

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВЕЙШЕЙ ГЕОДИНАМИКИ ГРАНИТО-ГНЕЙСОВЫХ КУПОЛОВ СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ

А.О. Агибалов, А.А. Сенцов

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

Введение

Данная работа посвящена проблеме моделирования новейшей геодинамики докембрийских гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья. Объектами исследования являются купола Хавус, Коккасельский, Риеккалансари, Импилахтинский, Мурсульский, Койринойско-Питкярантский, Йокирантский, Кирьяволахтинский и Сортавальский. Предмет исследования – процесс тектонической активизации этих структур в новейшее время. Цель работы – оценить с помощью компьютерного моделирования влияние неотектонической активизации гранито-гнейсовых куполов на облик рельефа Северного Приладожья.

Ранее проведенные нами геоморфологические исследования [Агибалов и др., 2018] показали, что большая часть гранито-гнейсовых куполов (исключая относительно опущенный Сортавальский купол) находит отражение в современном рельефе как области поднятия, к границам которых приурочены крутые склоны и вертикальные стенки высотой до первых десятков метров. Было установлено, что вблизи разрывных нарушений, ограничивающих купола Хавус и Риеккалансари, наблюдаются повышенные значения объемной активности радона в подпочвенном слое [Агибалов и др., 2019]. Широкое распространение палеосейсмодислокаций в пределах рассматриваемой области развития гранито-гнейсовых куполов (рис. 1) свидетельствует о протекании активных неотектонических процессов [Глубинное строение..., 2004; Лукашов, 1976; Agibalov, 2019]. На основе этих геоморфологических, геохимических и палеосейсмологических данных нами было сделано предположение о том, что гранито-гнейсовые купола являются активными в новейшее время структурами, развитие которых оказывает значительное влияние на облик рельефа. Компьютерное моделирование позволило проверить это предположение и разработать геодинамические модели активизации гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья.

