

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**СЕНЦОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ**

**СЕЙСМОТЕКТОНИКА ОПАСНЫХ ОБЛАСТЕЙ ВОСТОЧНО-  
ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

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**

- **Макеев Владимир Михайлович** – доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук», заведующий лабораторией

- **Деев Евгений Викторович** – доктор геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук», ведущий научный сотрудник

- **Зыков Дмитрий Сергеевич** – кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, ООО «Газпром геотехнологии», отдел геологии, главный специалист

Защита диссертации состоится «25» марта 2022 г. в 14:30 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.

Е-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/431666782/>

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.04.04.

кандидат геолого-минералогических наук



Ю.А. Гатовский

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Изучение сейсмичности Восточно-Европейской платформы (ВЕП), ее взаимосвязи с геологическим и геоморфологическим строением, представляется актуальной задачей, имеющей фундаментальное значение для понимания новейшей геодинамики платформенных территорий. Применение комплекса современных и традиционных методов исследования позволили взглянуть по-новому на определение источников, инициирующих сейсмическую активность. Сейсмотектоника активных областей платформенных территорий представляется актуальной в связи с их хозяйственной востребованностью, особенно со строительством и эксплуатацией АЭС и др. Составление обобщенных сейсмических каталогов позволило получить более полное представление о сейсмичности ВЕП. Актуальность проведенных структурно-геоморфологических и полевых геоморфологических наблюдений обусловлена отсутствием общепринятой точки зрения по вопросу активизации разломов кристаллического фундамента в пределах древних платформ. Значимость построенных геодинамических моделей связана с тем, что они позволили предложить решение вопроса о механизмах, инициирующих сейсмичность на исследуемых областях.

**Цель исследования** – сейсмотектонический анализ платформенных территорий на примере Фенноскандии, Балтийской синеклизы, Воронежской антеклизы и Волго-Уральской антеклизы.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ региональной сейсмичности ВЕП с целью построения графиков периода повторяемости землетрясений и оценки максимально возможных магнитуд на данной территории;
2. Выделение новейших разрывных нарушений (в том числе и сейсмогенерирующих) структурно-геоморфологическими методами (с использованием топографических карт разного масштаба, космических снимков Landsat 7 и 8, цифровых моделей рельефа, геоморфологических профилей);
3. Построение на новейший этап геодинамических моделей Фенноскандии, Балтийской синеклизы, северного склона Воронежской антеклизы и Волго-Уральской антеклизы;
4. Сопоставление характера распределения сейсмичности со строением кристаллического фундамента исследуемых районов Восточно-Европейской платформы;
5. Выделение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) с помощью компьютерного геодинамического моделирования и анализ временных вариаций гравитационного поля, полученных с помощью системы GRACE, и их сопоставление с выделяемой сейсмической энергией.

**Фактический материал и методы.** В качестве исходных данных использовались сейсмические каталоги, карты активных разломов, топографические карты и космические изображения, геологические карты, карты поверхности кристаллического фундамента, цифровые модели рельефа, а также материалы полевых геоморфологических наблюдений и данные о гравитационном поле, полученные системой GRACE.

Методика построения сеймотектонической модели основана на комплексном применении различных методов, включающих анализ сейсмичности, структурно-геоморфологическое дешифрирование, полевые геолого-геоморфологические наблюдения, компьютерное моделирование, сопоставление выделившейся сейсмической энергии с временными вариациями гравитационного поля.

**Достоверность полученных результатов.** Использование большого объема оригинального фактического материала с применением статистических критериев, в комплексе с геологическими, геофизическими и геоморфологическими данными повышают достоверность полученных в ходе исследования результатов и обоснованность итоговых выводов.

**Личный вклад автора.** Автор принимал участие в полевых геолого-геоморфологических исследованиях на территории центральной части Русской плиты (в рамках подготовки технического отчета работ по оценке сейсмической опасности для проектных основ Смоленской АЭС-2) и Карелии. Автором составлен сводный сейсмический каталог на исследуемые районы ВЕП, учитывающий информацию о сейсмичности с 1800 г. Построены оригинальные графики повторяемости землетрясений, структурно-геоморфологические схемы и схемы блоковой делимости, проведена работа по определению регионального поля напряжений сейсмоактивных областей ВЕП. Предложены схемы зон ВОЗ и проведена работа по уточнению среднесрочного сейсмического прогноза на основании данных об временных вариациях гравитационного поля. Принимал активное участие в следующих НИР: Развитие методов детального сейсмического районирования и сейсмического микрорайонирования (ИФЗ РАН); Новейшая геодинамика и ее влияние на фильтрационные свойства геологической среды; Новейшая геодинамика и обеспечение безопасности хозяйственной деятельности (МГУ им. М.В. Ломоносова).

**Научная новизна.** Структурно-геоморфологические схемы позволили подтвердить ранее выделенные активные разрывные нарушения. Удалось выделить предполагаемые активные разрывные нарушения, как унаследованные, так и новообразованные. Построены оригинальные геодинамические модели, позволяющие охарактеризовать сейсмический режим Фенноскандии, Балтийской синеклизы, Волго-Уральской антеклизы и северного склона Воронежской антеклизы. Впервые произведено разделение Фенноскандии на шесть частей, отличающихся типами напряженного состояния, вызывающего сейсмичность. Было установлено двухъярусное строение Балтийской синеклизы, в каждом ярусе которой

реализуются свои поля напряжений. Установлены источники полей напряжений вышеназванных районов. Эти модели хорошо согласуются с представлениями о новейшей геодинамике, рассмотренными в работах [Kieruf, 2014; Keiding, 2015; Копп, 2000; Юдахин, 2003; Трегуб, 2005; Ефременко, 2011; Рогожин, 2012; Макарова и др., 2016; Зыков, Полещук, 2016]. Зоны ВОЗ, выделенные с учетом результатов моделирования, как подтверждают ранее установленные зоны ВОЗ и геодинамически активные зоны [Панасенко, 1969; Сейсмотектоника..., 2009; Ефременко, 2011], так и являются оригинальными. Кроме того, построены графики повторяемости землетрясений на основе обобщенных каталогов.

