



<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0317>

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)

A. O. Agibalov, V. A. Zaytsev, A. A. Sentsov, A. S. Devyatkina

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

Abstract: This paper describes the influence of modern crustal movements and the recently activated Precambrian structural plan on the relief of the Lake Ladoga region. It presents the results of comprehensive studies, including processing of the regional geological and geomorphological data by the modern methods, as the major novelty of our work. The solutions of earthquake focal mechanisms suggest the current subhorizontal NW compression in the study area. Based on the computer simulation by the Roxar software, we have identified areas wherein new fractures are most likely to occur, determined the dominant directions of such fractures, and revealed the areas of intense vertical movements in the given stress state. The input database included a digital model of the relief and the spatial patterns of ancient faults represented by large-size inhomogeneities influencing the stress field. Strain values were estimated from the horizontal displacements recorded by the International GPS Service for Geodynamics (IGS) and the GPS networks in the Republic of Karelia and the southeastern regions of Finland. Using the LESSA software, we have estimated the relief orientation characteristics: the density of lineaments, and elongation lines, which are indicative of the changes in the dominant directions of the strike of the lineaments ('hatches') in the study area. By interpreting the satellite images and the topographic maps (scale 1:20000), we reveal a number of geological structures, such as granite-gneiss domes and large-size faults, which are directly reflected in the relief. The study results give grounds to establish an indirect relationship between the relief and the modern field of deformation: the areas with high strain values correspond to the areas with steep slopes. The computer simulation data show a NE-trending linear zone with the increased amplitudes of vertical movements. This zone occupies the region along the NW shore Lake Ladoga. In the block divisibility scheme based on the relief analysis, this region is comprised of blocks that are small in area: the Pearson correlation coefficient between the density of the block boundaries and the vertical displacements amounts to 65 %. In addition, this zone is distinguished by an increased permeability of the crust, which was estimated from the helium survey data. Most of the seismic events occurred in the areas characterized by either high or medium probability of new fracturing in case of NW compression. This gives an argument in support of the conclusion that compression takes place in the Ladoga Lake region at the present stage. According to estimations by the LESSA software, the maximum densities of the linear relief elements correlate with the spatial patterns of the Precambrian faults. A number of faults and granite-gneiss domes are directly manifested in the relief, reflecting the inherited nature of the development of the latter.

Key words: computer simulation; neotectonic activation; modern crustal movements; Lake Ladoga region

RESEARCH ARTICLE

Recommended by V.A. Sankov

Received: April 4, 2017

Revised: August 25, 2017

Accepted: September 14, 2017

For citation: Agibalov A.O., Zaytsev V.A., Sentsov A.A., Devyatkina A.S., 2017. 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* 8 (4), 791–807. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0317.

Для цитирования: Агibalов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Десяткина 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. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0317.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ И АКТИВИЗИРОВАННОГО В НОВЕЙШЕЕ ВРЕМЯ ДОКЕМБРИЙСКОГО СТРУКТУРНОГО ПЛАНА НА РЕЛЬЕФ ПРИЛАДОЖЬЯ (ЮГО-ВОСТОК БАЛТИЙСКОГО ЩИТА)

А. О. Агибалов, В. А. Зайцев, А. А. Сенцов, А. С. Девяткина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

Аннотация: Цель данной работы заключается в том, чтобы показать влияние современных движений земной коры и испытываемого активизацию в новейшее время докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья. Согласно решениям фокальных механизмов очагов землетрясений, представляется вероятным, что на современном этапе территория Приладожья находится в обстановке субгоризонтального северо-западного сжатия. Применение компьютерного моделирования, выполненного с помощью программы «Roxar», позволило выделить участки наиболее вероятного формирования новых трещин, определить доминирующие направления простирания последних, выявить области интенсивных вертикальных движений при заданном напряженном состоянии. В качестве исходных данных использовалась цифровая модель рельефа и информация о пространственном распределении древних разрывных нарушений, представляющих собой крупные неоднородности, влияющие на характер поля напряжений. На основе анализа горизонтальных перемещений пунктов GPS Международной геодинимической сети, а также сети Республики Карелия и Юго-Восточной Финляндии составлена схема величин деформации. В программе «LESSA» рассчитаны ориентационные характеристики рельефа – плотность линеаментов и линии вытянутости, показывающие, как изменяются доминирующие направления простирания линеаментов («штрихов») по территории. Дешифрирование космических снимков и топографических карт масштаба 1:20000 показало, что ряд геологических структур (гранито-гнейсовые купола, крупные разрывные нарушения) имеют прямое отражение в рельефе. В результате проведенных исследований установлена опосредованная взаимосвязь между рельефом и современным полем деформаций: участки повышенных значений деформаций соответствуют области развития крутых склонов. По данным компьютерного моделирования выделена линейная зона северо-восточного простирания, отличающаяся повышенными амплитудами вертикальных движений, протягивающаяся вдоль северо-западного побережья Ладожского озера. На схеме блоковой делимости, составленной на основе анализа рельефа, она выделяется как область развития небольших по площади блоков: коэффициент корреляции Пирсона между плотностью границ блоков и величинами вертикальных перемещений составляет 65 %. Кроме того, данная зона отличается повышенной проницаемостью земной коры, определенной по результатам гелиевой съемки. Большая часть сейсмических событий приурочена к участкам, характеризующимся высокой и средней вероятностью формирования новых трещин при северо-западном сжатии: этот факт можно рассматривать в качестве одного из аргументов в пользу того, что территория Приладожья находится в обстановке северо-западного сжатия на современном этапе. Построенные в программе «LESSA» максимумы плотности линейных элементов рельефа коррелируют с особенностями пространственного рисунка докембрийских разрывных нарушений. Ряд дизъюнктивных структур и гранито-гнейсовых куполов находят прямое отражение в рельефе, что свидетельствует об унаследованном характере развития последнего. Таким образом, в статье показано влияние современных движений земной коры и активизированного в новейшее время докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья. Новизна работы обусловлена тем, что она основана на результатах комплексных исследований, в ходе которых геолого-геоморфологические данные были обработаны современными методами.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; новейшая активизация; современные движения земной коры; Приладожье

1. ВВЕДЕНИЕ

Приладожье, расположенное в юго-восточной части Балтийского щита, относится к областям развития докембрийских комплексов, испытавших полистадийную деформационно-метаморфическую эволюцию, в результате которой на данной территории сформировался сложный парагенез плика-

тивных и дизъюнктивных структур. Его главными элементами являются архейские гранито-гнейсовые купола, надвиги, сформировавшиеся в эпоху карельского тектогенеза, и сбросы рифейского возраста, ограничивающие Ладожский грабен. Существуют разные представления о стадийности деформационных событий Приладожья [Kazakov et al., 1977; Morozov, 1999] и механизмах формирова-

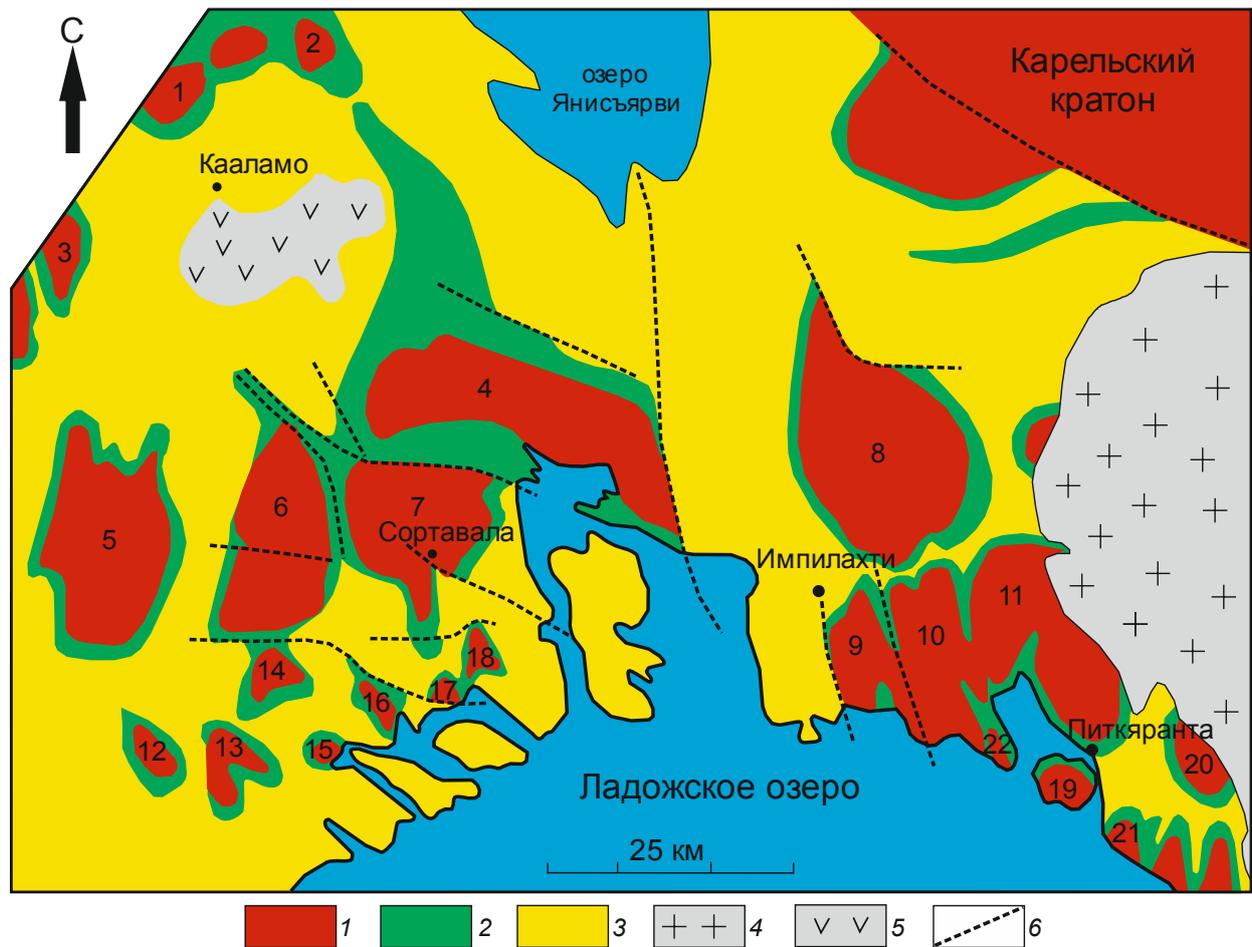


Рис. 1. Схема геологического строения Приладожья (по [Morozov, Gaft, 1985]).