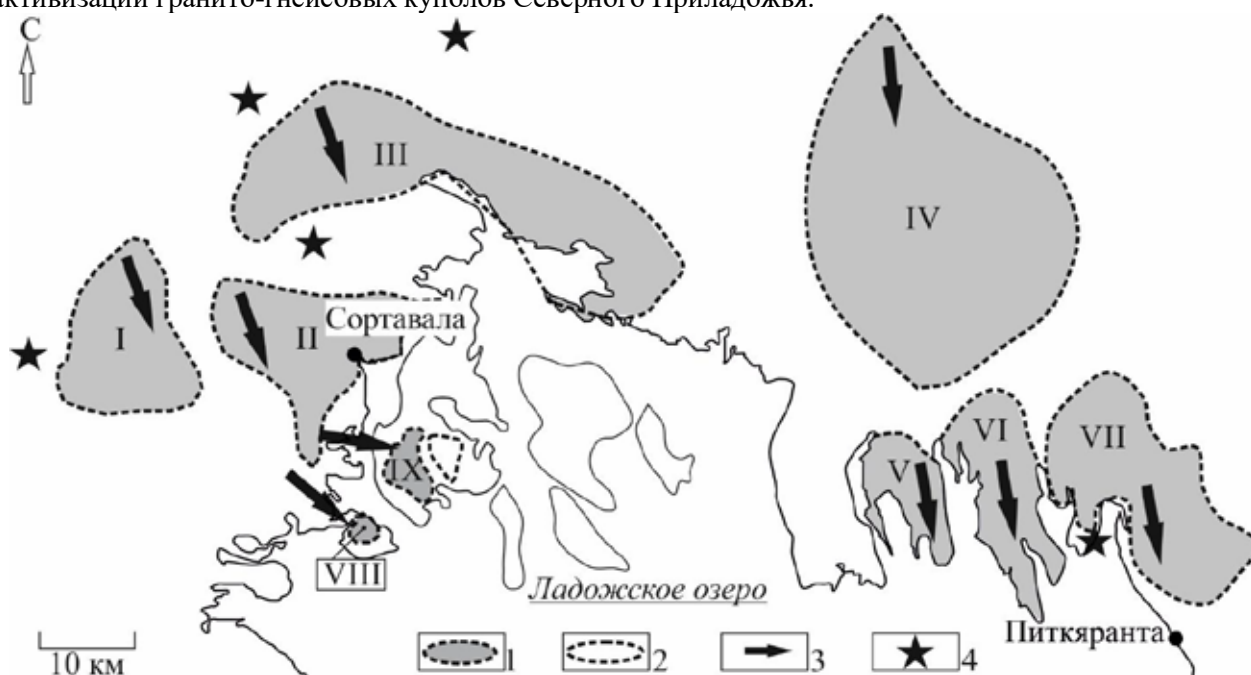


Рис. 1. Схема расположения гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья, для которых были разработаны компьютерные геодинамические модели:

1 – гранито-гнейсовые купола (I – Йокирантский, II – Сортавальский, III – Кирьяволахтинский, IV – Коккасельский, V – Мурсульский, VI – Импилахтинский, VII – Койринойско-Питкярантский, VIII – Хавус, IX – Риеккалансари), по [База данных..., 2020]; 2 – сопряженная с гранито-гнейсовым куполом Риеккалансари синформная структура, 3 – ориентировка горизонтальной оси сжатия в пределах гранито-гнейсовых куполов, определенная с помощью компьютерного моделирования, 4 – палеосейсмодислокации в рыхлых четвертичных отложениях, по [Agibalov, 2019]

Материалы и методы исследования

Методика моделирования предполагает использование программного продукта «RMS 2013» компании «Rohac». Исходными данными служили высотные отметки рельефа [Цифровая модель..., 2020] и глубины Ладожского озера [Ладожское озеро..., 2002], контуры гранито-гнейсовых куполов [База данных..., 2020], конфигурация активных разрывных нарушений [Глубинное строение..., 2004], физико-механические характеристики среды (осредненные значения коэффициентов Пуассона и внутреннего трения, равные 0,25 и 0,6, соответственно), ориентировки внешних нагрузок. Наиболее информативными показателями, рассчитанными в ходе моделирования, являются относительные амплитуды перемещений по границам куполов, активным разломам и вероятность формирования новых разрывов малой протяженности. Методика расчета предполагает, что модель состоит из упругого однородного материала [Daly, Mueller, 2004], основные физико-механические свойства которого (коэффициенты Пуассона и внутреннего трения) заданы как начальные условия. Под действием внешней нагрузки, величина которой считается достаточной для возникновения новых разрывов малой протяженности, происходит перераспределение напряжений вследствие влияния разрывных нарушений (в том числе приуроченных к границам куполов), рассматриваемых как вертикальные неоднородности. В результате перераспределения напряжений на некоторых площадках осуществляется комбинация нормального и касательного напряжений, которая, согласно теории Мора, приводит к нарушению прочности [Работнов, 1963]. Таким образом, физической основой для определения положения областей наиболее вероятного формирования новых разрывов малой протяженности является использование закона Кулона – Мора. Расчеты выполняются при допущении о том, что одно из трех внешних главных нормальных напряжений действует вертикально, промежуточное напряжение (σ_2) равно среднему напряжению (σ_m), а перемещения по разрывам происходят до полной релаксации напряжений [Агибалов, 2019; Руководство пользователя..., 2020].

Результаты и их обсуждение

Нами были рассмотрены 6 опорных участков (таблица 1), для каждого из которых построена серия геодинамических моделей, отличающихся типом заданной внешней нагрузки. В качестве исходных данных для построения всех моделей использовались контуры гранито-гнейсовых куполов. Модели, для которых значение коэффициента корреляции Пирсона между относительными амплитудами вертикальных перемещений и высотами рельефа максимальны, были выбраны как наиболее достоверные. Установлено, что эти значения варьируют от 29% до 47%, при этом оси максимального сжатия горизонтальны и ориентированы преимущественно в север-северо-западном направлении по азимутам 280^0 - 10^0 .