Сравнение выделившейся сейсмической энергии и временных вариаций гравитационного поля позволило по-новому взглянуть на проблему среднесрочного сейсмического прогноза Фенноскандии и Воронежской антеклизы. Подобные исследования ранее проводились для территорий активных континентальных окраин [Михайлов и др., 2014] и платформенных территорий [Огаджанов и др., 2005].

**Теоретическая и практическая значимость.** В результате проведенных исследований получены новые геодинамические модели, выделены геодинамически активные зоны, построенные графики повторяемости, представлен среднесрочный сейсмический прогноз Фенноскандии и Воронежской антеклизы. Эти результаты имеют как прикладное, так и теоретическое значение. Материалы диссертационной работы могут служить основой для прогноза землетрясений и оценки сейсмической опасности территории Фенноскандии, Балтийской синеклизы, Воронежской и Волго-Уральских антеклиз.

#### **Защищаемые положения.**

1. Территория Фенноскандии разделена на 6 геодинамически различных блоков, каждый из которых отличается своим полем напряжений. Для периферийных частей характерны сжимающие напряжения, для центральной – обстановка растяжения. Для данной территории предложена новая компьютерная сейсмотектоническая модель, благодаря которой удалось уточнить график повторяемости, выделить 13 зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) и скорректировать среднесрочный сейсмический прогноз по данным о временных вариациях гравитационного поля, полученных с помощью системы GRACE.

2. Для территории Балтийской синеклизы предложена двухъярусная сейсмотектоническая модель, описывающая сейсмичность в фундаменте и осадочном чехле. Сейсмичность, согласно этой модели, вызывается сдвиговыми деформациями в фундаменте, которые приводят к росту новейших поднятий в чехле. Различие механизмов, вызывающих сейсмичность, подтверждается различием в наклоне графиков повторяемости землетрясений в фундаменте и чехле. Выделено 3 зоны ВОЗ в фундаменте и 5 в чехле.

3. Различие сейсмичности территорий антеклиз Восточно-Европейской платформы (Воронежской и Волго-Уральской) связано с различием современного поля напряжения. Сейсмичность Воронежской антеклизы разделяется на северную и южные группы. Для обоих районов установлено сдвиговое поле напряжений в фундаменте. Ось сжатия ориентирована субгоризонтально в северо-западном направлении на области северного склона Воронежской антеклизы и субширотно на территории Волго-Уральской антеклизы. По результатам моделирования выделено 6 и 9 зон ВОЗ соответственно.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации, опубликовано **18** работ, в которых основополагающий вклад принадлежит соискателю: **4** статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, Scopus, RSCI и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ; **14** статей в журналах, материалов совещаний и тезисов докладов. Промежуточные результаты исследований представлены на конференциях, в том числе на «Международном тектоническом совещании», «Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН», конференциях «Ломоносовские чтения», в рамках семинара “Seismic Source Zones (Workshop)”, проведенного университетом Хельсинки на базе проекта SEISRISK.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, **4** глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет **116** страниц текста, работа включает **38** иллюстраций, **1** таблицу и библиографию из **227** наименований.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность следующим людям, чье мнение и поддержка привели к написанию данной работы: В.А. Зайцеву; Е.А. Рогожину, Л.В. Паниной, В.С. Захарову, А.О. Агибалову, А.Н. Овсяченко, С.А. Лебедеву, Д.В. Ушакову, А.В. Полещуку, В.В. Жмуру, Е.Р. Рудцкой, С.А. Дмитриеву, О.А. Изотову и многим-многим другим.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Введение

Во введении дано краткое описание научной проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования, обоснована его актуальность, новизна и практическая значимость, показан личный вклад автора.

### Глава 1. Исходные данные

В первой главе рассмотрена совокупность геофизических, геологических и геоморфологических данных, которые легли в основу сеймотектонических исследований. При анализе сейсмичности Восточно-Европейской платформы использованы каталоги землетрясений, имеющиеся на изучаемую территорию (как мировые, так и региональные). Сводный каталог собран из данных Американской геологической службы (USGS), университета Хельсинки, оперативного сейсмологического каталога Геофизической Службы РАН (ЕГС РАН), расширенного сводного каталога землетрясений Южной

Прибалтики и унифицированного каталога землетрясений Северной Евразии под редакцией Н.В. Кондорской и В.И. Уломова.

Для геолого-геоморфологического анализа и компьютерного геодинамического моделирования использовались следующие данные: цифровые модели рельефа, радарные снимки ASTER с разрешением 1,5 угс-секунды, серии космических снимков Landsat 7 и 8, топографические карты, а также данные геологического строения изучаемых регионов. Радарные изображения, используемые в работе, имели разрешение 500x500 м. Космические снимки были разных диапазонов спектра и их комбинирование (например, видимых с инфракрасным), что позволило выделить морфоструктуры и выраженные в рельефе «слабые» зоны.

Кроме того, использовались данные об активных разломах Фенноскандии [Lagerbäck, 1979, 1992; Панасенко, 1969; Международная..., 1996; Юдахин, 2003; Mörner, 2004; Землетрясения..., 2007; Kukonen et al., 2010; Julin et al., 2010; Olesen et al., 2013; Sutinen et al., 2014; Smith et al., 2014; Евзеров, Виноградов, Николаева, 2014; Никонов, Шварев, 2015; Afonin et al., 2017; Ojala et al., 2017; Shvarev, Rodkin, 2018], Балтийской синеклизы [Сейсмотектоника..., 2009, Рогожин и др., 2014] и Воронежской антеклизы [Трегуб, 2005; Кузьмин и др, 2015] и Волго-Уральской антеклизы [Агибалов и др., 2021а].

## Глава 2. Используемые методы

Диссертационная работа основана на комплексном применении сейсмотектонических, структурно-геоморфологических и компьютерном геодинамическом моделировании.

