

УДК 551.432.8 (470.22)

ИЗУЧЕНИЕ НОВЕЙШИХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ С ПОМОЩЬЮ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.О. Агibalов¹, В.А. Зайцев¹, А.И. Поletaев¹, А.А. Сенцов²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Поступила в редакцию 07.12.17

Морфоструктурный анализ территории Северного Приладожья с использованием метода В.П. Философова и метода изолонг позволил сделать выводы о характере неотектонических движений. По картам крутизны изобазит выявлены развивающиеся в новейшее время структуры. С помощью компьютерного моделирования рассчитаны амплитуды вертикальных перемещений в обстановке северо-западного сжатия, которое может быть связано со спредингом в северной части Атлантического океана и гляциоизостатическим поднятием Балтийского щита. Результаты моделирования и морфометрических исследований сопоставлены с данными о современных движениях Приладожья.

Ключевые слова: морфометрия, компьютерное моделирование, неотектоника, Приладожье.

Agibalov A.O., Zaitsev V.A., Poletaev A.I., Sentsov A.A. Study of neotectonic Earth crust movements in Ladoga region using morphometric methods and computer modeling. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2018. Volume 93, part 1. P. 3–9.

The morphostructural analysis of the Northern Ladoga region was performed using method of V.P. Filosofov and by construction of lines of equal length of watercourses, which concern to the same order. It allows us to make some conclusions about the nature of neotectonic movements. According to the maps of the steepness of the isobasic lines we identified structures developing in neotectonic time. Using computer modeling we calculated relative velocities of vertical movements in condition of northwestern compression, which can be associated with spreading in the northern part of the Atlantic Ocean and glacial isostatic uplift of the Baltic Shield. The results of modeling and morphometric studies were compared with data about modern earth's crust movements in Ladoga region.

Key words: morphometry, computer modeling, neotectonics, Ladoga region.

Введение

Северное Приладожье, расположенное на юго-востоке Балтийского щита, относится к областям развития докембрийских комплексов, испытавших полистадийную деформационно-метаморфическую эволюцию, в результате которой сформировался сложный парагенез пликативных и дизъюнктивных структур (Морозов и др., 2000). Некоторые из них были вовлечены в новейшие движения и получили отражение в рельефе (Лукашов, 1976). Приуроченность эпицентров сейсмических событий (Сейсмический каталог...) малых магнитуд к древним разрывным нарушениям (Хазов и др., 2004) свидетельствует о геодинамической активности последних на современном этапе. В данной работе затронуты проблемы выявления новейших структур фундамента по морфометрическим данным и установления их взаимосвязи с древним структурным планом. Поставленные задачи имеют не только научный, но и практический интерес, поскольку рассматриваемая территория расположена недалеко от крупнейшего мегаполиса – Санкт-Петербурга.

Методика исследований

В работе приведены результаты использования комплекса морфометрических методов, позволивших изучить характер новейших движений Приладожья. По топографическим картам масштаба 1:100 000 были построены карты порядков речных долин. Долины, не принимающие ни одного притока, рассматриваются как долины 1-го порядка, долины 2-го порядка образуются при слиянии двух долин 1-го порядка и т.д. Впадение долин более низкого порядка в долину более высокого порядка не изменяет ее порядок. Этим способом на территории Приладожья выделено шесть порядков долин. С помощью программы «ArcGis» на основе карт порядков долин построены карты базисных поверхностей долин 1–3-го порядков, распространенных в пределах всей изучаемой области. Методика построения заключается в том, что места впадения долин определенного порядка в долины следующего порядка или озера отмечаются точками, которым по цифровой модели рельефа присваиваются значения высотных отметок рельефа. Изобазиты проводятся путем интерполяции последних методом

обратно взвешенных расстояний. По мнению основоположника рассматриваемого метода В.П. Философова (1960), участки малых заложений между изобазитами связаны с активно развивающимися в новейшее время структурами, поэтому для выявления последних составлены карты крутизны изобазит.

