Нами было проведено 2 эксперимента. В ходе первого эксперимента моделировалась обстановка северо-восточного растяжения, в которой, судя по ранее полученным данным компьютерного моделирования, развивается котловина Ладожского озера на новейшем этапе. Методика проведения эксперимента заключалась в том, что модель из смеси песка с силиконом размерами $48,5 \times 35 \times 5$ см была помещена на основание из тонких полосок разной ширины, сделанных из шипованной резины. В процессе раздвижения полосок происходило изменение рельефа модели, изученного с помощью лазерного дальномера: для этого над поверхностью образца было установлено стекло с нанесенной квадратной сеткой, в узлах которой проводилось определение расстояния до поверхности образца. Рельеф модели был сопоставлен с рельефом северной части акватории Ладожского озера. Кроме того, были рассчитаны средние круговые значения (m) и выборочные моды (M) для направлений простирания линеаментов, выделенных В.М. Анохиным с соавт. [2016] и отдешифрованных по схеме высот модели. При расчетах использованы следующие формулы:

$$\arctg \frac{S}{C} + \frac{\pi}{2\{2 - (\text{sign}S)[1 + (\text{sign}C)]\}(\text{mod}2\pi)},$$

$$M = l + \frac{f_0 - f_{-1}}{2f_0 = f_{-1} - f_{+1}} \cdot h,$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k a_i \cos b_i, \quad S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k a_i \sin b_i,$$

где b_i – средняя точка i -го интервала группировки, a_i – частота, соответствующая i -му интервалу, l – нижний предел модального класс-интервала (то есть класс-интервала с наибольшей частотой, f_0, f_{-1} и f_{+1} – частоты, соответственно, предшествующего и следующего за модальным класс-интервалом, h – ширина модального класс-интервала. Более подробно методика расчета указанных параметров рассмотрена в монографии [Мардиа, 1978].

В ходе второго эксперимента изучалось развитие «ослабленных зон», конфигурация которых аналогична пространственному рисунку разрывных нарушений острова Валаам [Свириденко, Светов, 2008], в сдвиговой обстановке при ориентировке оси сжатия в северо-восточном направлении. Образец из влажной глины размерами $35 \times 28 \times 5$ см испытывал правосдвиговые деформации, локализованные в широкой зоне. Прибор для моделирования представляет собой прямоугольную металлическую рамку, в которую помещены тонкие деревянные планки. На них наклеены полосы из шипованной резины, необходимые для лучшего сцепления образца и поверхности прибора. В процессе деформации металлическая рамка приобретает форму параллелограмма, что приводит к равномерному смещению деревянных планок. Прибор сходной конструкции описан в работе [Schreurs, Colletta, 1998].

Результаты исследований и их обсуждение.

Сопоставление схем плотности разрывных нарушений и осей линейных форм рельефа подтверждает ранее установленную закономерность, заключающуюся в том, что выделенная В.М. Анохиным с соавт. [2016] сеть линеаментов связана с дизъюнктивными структурами. Авторами данной работы выполнен расчет коэффициентов корреляции между плотностями разрывов, выделенных разными исследователями [Анохин с соавт., 2016; Амантов, 2014], и плотностью осей линейных форм рельефа [Анохин с соавт., 2016], а также между плотностями разрывов и крутизной склонов. Полученные значения коэффициентов корреляции Пирсона указывают на то, что дизъюнктивные структуры находят отражение в рельефе (табл.). Этот факт, наряду с приуроченностью эпицентров сейсмических событий малых магнитуд к дизъюнктивным структурам, позволяет поставить вопрос о тектонической активизации последних в четвертичное время.

Для того чтобы оценить влияние данного процесса на облик рельефа, выполнено компьютерное моделирование. Установлено, что максимально высокие значения коэффициентов корреляции между отметками глубин и относительными амплитудами вертикальных смещений по разрывам достигаются в том случае, когда модель испытывает северо-восточное растяжение. При проведении расчетов с использованием схемы разрывных нарушений, опубликованной в статье [Свириденко, Светов, 2008], коэффициент корреляции Пирсона между рассматриваемыми параметра-

**Сопоставление плотностей разрывных нарушений и морфометрических параметров рельефа котловины
Ладожского озера**

Сопоставляемые параметры		Коэффициент корреляции Пирсона
Плотность разрывов*	Плотность осей линейных форм рельефа**	0,44
Плотность разрывов***	Плотность осей линейных форм рельефа*	0,27
Плотность разрывов*	Крутизна склонов	0,31

*По [Анохин с соавт., 2016].