1 – докарельские образования архейского фундамента; 2–3 – образования раннепротерозойского ладожского комплекса: 2 – амфиболиты сортавальской серии, 3 – сланцы и гнейсы ладожской серии; 4 – граниты-рапакиви Салминского массива; 5 – габброиды Кааламского массива; 6 – разрывные нарушения. Цифрами на схеме обозначены архейские гранитогнейсовые купола: 1 – Эскола, 2 – Матиселька, 3 – Уксильта, 4 – Кирьяволахтинский, 5 – Латвасюрья, 6 – Куокканиеми, 7 – Сортавальский, 8 – Коккасельский, 9 – Импилахтинский, 10 – Мурсульский, 11 – Койринойско-Питкярантский, 12 – Мулпумяки, 13 – Васкилампи, 14 – Реломьяки, 15 – Рауталахи, 16 – Инивара, 17 – Хавус, 18 – Риеккалансари, 19 – Пусунсари, 20 – Луппики, 21 – Ристиниеми, 22 – Вуоратсу.

Fig. 1. Schematic geological structure of the Lake Ladoga region (by [Morozov, Gaft, 1985]).

1 – pre-Karelian formations of the Archaean basement; 2–3 – Early Proterozoic formations of the Ladoga complex: 2 – amphibolites of the Sortavala series, 3 – shales and gneisses of the Ladoga series; 4 – granite-rapakivi of the Salmi massif; 5 – gabbroids of the Kaalam massif; 6 – faults. Archean granite-gneiss domes: 1 – Eskola, 2 – Matiselka, 3 – Uksilta, 4 – Kiryavolahta, 5 – Latvasyuria, 6 – Kuokkaniemi, 7 – Sortavala, 8 – Kokkasel, 9 – Impilahta, 10 – Mursul, 11 – Koirinoy-Pitkäranta, 12 – Mulpumyaki, 13 – Vaskilampi, 14 – Relomyaki, 15 – Rautalahi, 16 – Inivara, 17 – Havus, 18 – Riekkalansari, 19 – Pusunsari, 20 – Luppiki, 21 – Ristiniemi, 22 – Vuoratsu.

ния куполовидных выступов фундамента. Ряд исследователей рассматривают их как диапировые структуры [Escola, 1948; Grigorieva, Shinkarev, 1981]. Обобщенная численная модель диапирового подъема магмы рассмотрена в работе [Polyansky et al., 2016]. Согласно другой точке зрения, гранито-гнейсовые купола возникли в результате проявления интерференционной складчатости [Bowes et al., 1984]. Н.Г. Судовиков и В.А. Глебовицкий предложили модель, предполагающую внедрение гранито-гнейсов в виде жестких глыб и блоков [Sudovikov

et al., 1970]. Такое разнообразие мнений может быть связано с многофакторностью самих структурообразующих процессов [Morozov, 1999].

Региональной структурой, разделяющей архейские образования Карельского кратона и раннепротерозойские комплексы Свекофеннского пояса, является Раахе-Ладожская линеаментная зона северо-восточного простирания [Baltybaev et al., 2000] (рис. 1).

Кратко охарактеризованный докембрийский структурный план испытывает активизацию в

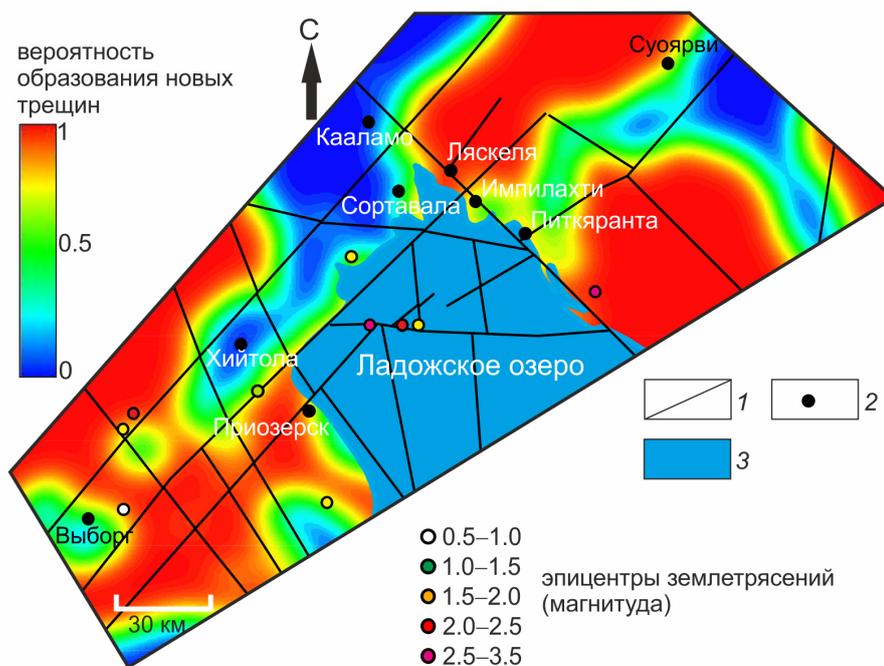


Рис. 2. Схема вероятности формирования новых трещин, составленная с помощью программы «Roxar».

1 – разрывные нарушения (по [Khazov et al., 2004]); 2 – населенные пункты; 3 – акватория Ладожского озера. Распределение эпицентров землетрясений приведено по данным сейсмического каталога Хельсинкского университета [Earthquake Database..., 2017].

Fig. 2. Probability scheme of new fracturing, constructed by the Roxar software.

1 – faults (after [Khazov et al., 2007]); 2 – settlements; 3 – Lake Ladoga. The pattern of earthquake epicenters is based on the data from the seismic catalog of the University of Helsinki [Earthquake Database..., 2017].

новейшее время, включая современный этап. Об этом свидетельствуют сейсмические события, приуроченные к древним разрывным нарушениям [Nikonov, Shvarev, 2015]. В целом, Приладожье относится к слабосейсмичным регионам: самое крупное землетрясение магнитудой 4.0 за исторический период времени на данной территории произошло 30 ноября 1921 г. в районе поселка Салми, расположенного в 30 км северо-восточнее Питкяранты, и было связано с Восточно-Ладожским разломом, ограничивающим Ладожский грабен [Nikonov, 2005]. Однако, согласно мнению Б.А. Ассиновской и ее коллег, практически полное отсутствие землетрясений в российской части Ладожского региона в течение инструментального периода в значительной степени обусловлено коротким интервалом стационарных сейсмических наблюдений [Assinovskaya et al., 2009]. По данным А.А. Никонова и С.В. Шварева, расширивших каталог раннеинструментальных и доисторических землетрясений, на территории Приладожья происходили сильные сейсмические события магнитудой более 6, связанные с активностью разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простирания [Nikonov, Shvarev, 2015]. Одним из аргументов в пользу современной активизации служат материалы гелиевой съемки, показавшие приуроченность повышенных содержаний гелия к зонам тектонизации, что свидетельствует о геодинамической активности последних [Bogachev, Borodulina, 2008]. Эти данные согласуются с более ранними результатами гелиевых исследований, позволивших выделить на территории Приладожья зоны повы-

шенной проницаемости земной коры северо-восточного простирания [Eremeev, 1983]. Сложный характер взаимосвязи рельефа и геологического строения [Lukashov, 1976] может интерпретироваться как аргумент в пользу активизации докембрийского структурного плана в новейшее время.

Современные геолого-геоморфологические данные и средства их обработки, используемые авторами данной статьи, позволяют оценить влияние современных движений и деформаций земной коры и активизированного докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья.

2. МЕТОДИКА РАБОТ

2.1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С помощью программы «Roxar», предназначенной для моделирования месторождений и сертифицированной для проведения научных исследований, были выделены области наиболее вероятного формирования новых трещин в обстановке субгоризонтального северо-западного сжатия (рис. 2) и рассчитаны доминирующие направления простирания трещин (рис. 3). Данный тип напряженного состояния проявляется на современном этапе, на что указывают решения фокальных механизмов очагов землетрясений, произошедших на сопредельной территории Юго-Восточной Финляндии [Assinovskaya et al., 2011; Slunga, 1991]. В качестве исходных данных для построения модели использовалась цифровая модель рельефа [Becker

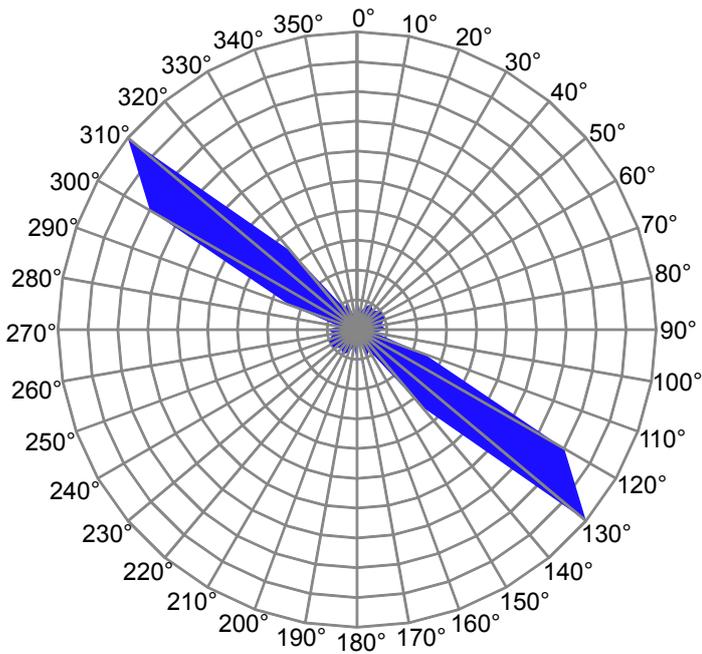


Рис. 3. Роза-диаграмма, характеризующая закономерности ориентировки трещин в обстановке северо-западного сжатия, составленная с помощью программы «Roxar».