С целью оценки характера вертикальных движений Приладожья составлены карты изолонг — линий равной длины водотоков одного порядка. Методика составления карт изолонг заключалась в том, что середине каждого водотока было присвоено значение его длины. Возможный вариант интерпретации результатов применения метода изолонг предполагает, что растущее новейшее поднятие находит отражение в рисунке гидросети в виде серии сближенных коротких водотоков, радиально расходящихся от его вершины. На картах изолонг эти поднятия проявляются в виде изометричных аномалий с пониженными значениями длин водотоков (Применение геоморфологических..., 1970). Для того, чтобы оценить степень извилистости русел, речные долины 3–6-го порядков были разделены на ряд прямоугольных ячеек равных размеров (2,3 x 1,7 км). Длинная сторона каждой

ячейки была ориентирована по направлению течения реки. С помощью программы «ArcGis» рассчитаны длины фрагментов водотоков, попадающих в каждую ячейку. Повышенные значения длины водотока в пределах элементарных ячеек связаны с меандрированием реки, в то время как пониженные значения этого параметра наблюдаются в пределах прямолинейных участков долин. Интерпретация построенной карты длин водотоков 3–6-го порядков, нормированных относительно ячеек, основана на том, что в областях растущих поднятий русло, как правило, более спрямленное, а увеличение меандрирования наблюдается на участках понижений (Ландшафты болот..., 2012).

Компьютерное моделирование, выполненное с помощью программы «Roxar», позволило рассчитать относительные величины вертикальных перемещений в обстановке субгоризонтального северо-западного сжатия. Судя по решениям фокальных механизмов очагов землетрясений на сопредельной части юго-востока Финляндии (Slunga, 1991; Uski et al., 2003), данный тип напряженного состояния проявляется в Приладожье на современном этапе. Он может быть связан со спредингом в северной части Атлантического океана и гляциоизо-

