

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

на правах рукописи



**АГИБАЛОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ**

**НЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ АКТИВИЗАЦИЯ ДОКЕМБРИЙСКОГО СТРУКТУРНОГО  
ПЛАНА СЕВЕРНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ  
(ЮГО-ВОСТОК БАЛТИЙСКОГО ЩИТА)**

25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва, 2019

Работа выполнена на кафедре динамической геологии  
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** - **Зайцев Владимир Александрович** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
- Официальные оппоненты**
- **Рогожин Евгений Александрович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук», главный научный сотрудник
  - **Имаев Валерий Сулейманович** - доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук», главный научный сотрудник
  - **Полещук Антон Владимирович** – кандидат геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геологический институт Российской академии наук», старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «29» ноября 2019 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета МГУ.04.04 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: [nvbadulina@mail.ru](mailto:nvbadulina@mail.ru)

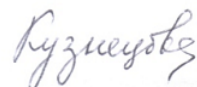
С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:  
<https://istina.msu.ru/dissertations/238298698/>

Автореферат разослан «16» октября 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.04.04

кандидат геолого-минералогических наук, доцент



Т.В. Кузнецова

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Изучение характера новейших движений Северного Приладожья, их взаимосвязи с докембрийским структурным планом представляется актуальной задачей, имеющей фундаментальное значение для понимания геодинамики платформенных территорий. Комплексное применение традиционных и современных методов исследования позволило по-новому подойти к дискуссионной проблеме оценки влияния активизированных в новейшее время древних структур на облик рельефа. Рассмотренная в данной работе проблема неотектонической активизации архейских гранито-гнейсовых куполов представляется актуальной в связи с ее недостаточной изученностью и широкой распространенностью куполовидных структур. Актуальность проведенных полевых палеосейсмологических наблюдений обусловлена отсутствием общепризнанной точки зрения по вопросу об интенсивности сейсмических событий, произошедших в пределах рассматриваемой территории на новейшем этапе. Значимость построенных геодинамических моделей связана с тем, что они позволили предложить решение вопроса о механизмах активизации докембрийского структурного плана.

**Цель исследования** - проанализировать характер взаимосвязи докембрийского структурного плана и происходящих в новейшее время движений и деформаций Северного Приладожья.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**.

1. С помощью геоморфологических методов оценить характер и степень выраженности докембрийских пликативных и дизъюнктивных структур в рельефе, проанализировать направленность и интенсивность неотектонических движений Северного Приладожья.

2. Разработать геодинамические модели активизации докембрийских структур, используя методы компьютерного и физического моделирования на эквивалентных материалах.

3. Провести полевые палеосейсмологические и эманационные радоновые исследования.

4. Проанализировать данные о современных тектонических движениях Северного Приладожья.

**Фактический материал и методы.** В основу работы положен фактический материал, полученный в ходе полевых наблюдений, проведенных на территории Северного Приладожья в 2013-2019 годах. За время работ были изучены докембрийские пликативные и дизъюнктивные структуры, проведены геоморфологические наблюдения, обнаружены палеосейсмодислокации, собраны массовые замеры зеркал и борозд

тектонического скольжения, выполнены эманационные радоновые исследования, позволившие выделить активные докембрийские морфоструктуры на островах Хавус и Риеккалансари. В качестве исходных данных использовались топографические карты и космические изображения, геологические карты, карты глубин Ладожского озера, цифровые модели рельефа, информация о перемещениях пунктов GPS и скоростях современных вертикальных движений, определенных путем высокоточных нивелировок, сейсмологические каталоги.

Методика исследований основана на комплексном применении различных методов, включающих структурно-геоморфологическое дешифрирование, полевые геолого-геоморфологические, палеосейсмологические и тектонофизические исследования, морфометрический анализ рельефа, компьютерное и физическое моделирование на эквивалентных материалах, анализ современных тектонических движений и сейсмичности.

**Достоверность полученных результатов.** Использование большого количества фактического материала, в том числе полученного в ходе прямых геолого-геоморфологических наблюдений, наряду с комплексным применением различных методов, дополняющих друг друга, свидетельствует в пользу достоверности полученных результатов и обоснованности сделанных выводов.

**Личный вклад автора.** Автор принимал личное участие в полевых работах в 2013 – 2019 годах, участвовал в описании обнажений и микроформ рельефа, проводил палеосейсмологические наблюдения, замеры зеркал и борозд скольжения, эманационные радоновые исследования. Автором были построены детальные цифровые модели рельефа, выполнено структурно-геоморфологическое дешифрирование, проведены морфометрический анализ рельефа, компьютерное и физическое моделирование.

**Научная новизна.** Впервые построены геодинамические модели, позволившие оценить влияние активизированного докембрийского структурного плана на рельеф Приладожья. В ходе полевых работ были обнаружены палеосейсмодислокации в ранее не изученных другими исследователями песчаных карьерах. Эти данные позволили подтвердить выводы А.А. Никонова и его коллег [Никонов, Шварев, 2015; Родкин и др., 2012] о том, что на территории Приладожья происходили сейсмические события магнитудой не менее 5. Были построены детальные цифровые модели рельефа, на основе анализа которых получены новые данные об отражении локальных докембрийских структур в рельефе. Направленность и интенсивность неотектонических движений изучена с помощью морфометрических исследований, выполненных по методике В.П. Философова [1960] в масштабе 1 : 100 000. Впервые активные докембрийские

тектонические структуры локального масштаба на островах Хавус и Риеккалансари были выявлены по аномалиям объемной активности подпочвенного радона. Впервые установлена численная корреляция между скоростями современных вертикальных движений и рядом морфометрических параметров.

**Теоретическая и практическая значимость.** В результате проведенных исследований были получены новые данные о палеосейсмичности, выделены геодинамически активные зоны, поэтому диссертационная работа может служить основой для прогноза землетрясений и оценки геодинамической опасности территории Северного Приладожья.

**Защищаемые положения.**

1. На основе данных структурно-геоморфологического дешифрирования, морфометрического анализа рельефа, полевых наблюдений установлена высокая степень взаимосвязи современного рельефа и докембрийского структурного плана Северного Приладожья, активизированного в новейшее время.

2. Значительная часть архейских гранито-гнейсовых куполов относится к активным неотектоническим структурам, испытывающим разные по знаку движения. Основным фактором, определяющим кинематику последних, являются форма и размеры докембрийских разрывных нарушений, приуроченных к границам куполовидных выступов фундамента.

3. Тектонофизическое моделирование показало, что неотектоническая активизация докембрийского структурного плана реализуется при разных ориентировках главных нормальных осей напряжений. На большей части Северного Приладожья преобладает северо-западное сжатие, а акватория Ладожского озера находится в обстановке северо-восточного растяжения.