При *сейсмотектонических* исследованиях использованы *традиционные* методы [Рогожин, 2012], к которым относится анализ землетрясений на основании сейсмических каталогов и данных об активности разломов. Кроме сейсмических каталогов привлекались литературные источники по историческим землетрясениям и палеосейсмичности. Для всех графиков повторяемости рассчитаны статистические критерии: коэффициент корреляции Пирсона (R), коэффициент детерминации ( $R^2$ ), проверка значимости регрессий критериями Фишера (F) и Стьюдента (t) для уровня статистической значимости  $\alpha=0,05$ .

Проведенное по методике Н.П. Костенко [1999] *структурно-геоморфологическое дешифрирование* позволило выделить «слабые» зоны, маркирующие как зоны трещиноватости, так и разрывные нарушения. Методом структурно-геоморфологического дешифрирования выделены новейшие поднятия и впадины, малоамплитудные (со смещением до первых метров) новейшие разрывные нарушения, активизированные древние (докембрийские) структуры.

Проведенное *компьютерное геодинамическое моделирование* позволило рассчитать вероятность формирования новейших разрывов. Исходными данными для моделей служили цифровые модели рельефа, карты поверхности фундамента, схемы разрывных нарушений

кристаллического фундамента, физико-механические характеристики среды (средние значения коэффициентов Пуассона и внутреннего трения), внешний тип поля напряжения. Методика компьютерного геодинамического моделирования предполагает, что модель состоит из упругого материала [Daly, Mueller, 2004], основные физико-механические свойства которого заданы как начальные условия. В результате воздействия внешних сил происходит перераспределение напряжений, связанное с влиянием заданных разрывных нарушений, являющихся вертикальными неоднородностями. На некоторых площадках в результате перераспределения напряжений, происходит комбинирование нормальных и касательных напряжений, приводящих, согласно теории Мора, к нарушению прочности. [Работнов, 1963]. Физической основой является закон Кулона – Мора, который используется для расчета положения областей наиболее вероятного формирования новейших разрывов [Руководство..., 2012]. Глубины моделей были ограничены 25 км, т.к., согласно С.Н. Иванову [2018], на этой глубине проходит граница между сиалической и мафической корой. В ходе моделирования рассчитываются ряд параметров, среди которых «вероятность формирования новых разрывов», которая может быть скоррелирована с плотностями эпицентров землетрясений. Выделение зон ВОЗ происходило путем оконтуривания областей формирования новых трещин и гипоцентров землетрясений. Более подробно об этом рассказано в главе 2 текста диссертации.

Для всех ранее названных регионов проводилась корреляция между выделившейся сейсмической энергией и временными *вариациями гравитационного поля*, полученными с помощью системы GRACE – спутниковой миссии, направленной на изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций. Особенностью данной системы является то, что она фиксирует отклонения гравитационного поля от поверхности геоида, получая эти отклонения в см.

### **Глава 3. Сейсмическая активность Восточно-Европейской платформы**

Распределение сейсмичности в пределах ВЕП неравномерно: наибольшая активность характерна для периферийных частей, что частично может быть объяснено отсутствием большого количества сейсмостанций в центральной части. Наиболее сейсмоактивными областями являются Балтийский щит, Балтийская синеклиза, Воронежская антеклиза, Волго-Уральская антеклиза, Прикаспийская впадина, Мезенская синеклиза и Украинский щит. К сожалению, не для всех территорий существуют достаточно полные сейсмические каталоги, что создает проблему для использования компьютерных геодинамических моделей. К таковым относятся Мезенская синеклиза, Прикаспийская впадина и Украинский щит. Сеймотектоническое описание этих регионов сделано по литературным данным, а для остальных четырех (Балтийский щит, Балтийская синеклиза, Воронежская и Волго-Уральская антеклизы) – на основе авторских исследований.

## Глава 4. Сейсмически опасные области Восточно-Европейской платформы

### 4.1. Фенноскандия

Данная территория соответствует Скандинавскому полуострову. Согласно [Сейсмологический..., 2020в], одно из наиболее сильных исторических землетрясений случилось в 1819 г на территории Норвегии с  $M_w=5,8$ . Согласно данным палеосейсмологических исследований [Mörner, 2013; Jacobsson et al, 2014; Никонов и др., 2015], на этой территории за последние 16000 лет происходили землетрясения с магнитудой 8. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что Фенноскандия, большей частью которой является Балтийский щит – одна из самых опасных в сейсмическом отношении областей ВЕП.

#### 4.1.1. Геологическое строение

В этой части дано описание геологического строения Балтийского щита и каледонидами Скандинавии. Щит состоит из трех мегаблоков [Милановский, 1996], возраст которых омолаживается с востока на запад. *Кольско-Карельский* мегаблок состоит из: 1) Мурманского позднеархейского гранит-мигматитового блока (пояса); 2) Кольского позднеархейского гранулит-гнейсового блока; 3) Беломорского позднеархейско-раннепротерозойского гранулит-гнейсового пояса; 4) Карельской архейской гранит-зеленокаменной области и 5) архейско-раннепротерозойской гранито-гнейсовой провинции Норрботтен [Козлов и др., 20016; Слабунов, 2010]. Все они, кроме последней, вытянуты в северо-запад — юго-восточном направлении.

Следующим мегаблоком в строении Балтийского щита является *Свекофеннский*, который тектонически более однородный. Этот мегаблок сложен метаморфическими породами раннепротерозойского возраста, представленными слюдястыми сланцами, гнейсами, метавулканитами от основного до кислого состава [Korsman et al., 1999, Korja et al., 2006, Lahtinen et al., 2008, Балтыбаев, 20013].