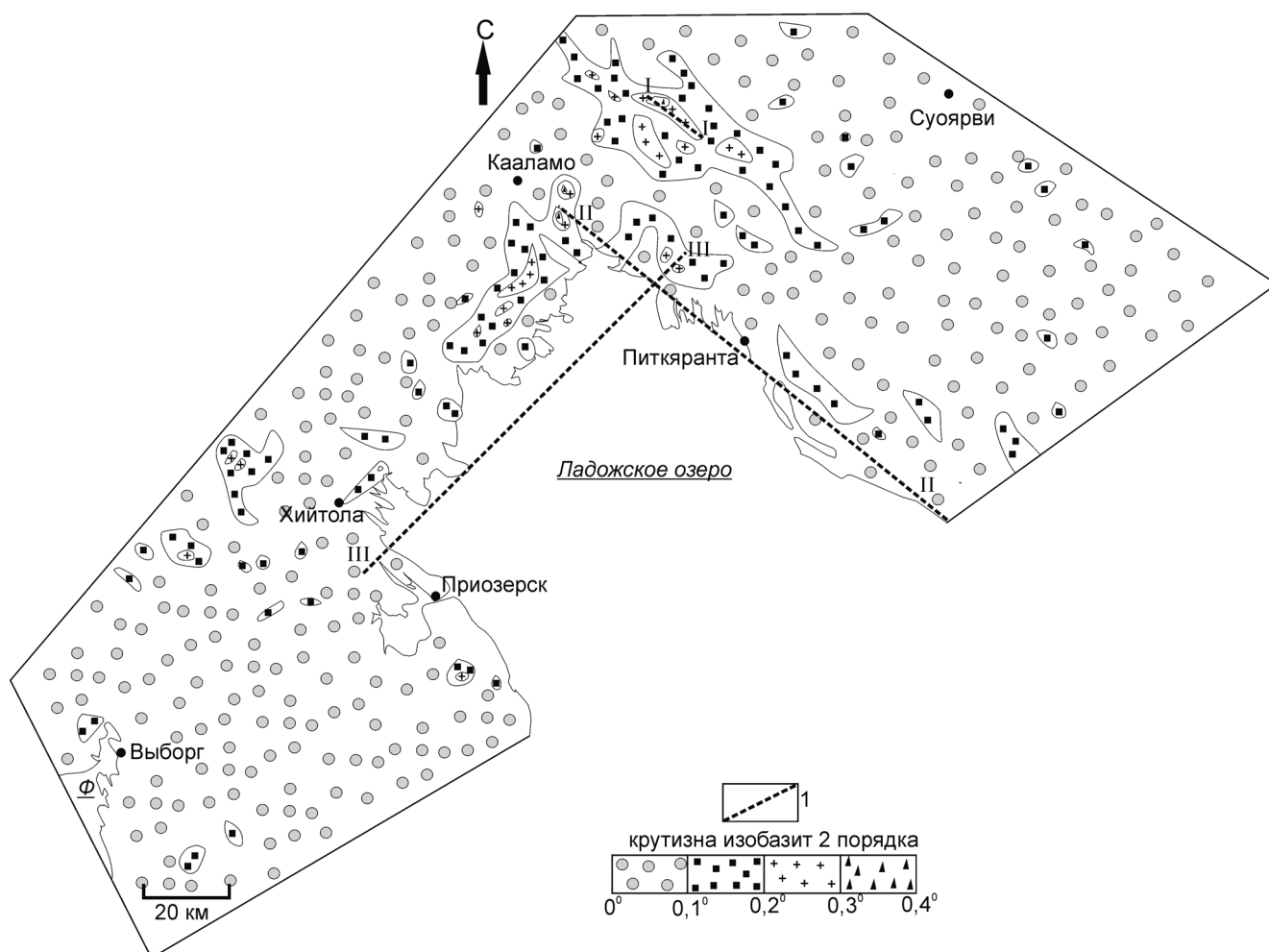


Рис. 1. Карта крутизны изобазит второго порядка: 1 — активные разрывные нарушения: I-I — Янисъярвинско-Тулумозерский разлом, по (Лукашов, 1976); II-II — Восточно-Ладожский сейсмолинеамент, по (Никонов, Шварев, 2015); III-III — Северо-Ладожский сейсмолинеамент, по (Никонов, Шварев, 2015). Ф — Финский залив

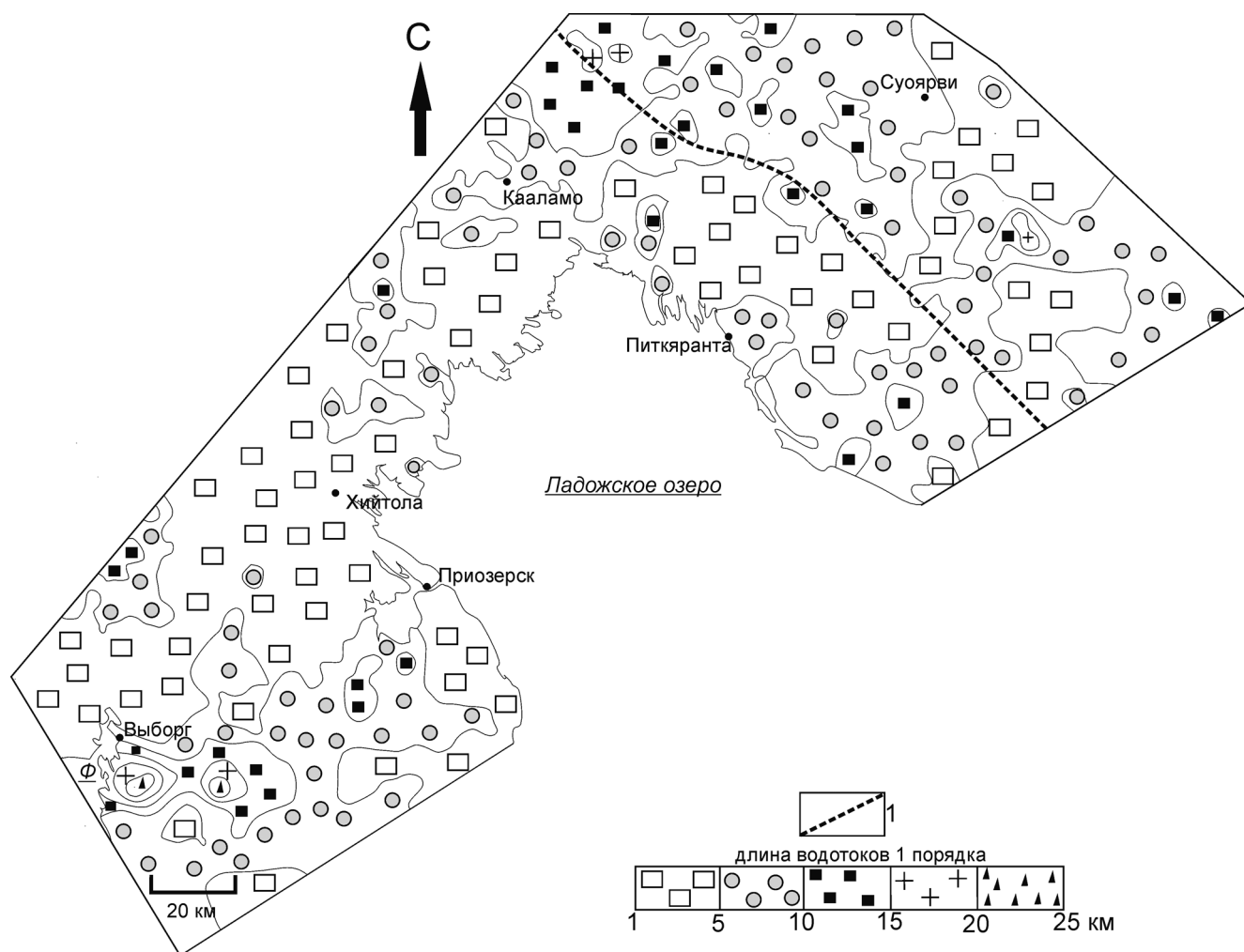


Рис. 2. Карта изолонг первого порядка: 1 – граница Карельского кратона (на востоке) и Свеккофеннского пояса (на западе), по (Куликов и др., 2017). Ф – Финский залив

статическим поднятием Балтийского щита (Keiding et al., 2015).