Fig. 3. Rose diagram characterizing the orientations of fractures in case of NW compression, constructed by the Roxar software.

et al., 2009] и схема разрывных нарушений, составленная на основе геолого-геофизических данных [Khazov *et al.*, 2004]. Выбор этой схемы обусловлен тем, что на ней показаны только крупные дизъюнктивные структуры, имеющие прямолинейную конфигурацию: проведение расчетов с использованием большого количества разноранговых разрывных структур затруднительно на компьютерах обычной производительности. Методика моделирования сводится к тому, что на основе цифровой модели рельефа в программе «Roxar» построена грид-поверхность, на которую нанесена сетка разрывных нарушений, после чего была задана ориентировка оси максимального сжатия. Расчет положения областей наиболее вероятного образования новых трещин в заданном поле напряжений основывается на использовании закона Кулона-Мора. Предполагается, что заданные напряжения достаточно велики для образования трещин, одно из трех главных нормальных напряжений действует вертикально, промежуточное напряжение (σ_2) равно среднему (σ_m). По умолчанию допускается, что все разломы непрерывны, однородны, вертикальны и имеют достаточно простую конфигурацию. При моделировании, помимо ориентировки

оси максимального сжатия и типа напряженного состояния, указываются значения коэффициентов Пуассона и внутреннего трения. В документации к программе «Roxar» отмечено, что в большинстве случаев выбор этих геомеханических констант не влияет значительно на результаты расчетов полей напряжений, поэтому при моделировании областей формирования новых трещин выбраны установленные по умолчанию значения коэффициентов Пуассона (0.25) и внутреннего трения (0.6). Компания-разработчик не приводит достаточно подробных математических выкладок, позволяющих детально рассмотреть методику моделирования в рамках данной работы, поскольку программный продукт «Roxar» является коммерческим [User Guide..., 2012]. В целом, подобные алгоритмы выявления участков наиболее вероятного формирования новых трещин используются при прогнозе сейсмических событий [King, Cocco, 2001], поэтому в данной статье положение участков наиболее вероятного трещинообразования сравнивается с распределением эпицентров землетрясений [Earthquake Database..., 2017]. Одно из допущений заключается в том, что перемещения по разрывным нарушениям, влияющим на характер поля напряжений, происходят до тех пор, пока величины напряжений не достигают нулевых значений. На основе этого допущения оцениваются амплитуды перемещений по разрывным нарушениям в вертикальном и горизонтальном направлении [User Guide..., 2012]. С учетом большого количества допущений, принятых при моделировании, на схеме вертикальных перемещений указаны амплитуды в относительных величинах, без учета направленности движений (все амплитуды считаются положительными) (рис. 4).

Программа «Roxar» использовалась не только для проведения моделирования, но и как инструмент, позволяющий сглаживать различные поверхности и рассчитывать значения коэффициента корреляции между ними. Таким способом были сопоставлены схемы величин деформации, определенных на основе анализа данных GPS, и крутизны склонов, а также схемы амплитуд вертикальных перемещений и плотности границ блоков, выявленных путем анализа рельефа.

2.2. Оценка величин деформации по данным GPS

Фактическим материалом для составления карты величин деформаций являются опубликованные данные о горизонтальных движениях пунктов GPS Международной геодинамической сети, а также сети Республики Карелия [Galaganov *et al.*, 2011; Krupennikova *et al.*, 2015] и Юго-Восточной Финляндии [Ahola *et al.*, 2005] (рис. 5, таблица).

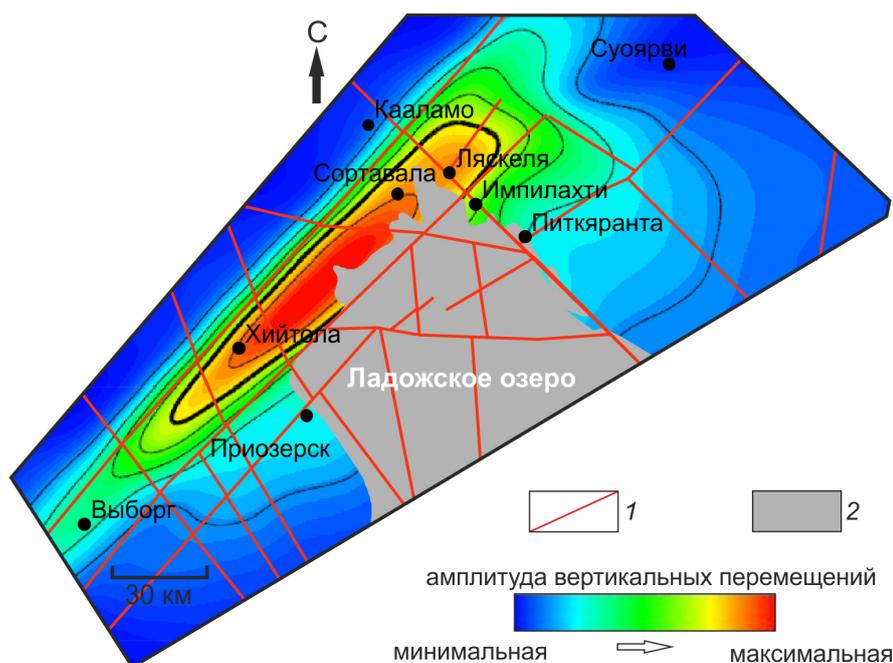


Рис. 4. Схема относительных амплитуд вертикальных перемещений, составленная с помощью программы «Roxar» (без учета направления перемещения, все амплитуды считаются положительными).

1 – разрывные нарушения (по [Khazov et al., 2004]); 2 – акватория Ладожского озера.

Fig. 4. Scheme of the relative vertical movement amplitudes, constructed by the Roxar software. The directions of movements are not taken into account. All the amplitudes are considered positive.

1 – faults (after [Khazov et al., 2004]); 2 – Lake Ladoga.



Рис. 5. Схема расположения станций GPS, данные о горизонтальных перемещениях которых использовались для построения схемы величин деформаций.

1 – контуры береговых линий; 2 – станции GPS (по [Galaganov et al., 2011; Ahola et al., 2005]); 3 – города; 4 – границы участка, показанного на рис. 6.

Fig. 5. Locations of GPS stations, which horizontal movement records were used to construct the scheme of strain values.

1 – shoreline contours; 2 – GPS stations (after [Galaganov et al., 2011; Ahola et al., 2005]); 3 – towns; 4 – boundaries of the site shown in Fig. 6.

Сводка средних скоростей горизонтальных движений пунктов GPS в системе отсчета ITRF2005 (по [Galaganov et al., 2011; Krupennikova et al., 2015; Ahola et al., 2005])

Summary of average horizontal movement rates of the GPS stations in the ITRF 2005 reference system (after [Galaganov et al., 2011; Krupennikova et al., 2015; Ahola et al., 2005])

Пункт GPS	Годы измерений	V_N , мм/год	V_E , мм/год	$V_{общая}$, мм/год	Широта, N	Долгота, E
Пункты Международной геодинамической сети						
JOEN	2002–2009	11.84	20.25	23.46	62.391	30.096
METS	2002–2009	12.74	19.60	23.38	60.217	24.345
SVTL	2005–2009	11.46	21.38	24.26	60.533	29.781
PULK	2002–2009	11.86	21.27	24.35	59.772	30.328
Пункты геодинамической сети Карелии						
BOTS	2001–2009	10.72	20.31	22.97	61.842	34.381
GIRS	2001–2009	10.00	22.28	24.42	62.458	33.667
MELO	1999–2009	10.86	21.91	24.19	61.783	30.785
VALM	1999–2009	10.89	22.47	24.97	61.360	30.785
Пункты геодинамической сети Финляндии						
VIRO	1999–2008	11.90	19.95	23.23	60.533	27.550
KIVE	2004	12.93	19.01	22.99	62.817	25.700

Методика расчета заключается в том, что точкам, расположенным на середине отрезков, соединяющих соседние пункты GPS, присваивается безразмерное значение величины деформации (E), рассчитываемое как $E = |L - l|/l$, где L – расстояние между соседними пунктами после их смещения за 1 год (в метрах), l – расстояние между пунктами до смещения (в метрах). Для расчета расстояний в метрической системе точки с координатами пунктов GPS представлены с помощью программы «ArcGis» в проекции WGS_1984_World_Mercator. Интерполяция проведена методом «естественная окрестность» (рис. 6).

2.3. АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА

Закономерности пространственного распределения линейных элементов рельефа Приладожья изучены путем анализа топографических карт масштаба 1:20000 и космических снимков. По рисунку гидросети выделены линейные элементы рельефа, представляющие собой спрямленные участки береговых линий крупных озер (Ладожского и Янисъярви) и речных долин, вытянутые системы небольших озер и болот. В целом, линейные элементы рельефа формируют блоковую структуру (рис. 7–9). С помощью программы «ArcGis» построены схемы плотности границ блоков (рис. 10) и вертикальных стенок, расположение которых показано на топографических картах масштаба 1:100000 (плотность в обоих случаях рассчитана в относительных величинах) (рис. 11).

На основе цифровой модели рельефа [Becker et al., 2009] в программе «Global Mapper» построены

изолинии крутизны склонов. С целью более наглядного представления изолинии сглажены с помощью модуля «Картография» в программе «ArcGis» (рис. 12).