4. Установлены палеосейсмодислокации в рыхлых четвертичных отложениях Северного Приладожья, сформировавшиеся в результате сейсмических событий с магнитудами не менее 5, которыми сопровождалась неотектоническая активизация докембрийского структурного плана.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации опубликовано **28** работ: **4** статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, Scopus, RSCI и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ; **2** статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 25.00.03 - «Геотектоника и геодинамика»; 1 статья – в журнале «Динамическая геология»; 3 статьи – в журнале «Научный альманах»; 2 статьи – в журнале «Вестник научных конференций»; 16 материалов совещаний и тезисов докладов.

Промежуточные результаты исследований представлены на **21** конференции, в том числе на «Международном тектоническом совещании», «Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН», конференциях «Ломоносовские чтения» «Актуальные вопросы науки и образования», «Современное общество, образование и наука» и других. В 2018-2019 годах работы по теме диссертационного исследования проводятся **при поддержке РФФИ** в рамках научного проекта 18-35-00359 (руководитель А.О. Агибалов).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, **6** глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет **210** страниц текста, работа включает **126** иллюстраций, **20** таблиц и библиографию из **224** наименований.

**Благодарности.** Выражаю глубокую признательность научному руководителю – Владимиру Александровичу Зайцеву за всестороннюю помощь в подготовке диссертации. Отдельно благодарю члена-корреспондента РАН Ю.А. Морозова за возможность принимать участие в полевых исследованиях в составе Кольско-Ладожского отряда ИФЗ РАН и Ю.Л. Ребецкого (ИФЗ РАН) за предоставленное разрешение использовать программу STRESSgeol. Выражаю благодарность сотрудникам кафедры динамической геологии МГУ имени М.В. Ломоносова: заведующему кафедрой проф. Н.В. Короновскому, В.С. Захарову, А.И. Полетаеву, Л.В. Паниной, Н.С. Фроловой, А.А. Сенцову. Благодарю А.В. Полещука и Д.С. Зыкова (ГИН РАН), А.Н. Овсюченко и И.В. Бондаря (ИФЗ РАН), а также сотрудников кафедры философии естественных факультетов МГУ В.А. Шапошникову и С.А. Лебедеву.

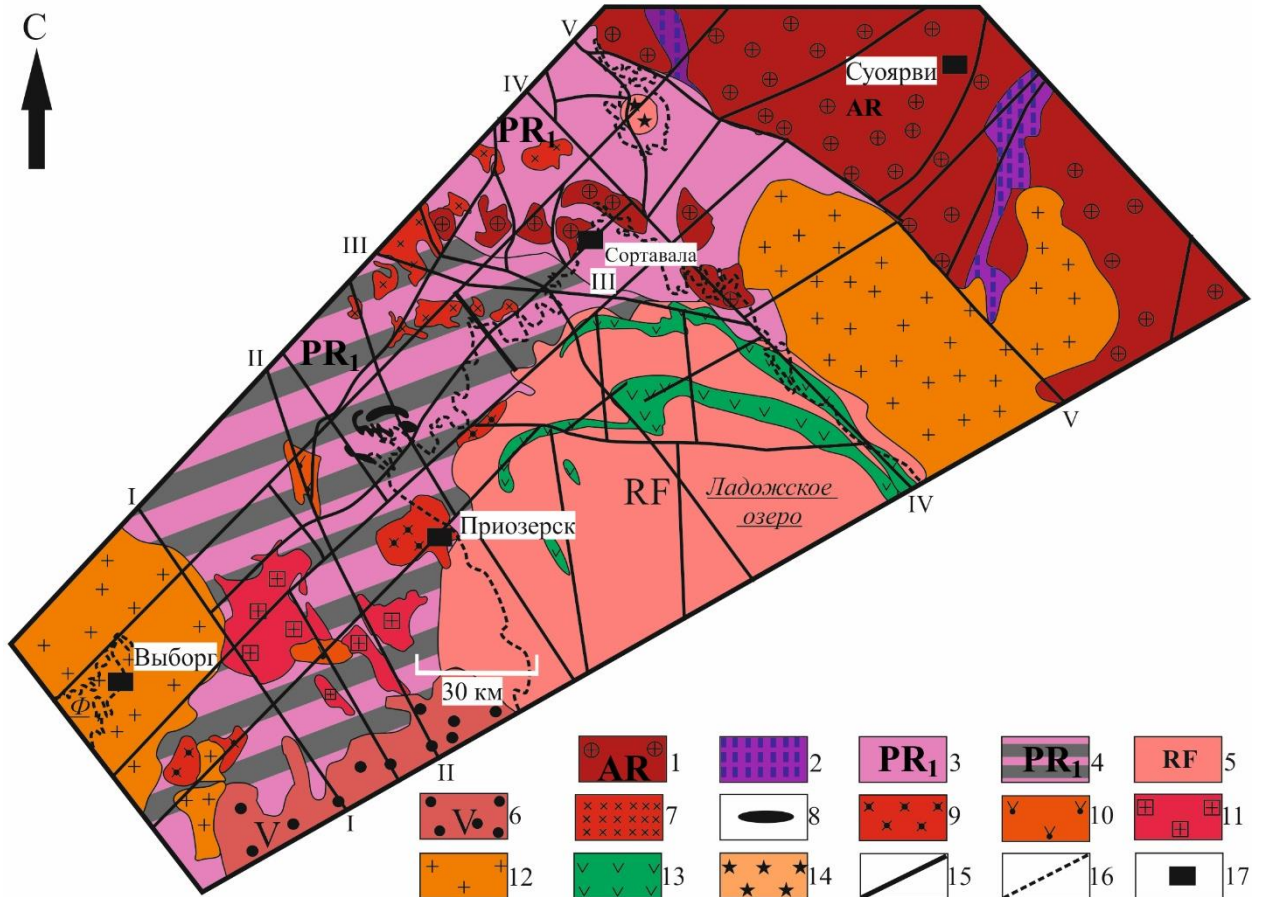
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснована его актуальность, новизна и практическая значимость, показан личный вклад автора.

### Глава 1. Геологическое строение Северного Приладожья

В данной главе описана стратиграфия четвертичных и дчетвертичных образований, тектоника и магматизм Северного Приладожья. При описании стратиграфии дчетвертичных образований используется региональная схема докембрия юго-восточной Фенноскандии [Куликов и др., 2017]. Ее соотношение с международной стратиграфической шкалой и общей стратиграфической шкалой, принятой в России, показано на рис. 6, приведенном в тексте диссертации. В целом, Северное Приладожье, расположенное в зоне сочленения архейского Карельского кратона и раннепротерозойского Свекофеннского пояса, относится к областям развития докембрийских комплексов со сложным геологическим строением (рис. 1). В эпоху карельского тектогенеза изучаемая территория длительное время (2,0 – 1,8 млрд. лет)

находилась в обстановке транспрессии [Морозов, 1999]. В течение рифейского этапа происходило формирование Ладожского грабена [Балуев, 2013]. Сформировавшийся в результате докембрийской полистадийной деформационно-метаморфической эволюции структурный парагенез, к главным элементам которого относятся надвижки, гранито-гнейсовые купола, ограничивающие Ладожский грабен сбросы, испытывает тектоническую активизацию в новейшее время.