Таблица 1. Основные сведения о разработанных компьютерных геодинамических моделях: К_п – коэффициент корреляции Пирсона между высотами рельефа и относительными амплитудами вертикальных перемещений

№ участка	Гранито-гнейсовые купола	Азимут простира ния горизонтальной оси сжатия	К _п
1	Июкирантский, Сортавальский	340^0	32%
2	Кирияволахтинский	340^0	47%
3	Коккасельский	355^0	29%
4	Мурсульский, Импилахтинский, Койринойско-Питкярантский	10^0	32%
5	Хавус	310^0	37%
6	Риеккалансари	280^0	45%

Для опорного участка № 4, включающего гранито-гнейсовые купола Мурсульский, Импилахтинский и Койринойско-Питкярантский, установлена численная корреляция между крутизной склонов и вероятностью формирования новых разрывов малой протяженности (коэффициент корреляции составляет 41%). На наш взгляд, полученные данные об ориентировках осей сжатия в пределах рассматриваемой территории не противоречат общим представлениям о преобладании северо-западного сжатия в юго-восточной части Балтийского щита [Зыков, Полещук, 2016], а некоторые отклонения от этого направления можно объяснить влиянием различных неоднородностей, обусловленных сложным геологическим строением. На наш взгляд, рассчитанные значения коэффициентов корреляции Пирсона между высотами рельефа и относительными амплитудами вертикальных перемещений являются достаточными для подтверждения

обоснованности разработанных моделей, поскольку тектонические движения – один из множества факторов (наряду с экзарационной и аккумулятивной деятельностью ледника, гидроизостатическими движениями и т. д.), оказывающих влияние на облик рельефа [Спиридонов, 1978].

Однако существенным недостатком построенных моделей является то, что они не позволяют объяснить особенности расположения палеосейсмодислокаций, рассмотренных в работах [Глубинное строение..., 2004; Agibalov, 2019]. Для того чтобы решить эту задачу, была построена другая модель по аналогичной методике. При этом в качестве исходных данных вместо контуров гранито-гнейсовых куполов использовались разломы с признаками голоценовой активизации [Глубинное строение..., 2004] (рис. 2). Нами был задан сдвиговый тип напряженного состояния с ориентировкой оси максимального сжатия по азимуту 350^0 . Сопоставление рассчитанных параметров с реальными характеристиками геолого-географической среды показало, что существует численная корреляция между высотами рельефа и относительными амплитудами вертикальных перемещений (коэффициент корреляции Пирсона составляет 31%). Кроме того, палеосейсмодислокации расположены в областях низких отрицательных значений вероятности формирования новых разрывов (параметра «FractureLikelihood»). Опыт применения программы «RMS 2013» свидетельствует о том, что высокие по модулю положительные значения этого показателя приурочены к областям возникновения трещин скола, а отрицательные – трещин отрыва [Агибалов, 2019]. При исключении из рассмотрения всех положительных значений «FractureLikelihood» коэффициент корреляции Пирсона между плотностью палеосейсмодислокаций и вероятностью формирования новых разрывов малой протяженности составляет «-41%» (рис. 3). Интересным результатом моделирования является также карта ориентировок оси максимального сжатия, из рассмотрения которой следует вывод об изменчивости положений главных нормальных осей напряжений в пределах рассматриваемой территории (рис. 4). Это подтверждает обоснованность выбора разных вариантов внешней нагрузки при моделировании новейшей геодинамики отдельных гранито-гнейсовых куполов.