Проводилось дешифрирование цифровой модели рельефа с помощью программы «LESSA», позволяющей автоматически выявить спрямленные участки долин – «штрихи» и построить схему их плотности в относительных величинах (рис. 13). Кроме того, были построены линии вытянутости, которые ориентированы вдоль доминирующих направлений простирающихся линеаментов – «штрихов» (рис. 14).

Принципы работы программы «LESSA» и ее возможности достаточно подробно описаны в работе А.А. Златопольского [Zlatopolsky, 2011].

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Выделенные с помощью программы «Rohag» участки наиболее вероятного образования новых трещин сопоставлены с распределением эпицентров землетрясений малых магнитуд. Несмотря на отсутствие четкой корреляции между ними, можно сделать вывод о том, что результаты моделирования не противоречат геологическим данным, поскольку эпицентры землетрясений сконцентрированы в областях высокой и средней вероятности формирования трещин, в то время как области низкой вероятности трещинообразования асейсмичны (см. рис. 2). На схеме амплитуд вертикаль-

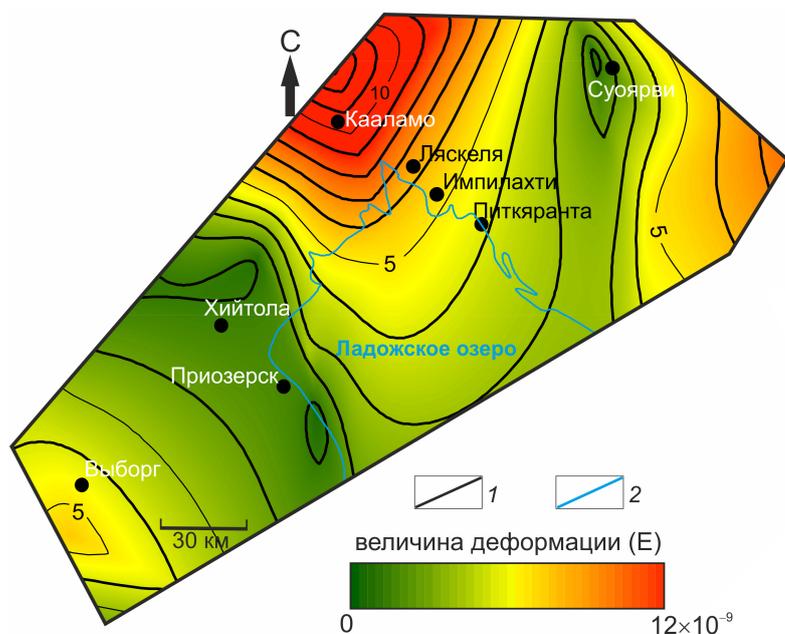


Рис. 6. Схема величин деформации, составленная на основе данных GPS.

1 – контуры береговой линии Ладожского озера; 2 – изолинии величин деформации (цифрами подписаны изолинии по значениям, кратным 5).

Fig. 6. Scheme of strain values, based on the GPS data.

1 – shoreline contours of Lake Ladoga; 2 – isolines of strain values (numbers on the isolines from the values that are multiples of 5).

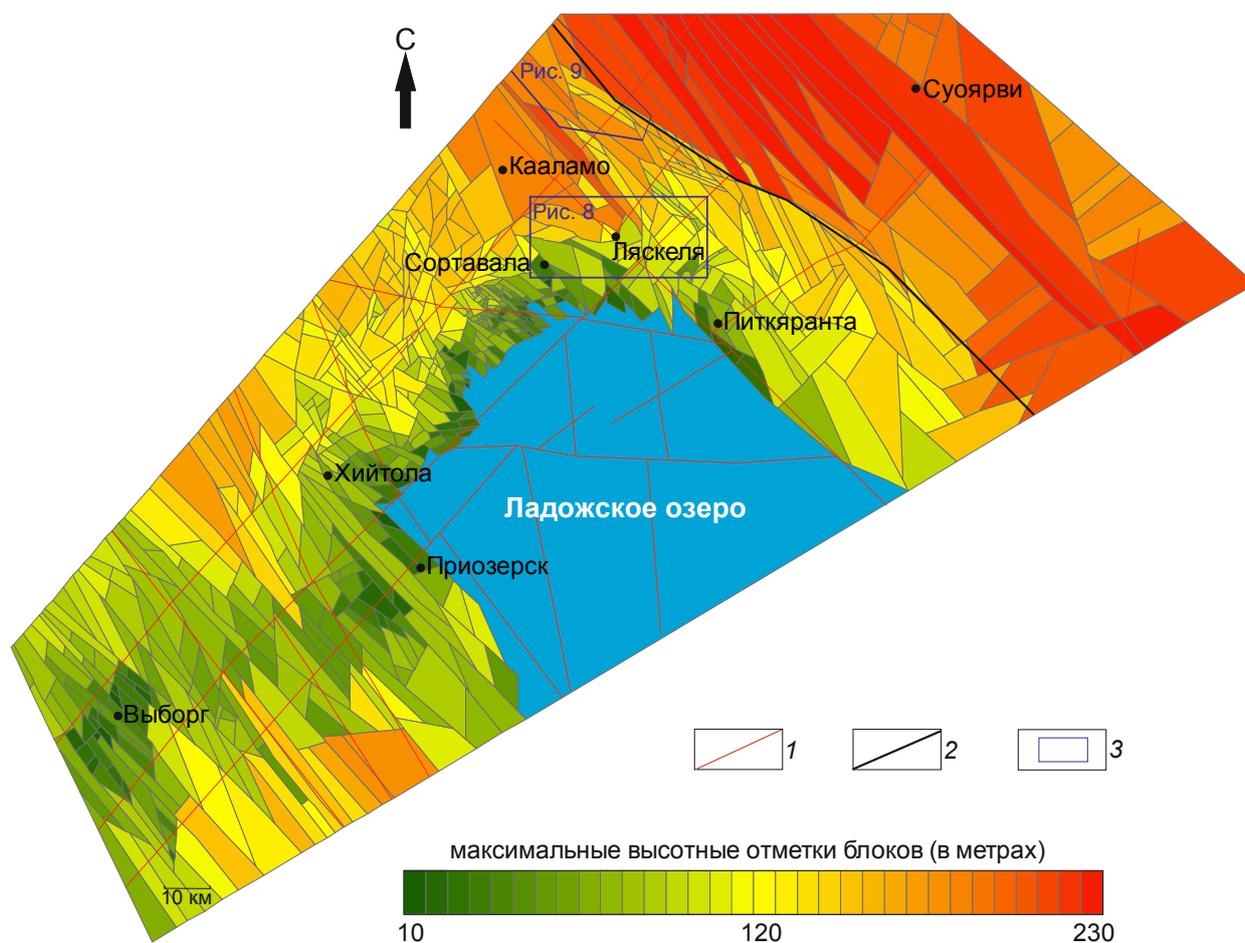


Рис. 7. Схема блоковой делимости Приладожья, составленная по данным анализа рельефа.

1 – разрывные нарушения (по [Khazov et al., 2004]); 2 – граница между протерозойскими комплексами Свеккофеннского пояса и архейскими образованиями Карельского кратона (по [Kulikov et al., 2017]); 3 – границы участков, показанных на рис. 8 и 9.

Fig. 7. Block divisibility scheme of the Lake Ladoga region, based on the analysis of the relief data.

1 – faults (after [Khazov et al., 2004]); 2 – boundary between the Proterozoic complexes of the Svecofennian belt and the Archean formations of the Karelian Craton (after [Kulikov et al., 2017]); 3 – boundaries of the sites shown in Fig. 8 and 9.

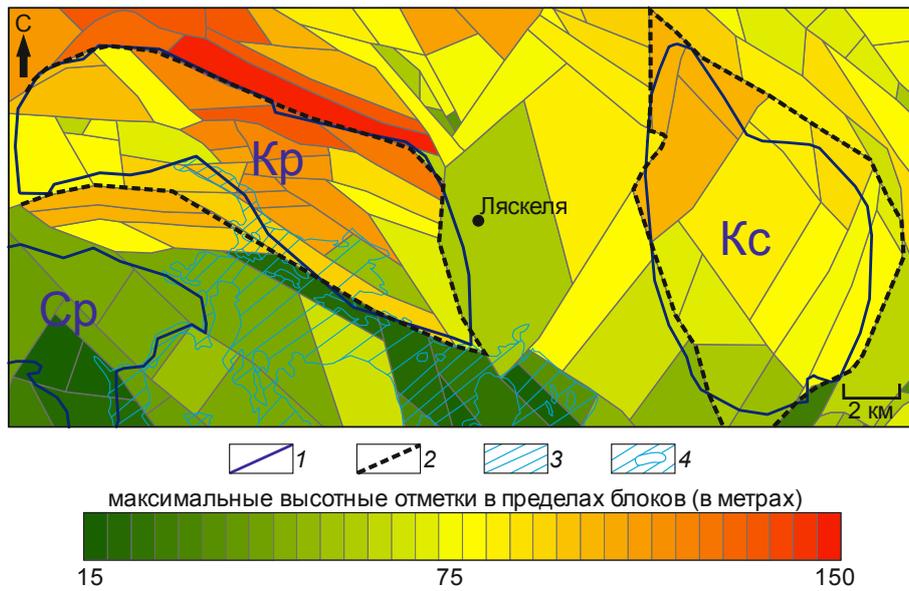


Рис. 8. Схема блоковой делимости района поселка Ляскеля, составленная по данным анализа рельефа.

1 – границы гранитогнейсовых куполов (по [Baltybaev et al., 1996]); 2 – границы блоков по данным анализа рельефа, приуроченные к зонам контакта гранитогнейсовых куполов; 3 – акватория Ладожского озера; 4 – острова Ладожского озера. Буквами обозначены гранитогнейсовые купола: Кр – Кирьяволахтинский, Кс – Коккасельский, Ср – Сортавальский.