**Рис. 1. Схема геологического строения Северного Приладожья, по [Государственная..., 2014a; Куликов и др., 2017; Хазов и др., 2004]:** 1 – архейские гранито-гнейсы (саамий – средний лопий), 2 – метавулканы шуйской и масельгской серий (средний лопий), 3 – метаосадочные породы и метавулканы сортавальской (людиковий) и ладожской серий (калевий), 4 – гнейсы и мигматиты исоярвинской и курхуланмякской метаморфических толщ и лахденпохского метаморфического комплекса (калевий), 5 – терригенные породы рифейского возраста, 6 – терригенные породы старорусской и василеостровской свит (верхний венд); 7-14 магматические образования: 7 – якимского диорит-тоналитового и кааламского габбро-диорит-тоналитового комплексов, 8 – куркиекского эндербит-норитового комплекса, 9 – импиниемского (приозерского) диорит-тоналитового комплекса, 10 – элисенваарско-вуоксинского монцогаббро-монцонит-сиенитового комплекса, 11 – мигматит – анатектит – граниты

*Приладожья (калевий), 12 – граниты салминского и выборгского комплексов, 13 – трахидолериты валаамского комплекса, 14 – зювиты и тагамиты янисъярвинского коптогенного комплекса; 15 – разрывные нарушения; 16 – контуры береговых линий; 17 – населенные пункты;  $\Phi$  – Финский залив. Римскими цифрами обозначены разрывные нарушения: Вуоксинский разлом (I-I), Приозерская зона рифтообразующих разломов (II-II), Мейерская надвиговая система (III-III), Рускеальско-Салминский рифтообразующий разлом (IV-IV), шовная зона между Карельским и Ладожским геоблоками (V-V)*

## **Глава 2. Краткий обзор литературных данных о новейшей тектонической активности докембрийских структур Северного Приладожья**

Интерес к проблемам новейшей тектоники Балтийского щита возник во второй половине XIX века [Иностранцев, 1871]. Среди фундаментальных работ, посвященных новейшим движениям и деформациям Приладожья, выделяются труды *А.Д. Лукашова*, внесшего большой вклад в изучение морфоструктурного плана территории, характера новейших движений [2000, 1976а-б, 1972], современной и палеосейсмичности [2002]. К настоящему времени накоплен большой фактический материал о новейшей тектонической активности докембрийского структурного плана Северного Приладожья, индикаторами которой является комплекс *геоморфологических, сейсмологических и геохимических* данных.

Проведенные разными авторами *геоморфологические* исследования показали, что докембрийские структуры Северного Приладожья нередко находят прямое отражение в рельефе. Данная особенность традиционно рассматривается в качестве одного из аргументов в пользу унаследованного характера развития последнего. Результаты упомянутых геоморфологических исследований изложены в работах [Анохин и др., 2016а-б; Лак, Лукашов, 1972; Лукашов, 1976б; Науменко, 2013; Никонов, Шварев, 2008; Свириденко, Светов, 2008; Шелехова, 2014]. Точка зрения о том, что тектонические движения оказали значительное влияние на облик рельефа котловины Ладожского озера, высказана в публикациях [Биске и др., 1974; Лукашов, 1976б; Ладожское озеро, 1978; Никонов, 2017; Никонов, 2001; Усикова и др., 1970]. В то же время, некоторые исследователи полагают, что высокую степень взаимосвязи геологического строения и рельефа можно объяснить с позиций ледниковой теории [Амантов, Амантова, 2014]. По мнению автора данной работы, наиболее обоснованной представляется точка зрения *А.И. Спиридонова* [1978], отмечавшего влияние как экзогенных, так и тектонических факторов на рельеф Ладожского озера и его побережья.



О неотектонической активности докембрийских структур свидетельствуют *палеосейсмологические* исследования. А.А. Никоновым и С.В. Шваревым [Никонов, Шварев, 2015; Эртелева и др., 2018] были выделены сейсмолинеаменты, приуроченные к докембрийским разрывным нарушениям. В работах [Никонов, 2017; Никонов и др., 2014; Родкин и др., 2012; Shvarev et al., 2018] дана оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям в скальных породах. В работах [Бискэ и др., 2009; Верзилин, Окнова, 2008; Верзилин и др., 1998; Верзилин, Севастьянов, 2001; Шитов и др., 2010; Шитов и др., 2019; Shvarev et al., 2018] описаны деформации в рыхлых отложениях Приладожья. Интерпретация изученных структур как палеосейсмодислокаций в ряде случаев носит проблемный характер, о чем свидетельствуют публикации [Верзилин, 2012; Стрелецкая, 2017; Poleshchuk et al., 2018].

*Геохимическим* индикатором тектонической активности разрывных нарушений является приуроченность к ним аномалий гелия и радона. Результаты гелиевых съемок представлены в работах [Богачев, Бородулина, 2008; Схема..., 1983], радоновых исследований – в статьях [Горьковец, Белашев, 2014; Титаева и др., 1995]. На основе комплекса геолого-геоморфологических данных выделены новейшие разрывные нарушения Приладожья [Афанасов, 2011; Бачманов и др., 2017; Карта..., 2007; Карта..., 2000; Карта..., 1980; Карта..., 1964; Сим и др., 2009], значительная часть которых наследует древний структурный план. Актуальной проблемой является определение параметров новейшего поля напряжений, в котором происходит активизация докембрийских структур. Согласно [Зыков, Полещук, 2016; Сим и др., 2011], юго-восточная часть Балтийского щита испытывает северо-западное сжатие в новейшее время.

В целом, обзор литературных данных показывает, что ряд вопросов о причинах выраженности древних структур в рельефе, интенсивности палеоземлетрясений носят дискуссионный характер. Недостаточно проработанными представляются проблемы выделения развивающихся в новейшее время докембрийских морфоструктур локального масштаба и построения геодинамических моделей их активизации. Возможные варианты решения упомянутых проблем предложены в рамках диссертационного исследования.

### **Глава 3. Методика исследований**

Диссертационная работа основана на комплексном применении традиционных и современных методов исследования. Проведенное по методике Н.П. Костенко [1999] *структурно-геоморфологическое дешифрирование* позволило выделить «слабые зоны», являющиеся элементами сводово-блокового новейшего структурного плана территории. Известно, что древние активные пликативные и дизъюнктивные структуры, как правило, находят отражение в рельефе, поэтому пространственный рисунок «слабых зон» был

сопоставлен с геологическим строением изучаемого района.