**По [Анохин с соавт., 2006].

***По [Амантов, 2014].

ми равен 0,46 (азимут простирания оси растяжения 50°); при использовании схемы [Амантов, 2014] – 0,37 (азимут простирания оси сжатия 20°); при использовании карты разломов [Анохин с соавт., 2016] – 0,32 (азимут простирания оси растяжения 40°). В пользу обоснованности трех построенных моделей свидетельствует расположение эпицентров землетрясений малых магнитуд в пределах областей возможного формирования новых разрывов малой протяженности. Кроме того, существует численная корреляция между плотностью линеаментов и вероятностью формирования новых разрывов (коэффициент корреляции 0,20), а также между плотностью линеаментов и суммарными амплитудами смещений по осям X, Y, Z, взятыми по модулю (коэффициент корреляции 0,30; использована схема разрывных нарушений [Анохин с соавт., 2006]). Таким образом, выполненное компьютерное моделирование позволяет сделать вывод о том, что разрывные нарушения котловины Ладожского озера развиваются в обстановке северо-восточного растяжения. Наличие численной корреляции между рассчитанными относительными амплитудами вертикальных смещений и отметками глубин свидетельствует о том, что этот процесс мог оказывать влияние на облик рельефа Ладожского озера.

С целью повышения степени достоверности выводов, сделанных по данным компьютерного моделирования, проведен эксперимент, в ходе которого модель из песка с силиконом испытывала растяжение. В результате эксперимента сформировалась система сопряженных поднятий и впадин, ориентированных ортогонально оси растяжения. В рельефе Ладожского озера им соответствуют аналогичные морфоструктуры северо-западного простирания (рис. 2). На построенной с помощью лазерного дальномера схеме высот рельефа модели выделены три статистически значимых направления простирания линеаментов, соответствующие ориентировкам 130° , 90° – 100° , 0° , 50° (в порядке убывания значимости). В.М. Анохиным с соавт. [2016] было показано, что сходные направления простирания (по азимутам 140° , 0° , 90° , 40° – 50°) линейных элементов рельефа выделяются путем визуального дешифрирования батиметричес-

кой карты Ладожского озера (рис. 3). О схожести роз-диаграмм, иллюстрирующих закономерности ориентировок линеаментов, выделенных по данным анализа рельефа модели и акватории Ладожского озера, свидетельствует близость средних круговых значений (m) и выборочных мод (M). Для рельефа котловины величины m и M составляют 74° и 136° , соответственно, а для рельефа модели рассчитаны значения $m=72^\circ$ и $M=143^\circ$.

Наличие детальных топографических карт и крупномасштабной схемы разрывных нарушений позволили рассмотреть территорию острова Валаам в качестве опорного участка. Разрывные нарушения Валаама хорошо проявляются в рельефе как линейные понижения, нередко выделяющиеся по спрямленным очертаниям береговых линий (рис. 4). Коэффициент корреляции между плотностью разломов [Свириденко, Светов, 2008] и выделенных по данным анализа рельефа границ блоков равен 0,45. Выполненное аналоговое моделирование показало, что при развитии «ослабленных зон» в сдвиговой обстановке (ось растяжения ориентирована в северо-восточном направлении) вдоль разрывов северо-западного простирания возникают трещины отрыва, которым соответствуют понижения в рельефе острова. Немногочисленные разрывы северо-восточного простирания, ориентированные ортогонально оси сжатия, развиваются как содвиги – разрывы со сближающимися в процессе деформации крыльями [Расцветаев, 2008]. В рельефе модели со-