Fig. 8. Block divisibility scheme of the Läskeleä village, based on the analysis of the relief data.

1 – boundaries of granite-gneiss domes (after [Baltybaev et al., 1996]); 2 – block boundaries according to the analysis of the relief data, related to the contact zones of granite-gneiss domes; 3 – Lake Ladoga; 4 – islands in Lake Ladoga. Granite-gneiss domes: Кр – Kiryvolahta, Кс – Kokkasel, Ср – Sortavala.

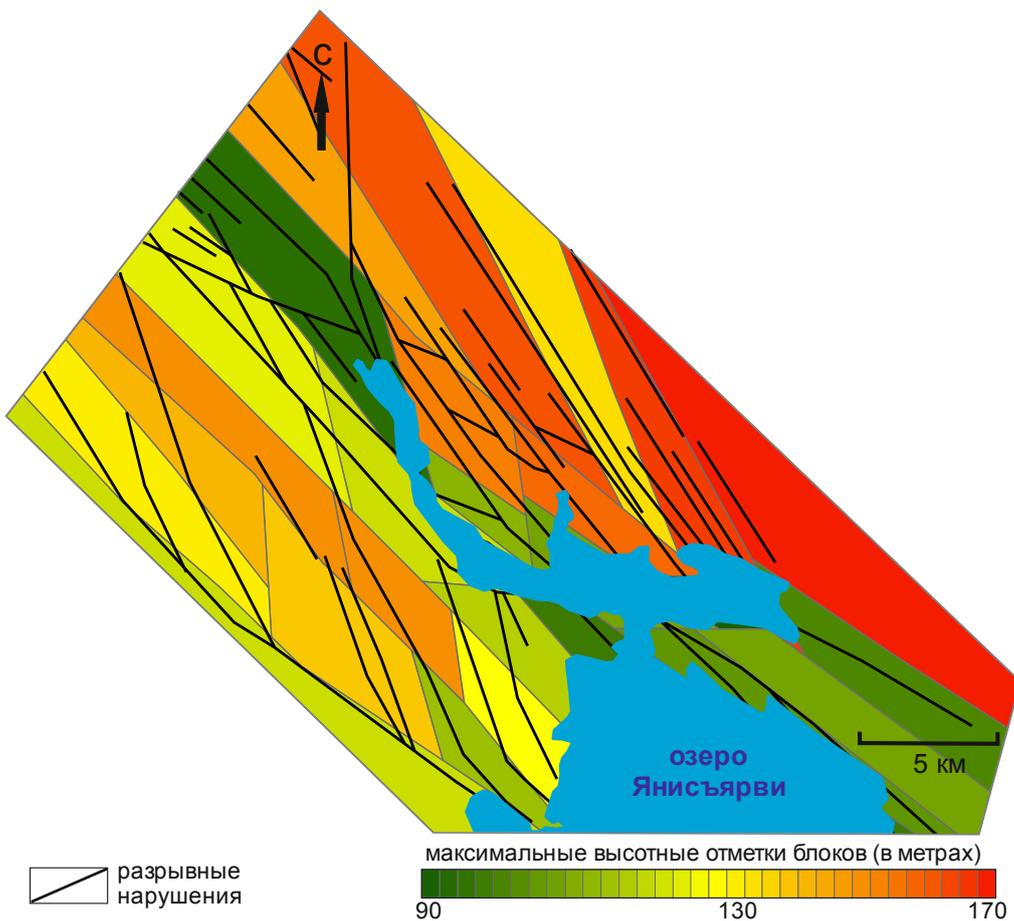


Рис. 9. Схема блоковой делимости района озера Янисъярви, составленная по данным анализа рельефа. Разрывные нарушения показаны по [Morozov et al., 2000].

Fig. 9. Block divisibility scheme of Lake Janisjarvi, based on the analysis of the relief data. Faults are shown after [Morozov et al., 2000].

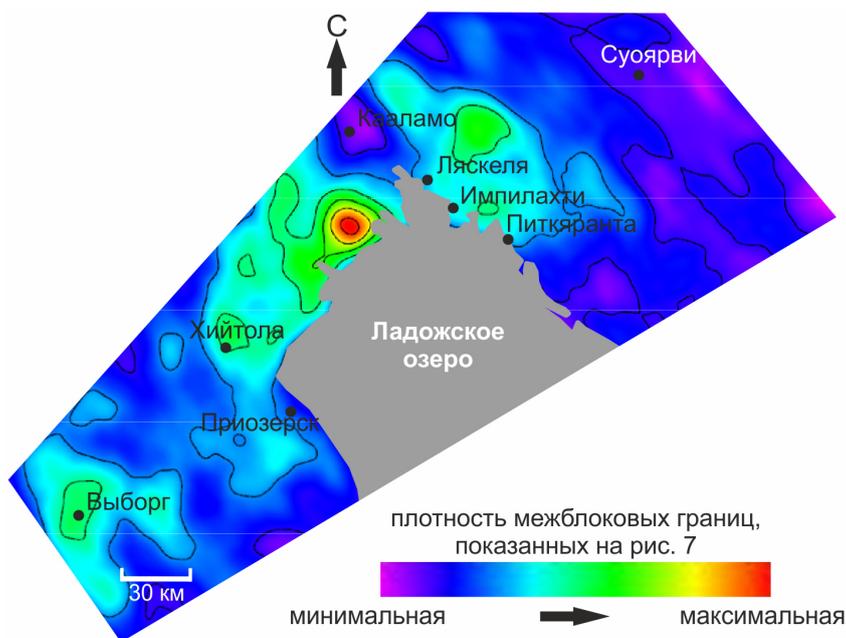


Рис. 10. Схема плотности границ блоков, выделенных по данным анализа рельефа (составлена на основе рис. 7). Плотность рассчитана в относительных величинах.

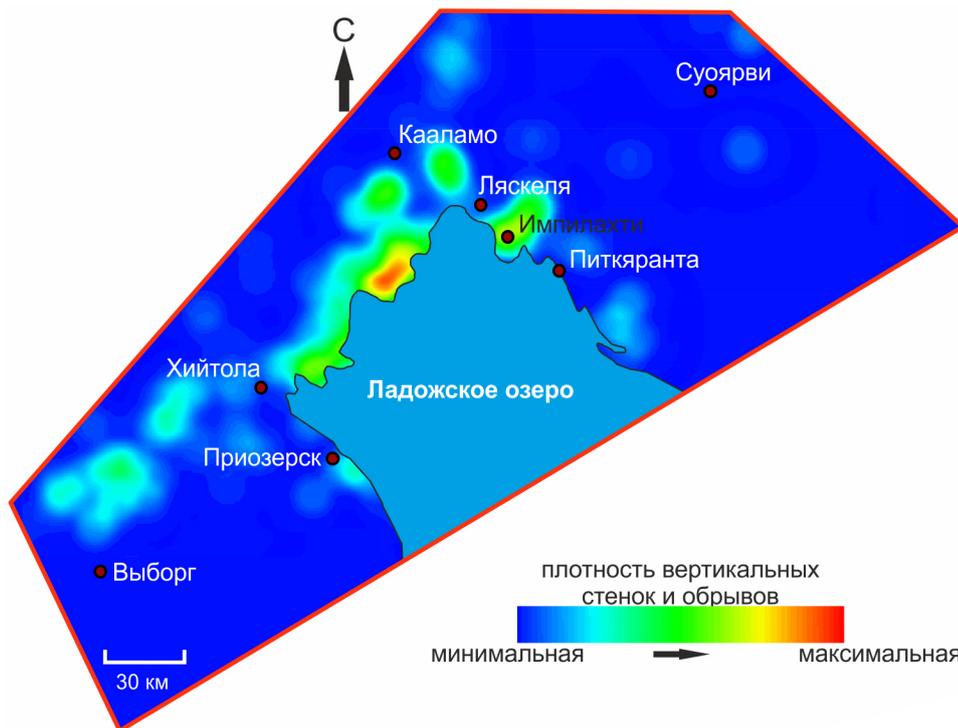
Fig. 10. Density of the block boundaries identified by the relief analysis (based on Fig. 7). The density is calculated in relative values.

ных перемещений выделяется линейная зона повышенных значений этого параметра, расположенная на северо-западном побережье Ладожского озера (см. рис. 4). Эта зона характеризуется повышенной проницаемостью, определенной по результатам гелиевых исследований [Eremeev, 1983]. Кроме того, она прослеживается на схеме плотности границ разновысотных блоков, выделенных на основе анализа рельефа (см. рис. 10). Коэффициент корреляции Пирсона между относительными ве-

личинами плотности межблоковых границ (см. рис. 10) и относительными амплитудами вертикальных перемещений, рассчитанных с помощью программы «Roxag» (см. рис. 4), составляет 65 % (рис. 15). Кроме того, для простирающейся вдоль северо-западного побережья Ладожского озера области характерны крутые склоны, вертикальные уступы и обрывы (см. рис. 11), высота которых достигает нескольких десятков метров. Этот факт указывает на то, что в ее пределах происходили достаточно

Рис. 11. Схема плотности вертикальных стенок и обрывов (в относительных величинах).

Fig. 11. Density of vertical walls and cliffs (in relative values).