Для того чтобы повысить степень достоверности результатов структурно-геоморфологического дешифрирования, проведены комплексные *морфометрические исследования*, позволившие сделать предположения об интенсивности и направленности неотектонических движений, выделить активные на новейшем этапе структуры. Морфометрический анализ включал выделение порядков речных долин по методике В.П. Философова [1960], построение базисных поверхностей разных порядков, а также схем *крутизны и разности базисных поверхностей*. По мнению В.П. Философова [1960], активно развивающиеся в новейшее время структуры выделяются по повышенным значениям крутизны изобазит, в то время как анализ схем разностей базисных поверхностей позволяет оценить направленность вертикальных движений. Как показано в [Применение..., 1970], растущее новейшее поднятие находит отражение в рисунке гидросети в виде серии коротких сближенных водотоков, радиально расходящихся от его вершины. Этот принцип положен в основу интерпретации построенных карт *изолонг-линий* равной длины водотоков одного порядка. Для того чтобы на количественном уровне оценить степень извилистости речных русел, которая опосредованным образом связана с неотектоническими движениями [Ландшафты..., 2012], построена карта данного параметра. Кроме того, для ряда морфоструктур выполнен расчет *максимальных, средних, медианных значений высотных отметок и гауссовой кривизны поверхности рельефа, средней крутизны склонов, плотности вертикальных стенок*. Эти параметры традиционно используются при проведении морфометрических исследований [Симонов, 1998, 1999]. Для нескольких опорных участков построены схемы *коэффициента развития рельефа* – второстепенного морфометрического параметра, отражающего морфологию склонов [Лысова, 2004], которая, в общем случае, связана с направленностью новейших движений. В качестве дополнительного морфометрического показателя рассчитан *индекс расчлененности рельефа* [Мамедов и др., 2017]. Кроме того, с помощью программы LESSA [Златопольский, 2011] составлены схемы плотности линеаментов – «штрихов» и *линий вытянутости*. Полученные морфометрические данные были сопоставлены с геологическим строением Северного Приладожья.

Результаты структурно-геоморфологического дешифрирования и морфометрического анализа дополнены данными *прямых геолого-геоморфологических наблюдений*, показавших, каким образом геологические структуры находят отражение в рельефе. В песчаных карьерах выполнялись *палеосейсмологические* исследования. В пределах нескольких опорных участков проведено *изучение объемной активности подпочвенного радона*, позволившее выделить нарушающие новейший структурный план

зоны повышенной проницаемости. Для реконструкции палеонапряжений по массовым замерам зеркал и борозд скольжения использованы *метод катакластического анализа разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого* [Ребецкий и др., 2017] и *кинематический метод Гущенко – Анжелъе* [Гущенко 1973, 1979].

При анализе современных тектонических движений по данным о скоростях горизонтальных смещений пунктов GPS рассчитаны величины деформации ( $\varepsilon$ ) по формуле:  $\varepsilon = (l - L)/l$ , где  $l$  – расстояние между пунктами GPS (в метрах),  $L$  – расстояние между соседними пунктами с учетом их смещения за 1 год (в метрах). В рамках изучения современной сейсмичности было выполнено сопоставление пространственного распределения эпицентров землетрясений и докембрийских разрывных нарушений. Проведен агломеративный иерархический *кластерный анализ землетрясений* методом «ближайшего соседа». Алгоритм обработки данных описан в тексте диссертации и монографии [Дюран, Оделл, 1977].

Для того чтобы предложить решение вопроса о том, как формируется мофроструктурный план котловины Ладожского озера и острова Валаам, проведено *тектонофизическое моделирование* на эквивалентных материалах, в качестве которых использовались влажная глина и смесь песка с силиконом. Обоснованность их применения подтверждается расчетами условий подобия по формулам, приведенным в работах [Шерман и др., 1991; Dooley, Schreurs, 2012].

Помимо физического моделирования, проведено *компьютерное геодинамическое моделирование*, позволившее рассчитать относительные амплитуды вертикальных и горизонтальных смещений по разломам, вероятность формирования новых разрывов малой протяженности. Исходными данными для создания моделей служат высотные отметки рельефа, схемы разрывных нарушений, физико-механические характеристики среды (осредненные значения коэффициентов Пуассона и внутреннего трения), ориентировки внешних нагрузок. Методика расчета предполагает, что модель состоит из упругого однородного материала [Daly, Mueller, 2004], основные физико-механические свойства которого заданы как начальные условия. Под действием внешней нагрузки происходит перераспределение напряжений вследствие влияния разрывных нарушений, 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 закон Кулона – Мора [Руководство..., 2012].

## **Глава 4. Результаты изучения новейшего структурного плана**

### **4.1. Результаты структурно-геоморфологического дешифрирования**

При написании параграфа использован материал собственных работ [Агибалов, 2016; Агибалов, 2017; Агибалов, Бардышев, 2019; Агибалов, Зайцев, 2017; Агибалов и др., 2018б, г, ж, и-л, о; Агибалов и др., 2017а-б; Агибалов и др., 2019в;].