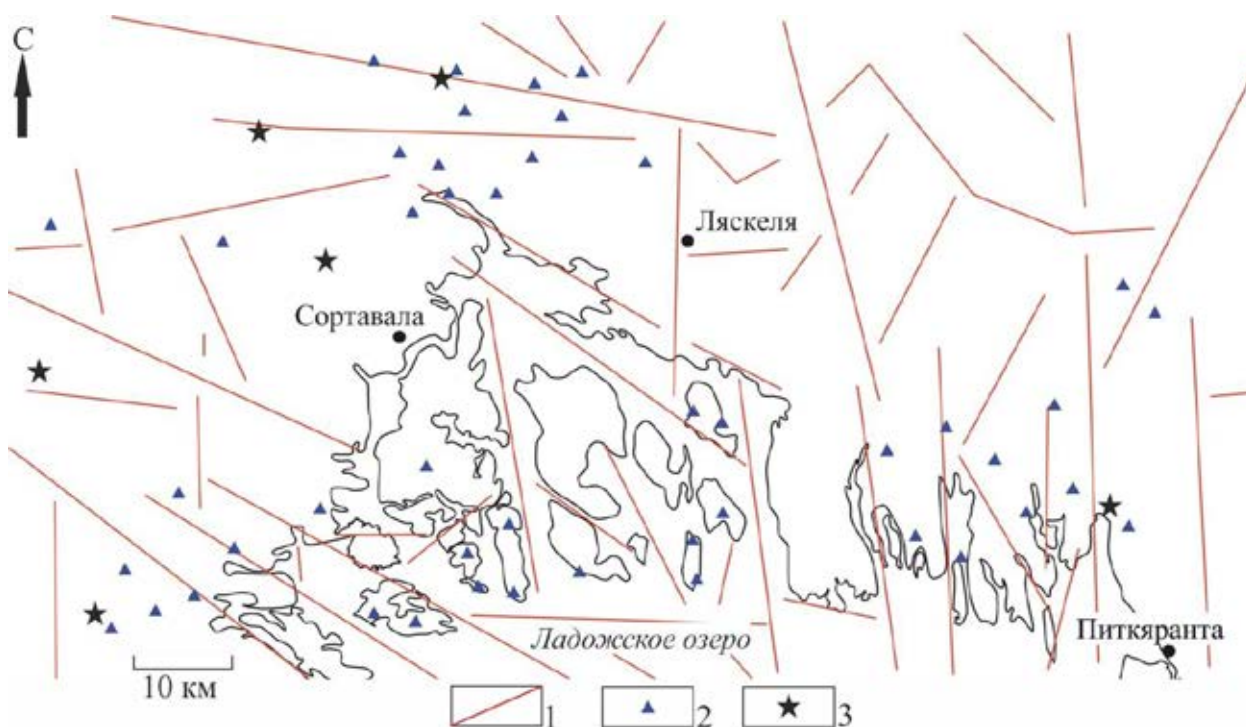


Рис. 2. Схема разломов с признаками голоценовой активизации области развития гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья:

1 – разломы с признаками голоценовой активизации, по [Глубинное строение..., 2004], 2-3 – палеосейсмодислокации: 2 – по [Глубинное строение..., 2004], 3 – по [Agibalov, 2019]