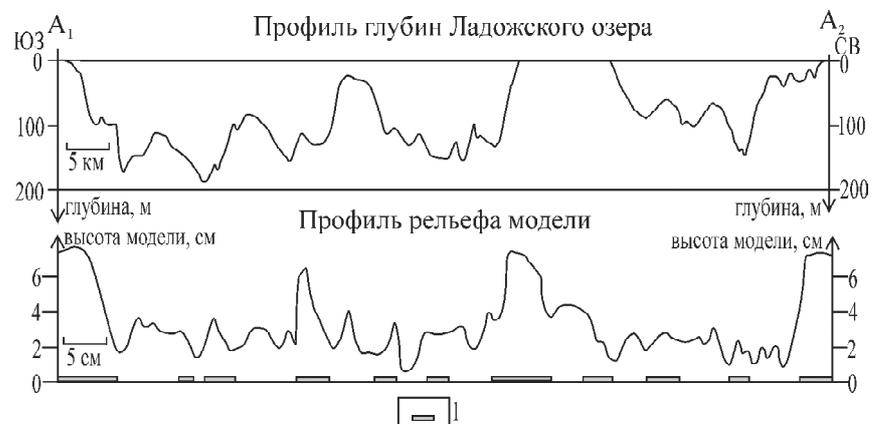


Рис. 2. Сопоставление профиля глубин Ладожского озера и профиля рельефа модели: 1 – полоски из шипованной резины

Fig. 2. Comparison of the profile of the Ladoga Lake depths and the profile of the model's relief: 1 – bands of studded rubber

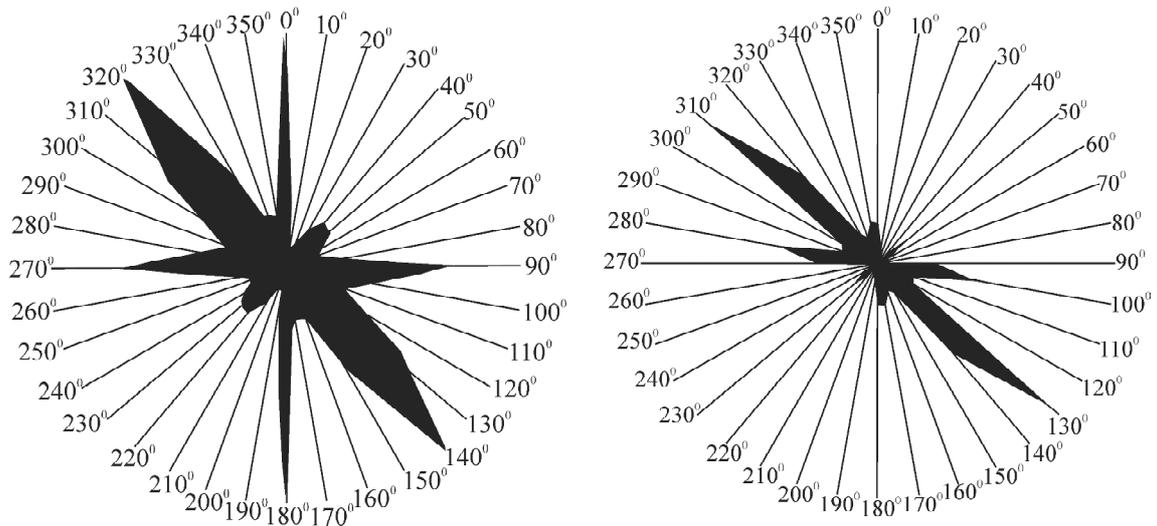


Рис. 3. Сопоставление роз-диаграмм, иллюстрирующих закономерности пространственного распределения линейментов, выделенных по цифровой модели рельефа Ладожского озера (по: [Анохин с соавт., 2016], (слева) и по рельефу модели (справа)

Fig. 3. Comparison of rose diagrams illustrating the patterns of the spatial distribution of lineaments identified by the digital model of the Ladoga Lake (after: [Anokhin et al., 2016], (left) and by the model topography (right))