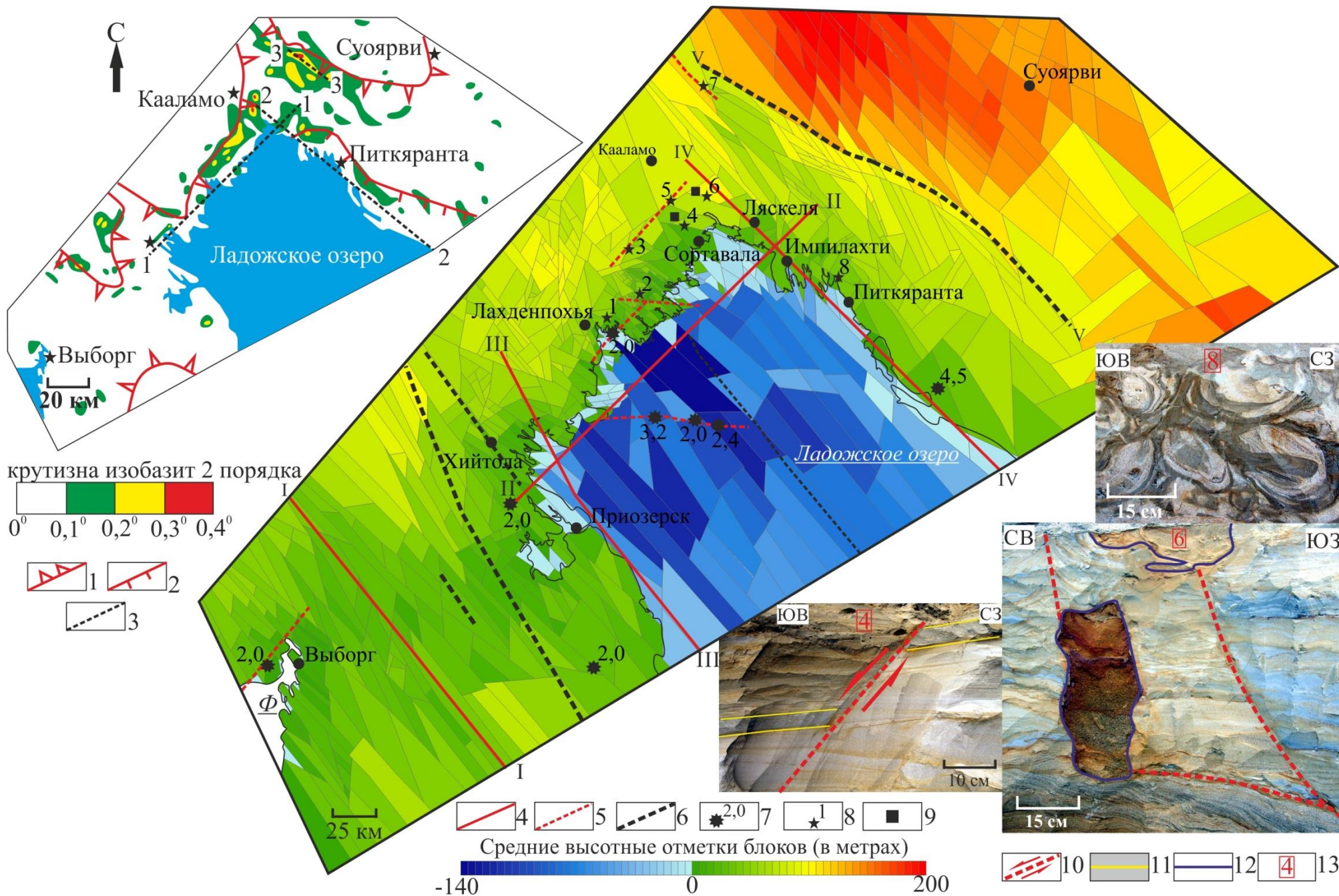
Автором данной работы было построено 9 разномасштабных схем блоковой делимости для всей территории Северного Приладожья и опорных участков. Установлено, что выделенные «слабые зоны» приурочены к древним дизъюнктивным структурам – разрывам, ограничивающим котловину Ладожского озера, шовной зоне разломов между Ладожским и Карельским геоблоками, Янисъярвинско - Туломозерскому разрывному нарушению, Вуоксинскому разлому (рис. 2), надвигам Янисъярвинского синклинория и разрывам острова Валаам. По пространственному рисунку межблоковых границ выделяются контуры гранито-гнейсовых куполов, большая часть которых (Коккасельский, Хавус, Иокирантский, Риеккалансари, Импилахтинский, Мурсульский, Койринойско-Питкярантский) выражена как области поднятия. Исключениями являются относительно опущенный Сортавальский гранито-гнейсовый купол и Кирьяволахтинский купол, отличающийся сложным новейшим структурным планом. В связи с тем, что в южных зонах метаморфизма вмещающие гнейсы ладожской серии макроскопически схожи с гранито-гнейсами, эта особенность не может быть объяснена только различием прочностных свойств пород. Таким образом, проведенное структурно-геоморфологическое дешифрирование показало высокую степень взаимосвязи рельефа и докембрийского структурного плана, связанную с неотектонической активизацией последнего.

### **4.2. Результаты морфометрических исследований**

Данный параграф написан с использованием собственных работ [Агибалов, Зайцев, 2018; Агибалов, Бардышев, 2019; Агибалов и др., 2018а, в, к, и, н; Агибалов и др., 2017а].

Поскольку в ряде случаев на платформенных территориях не удается с высокой степенью достоверности выявить активные неотектонические структуры и сделать предположения о направленности и интенсивности новейших движений на основании результатов структурно-геоморфологического дешифрирования, были проведены комплексные морфометрические исследования.

Автором данной работы были выделены 6 порядков речных долин, построены карты крутизны и разности изобазит разных порядков, изолонг, степени кривизны водотоков, с помощью программы «LESSA» составлены схемы линий вытянутости и плотности линеаментов.





*Рис. 2. Схемы новейших морфоструктур Северного Приладожья, выделенных по комплексу геоморфологических и палеосейсмологических данных, по [Агибалов и др., 2018в, д, к, н].*

*На врезке, вверху – схема новейших морфоструктур, выделенных по результатам морфометрического анализа рельефа: 1 – области поднятия, выделенные по повышенным значениям разности изобазит 1 и 3 порядков; 2 – области опускания, выделенные по низким значениям разности изобазит 1 и 3 порядков, 3 – активные докембрийские разломы, приуроченные к линейным максимумам крутизны изобазит 2 порядка (1-1 – Северо-Ладожский, 2-2 – Восточно-Ладожский, 3-3 Янисъярвинско – Туломозерский)*

*В центре – схема блоковой делимости Северного Приладожья: 4-6 – докембрийские разрывные нарушения, проявляющие новейшую геодинамическую активность: 4 – сейсмолинеаменты, по [Эртелева и др., 2018]; 5 – разрывы, к которым приурочены эпицентры современных землетрясений, по [Earthquake..., 2019], и точки наблюдения, где зафиксированы палеосейсмодислокации в рыхлых четвертичных отложениях; 6 – выраженные в рельефе региональные разрывные нарушения (с использованием данных [Куликов и др., 2017; Хазов и др., 2004]); 7 – эпицентры современных землетрясений и их магнитуды, по [Никонов, 2005; Earthquake ..., 2019]; 8 – точки наблюдения, в которых зафиксированы палеосейсмодислокации, проявленные в рыхлых четвертичных отложениях, и их номера, 9 – точки наблюдения, где обнаружены деформации, генезис которых может быть связан с сейсмическими событиями. Римскими цифрами обозначены докембрийские разрывные нарушения: I–IV сейсмолинеаменты, по [Эртелева и др., 2018; Никонов, Шварев, 2015]: I-I – Вуоксинский, II-II – Северо-Ладожский, III-III – Западно-Ладожский, IV-IV – Восточно-Ладожский; V-V – граница между архейскими образованиями Карельского кратона и раннепротерозойскими комплексами, по [Куликов и др., 2017]. Ф – Финский залив.*

*На врезке, внизу – общий вид палеосейсмодислокаций в рыхлых отложениях: 10 – разрывные нарушения и направление смещения по ним; 11 – границы маркирующего слоя; 12 – контуры инъекционных структур; 13 – номера точек наблюдения, в которых отмечены палеосейсмодислокации*

На построенных картах крутизны изобазит 1-3 порядков обособляются 3 основные линейные зоны малых заложений между изобазитами, приуроченные к проявляющим новейшую геодинамическую активность докембрийским разломам: Восточно- и Северо-Ладожскому [Никонов, Шварев, 2015], Янисъярвинско - Туломозерскому [Лукашов,

19766]. По картам разности изобазит 1 и 3 порядков, картам изолонг и кривизны водотоков выделены области новейших поднятий и опусканий. На построенной с помощью программы «LESSA» схеме плотности линеаментов выделяется ряд докембрийских разрывных нарушений, что указывает на высокую степень взаимосвязи древнего и новейшего структурных планов.

Кроме того, была установлена численная корреляция между скоростями современных вертикальных движений и рядом морфометрических параметров (табл. 1). Знак «минус» перед коэффициентами корреляции указывает на то, что в областях развития протяженных долин 2 порядка преобладают нисходящие современные движения, а наиболее интенсивное меандрирование рек связано с участками, испытывающими опускание на современном этапе.