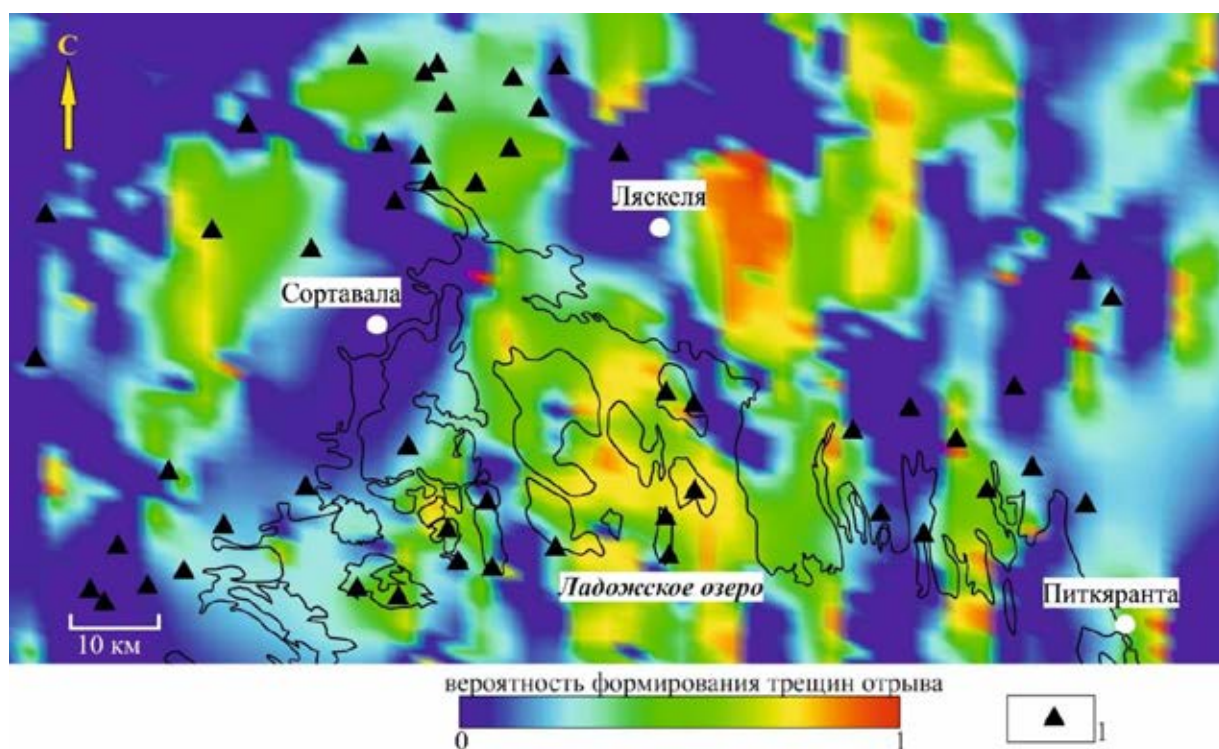


Рис. 3. Схема вероятности формирования трещин отрыва в пределах области развития гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья:

1 – палеосейсмодислокации, по [Глубинное строение..., 2004; Agibalov, 2019]