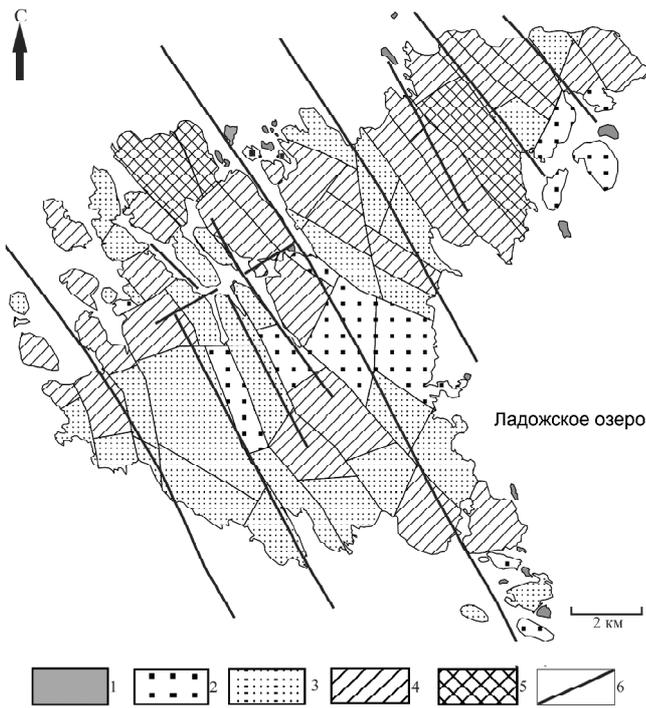


Рис. 4. Схема блоковой делимости острова Валаам, составленная по данным анализа рельефа: 1–5 максимальные высотные отметки блоков (в метрах): 1–0–10; 2–10–20; 3–20–30; 4–30–40; 5–40–50; 6– разрывные нарушения (по: [Свириденко, Светов, 2008])

Fig. 4. Block divisibility scheme of the Valaam Island, based on the analysis of relief data: 1–5 maximum elevations of blocks (meters): 1–0–10; 2–10–20; 3–20–30; 4–30–40; 5–40–50; 6 – faults (after: [Sviridenko, Svetov, 2008])

двигам также соответствуют локальные понижения. Таким образом, результаты проведенных экспериментов согласуются с ранее полученными путем компьютерного моделирования данными.

Выводы:

- по данным аналогового и компьютерного моделирования, отражение докембрийских разрывных нарушений в рельефе впадины Ладожского озера может быть связано не только с влиянием экзогенных процессов (прежде всего, деятельностью ледника), но и с тектонической активизацией, происходящей в новейшее время (включая современный этап);

- компьютерные и аналоговые модели, построенные с использованием разных схем разрывных нарушений, предполагают, что активизация докембрийских дизъюнктивных структур происходит при ориентировке оси растяжения в северо-восточном направлении (вкост простираия Ладожского грабена);

- активизированные дизъюнктивные структуры по-разному развиваются в новейшем поле напряжений: по разломам горсто-грабеновой системы северо-западного простираия происходят вертикальные блоковые движения, влияющие на формирование положительных и отрицательных морфоструктур, характерных для северной части Ладожского озера; разломы острова Валаам, в зависимости от их ориентировки относительно оси растяжения, развиваются как трещины отрыва или как содвиги.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00359 «Оценка новейшей и современной геодинамической активности докембрийских купольно-надвиговых структур Приладожья».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агибалов 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 (юго-восток Балтийского щита) // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 791–807.
- Амантов А.В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 22–32.
- Амантов А.В., Амантова М.Г. Развитие котловины Ладожского озера с позиций ледниковой теории // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 5–14.
- Анохин В.М., Науменко М.А., Нестеров Н.А. Особенности направленности линейных форм рельефа дна Ладожского озера // География: развитие науки и образования. Часть I. Коллективная монография по материалам ежегодной Международной научно-практической конференции LXIX Герценовские чтения, посвященной 115-летию со дня рождения С.В. Калесника. СПб., 2016. С. 108–117.
- Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 823–861.
- Гончаров М.А. Реальная применимость условий подобия при физическом моделировании тектонических структур // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 2. С. 148–168.
- Гончаров М.А., Рогожин Е.А., Фролова Н.С., Рожин П.Н., Захаров В.С. Мегасколы Риделя R' и тенденция к гравитационному равновесию как главные факторы цунамигенных землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 939–991.
- Гончаров М.А., Галицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. М.: Изд-во КДУ, 2015. 496 с.
- Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 379 с.
- Ладожское озеро. Атлас. ГУНИО. 2002.
- Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.
- Науменко М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Известия РАН. Сер. географическая. 2013. № 1. С. 62–72.
- Никонов А.А. К неотектонике Ладожской депрессии // Тектоника Неогей: общие и региональные аспекты. Материалы XXXIV Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2001. Т. 2. С. 80–83.
- Никонов А.А. Ладожский грабен: унаследованное развитие в четвертичное время, молодая тектоника и сейсмичность // Глубинное строение и геодинамика Приладожья. Материалы конференции с международным участием. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 146–153.
- Расцветаев Л.М. Содвиги как объект тектонофизики и региональной геологии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лабораторией тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов Всероссийской конференции. М.: ИФЗ РАН, 2008. Т. 1. С. 299–302.
- Румянцев В.А., Кудерский Л.А. Ладожское озеро: общая характеристика, экологическое состояние // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2010. № 1. С. 171–182.
- Свириденко Л.П., Светов А.П. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 123 с.
- Спиридонов А.И. Геоморфология европейской части СССР. М.: Высшая школа, 1978. 335 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А. Разломообразование в литосфере. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991. 262 с.
- Юрковец В.П. Ладожская астроблема // Вестн. Российской академии ДНК-генеалогии. 2011. Т. 4. № 10. С. 1997–2018.
- Dooly T.P., Schreurs G. Analogue modelling of interpolate strike-slip tectonics: A review and new experimental results // Tectonophysics. 2012. V. 574–575. P. 1–71.
- Earthquake Database of the Institute of Seismology of the University of Helsinki, 2018. Available from: <http://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php>.
- Schreurs G., Colletta B. Analogue modelling of faulting in zones of continental transpression and transtension // Continental Transpressional and Transtensional Tectonics. 1998. V. 135. P. 59–79.