Сопоставляемые параметры		Коэффициент корреляции Пирсона
скорости современных вертикальных движений [Карта ..., 1973]	плотность водотоков 1 порядка	0,46
	длины водотоков 2 порядка	-0,43
	кривизна (извилистость) водотоков	-0,41
	плотность водотоков	0,40
длины водотоков 2 порядка	кривизна (извилистость) водотоков	0,27

**Табл. 1. Сопоставление рассчитанных морфометрических параметров и скоростей современных вертикальных движений**

Таким образом, выполненные автором морфометрические исследования позволили существенно дополнить результаты структурно-геоморфологического дешифрирования: оконтурить границы новейших поднятий и впадин, выделить активные разрывные нарушения. Эти данные в дальнейшем использовались при проведении компьютерного геодинамического моделирования.

#### 4.3. Результаты изучения новейших движений с помощью полевых геолого-геоморфологических, палеосейсмологических и тектонофизических методов

Данный параграф написан с использованием собственных работ [Агибалов, 2019; Агибалов и др., 2019а-б, д, е].

Проведенные автором в ходе полевых работ в 2013-2019 годах прямые геологические и геоморфологические наблюдения позволили заверить на местности ряд выделенных путем структурно-геоморфологического дешифрирования «слабых зон», а также дополнить данные о характере взаимосвязи рельефа и геологического строения. В 20 точках наблюдения выполнен сбор замеров борозд скольжения, обработанных по методике Ю.Л. Ребецкого с помощью программы STRESSgeol [Ребецкий и др., 2017]. В

результате обработки выделены 2 основные однородные выборки, каждая из которых отражает определенный тип напряженного состояния. Первой выборке соответствует обстановка северо-восточного сжатия, которая, согласно [Геология Карелии, 1987], проявлялась на ранних этапах карельского тектогенеза. Второй выборке соответствует обстановка северо-западного сжатия. По мнению [Зыков, Полещук, 2016; Keiding et al., 2015], она проявляется на новейшем этапе. Таким образом, по данным анализа замеров борозд скольжения было сделано предположение об ориентировках внешних главных нормальных осей напряжений в новейшее время, что позволило в дальнейшем провести геодинамическое моделирование.

Полевым геохимическим методом, позволяющим выявить зоны повышенной проницаемости, нарушающие новейший структурный план, является *изучение объемной активности почвенного радона* [Семинский и др., 20014]. За время полевых работ автором были измерены значения данного параметра в 33 точках наблюдения, построены 6 профилей. По повышенным значениям объемной активности радона были выделены активные докембрийские морфоструктуры: границы гранито-гнейсовых куполов Хавус и Риеккалансари и сопряженной с ним синформной структуры, а также 2 разрывных нарушения локального масштаба на острове Риеккалансари.

Практический интерес для оценки сейсмического потенциала территории Приладожья представляют зафиксированные автором дислокации в рыхлых отложениях позднего неоплейстоцена. В 2017-2019 г. было обнаружено 8 участков, в пределах которых отмечены дизъюнктивные нарушения, деформационные текстуры и инъекционные структуры, интерпретируемые как палеосейсмодислокации, возникшие в результате землетрясений с магнитудами не менее 5. Кроме того, в 2 точках наблюдения отмечены дислокации проблемного генезиса, который, предположительно, может быть связан с сейсмическими процессами. Выполненная по методике Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий и др., 2017] обработка замеров элементов залегания 12 разрывных нарушений, проявленных в рыхлых отложениях, показала, что 10 разрывов относятся к одной однородной выборке, которой соответствует обстановка юго-восточного растяжения. Данный тип напряженного состояния может быть связан с активизацией региональных докембрийских разломов северо-восточного простирания, развивающихся на новейшем этапе как сбросы.

Таким образом, проведенные полевые наблюдения позволили сделать вывод об ориентировке внешних главных нормальных осей напряжений на новейшем этапе, выделить по аномалиям объемной активности радона зоны повышенной проницаемости, приуроченные к древним структурам, а также обнаружить палеосейсмодислокации.



## **Глава 5. Результаты изучения современных тектонических движений**

Автором работы была составлена схема величин деформаций по данным о горизонтальных перемещениях пунктов GPS. Анализ этой схемы позволил сделать вывод о том, что Северо- и Восточно-Ладожский докембрийские разломы являются активными на современном этапе, и влияют на движение GPS станций MELO и VALM. Установлена приуроченность большей части эпицентров землетрясений малых магнитуд к докембрийским дизъюнктивным структурам, которая свидетельствует об их сейсотектонической активности. Проведенный кластерный анализ землетрясений юго-восточной части Балтийского щита показал, что все сейсмические события, произошедшие в Северном Приладожье за исторический период времени, относятся к одному кластеру. Это позволяет сделать предположение о том, что их возникновение можно объяснить в рамках единой геодинамической модели.

## **Глава 6. Результаты моделирования неотектонических структур**

Данная глава написана с использованием собственных работ [Агибалов, Бардышев, 2019; Агибалов и др., 2019б-в; Агибалов и др., 2018а, в, з, и, л-о; Агибалов и др., 2017а].

Для того чтобы предложить решение вопроса о том, каким образом формируются новейшие морфоструктуры, автором было выполнено физическое моделирование на эквивалентных материалах. В данной главе описаны 2 серии экспериментов: в ходе первой моделировалась новейшая геодинамика котловины Ладожского озера, в ходе второй – острова Валаам. В течение первой серии экспериментов образец из смеси песка с силиконом испытывал растяжение. Сформировавшейся в результате первой серии экспериментов системе поднятий и впадин, ориентированных ортогонально оси растяжения, в рельефе дна Ладожского озера соответствуют аналогичные морфоструктуры северо-западного простирания. В ходе второй серии экспериментов модель из влажной глины, в которой были прорезаны «ослабленные зоны», аналогичные по конфигурации пространственному рисунку древних разрывных нарушений острова Валаам, развивалась в обстановке сдвига, локализованного в широкой зоне. Проведенные эксперименты показали, что при ориентировке оси растяжения в северо-восточном направлении вдоль разрывов северо-западного простирания возникают трещины отрыва, которым соответствуют понижения в рельефе острова. Немногочисленные разломы северо-восточного простирания, ориентированные ортогонально оси сжатия, развиваются как содвиги – дизъюнктивы со сближающимися в процессе деформации крыльями [Расцветаев, 2008]. В рельефе модели содвигам также соответствуют локальные понижения. Таким образом, физическое моделирование позволило предложить решение

вопроса о механизмах активизации древних разрывных нарушений острова Валаам и ориентировках внешних главных нормальных осей напряжений в пределах котловины Ладожского озера в новейшее время.