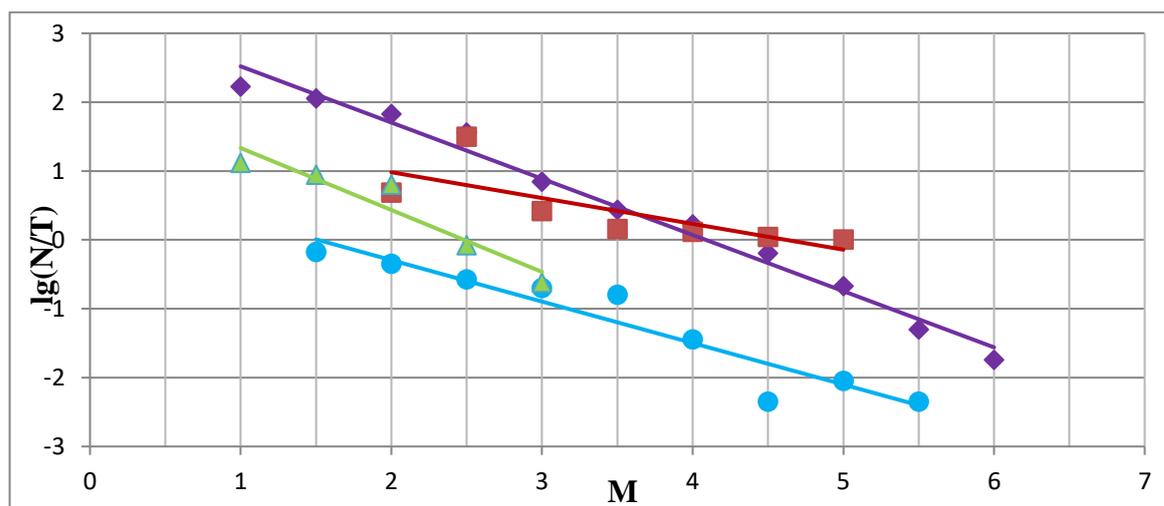
Последний, *Свеконорвежский* мегаблок, занимает крайнюю юго-западную часть Скандинавского полуострова. В структуре этого мегаблока выделяют пять литотектонических сегментов, большая часть которых сложена гнейсами, подвергшимся перемещениям и переработке в интервале 1,14-0,9 млрд. лет. Эти литотектонические сегменты разделены сквозькоровыми деформационными зонами [Минц, 2017].

Каледониды Скандинавии развиты на северо-западной части Скандинавского полуострова и протягиваются в северо-восточном направлении. Это сложный покровный аллахтонный комплекс, который состоит из трех разновозрастных сегментов, отличающихся по возрасту автохтона: южного (позднепротерозойского), центрального (раннепротерозойского) и северного (позднеархейского) [Corfuet al., 2014].

#### 4.1.2 Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность

Методом структурно-геоморфологического анализа было выделено около 2700 «слабых» зон различной ориентировки, максимальная протяженность которых достигает 650 км. Установлено, что коэффициент корреляции Пирсона между плотностями «слабых» зон и эпицентров землетрясений (радиус поиска – 250 км) составляет «-0,40». При исключении из рассмотрения землетрясений с магнитудой до 3 включительно, значение данного коэффициента возрастает по модулю до «-0,52». Подобная отрицательная корреляция свидетельствует о накоплении упругой энергии в пределах наименее тектонически раздробленных блоков, которое может привести к возникновению землетрясений высоких магнитуд, в то время как на территории слабосейсмичных участков с большим количеством разрывных нарушений и зон трещиноватости происходит быстрая релаксация напряжений.

С 1800 по 2020 г. на рассматриваемой территории зафиксировано 12 343 землетрясения, из них 850 с  $M > 3$ . Наибольшая сейсмическая активность характерна для западного побережья изучаемой территории, в пределах которого эпицентры землетрясений группируются в линейные области («сейсмолинементы») протяженностью до 1 500 км, ориентированные преимущественно вдоль береговой линии. Очаги почти всех землетрясений располагаются на глубинах от 10 до 20 км. График повторяемости землетрясений Фенноскандии (рис. 1) описывается уравнением  $\lg\left(\frac{N}{T}\right) = -0,815(\pm 0,033)M + 3,335(\pm 0,13)$ , где  $T$  – время, с которым происходят сейсмические события в количестве ( $N$ ) с магнитудой  $M$ ,  $R_c = 0,992$ ;  $R^2 = 0,984$ ,  $F = 580,13$  и  $t = 18,31$  при  $F_{\text{крит}} = 5,11$  и  $t_{\text{крит}} = 1,3$ .



**Рис. 1** Графики повторяемости землетрясений Фенноскандии (фиолетовый), Балтийской синеклизы (красный), Воронежской антеклизы (зеленый) и Волго-Уральской антеклизы (синий).

Установлено, что наибольшая степень взаимосвязи между сейсмической энергией и временными вариациями гравитационного поля характерна для низкомagnitudeных сейсмических событий. Коэффициент корреляции Спирмена между средним значением выделившейся среднемесячной сейсмической энергией для землетрясений с  $M \leq 3$  и месячным значением гравитационного поля составляет 39% (при осреднении значения

сейсмической энергии в пределах  $\pm 3$  месяцев<sup>1</sup> от экстремума в гравитационном поле), а между среднемесячным значением энергией и средним значением гравитационного поля — 46% (при осреднении значения сейсмической энергии в пределах  $\pm 3$  месяцев от экстремума в гравитационном поле). Отмечается зависимость между суммарной энергией землетрясений и временными вариациями гравитационного поля: на участках, где наблюдается тренд подъема поля, существует прямая корреляция. Обратная корреляция с сейсмической энергией наблюдается на тех участках графика, где гравитационное поле испытывает понижение. На временных интервалах, где не удается выделить четкое направление в изменении гравитационного поля, корреляция отсутствует.

#### 4.1.3. Компьютерное моделирование новейшей геодинамики

Изучая результаты известных исследователей, занимавшихся проблемой моделирования новейшей геодинамики Фенноскандии (Кединг, Киеруф, Никонов, Сим и др.), можно отметить отсутствие общей точки зрения, касательной новейшего поля напряжения на данной территории. Отсутствует четкое деление данной территории на блоки, отличающиеся типом напряженного состояния. Автором была рассчитана геодинамическая модель Фенноскандии, на территории которой выделено 6 блоков, отличающихся типом напряженного состояния (рис. 2).