В качестве исходных данных для построения модели использовались высотные отметки рельефа (Цифровая модель рельефа; Карта глубин..., 1988) и схема разрывных нарушений, составленная на основе геолого-геофизических данных (Хазов и др., 2004). Выбор данной схемы обусловлен тем, что на ней показаны крупные дизъюнктивные структуры, находящие отражение в современном рельефе (Агибалов и др., 2017). Некоторые из них проявляют сейсмическую активность (Сейсмический каталог...; Никонов, Шварев, 2015). Методика моделирования заключалась в том, что на поверхность рельефа, построенную в формате «Grid», была нанесена сетка разрывных нарушений. С помощью модуля «Fracture modelling» проведен расчет относительных амплитуд вертикальных перемещений в обстановке субгоризонтального сжатия, ось которого простирается по азимуту 310° (ось максимального растяжения ориентирована вертикально). При проведении расчетов используются следующие допущения: величины напряжений достаточно велики для образования новых разрывов малой протяженности, все разломы считаются непрерывными, однород-

ными, вертикальными. Расчет относительных амплитуд вертикальных перемещений проводится при допущении, что все перемещения происходят до тех пор, пока величины напряжений не достигнут нулевых значений (Руководство пользователя..., 2012). Помимо оценки относительных амплитуд вертикальных перемещений, программа «Rohag» использовалась для расчета коэффициентов корреляции Пирсона между рассмотренными в данной работе параметрами (длинами рек определенного порядка, амплитудами современных вертикальных движений и пр.).

Результаты исследований

Составленные карты крутизны изобазит 1–3-го порядков принципиально не отличаются друг от друга: основные закономерности пространственного рисунка изолоний крутизны изобазит можно охарактеризовать, рассмотрев карту крутизны изобазит 2-го порядка (рис. 1). На ней выделяются три основные линейные зоны малых заложений между изобазитами. Две из них простираются в северо-западном направлении вдоль восточного побережья Ладожского озера, а одна протягивается вдоль се-