Для уточнения и дополнения результатов физического моделирования было выполнено компьютерное геодинамическое моделирование. Автором работы была построена серия моделей для разных участков Северного Приладожья (табл. 2). На основе обобщения полученных результатов можно сделать следующие выводы. 1. Перемещения по древним разрывным нарушениям оказывают существенное влияние на облик современного рельефа Северного Приладожья, о чем свидетельствует численная корреляция между рассчитанными относительными амплитудами вертикальных перемещений и высотными отметками рельефа. 2. Неотектоническая активизация древнего структурного плана в пределах большей части территории Северного Приладожья реализуется в обстановке северо-западного сжатия, а акватория Ладожского озера находится в обстановке северо-восточного растяжения. Различная ориентировка главных нормальных осей напряжений в пределах большей части Северного Приладожья и акватории Ладожского озера может быть связана с активизацией Ладожского мантийного свода, выделенного по геофизическим данным [Хазов и др., 2004].

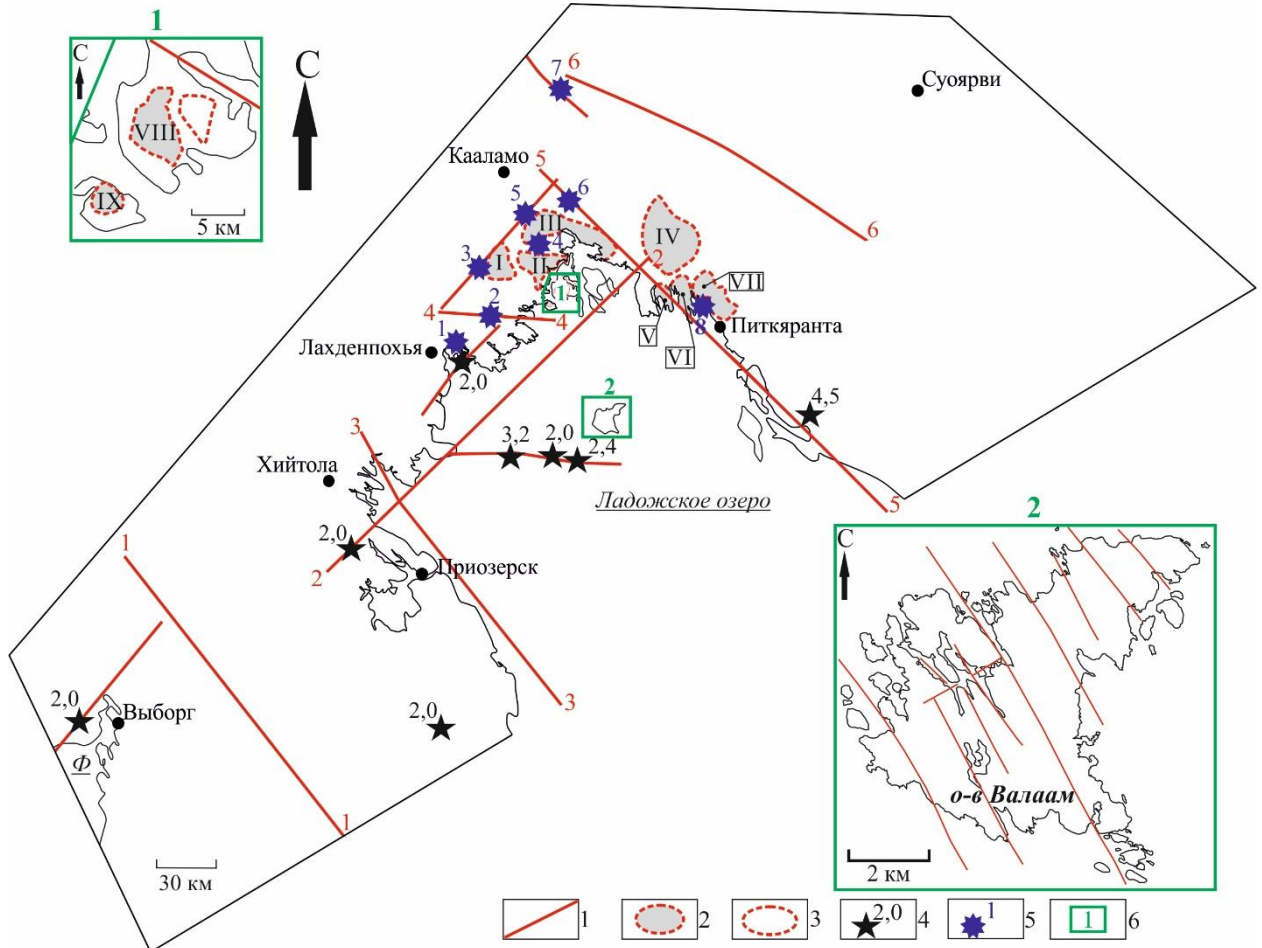
### **Заключение**

В заключении перечислены основные активные докембрийские структуры, выделенные автором на основании проведенных комплексных исследований (рис. 3). Некоторые из них, например, ограничивающие впадину Ладожского озера разломы, ранее выделялись другими авторами [Никонов, Шварев, 2015; Бачманов и др., 2017]. В этом случае проведенные исследования способствовали повышению степени достоверности полученных ранее результатов и расширению существующих представлений о тектонической активности докембрийских структур Приладожья.

район	заданные при моделировании тип напряженного состояния и азимут простираения оси максимального сжатия	используемая схема неоднородностей, по которым могут происходить перемещения блоков	сопоставляемые параметры		коэффициент корреляции Пирсона
			параметры, рассчитанные с помощью моделирования	реальные характеристики среды	
Вся территория Приладожья, включая акваторию Ладожского озера	сжатие, $130^0$	[Хазов и др., 2004]	относительные амплитуды вертикальных перемещений	скорости современных вертикальных движений	0,39
Северное Приладожье, включая акваторию Ладожского озера			относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,56
			суммарные величины относительных перемещений по осям X, Y, Z, взятые по модулю	магнитуды землетрясений (интерполированные на всю территорию)	0,72
Северное Приладожье (исключая акваторию Ладожского озера)	сжатие, $140^0$	составленная автором работы схема поднятий и впадин на основе карты разности изобазит 1-3 порядков	относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,46
акватория Ладожского озера	растяжение, $140^0$	[Свириденко, Светов, 2008]	относительные амплитуды вертикальных перемещений	отметки глубин	0,46
	растяжение, $110^0$	[Амантов, 2014]	относительные амплитуды вертикальных перемещений	отметки глубин	0,37
	растяжение, $130^0$	[Анохин и др., 2016]	относительные амплитуды вертикальных перемещений	отметки глубин	0,32
			вероятность формирования новых разрывов	плотность линеаментов	0,20
			суммарные величины относительных перемещений по осям X, Y, Z, взятые по модулю	плотность линеаментов	0,30
остров Хавус	сжатие, $130^0$	границы гранито-гнейсового купола Хавус, по [Государственная..., 2004a]	относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,37