Границы блоков выделены по изменению пространственного рисунка эпицентров землетрясений и контурам береговой линии. Ввиду отсутствия общепринятых данных по напряженному состоянию данного региона, работы по компьютерному моделированию происходили следующим образом: для каждого из 6 выделенных блоков проводилось моделирование с использованием всех трех типов напряженного состояния (сдвиг, сжатие и растяжение), а азимуты протираний осей сжатия и растяжения варьировали от  $0^\circ$  до  $165^\circ$  с шагом в  $15^\circ$ . Исходными данными для моделирования служили цифровая модель рельефа, активные линейные структуры, полученные в результате структурно-геоморфологического анализа, сейсмичность. В результате построены 36 моделей на каждый блок. Оценка достоверности построенных моделей проведена путем сопоставления рассчитанных с помощью моделирования параметров с реальными геолого-геоморфологическими данными: например, вероятность формирования новых разрывов сравнивалась с плотностью эпицентров землетрясений. В качестве наиболее достоверной выбраны те модели, для которых коэффициент Пирсона между вероятностью формирования новых разломов и плотностью эпицентров землетрясений достигал максимальных значений. Отметим, что полученные коэффициенты корреляции Пирсона имеют как положительные, так и отрицательные значения, которым, согласно [Руководство..., 2013], дается следующая

---

<sup>1</sup> Имеется ввиду то, что «длина волны» изменения гравитационного поля составляет год (экстремумы каждые полгода), а у сейсмической энергии длина волны хаотична. Ввиду этого была рассчитана средняя сейсмическая энергия за полугодовой интервал.

интерпретация: положительные значения получаются при корреляции со сколами, а отрицательные – с деформациями отрыва. Параметры каждого блока приведены в таблице 1. Для блоков Jarvidol и Ladoga не удалось получить численную корреляцию между вероятностью разломообразования и плотностью землетрясений из-за малого количества сейсмических событий.

**Таблица 1** Краткое описание новейшего поля напряжения Фенноскандии.

Название блока	Тип напряженного состояния	Ориентировка оси сжатия/растяжения	Коэффициент Пирсона
Venusland	Сдвиг	285°	0,37
Fjordland	Сдвиг	315°	0,47
InSammer <sup>2</sup>	Растяжение	330°	0,5
Porttipahdan	Сжатие	315°	0,43
Jarvidol	Сжатие	330°	–
Ladoga	Сжатие	330°	–

Определенное в результате моделирования положение главных нормальных осей новейших напряжений для разных блоков Фенноскандии хорошо согласуются с решениями очагов землетрясений [Kierulf et al., 2014].

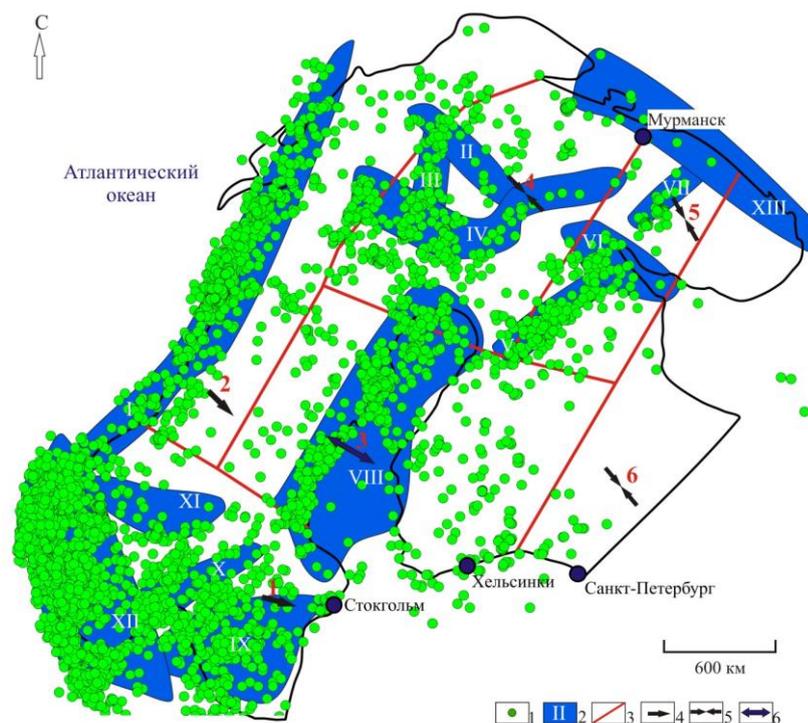
#### 4.1.4. Схема зон возможных очагов землетрясений

По данным о характере распределения эпицентров землетрясений, а также их плотностей и расположению участков, на территории которых, по данным компьютерного моделирования, происходит формирование новых разрывов малой протяженности, построена схема зон ВОЗ (рис. 2, табл. 2). Полученные в результате моделирования зоны ВОЗ сравнивались с ранее выделенными [Панасенко, 1969; Землетрясения..., 2007]. Так, Финско-Российской и Апатитовой зоне частично соответствуют Хибинско-Ловозерская и Куусамо-Порьегубская сейсмогенные зоны, Шведско-Российской и Беломорской — Кандалакшская, Ботническая и Финско-Шведско-Норвежская зоны частично совпадают с Ботний-Финмаркской, а Мурманская зона ВОЗ и одноимённая сейсмогенная зона совпали практически полностью. Помимо этого, проведенные автором исследования позволили выделить Норвежскую, Венернскую, Осло, Центрально-Норвежскую и Бергенскую зоны ВОЗ. Для оценки максимальных магнитуд в пределах выделенных зон ВОЗ привлекались результаты работ по палеосейсмичности [Никонов, Шварев, 2011; Mörner, 2013; Jakobsson et al, 2014; Palmu et al, 2015].

**Выводы.** В результате проведенной работы установлена активизация на новейшем этапе части разрывных нарушений Фенноскандии. На основании комплексного геолого-

<sup>2</sup> Название использовано с разрешения правообладателя — шведско-русского музыкального коллектива InSammer

геоморфологических исследований исследуемая область разделена на 6 участков, отличающихся типом напряженно-деформационного состояния. Проведенный анализ сейсмичности и компьютерное моделирование позволили выделить 13 зон ВОЗ, 5 из которых являются оригинальными, а также скорректировать сейсмический прогноз по времени на основе графика повторяемости. Установлена численная корреляция между трендами изменения гравитационного поля и выделившейся сейсмической энергией.