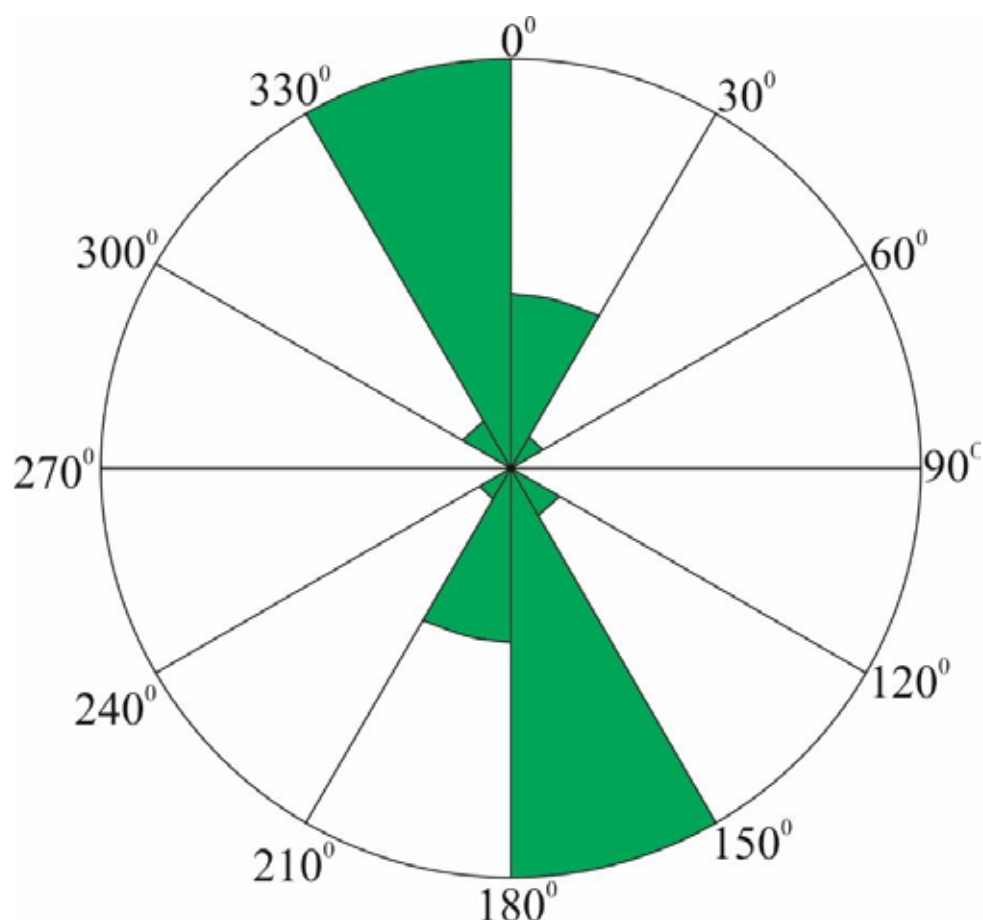


Рис. 4. Роза-диаграмма, иллюстрирующая особенности ориентировки оси максимального сжатия в области развития гранито-гнейсовых куполов Северного Приладожья

Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Гранито-гнейсовые купола Северного Приладожья являются активными тектоническими структурами, развитие которых оказывает значительное влияние на облик рельефа данной территории.

2. Активизация гранито-гнейсовых куполов происходит при разных ориентировках внешних главных нормальных осей напряжений, однако в области развития этих структур преобладает север-северо-западное сжатие.

3. Установлена численная корреляция между рассчитанными с помощью моделирования параметрами (относительными амплитудами вертикальных перемещений, вероятностью формирования новых разрывов) и реальными характеристиками геолого-географической среды (высотами рельефа, плотностью палеосейсмодислокаций).

4. Разработана геодинамическая модель, подтверждающая обоснованность выделения А.Д. Лукашовым [Глубинное строение..., 2004] разломов с признаками голоценовой активизации в пределах Ладожской сейсмогенной структуры

Благодарности

Исследования проведены в ходе выполнения НИР «Развитие методов детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования» (№ гос. регистрации АААА-А17-117060110060-3) (ИФЗ РАН).

ЛИТЕРАТУРА

1. Агibalов А.О. Неотектоническая активизация докембрийского структурного плана Северного Приладожья (юго-восток Балтийского щита): дис. кан. геол.-мин. наук. М. 2019. 210 с.
2. Агibalов А.О., Мошкин И.В., Кошевой Н.Г., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Выделение активных докембрийских структур Северного Приладожья по данным изучения объемной активности радона // Материалы всероссийской научной конференции «Прикладные аспекты динамической геологии», посвященной 110-й годовщине со дня рождения Г.П. Горшкова (1909-1984). М.: Перо. 2019. С. 172–182.
3. Агibalов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А. Отражение гранито-гнейсовых куполов Приладожья в современном рельефе // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 5. С. 72–80.
4. База данных государственных геологических карт [Электронный ресурс]. URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>. Дата обращения 2.04.2020.
5. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2004. 353 с.
6. Зыков Д.С., Полещук А.В. Взаимодействие геодинамических систем на Восточно-Европейской платформе в новейшее время // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2016. Т. 91. Вып. 1. С. 3–14.
7. Ладожское озеро. Атлас. ГУНИО. 2002.
8. Лукашов А.Д. Новейшая тектоника Карелии. Л.: Наука. 1976. 109 с.
9. Руководство пользователя «Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS)» [Электронный ресурс]. URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2. Дата обращения: 2.04.2020.
10. Спиридонов А.И. Геоморфология Европейской части СССР. М.: Высшая школа. 1978. 335 с.
11. Цифровая модель рельефа [Электронный ресурс]. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. Дата обращения 2.04.2020.
12. Agibalov A.O. Faults in the Quaternary Deposits of the Northern Ladoga Region as Indicators of Seismotectonic Processes // Moscow University Geology Bulletin. 2019. V. 36. № 3. P. 246–251.
13. Daly C., Mueller D. Characterization and Modelling of Fractured Reservoirs: Static model // ECMOR IX: 9th European Conference of the Mathematics and Oil Recovery. Cannes: EAGE Business Office. 2004.