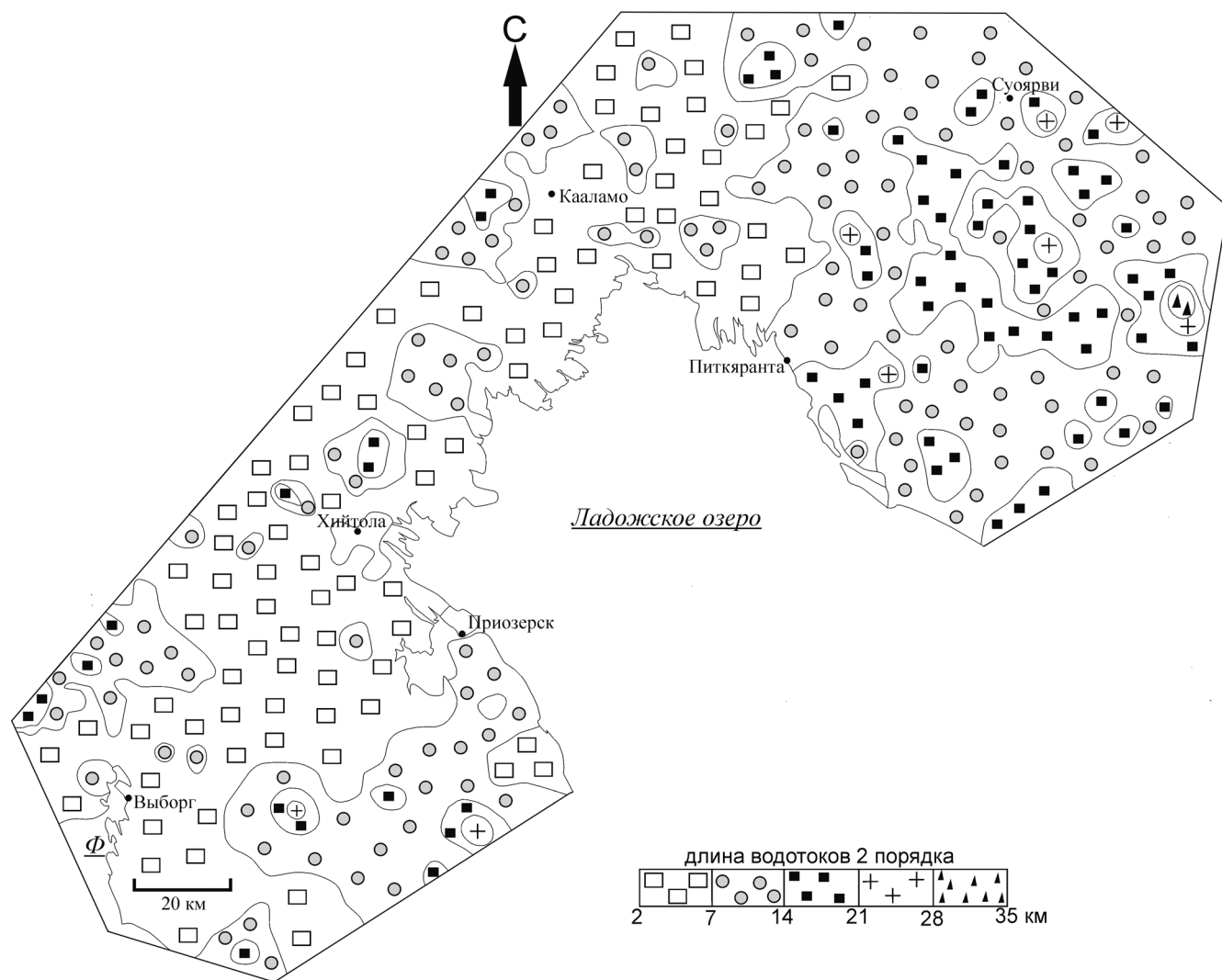


Рис. 3. Карта изолонг второго порядка. Ф – Финский залив

веро-западного побережья. Расположенная восточнее пос. Кааламо зона, отличающаяся повышенными значениями крутизны изобазит, приурочена к Янисъярвинско-Тулумозерскому линеamentу. Последний представляет собой древнее разрывное нарушение (Куликов и др., 2017; Лукашов, 1976; Хазов и др., 2004), активизированное в новейшее время, о чем свидетельствуют смещения речных долин и изгиб озовой гряды как при левом сдвиге (Лукашов, 1976). По высоким значениям крутизны изобазит выделяется сейсмоактивный Восточно-Ладожский разлом, ограничивающий впадину Ладожского озера. С ним связано Салминское землетрясение 1921 г. магнитудой 4,0 (Никонов, 2005). Вдоль северо-западного побережья Ладожского озера простирается сейсмогенерирующая структура – Северо-Ладожский сейсмолинеament (Никонов, Шварев, 2015), с которым связано землетрясение магнитудой 2,0 (Сейсмический каталог...) (рис. 1). Упомянутые сейсмолинеamentы соответствуют региональным разрывным нарушениям, показанным на карте активных разломов Евразии (Trifonov, 1996). А.А. Никоновым и С.В. Шваревым (2015) выделены Вуоксинский и Западно-Ладожский сейс-

молинеamentы, однако их фрагменты, расположенные в пределах рассматриваемой территории, асейсмичны на современном этапе (Сейсмический каталог...) и не прослеживаются на картах крутизны изобазит.

На картах изолонг первого и второго порядков юго-восточнее г. Выборга показана область повышенных значений длин водотоков, которую можно рассматривать как зону опускания. Для нее характерны пониженные высотные отметки рельефа и нисходящие движения земной коры на современном этапе (Карта современных..., 1973). Для северной и северо-западной частей рассматриваемой территории, испытывающих поднятие на современном этапе (Карта современных..., 1973), характерна относительно небольшая протяженность водотоков. Восточная часть изучаемого района, судя по рисунку изолонг, отличается сложным новейшим структурным планом (рис. 2, 3). Интересно отметить, что юго-западная часть Карельского кратона, выделяющаяся по повышенным значениям высотных отметок рельефа, не выражена на картах изолонг как растущее поднятие (рис. 2). Возможно, перепад высот, приуроченный к границе