**Рис. 2** Схема зон ВОЗ территории Фенноскандии: 1 – эпицентры землетрясений, произошедшие с 1800 по 2020 гг., 2 – зоны ВОЗ и их номера (см. Табл. 1), 3 – границы блоков, 4 – ориентировка оси сжатия при сдвиге, 5 – ориентировка оси сжатия в обстановке сжатия, 6 – ориентировка оси растяжения в обстановке растяжения. Цифрами обозначены номера блоков: 1 – Venusland, 2 – Fjordland, 3 – InSammer, 4 – Porttipahdan, 5 – Jarvidol, 6 – Ladoga

**Таблица 2** Краткое описание выделенных зон ВОЗ.

№ п/п	Название зоны ВОЗ	Линейные размеры (в км)	$M_{\max}$ по исторической и современной сейсмичности	$M_{\max}$ с учетом палеосейсмологических данных	Тип напряженного состояния, полученный при моделировании	Ближайшее к зоне ВОЗ решение очага землетрясения, (по [Keiding et al., 2015])
I	Норвежская	2670x200	6,3	-	Сдвиг, 315°	Сдвиг, 300-315°
II	Финско-Шведско-Норвежская	300x200	3,8	-	Сжатие, 315°	Сжатие, 315-330°
III	Финско-Норвежская	700x135	4,2	-	Сжатие, 315°	Сжатие, 315-330°
IV	Шведско-Российская	1540x200	4,3	7 [Никонов и др., 2015]	Сжатие, 315°	Сжатие, 315-330° или 45-60°
V	Финско-Российская	670x130	5,1	7 [Никонов и др., 2015]	Растяжение, 330°	Растяжение/сдвиг, 45°/60°
VI	Беломорская	650x380	3,7	7 [Никонов и др., 2015]	Сжатие, 330°	Нет данных
VII	Апатитовая	600x100	5,2	7 [Никонов и др., 2015]	Сжатие, 330°	Нет данных
VIII	Ботническая	1750x500	5,4	>8 [Mörner, 2013]	Растяжение, 330°	Растяжение, 315-330°
IX	Венернская	900x 500	5,3	7,5 [Jacobsson et al., 2014]	Сдвиг, 285°	Сдвиг, 300°
X	Осло	715x160	5,9	-	Сдвиг, 285°	Сбросо-сдвиг, 30°

XI	Центрально-Норвежская	700x200	5,3	-	Сдвиг, 285°	Сдвиг, 270°
XII	Бергенская	1350x500	5,7	-	Сдвиг, 285°	Взбросо-сдвиг, 30°
XIII	Мурманская	1800x200	5,2	7 [Никонов и др., 2015]	Сжатие, 330°	Нет данных

#### 4.2 Балтийская синеклиза

В данном разделе приведены описания геологического строения Балтийской синеклизы, результаты структурно-геоморфологического анализа, компьютерного моделирования и схема зон ВОЗ. Детальное изучение этого региона актуально в связи с двумя землетрясениями 2004 года с  $M_w=4,8\pm 0,3$ , которые, согласно ОСР–97, не прогнозировались в данном регионе.

##### 4.2.1 Геологическое строение

Балтийская синеклиза расположена на западном окончании ВЕП. В ее строении выделяют два структурных этажа: нижний, представленный архей-протерозойским складчатым комплексом и верхний, сложенный осадочным чехлом фанерозойского возраста. Балтийская синеклиза представляет собой довольно глубокую асимметричную впадину, кристаллический фундамент которой погружается в западном направлении на глубины от 1–2 км до 4–6 км близ Датско-Польского прогиба (авлакогена).

В пределах этой тектонической единицы многие сейсмогенерирующие структуры могут быть наиболее четко выражены в кровле кристаллического фундамента, но не всегда имеют отражение в современном рельефе. Разрывные смещения с амплитудами порядка 15–20 м фиксируются во многих случаях по деформациям кровли кристаллического фундамента, с гляциоизостатическими поднятиями, выделенными в работе [Piasecki, 1982].

##### 4.2.2. Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность

В результате структурно-геоморфологического анализа построена схема блоковой делимости Балтийской синеклизы. Установлено, что основными направлениями простираения «слабых» зон являются субмеридиональное, диагональные (северо-западное и северо-восточное) и субширотное (по мере уменьшения значимости). В некоторых случаях эти зоны наследуют глубинные структуры. Например, одна из них совпадает с разломом, протягивающимся в субширотном направлении от Калининградского залива вглубь континента примерно до 23° восточной долготы [Рогожин и др., 2010; Рогожин, 2012]. По данным [Землетрясения..., 2007], точно такую же ориентировку имеет значительная часть новейших активных разрывных нарушений в смежных регионах. Исходя из этого, было сделано предположение о том, что наиболее протяженные «слабые» зоны можно рассматривать при моделировании как предполагаемые активные разрывные нарушения. Таким образом, разломная сетка, используемая при компьютерном моделировании, была составлена как по результатам проведенных автором структурно-геоморфологических исследований, так и с использованием данных об активных разрывных нарушениях

[Сейсмогеология..., 2009].

За период наблюдений с 1302 по 2014 [Сейсмогеология..., 2009] зафиксировано 91 землетрясение, 76 в инструментальный период, из них 23 имели магнитуду больше 3. Раньше эта область не попадала на карте ОСР-97 в зоны высокой интенсивности, однако 2 землетрясения с магнитудой 4,6 и  $4,8 \pm 0,3$ , произошедшие в сентябре 2004 года, показали, что на данной территории возможны достаточно сильные для платформенных территорий сейсмические события. После этих землетрясений Е.А. Рогожиным [2012] были проведены полевые работы по сейсмическому микрорайонированию, в результате которых с помощью палеосейсмологических наблюдений было выявлено палеоземлетрясение с интенсивностью в 7 баллов (магнитуда около 5) и возрастом 10 000 лет.