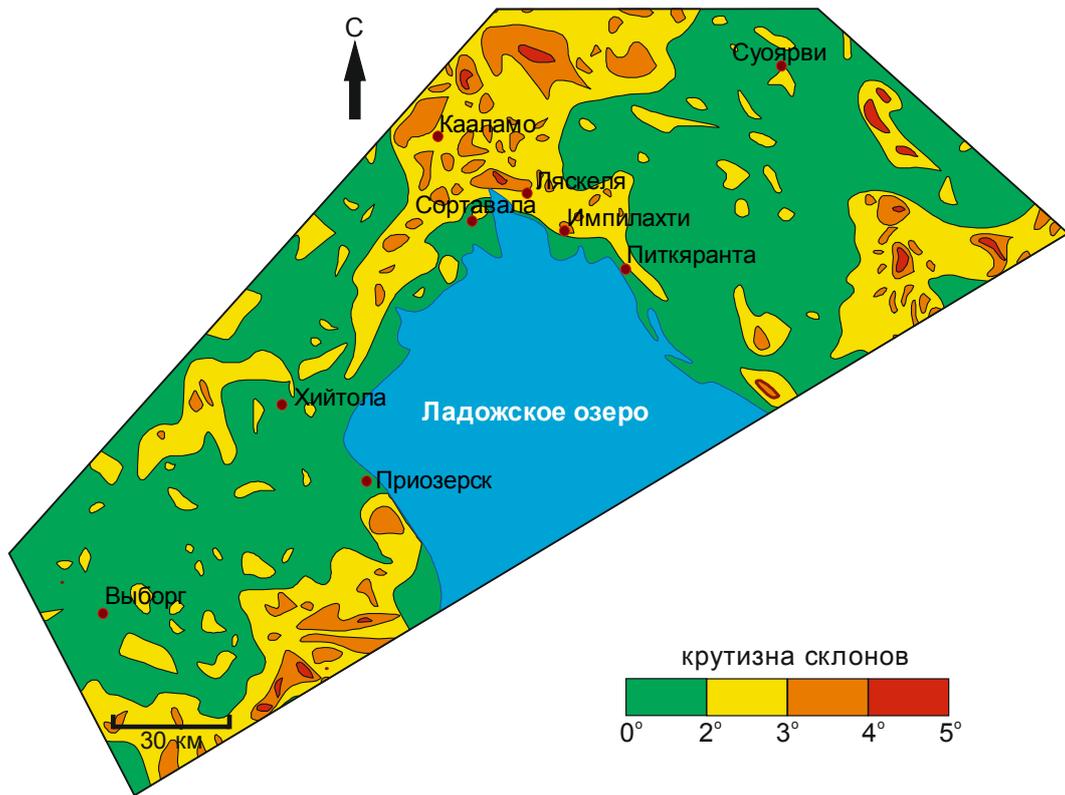


Рис. 12. Схема крутизны склонов.

Fig. 12. Steepness of slopes.

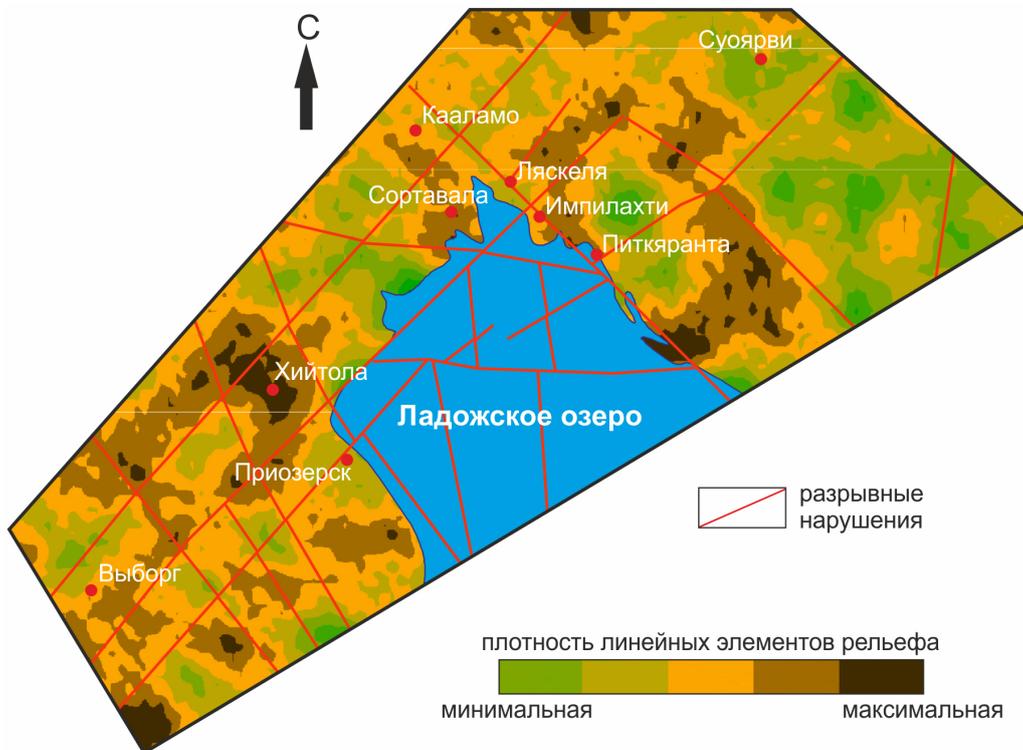


Рис. 13. Схема плотности линейных элементов рельефа (в относительных величинах). Разрывные нарушения показаны по [Khazov et al., 2004].

Fig. 13. Density of linear relief elements (in relative values). Faults are shown after [Khazov et al., 2004].

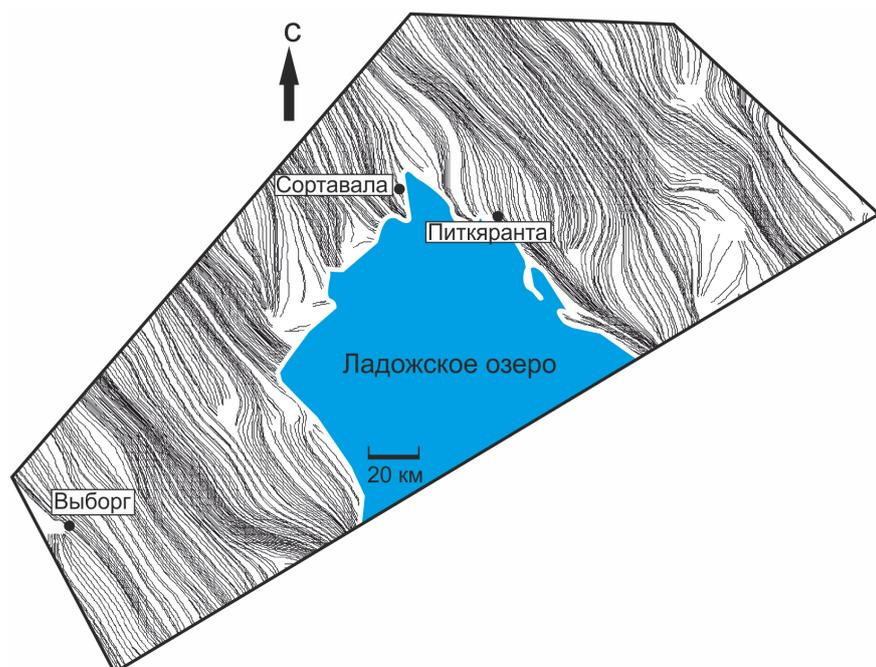


Рис. 14. Схема линий вытянутости.

Fig. 14. Elongation lines.

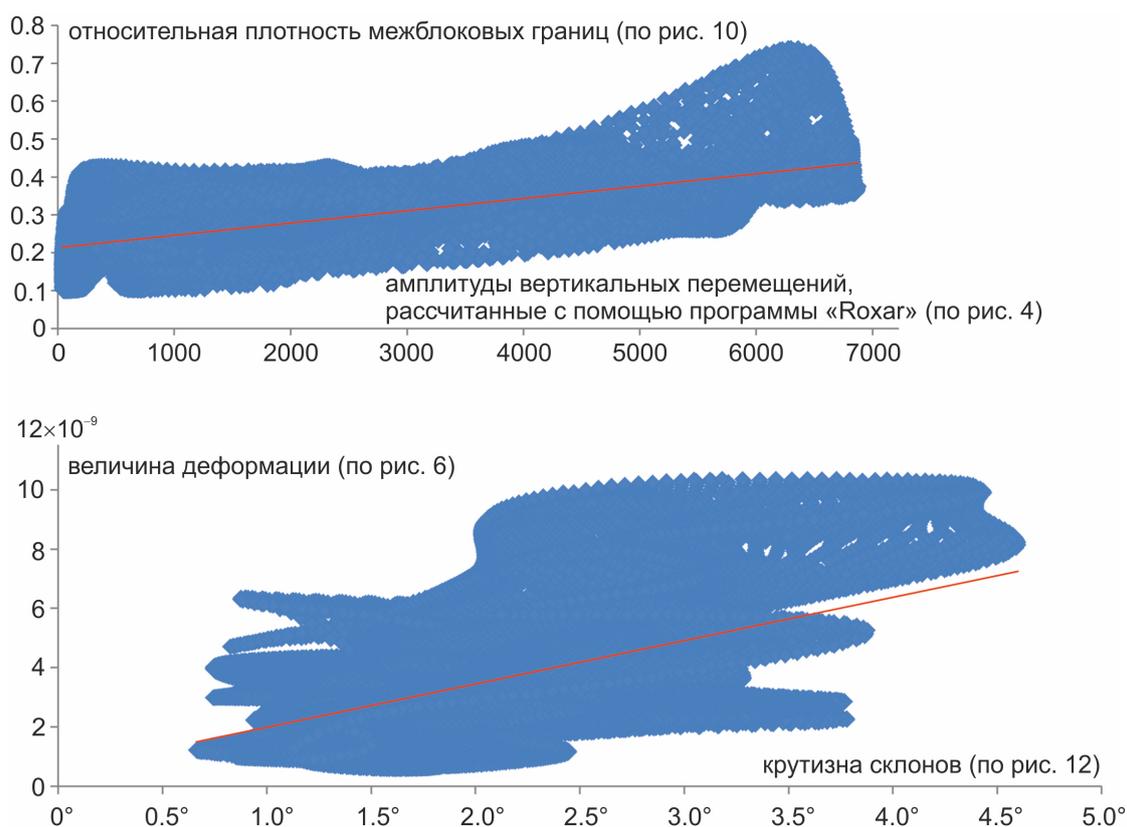


Рис. 15. Диаграммы рассеяния, составленные для относительных значений плотности межблоковых границ (по рис. 10) и амплитуд вертикальных перемещений, рассчитанных с помощью программы «Roxar» (по рис. 4) (вверху), и численных значений безразмерных величин деформации (E) (по рис. 6) и крутизны склонов (в градусах, по рис. 12) (внизу). Красным показаны линии тренда.