Поступила в редакцию 18.10.2018

После доработки 21.02.2019

Принята к публикации 21.02.2019

A.O. Agibalov¹, A.A. Sentsov², V.A. Zaitsev³

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ACTIVATED
PRECAMBRIAN FAULTS ON THE RELIEF
OF THE LADOGA LAKE DEPRESSION

The established nature of the relationship between the spatial pattern of linear elements of the relief and the Precambrian faults of the Ladoga Lake basin suggests that the direct reflection of faults in the relief may be related to the neotectonic activation of disjunctive structures. According to the data of computer and analogue tectonophysical modeling we concluded, that this process occurs in the NE stretching

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Dynamic Geology, postgraduate student; e-mail: Agibalo@yandex.ru

² The Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Laboratory of Seismotectonics and Seismic Microzonation, Research Scientist; e-mail: alekssencov@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Dynamic Geology, Head of the Section of Geocatastrophe Research, PhD in Geology and Mineralogy; e-mail: v.zaitsev@mail.ru

environment and can be considered as a significant relief formation factor along with glacier activity, hydroisostatic movements and other processes.

Key words: the Ladoga Lake, tectonophysical modeling, relief

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-35-00359 «Assessment of the neotectonic and modern geodynamic activity of Precambrian dome-thrust structures of the Ladoga Lake region»).