Повторяемость всех землетрясений Балтийской синеклизы описывается уравнением  $Lg\left(\frac{N}{T}\right) = -0,66(\pm 0,1)M + 1,53(\pm 0,36)$ ,  $R_c=0,946$ ;  $R^2=0,89$ ,  $F=43,43$  и  $t=6,59$  при  $F_{\text{крит}}=6,6$  и  $t_{\text{крит}}=2,57$  (рис. 1). Анализ сейсмичности позволил установить, что коэффициент корреляции Пирсона между плотностями эпицентров землетрясений в осадочном чехле и кристаллическом фундаменте равен 26%. Корреляция между величинами сейсмической энергии, интерполированными на всю изучаемую территорию, и рассчитанными для чехла и фундамента, составляет 14%. Кроме этого, углы наклона линии тренда графиков повторяемости землетрясений, произошедших в кристаллическом фундаменте и осадочном чехле, различны. Повторяемость землетрясений в фундаменте описывается уравнением  $Lg\left(\frac{N}{T}\right) = -0,44(\pm 0,07)M + 0,35(\pm 0,25)$ ,  $R_c=0,93$ ;  $R^2=0,88$ ,  $F=40,23$  и  $t=6,34$  при  $F_{\text{крит}}=6,6$  и  $t_{\text{крит}}=2,57$ . Для землетрясений осадочного чехла характерна следующая зависимость:  $Lg\left(\frac{N}{T}\right) = -0,78(\pm 0,15)M + 1,72(\pm 0,48)$ ,  $R_c=0,94$ ;  $R^2=0,89$ ,  $F=24,8$  и  $t=4,98$  при  $F_{\text{крит}}=10,12$  и  $t_{\text{крит}}=3,18$ . В целом полученные данные позволяют сделать вывод о разном характере сейсмичности в осадочном чехле Балтийской синеклизы и кристаллическом фундаменте на котором она заложилась, обосновывают необходимость отдельного рассмотрения новейшей геодинамики в осадочном чехле.

#### 4.2.3. Компьютерное моделирование новейшей геодинамики

С помощью компьютерного моделирования построена схема вероятности формирования новейших разрывов для фундамента и чехла Балтийской синеклизы. Более полное описание исходных данных приведено в разделе 4.2.3 диссертации, а также в статье [Агибалов и др, 2021б].

Для моделирования новейшей геодинамики фундамента Балтийской синеклизы в качестве внешней нагрузки задавалось сдвиговое поле напряжения с азимутом простирания горизонтальной оси максимального сжатия в  $330^\circ$ . Этот тип внешней нагрузки согласуется с решением фокального механизма очага Калининградского землетрясения 21.09.2004 с магнитудой  $M_w=4,8$ , располагавшегося на глубине 7-10 км в районе Самбийского

полуострова [Рогожин и др., 2014а]. Установлена численная корреляция между плотностью эпицентров землетрясений и вероятностью формирования новейших разрывных нарушений (коэффициент корреляции Пирсона 86%). Также наблюдается корреляция между энергией землетрясений (Дж) и вероятностью формирования новейших разрывов (коэффициент корреляции Пирсона 42%). Землетрясения, гипоцентр которых располагался на глубине 10 км, исключены из рассмотрения. Это сделано на основании исследований Е.А. Рогожина и его коллег [2014б], показавших, что в данном районе в средней части земной коры (на глубинах 7-11 км) существует аномальная низкоскоростная зона.

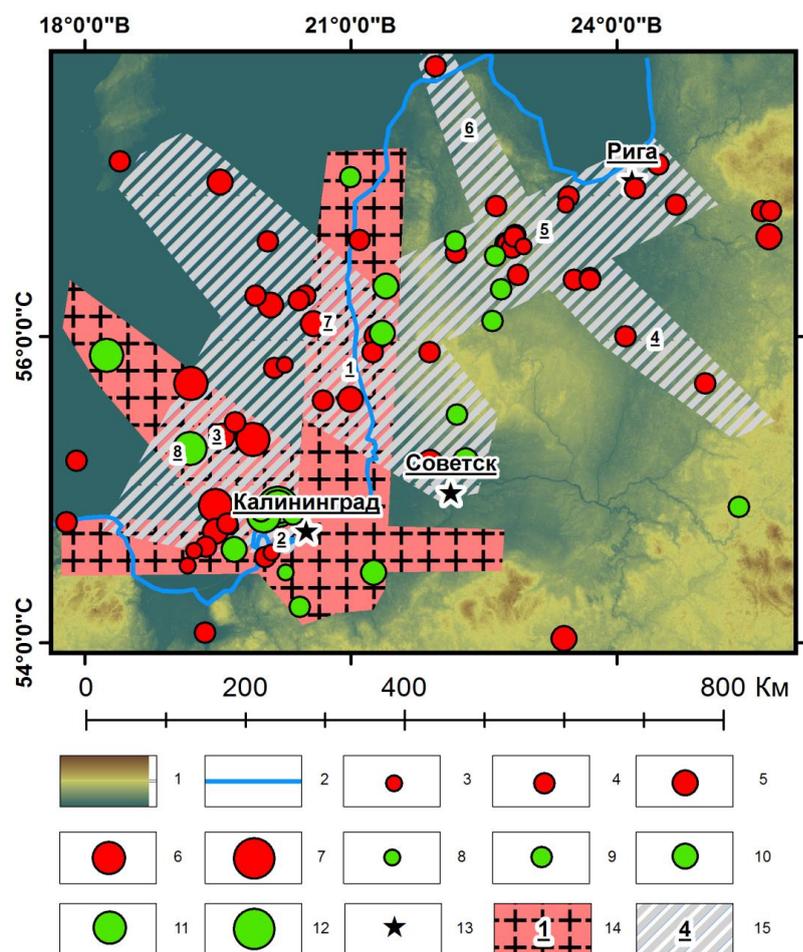
Установлено, что эпицентры практически всех землетрясений осадочного чехла расположены в пределах областей повышенных значений вероятности формирования новейших разрывов. Существует численная корреляция между плотностью эпицентров землетрясений и вероятностью формирования новых разрывов (коэффициент корреляции Пирсона составляет 70%), а также между сейсмической энергией и вероятностью формирования новых разрывов (коэффициент корреляции Пирсона 58%).