Fig. 15. Scatterplots of the relative density values of inter-block boundaries (from Fig. 10) and the vertical displacement amplitudes calculated by the Roxar software (from Fig. 4) (top), and the numerical values of dimensionless strain values (E) (from Fig. 6) and the steepness of slopes (in degrees, from Fig. 12) (bottom). Red lines show trends.

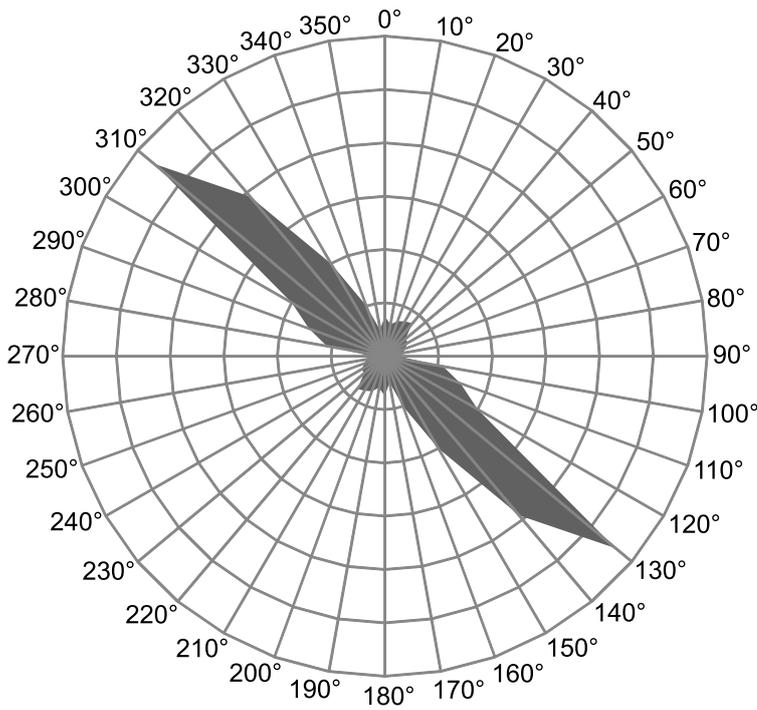


Рис. 16. Роза-диаграмма, характеризующая ориентировку ограничивающих разновысотные блоки линейных элементов рельефа, составленная с учетом их протяженности.

Fig. 16. Rose diagram characterizing the orientations of the linear relief elements bordering the blocks of various heights. The length of the elements is taken into account.

интенсивные вертикальные движения. Коэффициент корреляции Пирсона между относительными величинами плотностей вертикальных стенок (см. рис. 11) и амплитудами вертикальных перемещений (см. рис. 4) составляет 47 %, коэффициент корреляции между значениями плотностей межблоковых границ (см. рис. 10) и вертикальных стенок (см. рис. 11) равен 45 %.

Однако существует кардинальное отличие между рассчитанной по программе «Roxar» схемой вертикальных движений (см. рис. 4) и схемой блоковой делимости Приладожья (см. рис. 7), полученной путем анализа реального рельефа: согласно рис. 7 максимальные вертикальные движения в природе приурочены к северо-восточной части площади, а не к северо-западной, как получено в модели (см. рис. 4). Статическая корреляция между вершинной поверхностью блоков (см. рис. 7), которая может служить показателем величины вертикальных движений, и рассчитанными в модели относительными амплитудами вертикальных перемещений (см. рис. 4) отсутствует. По-видимому, это связано с тем, что на рис. 4 указаны модельные величины смещений без учета знака (все амплитуды вертикальных движений считаются положительными). Можно предположить, что в пределах выделенной на рис. 4 области северо-восточного простираения происходили интенсивные дифференцированные восходящие и нисходящие движения земной коры, приведшие к формированию расчлененного рельефа, суммарная амплитуда которых по модулю превосходит амплитуду поднятия, рас-

положенного в северо-восточной части территории и выделяющегося по вершинной поверхности блоков (см. рис. 7).

3.2. ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН ДЕФОРМАЦИИ ПО ДАННЫМ GPS

На схеме величин деформаций, построенной по данным GPS, выделяются области повышенных значений этого параметра. Наиболее крупная из них расположена в районе поселка Кааламо. Локальные максимумы величин деформаций приурочены к юго-западной (район города Выборга) и юго-восточной окраинам рассматриваемой территории (см. рис. 6). Аналогичным образом распределены участки, отличающиеся достаточно расчлененным рельефом, для которого характерно развитие крутых склонов (см. рис. 12). Коэффициент корреляции между величинами деформаций и крутизной склонов составляет 56 % (см. рис. 15).

3.3. АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА

Выделенные путем визуального дешифрирования линейные элементы рельефа формируют блоковую структуру (см. рис. 7–9). Наибольшей суммарной протяженностью характеризуются межблоковые границы северо-западного направления (протяженность межблоковых границ, простирающихся по азимуту 310–320, составляет около 45 % от общей протяженности) (рис. 16). Закономерности пространственного рисунка линейных элементов рельефа сопоставлены с геологическим строе-

нием и данными компьютерного моделирования. Проблема отражения геологических структур в рельефе рассмотрена в следующем разделе.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Линейные элементы рельефа преимущественно ориентированы как структуры растяжения в обстановке северо-западного сжатия, проявленной на современном этапе. Аналогичным образом простираются трещины, моделирование которых проводилось с помощью программы «Roxag» (см. рис. 3).

Некоторые линейные элементы рельефа являются прямым отражением дизъюнктивных структур: высокая степень соответствия древнего структурного плана и пространственного рисунка межблоковых границ характерна для района озера Янисъярви, расположенного в северной части рассматриваемого участка (см. рис. 9). Зона разрывных нарушений северо-западного простираения, разделяющая архейские образования Карельского кратона и раннепротерозойские комплексы Свекофеннского пояса [Kulikov et al., 2017] и представляющая собой фрагмент региональной Раахе-Ладожской сутуры [Baltybaev et al., 2000], выражена в рельефе как граница разновысотных блоков (см. рис. 7). К границам Коккасельского и Кирьяволахтинского куполов приурочены границы блоков (см. рис. 8). Максимумы плотности линеаментов («штрихов»), рассчитанные с помощью программы «LESSA», нередко вытянуты вдоль разрывных нарушений [Khazov et al., 2004] (см. рис. 13).

Большая часть линий вытянутости ориентирована в северо-западном направлении – так же, как и трещины, моделирование которых проводилось в программе «Roxag». Исходя из этого, можно предположить, что в новейшее время рассматриваемая территория находилась в обстановке северо-западного сжатия. Однако в пределах отдельных областей линии вытянутости отклоняются от доминирующего направления, что можно объяснить наличием крупных неоднородностей, обусловлен-

ных геологическим строением и влияющих на рельеф. К ним относятся расположенные в районе города Сортавала и поселка Ляскеля гранитогнейсовые купола (Сотравальский, Кирьяволахтинский, Коккасельский) и выходы гранитоидов Салминского массива южнее города Питкяранты (см. рис. 14). По-видимому, эти неоднородности оказывают значительное влияние на характер напряженного состояния.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлена опосредованная взаимосвязь между рельефом и современными деформациями: участки повышенных значений величин деформаций отличаются достаточно расчлененным рельефом, для которого характерны крутые склоны. По данным компьютерного моделирования выявлена зона северо-восточного простираения, в пределах которой рассчитанные относительные амплитуды вертикальных перемещений достигают максимальных отметок. Эта зона отличается повышенной проницаемостью земной коры и развитием небольших по площади блоков, выделенных на основе анализа рельефа. Геологические структуры (разрывные нарушения, гранитогнейсовые купола) фрагментарно отражаются в современном рельефе, что свидетельствует об унаследованном характере развития последнего. Судя по фокальным механизмам очагов землетрясений и результатам компьютерного моделирования, новейшая и современная активизация древнего структурного плана происходит в обстановке северо-западного сжатия. При данном типе напряженного состояния наиболее протяженные линейные элементы рельефа северо-западного простираения ориентированы как структуры растяжения. Таким образом, современные движения земной коры и активизированные в новейшее время геологические структуры взаимосвязаны с морфоструктурным планом рельефа Приладожья.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Ahola J., Ollikainen M., Koivula H., 2005. GPS Operations at Olkiluoto, Kivetty and Romuvaara in 2002–2003. Finnish Geodetic Institute, Kirkkonummi, 288 p.
- Assinovskaya B.A., Ovsov M.K., Karpinsky V.V., Mekhryushev D.Yu., 2009. Seismic events on Ladoga. *Georisk* (3), 6–12 (in Russian) [Ассиновская Б.А., Овсов М.К., Карпинский В.В., Мехрюшев Д.Ю. Сейсмические события на Ладоге // *Геориск*. 2009. № 3. С. 6–12].
- Assinovskaya B.A., Shchukin J., Gorshkov V., Shcherbakova N., 2011. On recent geodynamics of the Eastern Baltic Sea region. *Baltica* 24 (2), 61–70.
- Baltybaev Sh.K., Glebovitskii V.A., Kozyreva I.V., Shul'diner V.I., 1996. The Meyeri Thrust: The main element of the suture at the boundary between the Karelian Craton and the Svecofennian belt in the Ladoga region of the Baltic Shield. *Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences / Earth Science Sections* 348 (4), 581–584.