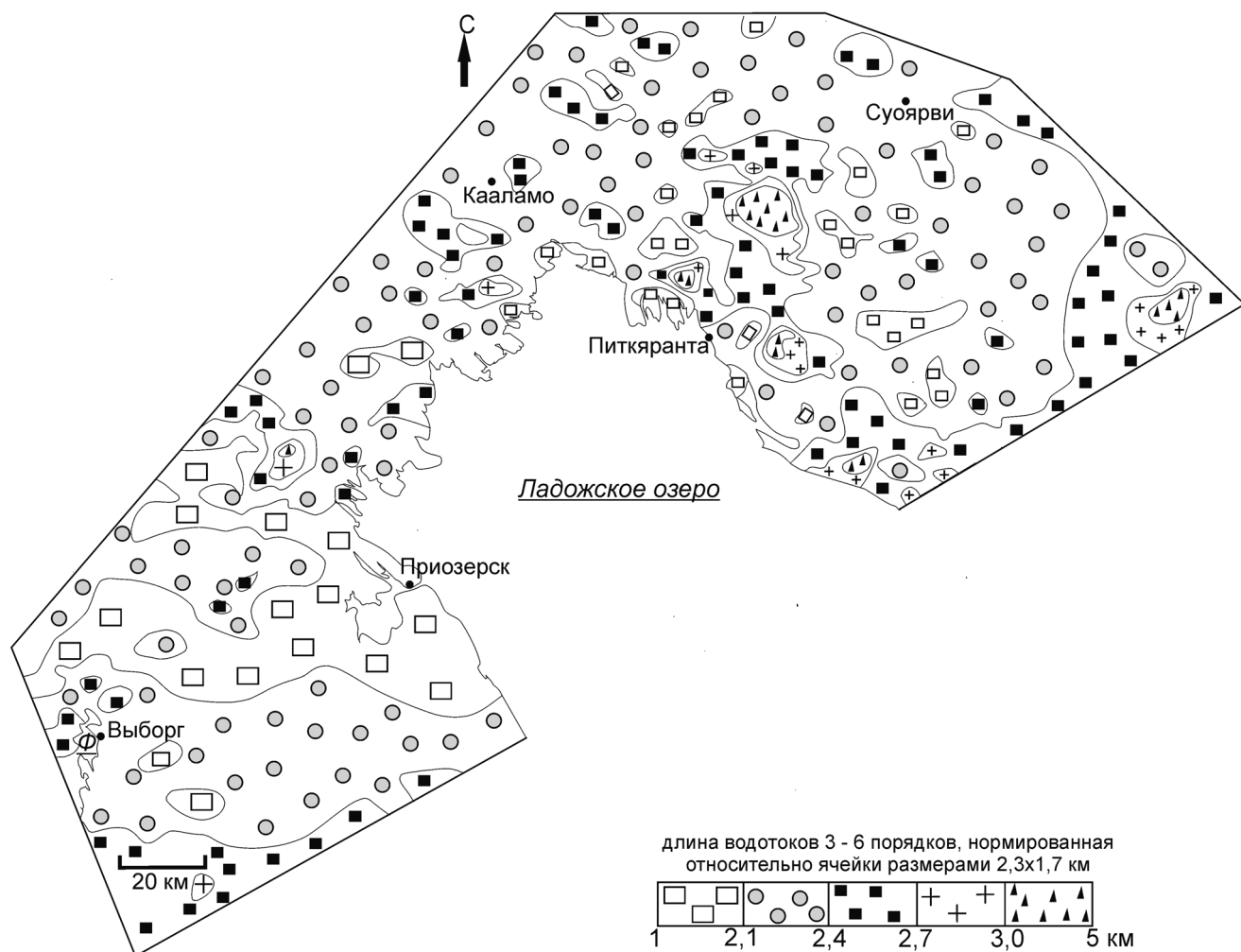


Рис. 4. Карта длин водотоков 1–3-го порядков, нормированных относительно ячейки размером 2,3x1,7 км. Ф – Финский залив

Карельского кратона и Свекофенского пояса, связан с изменением прочностных свойств пород.

Коэффициент корреляции Пирсона между изолинами первого и третьего порядков составляет 37%, в то время как карта изолонг второго порядка значительно отличается от аналогичных карт первого и третьего порядков. Судя по среднему значению скорости врезания равнинных рек на платформах, составляющему около 0,4 мм/год (Никонов, 1971), речные долины второго порядка сформировались в эпоху ладожской трансгрессии (2400–2800 лет назад), сопровождавшейся перестройкой гидросети (Малаховский и др., 1993).

На карте длин водотоков 3–6-го порядков, нормированных относительно элементарной ячейки, по повышенным значениям этого параметра выделяются области, расположенные в юго-западной и юго-восточной частях рассматриваемой территории (рис. 4). По данным повторного нивелирования, они испытывают поднятие с малой скоростью или опускание на современном этапе (Карта современных..., 1973). Между длинами водотоков второго порядка и протяженностью водотоков 3–6-го порядков, нормированных относительно элементарной ячейки, существует слабая корреляция (коэффициент корреляции Пирсона равен 27%).