район	заданные при моделировании тип напряженного состояния и азимут простираения оси максимального сжатия	используемая схема неоднородностей, по которым могут происходить перемещения блоков	сопоставляемые параметры		коэффициент корреляции Пирсона
			параметры, рассчитанные с помощью моделирования	реальные характеристики среды	
район Коккасельского гранито-гнейсового купола	сжатие, $175^0$	границы Коккасельского гранито-гнейсового купола, по [Государственная..., 2004a]	относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,29
южная часть о-ва Риеккалансари	сжатие, $100^0$	границы гранито-гнейсового купола Риеккалансари и сопряженной с ним синформы	относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,45
район г. Сортавала	сжатие, $160^0$	границы Сортавальского и Йокирантского куполов, по [Кулаковский, Морозов, 2015]	относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,32
остров Риеккалансари	сжатие, $170^0$	составленная автором работы схема достоверных и предполагаемых разрывных нарушений	относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,42
район Кирьявволахтинского гранито-гнейсового купола	сжатие, $160^0$		относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,47
район пос. Импилахти	сжатие, $10^0$		относительные амплитуды вертикальных перемещений	высотные отметки рельефа	0,32
			вероятность формирования новых разрывов	крутизна склонов	-0,41

**Табл. 2. Основные сведения о построенных для разных участков территории Приладожья компьютерных моделях**



**Рис. 3. Генерализованная схема докембрийских структур Северного Приладожья, активизированных в новейшее время:** 1 – докембрийские разрывные нарушения, по [Хазов и др., 2004] (1-1 Вуоксинский разлом; 2-2 Северо-Ладожский разлом; 3-3 Западно-Ладожский разлом, 4-4 фрагмент Мейерской надвиговой зоны; 4-5 – фрагмент разрывного нарушения северо-восточного простирания, протягивающийся от оз. Пайкъярви до оз. Вахваярви; 5-5 Рускеальско-Салминский рифтообразующий разлом, 6-6 фрагмент шовной зоны между Карельским и Ладожским геоблоками), 2 – гранито-гнейсовые купола, по [Государственная..., 2014а] (I – Йокирантский, II – Сортавальский, III – Кирьяволахтинский, IV – Коккасельский, V – Импилахтинский, VI – Мурсульский, VII – Койринойско – Питкярантский, VIII – Риеккалансари, IX – Хавус), 3 – контуры сопряженной с куполом Риеккалансари синформы, сложенной гнейсами ладожской серии, 4 – эпицентры землетрясений, по [Earthquake..., 2019], 5 – палеосейсмодислокации, зафиксированные автором в рыхлых четвертичных отложениях, 6 – границы участков, показанных на врезках, и их номера;  $\Phi$  – Финский залив

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ по специальности**

1. *Агибалов А.О.* Разрывные нарушения в четвертичных отложениях Северного Приладожья как индикатор сейсмотектонических процессов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2019. №2. С. 17-22. (Импакт-фактор в РИНЦ 0,656).
2. *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. 2017а. Т. 8. №4. С. 791–807. (Импакт-фактор в РИНЦ 0,640).
3. *Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А.* Влияние активизированных докембрийских разрывных нарушений на рельеф котловины Ладожского озера // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019в. № 3. С. 99-105. (Импакт-фактор в РИНЦ 0,729).
4. *Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А.* Отражение гранито-гнейсовых куполов Приладожья в современном рельефе // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018и. № 5. С. 72-80. (Импакт-фактор в РИНЦ 0,729).

**Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России**

5. *Агибалов А.О., Зайцев В.А., Полетаев А.И., Сенцов А.А.* Изучение новейших движений земной коры Северного Приладожья с помощью морфометрических методов и компьютерного моделирования // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2018в. Т. 93. Вып. 1. С. 3-9.
6. *Полетаев А.И., Агибалов А.О., Гордеев Н.А.* Балтийско-Ладожско-Онежско-Колгуевская зона: показательный пример поиска, выделения и обоснования скрытых тектонических нарушений земной коры // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2016. Т. 91. Вып. 4-5. С.90-96.

### **Иные основные публикации**

7. *Агибалов А.О., Бардышев Г.П.* Определение типа новейшего напряженного состояния в районе пос. Импилахти (Северное Приладожье) с помощью компьютерного моделирования // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2019. Т. 1. С. 16-20.
8. *Агибалов А.О., Бондарь И.В., Зайцев В.А., Сенцов А.А.* Реконструкция напряженно-деформированного состояния Северного Приладожья по геолого-кинематическим индикаторам // Динамическая геология. 2019а. № 2. С. 32-43.
9. *Агибалов А.О., Бондарь И.В., Сенцов А.А., Усанова О.И.* Оценка новейшей

геодинамической активности разрывных нарушений Северного Приладожья по данным анализа рельефа и тектонофизического моделирования // *Материалы всероссийской научной конференции "Восточно-Европейская платформа: геология, неотектоника, геоморфология"*. М.: Перо, 2018а. С. 61-64.

10. *Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А.* Признаки активизации разрывных нарушений котловины Ладожского озера в современном поле напряжений // *Вестник научных конференций*. 2018г. Т. 2. № 32. С. 7-9.

11. *Агибалов А.О., Сенцов А.А., Бардышев Г.П., Зайцев В.А.* Разрывные нарушения в четвертичных отложениях Северного Приладожья как индикатор новейшей сейсмотектонической активности территории // *Материалы всероссийской научной конференции "Восточно-Европейская платформа: геология, неотектоника, геоморфология"*. М.: Перо, 2018д. С. 38-56.

12. *Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А.* Изучение новейшего поля напряжений района Кирьяволахтинского гранито-гнейсового купола (Северное Приладожье) с помощью компьютерного моделирования // *Научный альманах*. 2018з. Т. 3. № 10. С. 12-15.

13. *Агибалов А.О., Сенцов А.А., Зайцев В.А.* Сопоставление докембрийского и новейшего структурных планов Северного Приладожья // *Научный альманах*. 2018к. №12. Т. 2. С. 147-151.

14. *Агибалов А.О., Сенцов А.А., Усанова О.И.* Новейшее напряженное состояние Янисъярвинско – Туломозерской линеаментной зоны (Северное Приладожье) // *Материалы всероссийской научной конференции "Восточно-Европейская платформа: геология, неотектоника, геоморфология"*. М.: Перо, 2018л. С. 65-68.

15. *Агибалов А.О., Усанова О.И., Мошкин И.В.* Выявление областей повышенной современной геодинамической активности Приладожья по данным тектонофизического моделирования // *Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы I Тектонического совещания*. М.: ГЕОС, 2018м. Т. 2. С. 363-366.

16. *Агибалов А.О., Усанова О.И., Мошкин И.В., Сенцов А.А.* Изучение вертикальных движений Северного Приладожья с помощью метода В.П. Философова и компьютерного моделирования // *Вестник научных конференций*. 2018н. Т. 1. № 8. С. 7-8.

17. *Агибалов А.О., Усанова О.И., Мошкин И.В., Сенцов А.А.* Изучение новейших движений территории острова Риеккалансари (Северное Приладожье) с помощью геоморфологического дешифрирования и компьютерного моделирования // *Научный альманах*. 2018о. Т. 1. № 8. С. 158-161.