- Baltybaev Sh.K., Glebovitsky V.A., Kozyreva I.V., Konopel'ko D.L., Levchenkov O.A., Sedova I.S., Schuldiner V.I., 2000. Geology and Petrology of Svekofennids in the Lake Ladoga Region. Publishing House of St. Petersburg State University, St. Petersburg, 200 p. (in Russian) [Балтыбаев Ш.К., Глебовицкий В.А., Козырева И.В., Конопелько Д.Л., Левченко О.А., Седова И.С., Шульдинер В.И. Геология и петрология свекофеннид Приладожья. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 200 с.].
- Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.H.F., Braud J., Binder B., Depner J., Fabre D., Factor J., Ingalls S., Kim S-H., Ladner R., Marks K., Nelson S., Pharaoh A., Trimmer R., Von Rosenberg J., Wallace G., Weatherall P., 2009. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS. *Marine Geodesy* 32 (4), 355–371. <https://doi.org/10.1080/01490410903297766>.
- Bogachev M.A., Borodulina G.S., 2008. Relationship between helium anomalies in groundwaters of Karelia and tectonic zones. In: Relationship between the surface and deep structures of the crust. Proceedings of the XIV International Conference. Part 1. Publishing House of Karelian Research Center, Petrozavodsk, Vol. 1. p. 62–63 (in Russian) [Богачев М.А., Бородулина Г.С. Связь аномалий гелия в подземных водах Карелии с тектоническими зонами // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: Материалы XIV международной конференции. Часть 1. Петрозаводск: Издательство КарНЦ РАН, 2008. Т. 1. С. 62–63].
- Bowes D.R., Halden N.M., Koistinen T.J., Park A.F., 1984. Structural features of basement and cover rocks in the eastern Svecocarellides, Finland. In: A. Kröner, R. Greiling (Eds.), Precambrian tectonics illustrated. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, p. 147–171.
- Earthquake Database of the Institute of Seismology of the University of Helsinki, 2017. Available from: <http://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php> (last accessed October 31, 2017).
- Eremeev A.N. (Ed.), 1983. Scheme of Permeability of the Crust in the European Regions of the USSR from the Data of Helium Surveys. Scale 1:2500000. The USSR Ministry of Geology, All-Union Scientific Research Institute of Mineral Raw Materials, Moscow (in Russian) [Схема проницаемости земной коры европейской части СССР по данным гелиевых исследований. Масштаб 1:2500000 / Ред. А.Н. Еремеев. М.: Министерство геологии СССР, Всесоюзный научно-исследовательский институт минерального сырья, 1983].
- Eskola P.E., 1948. The problem of mantled gneiss domes. *Quarterly Journal of the Geological Society* 104 (1–4), 461–476. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1948.104.01-04.21>.
- Galaganov O.N., Gorshkov V.L., Guseva T.V., Rosenberg N.K., Perederin V.P., Shcherbakova N.V., 2011. Recent crustal motion of Ladoga-Onega Region revealed from satellite and ground measurements. *Sovremennyye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa (Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space)* 8 (2), 130–136 (in Russian) [Галаганов О.Н., Горшков В.Л., Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Передерин В.П., Щербакова Н.В. Современные движения земной коры Ладого-Онежского региона по данным спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 130–136].
- Grigorieva L.V., Shinkarev N.F., 1981. Conditions for formation of dome structures in the Lake Ladoga region. *Izvestiya AN SSSR, Seriya Geologicheskaya* (3), 41–50 (in Russian) [Григорьева Л.В., Шинкарев Н.Ф. Условия образования купольных структур в Приладожье // Известия АН СССР, серия геологическая. 1981. № 3. С. 41–50].
- Kazakov A.N., Miller Yu.V., Duk V.L., Kharitonov A.L., 1977. Structural Evolution of Metamorphic Complexes. Nauka, Leningrad, 159 p. (in Russian) [Казакон А.Н., Миллер Ю.В., Дук В.Л., Харитонов А.Л. Структурная эволюция метаморфических комплексов. Л.: Наука, 1977. 159 с.].
- Khazov R.A., Sharov N.V., Isanina E.V., 2004. Deep structure and metallogeny of the Lake Ladoga region. In: Geology and natural resources of Karelia, vol. 7, p. 55–74 (in Russian) [Хазов Р.А., Шаров Н.В., Исанина Э.В. Глубинное строение и металлогения Приладожья // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2004. Вып. 7. С. 55–74].
- King G.C.P., Cocco M., 2001. Fault interaction by elastic stress changes: New clues from earthquake sequences. In: R. Dmowska, B. Saltzman (Eds.), *Advances in geophysics*, vol. 44, p. 1–38. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(00\)80006-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(00)80006-0).
- Krupennikova I.S., Mokrova A.N., Guseva T.V., 2015. Modern deformation and seismicity of the crust in the Baltic Shield. In: Modern tectonophysics. Methods and results. Materials of the 4th Youth Tectonophysical Workshop. IPE RAS, Moscow, Vol. 1, p. 166–173 (in Russian) [Крупеникова И.С., Мокрова А.Н., Гусева Т.В. Современные деформации и сейсмичность земной коры Балтийского щита // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ РАН, 2015. Т. 1. С. 166–173].
- Kulikov V.S., Svetov S.A., Slabunov A.I., Kulikova V.V., Polin A.K., Golubev A.I., Gorkovets V.Ya., Ivashchenko V.I., Gogolev M.A., 2017. Geological map of Southeastern Fennoscandia (scale 1:750000): a new approach to map compilation. *Proceedings of the Karelian Research Center of RAS. Series Precambrian Geology* (2), 3–41 (in Russian) [Куликов В.С., Светов С.А., Слабунов А.И., Куликова В.В., Полин А.К., Голубев А.И., Горьковец В.Я., Иващенко В.И., Гоголев М.А. Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750000: новые подходы к составлению // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Геология докембрия. 2017. № 2. С. 3–41]. <https://doi.org/10.17076/geo444>.
- Lukashov A.D., 1976. Morphological structure of the Northern Lake Ladoga region. In: Geomorphology and Quaternary geology of the North European regions of the USSR. Publishing House of the Karelian Branch of the USSR Acad. Sci., Petrozavodsk, p. 50–59 (in Russian) [Лукашов А.Д. Морфоструктура Северного Приладожья // Геоморфология и геология четвертичного периода севера европейской части СССР. Петрозаводск: Изд-во Карельского филиала АН СССР, 1976. С. 50–59].

- Morozov Y.A., 1999. The role of transpression in the structural evolution of the Svecokareliides in the Baltic Shield. *Geotectonics* 33 (4), 302–313.
- Morozov Yu.A., Gaft D.E., 1985. On the nature of granite-gneiss domes in the Northern Lake Ladoga region. In: Structure and petrology of Precambrian complexes. IPE of USSR Acad. Sci., Moscow, p. 3–121 (in Russian) [Морозов Ю.А., Гафт Д.Е. О природе гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья // Структура и петрология докембрийских комплексов. М.: ИФЗ АН СССР, 1985. С. 3–121].
- Morozov Yu.A., Somin M.L., Travin V.V., 2000. The behavior of granitoid basement involved in the formation of the Svekokarelian Foldbelt, Northern Ladoga region. *Doklady Earth Sciences* 370 (1), 58–62.
- Nikonov A.A., 2005. East Ladoga earthquake of November 30, 1921. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 41 (7), 525–529.
- Nikonov A.A., Shvarev S.V., 2015. Seismolineaments and strong earthquakes in the Russian regions of the Baltic Shield: new solutions for the last 13 thousand years. In: Geological and geophysical medium and various manifestations of seismicity. Proceedings of the international conference. Publishing House of NEFU Technical Institute, Neryungri, p. 243–251 (in Russian) [Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинементы 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. Нерюнгри: Изд-во Технического Института СВФУ, 2015. С. 243–251].
- Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Babichev A.V., Sverdlova V.G., 2016. The mechanism of magma ascent through the solid lithosphere and relation between mantle and crustal diapirism: numerical modeling and natural examples. *Russian Geology and Geophysics* 57 (6), 843–857. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.05.002>.
- Slunga R.S., 1991. The Baltic Shield earthquakes. *Tectonophysics* 189 (1–4), 323–331. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90505-M](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90505-M).
- Sudovikov N.G., Glebovitsky V.A., Sergeev A.S., Petrov V.P., Kharitonov A.L., 1970. Geological Development of Deep Zones in Mobile Belts (North Lake Ladoga Region). Nauka, Leningrad, 227 p. (in Russian) [Судовиков Н.Г., Глебовицкий В.А., Сергеев А.С., Петров В.П., Харитонов А.Л. Геологическое развитие глубинных зон подвижных поясов (Северное Приладожье). Л.: Наука, 1970. 227 с.].
- User Guide for “Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)”, 2012 (in Russian) [Руководство пользователя «Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)», 2012]. Available from: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2.
- Zlatopolsky A.A., 2011. New LESSA technology resources and digital terrain map analysis. Methodology. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa (Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space)* 8 (3), 38–46 (in Russian) [Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46].



Агибалов Алексей Олегович, аспирант
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1, Россия
✉ e-mail: Agibalo@yandex.ru

Agibalov, Alexei O., postgraduate student
M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology
1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia
✉ e-mail: Agibalo@yandex.ru



Зайцев Владимир Александрович, канд. геол.-мин. наук, в.н.с.
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1, Россия
e-mail: v.zaitsev@mail.ru

Zaitsev, Vladimir A., Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology
1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia
e-mail: v.zaitsev@mail.ru



Сенцов Алексей Андреевич, аспирант
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1, Россия
e-mail: alekssencov@yandex.ru

Sentsov, Alexei A., postgraduate student
M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology
1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia
e-mail: alekssencov@yandex.ru



Девяткина Анастасия Сергеевна, студентка
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1, Россия
e-mail: anastasia.deviatkina@mail.ru

Deviatkina, Anastasia S., student
M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology
1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russia
e-mail: anastasia.deviatkina@mail.ru