REFERENCES

- Agibalov A.O., Zaytsev V.A., Sentsov A.A., Devyatkina A.S.* Assessment of the influence of modern crustal movements and the recently activated Precambrian structural plan on the relief of the Lake Ladoga region (the southeastern Baltic Shield) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 8. № 4. P. 791–807.
- Amantov A.V.* Geologiya dochetvertichnykh obrazovaniy i tektonika Ladozhskogo ozera [Geology of pre-Quaternary formations and tectonics of the Ladoga Lake] // *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*. 2014. V. 58 P. 22–32. (In Russian)
- Amantov A.V., Amantova M.G.* Razvitie kotloviny Ladozhskogo ozera s pozicij lednikovoj teorii [Development of the Ladoga Lake Basin from the position of glacial theory] // *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*. 2014. V. 59. P. 5–14. (In Russian)
- Anohin V.M., Naumenko M.A., Nesterov N.A.* Osobennosti napravlenosti linejnykh form relefa dna Ladozhskogo ozera [Specific features of the orientation of linear forms of bottom relief of the Ladoga Lake] // *Geografiya, razvitie nauki i obrazovaniya*. Part I. Kollektivnaya monografiya po materialam ezhegodnoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii LXIX Gercenovskie chteniya, posvyashchennoj 115-letiyu so dnya rozhdeniya S.V. Kalesnika S.Petersburg, 2016. P. 108–117. (In Russian)
- Bornyakov S.A., Seminsky K.Zh., Buddo V.Yu., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., Tarasova A.A.* Main regularities of faulting in lithosphere and their applications (based on physical modelling results) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. V. 5. № 4. P. 823–861.
- Dooly T.P., Schreurs G.* Analogue modelling of interplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results // *Tectonophysics*. 2012. V. 574–575. P. 1–71.
- Earthquake Database of the Institute of Seismology of the University of Helsinki, 2018. Available from: <http://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php>.
- Goncharov M.A.* Applicability of similarity conditions to analogue modelling // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1. № 2. P. 148–168.
- Goncharov M.A., Rogozhin E.A., Frolova N.S., Rozhim P.N., Zakharov V.S.* Riedel megashears R' and the trend to gravitational equilibrium as main factors of tsunamigenic earthquakes // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. V. 5. № 4. P. 939–991.
- Goncharov M.A., Talickij V.G., Frolova N.S.* Vvedenie v tektonofiziku [Introduction to Tectonophysics] / Executive editor N.V. Koronovskij. Moscow: KDU, 2015. 496 p. (In Russian)
- Kostenko N.P.* Geomorfologiya [Geomorphology]. Moscow: MGU, 1999. 379 p. (In Russian)
- Ladozhskoe ozero [The Ladoga Lake]. Atlas. GUNIO, 2002. (In Russian)
- Mardia K.* Statisticheskij analiz uglovykh nablyudenij [Statistical analysis of angular observations]. Moscow: Nauka, 1978. 240 p. (In Russian)
- Naumenko M.A.* Analiz morfometricheskikh karakteristik podvodnogo rel'efa Ladozhskogo ozera na osnove cifrovoj modeli [Analysis of the morphometric characteristics of submarine relief of the Ladoga Lake based on a digital model] // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2013. V. 1. P. 62–72. (In Russian)
- Nikonov A.A.* K neotektonike Ladozhskoj depressii [To the neotectonics of the Ladoga Lake Depression] // *Tektonika Neogeya obshchie i regionalnye aspekty Materialy XXXIV Tektonicheskogo soveshchaniya*. V. 2. Moscow: GEOS, 2001. P. 80–83. (In Russian)
- Nikonov A.A.* Ladozhskij graben: unasledovannoe razvitie v chetvertichnoe vremya, molodaya tektonika i sejsmichnost [The Ladoga graben: inherited Quaternary development, recent tectonics and seismicity] // *Glubinnoe stroenie i geodinamika Priladozhya. Materialy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2017. P. 146–153. (In Russian)
- Rascvetaev L.M.* Sodvigi kak obekt tektonofiziki i regionalnoj geologii [Shift dislocations as an object of tectonophysics and regional geology] // *Tektonofizika i aktualnye voprosy nauk o Zemle. K 40-letiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN: Tezisy dokladov Vserossijskoj konferencii*. Moscow: IFZ RAN, 2008. V. 1. P. 299–302. (In Russian)
- Rumyancev V.A., Kuderskij L.A.* Ladozhskoe ozero: obshchaya harakteristika, ehkologicheskoe sostoyanie [The Ladoga Lake: general characteristics, ecological state] // *Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana)*. 2010. V. 1. P. 171–182. (In Russian)
- Schreurs G., Colletta B.* Analogue modelling of faulting in zones of continental transpression and transtension // *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics*. 1998. V. 135. P. 59–79.
- Sherman S.I., Seminskij K.Zh., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., Lobackaya R.M., Adamovich A.N., Truskov V.A., Babichev A.A.* Razlomboobrazovanie v litosfere [Faulting in the lithosphere]. Novosibirsk: Nauka: Sibirskoe otdelenie, 1991. 262 p. (In Russian)
- Spiridonov A.I.* Geomorfologiya evropejskoj chasti SSSR [Geomorphology of the European part of the USSR] Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 335 p. (in Russian)
- Sviridenko L.P., Svetov A.P.* Valaamskij sill gabbro-doleritov i geodinamika kotloviny Ladozhskogo ozera [Valaam gabbro-dolerite sill and geodynamics of the Ladoga Lake basin] // Petrozavodsk: Karelskij nauchnyj center RAN, 2008. 123 p. (In Russian)
- Yurkovec V.P.* Ladozhskaya astroblema [The Ladoga astrobleme] // *Vestnik Rossijskoj akademii DNK-genealogii*. 2011. V. 4. № 10. P. 1997–2018. (In Russian)

Received 18.10.2018

Revised 21.02.2019

Accepted 21.02.2019