С помощью программы «Rohar» построена схема амплитуд вертикальных перемещений в относительных величинах для всей территории Приладожья. На ней отчетливо выделяется область опускания, приуроченная к северо-восточной части впадины Ладожского озера, максимальная глубина которой достигает 230 м (рис. 5).

Заключение

Анализ составленных карт крутизны изобазит 1–3-го порядков позволил выявить области проявления новейшей геодинамической активности на территории Северного Приладожья, связанные с Восточно- и Северо-Ладожскими сейсмогенерирующими структурами и Янисъярвинско-Тулумозерским линеamentом, расположенным вкрест простирания ранее выделенной Балтийско-Ладожско-Онежско-Колгуевской линеamentной зоны (Поletaев и др., 2016). По картам изолонг и карте длин водотоков 3–6-го порядков, нормированных относительно элементарной ячейки, сделаны предположения о характере новейших движений. Они подтверждаются данными о современных вертикальных перемещениях (Карта современных...,

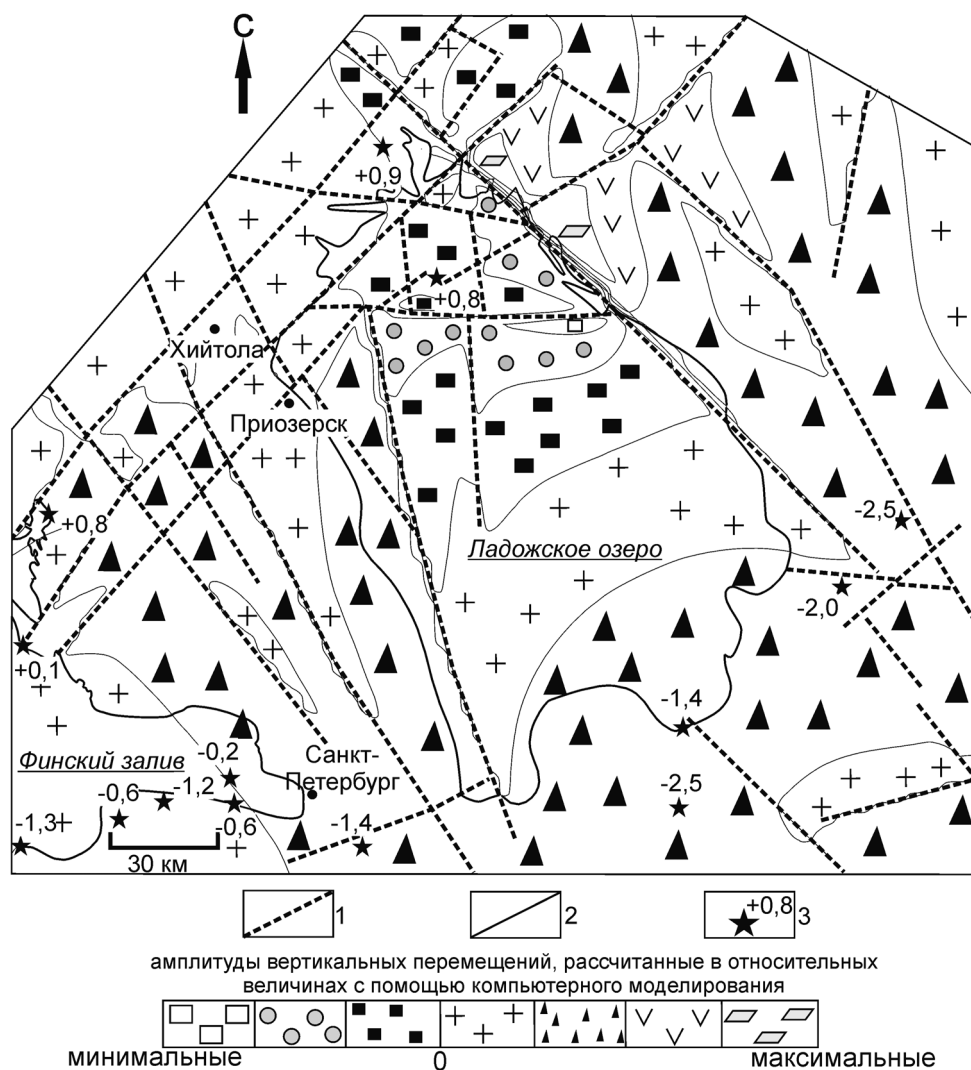


Рис. 5. Схема амплитуд вертикальных перемещений, рассчитанных в относительных величинах с помощью программы «Rohag»: 1 – разрывные нарушения, по (Хазов и др., 2004); 2 – контуры береговых линий Ладожского озера и Финского залива; 3 – пункты измерения скоростей современных вертикальных движений (в мм/год), по (Карта современных..., 1973)

1973) (рис. 5). Коэффициент корреляции Пирсона между скоростями вертикальных движений и длинами водотоков второго порядка составляет -43% (знак минус показывает, что в областях развития достаточно протяженных долин второго порядка преобладают нисходящие движения). Между значениями длин водотоков 3–6-го порядков, нормированных относительно элементарной ячейки, и скоростями современных вертикальных перемещений существует численная корреляция (коэффициент корреляции -41%). С помощью компьютерного

моделирования показано, что новейшие движения происходят в обстановке субгоризонтального северо-западного сжатия, ось которого ориентирована по азимуту около 310° . В пользу достоверности построенной модели свидетельствует корреляция между реальными скоростями вертикальных движений (Карта современных..., 1973) и рассчитанными в относительных величинах амплитудами вертикальных перемещений (коэффициент корреляции 39%).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-35-00359.

ЛИТЕРАТУРА

Агибалов А.О., Зайцев В.А., Гордеев Н.А. Оценка влияния геологического строения на рельеф Приладожья // Мат-лы Второй всероссийской науч. конф. «Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей», посвященной 110-летию со дня рождения Н.И. Николаева и А.Ф. Якушевой. Москва, 8 ноября 2017 г. М.: Перо, 2017. С. 19–21.

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

Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. Масштаб 1:2 500 000. М.: ГУГК, 1973.

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 1:750 000: новые подходы к составлению // Тр. Карельского НЦ РАН. Сер. «Геология докембрия». 2017. № 2. С. 3–41.

Ландшафты болот Томской области / Под ред. Н.С. Евсеевой. Томск: Изд-во научно-технической литературы, 2012. 399 с.

Лукашов А.Д. Новейшая тектоника Карелии. Л.: Наука, 1976. 109 с.

Малаховский Д.Б., Арсланов Х.А., Гей Н.А. Новые данные по голоценовой истории Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера / Ред. Н.Н. Давыдова, И.Б. Кошечкин. СПб.: Рос. геогр. о-во, 1993. С. 61–73.

Морозов Ю.А., Сомин М.Л., Травин В.В. О поведении гранитоидного фундамента при формировании Свекокарельского складчатого пояса Северного Приладожья // Докл. АН. 2000. Т. 370, № 4. С. 497–502.

Никонов А.А. С какой скоростью врезаются реки? // Природа. 1971. № 5. С. 30–39.

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.

Полетаев А.И., Агibalов А.О., Гордеев Н.А. Балтийско-Ладожско-Онежско-Колгуевская зона: показательный пример поиска, выделения и обоснования скрытых тектонических нарушений земной коры // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2016. Т. 91, вып. 4–5. С. 90–96.

Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях / Ред. И.П. Герасимов. М.: Недра, 1970. 293 с.

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

Сейсмический каталог Хельсинского университета. Режим доступа: <http://www.seismo.helsinki.fi/EQ-search/query.php>.

Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1960. 91 с.

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

Цифровая модель рельефа. Режим доступа: http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi.

Keiding M., Kreemer C., Lindholm C. D., Gradman S., Olesen O., Kierulf H.P. A comparison of strain rates and seismicity for Fennoscandia: depth dependency of deformation from glacial isostatic adjustment // Geophys. J. Int. 2015. Vol. 202. P. 1021–1028.

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.

Uski M., Hyvönen T., Korja A., Airo M.-L. Focal mechanisms of three earthquakes in Finland and their relation to surface faults // Tectonophysics. 2003. Vol. 363. P. 141–157.

Сведения об авторах: Агibalов Алексей Олегович — аспирант каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail*: Agibalo@yandex.ru; Зайцев Владимир Александрович — канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail*: v.zaitsev@mail.ru; Полетаев Анатолий Иванович — канд. геол.-минерал. наук, старший науч. сотр. каф. динамической геологии геологического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова, *e-mail*: aipoletaev@mail.ru; Сенцов Алексей Андреевич — науч. сотр. лаб. сейсмоструктоники и сейсмического микрорайонирования ИФЗ РАН, *e-mail*: alekssencov@yandex.ru