#### 4.2.4. Схема зон возможных очагов землетрясений

По картам вероятности формирования новых разрывов и плотности эпицентров землетрясений выделены 8 зон ВОЗ (3 в фундаменте и 5 в осадочном чехле Балтийской синеклизы) (рис. 3). В фундаменте установлены две ортогональные зоны (Береговая и Южно-Калининградская), возможная максимальная магнитуда в их пределах оценивается в 4,5. Размеры субмеридиональной Береговой зоны (1) составляют около 490×115 км, субширотной Южно-Калининградской (2) - 555×70 км. Третья, Калининградская зона, ориентирована в северо-западном направлении с  $M_{\max}=5,5$ . Основанием для установления  $M_{\max}$  служат сейсмические события, приведенные в Расширенном каталоге [Сейсмоструктура..., 2009].

В осадочном чехле выделены следующие зоны. Вильнюсская зона (4), ориентированная в северо-западном направлении, длиной почти 290 км и шириной до 90 км, с максимально возможной магнитудой 3,4. Рижско-Советская зона (5), вытянутая в северо-восточном направлении, с максимальной магнитудой 3,5, длиной 400 км и шириной до 350 км. Рижская зона ВОЗ (6), вытянутая в северо-северо-западном направлении, длиной 215 км и шириной 65 км, с максимальной магнитудой 3,3. Советско-Балтийская (7) зона ВОЗ с максимальной магнитудой 4,1, также ориентированная в северо-западном направлении (длина - 645 км, ширина - до 185 км). Гданьская зона (8), вытянутая в север-северо-восточном направлении, с максимальной магнитудой 4,9, длиной 260 км и шириной 190 км. Выделенные зоны ВОЗ являются региональными, их расположение хорошо согласуется с данными Е.А. Рогожина и его коллег [2014б] и С.А. Несмеянова [Сейсмоструктура..., 2009]. Так, расположение Южно-Калининградской, Калининградской и Гданьской зон ВОЗ согласуются с активными разрывными нарушениями третьего порядка, а

Вильнюсская, Рижско-Советская и Рижская зоны ВОЗ соответствуют активным разрывным нарушениями второго порядка, а именно Шауляй-Гомельской шовно-разрывной и Лиепайско-Псковской шовно-антиклинарной мелкоблоковой погребенным активизированным структурам [Сейсмогеология..., 2009]. Это означает, что проведенные исследования позволили подтвердить обоснованность выделения зон ВОЗ независимым методом, а также дополнить существующие схемы.



**Рис. 3** Схема зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) Калининградской области и сопредельных территорий: 1 — высотные отметки рельефа (от 0 до 350 м), 2 — береговая линия, 3-7 магнитуды землетрясений, произошедших в осадочном чехле на глубинах до 5 км : 3 —  $1 \leq M \leq 2$ , 4 —  $2 < M \leq 3$ , 5 —  $3 < M \leq 4$ , 6 —  $4 < M \leq 5$ , 7 —  $5 < M \leq 5.1$ , 8-12 магнитуды землетрясений, произошедших в фундаменте на глубинах 5-25 км : 8 —  $1 \leq M \leq 2$ , 9 —  $2 < M \leq 3$ , 10 —  $3 < M \leq 4$ , 11 —  $4 < M \leq 5$ , 12 —  $5 < M \leq 5.1$ , 13 — города, 14 — зоны ВОЗ в фундаменте, 15 — зоны ВОЗ в осадочном чехле. Цифрами обозначены зоны ВОЗ: 1 — Береговая, 2 — Южно-Калининградская, 3 — Калининградская, 4 — Вильнюсская, 5 — Рижско-Советская, 6 — Рижская, 7 — Южно-Калининградская, 8 — Гданьская.

**Выводы.** Методом структурно-геоморфологического анализа выделены крупные линеаменты, интерпретируемые как предполагаемые новейшие разрывные нарушения. Компьютерное геодинамическое моделирование позволило установить сдвиговое поле напряжений в фундаменте Балтийской синеклизы с ориентировкой оси сжатия в  $330^\circ$ , которому подчиняются деформации осадочного чехла. В результате этого воздействия в чехле образуется обстановка растяжения с ориентировкой субгоризонтальной оси растяжения в  $330^\circ$ . Проведенный анализ сейсмичности позволил разделить сейсмические режимы в фундаменте и осадочного чехла, а также выделить 8 зон ВОЗ для данной территории.

### 4.3. Воронежская антеклиза

Согласно [Новый..., 1977], одним из сильнейших описанных сейсмических событий на территории Воронежской антеклизы является землетрясение 21.07.1825 г., эпицентр которого располагался в районе г. Павловска. Магнитуда этого события оценивается  $3,6 \pm 0,7$ . Это значение является достаточно большим для платформенной территории. Детальный сейсмический мониторинг проводится с 1998 г. В результате него установлено [Надежка и др., 2010; Ефременко, 2011; Ежова и др., 2013], что на данной территории возможны землетрясения 9-го энергетического класса (по шкале MSK-64), который соответствует  $M \approx 3$ . Результаты этих наблюдений позволяют сделать вывод об активной (по меркам древних платформ) сейсмичности региона.

#### 4.3.1. Геологическое строение

В тектоническом отношении изучаемая территория делится на два структурных этажа: *нижний*, представленный сложно дислоцированными метаморфизованными породами, пронизанными интрузивными образованиями различного состава, архейско-раннепротерозойского возраста, и *верхний*, представленный преимущественно осадочными отложениями позднепротерозойского, фанерозойского и четвертичного возраста, которые залегают субгоризонтально [Кузьмин и др., 2015].

Кровля нижнего структурного этажа, являющегося поверхностью кристаллического фундамента, залегает на разных глубинах: так, в южной части она находится на глубинах - 250 м, а в районе Пачелмского авкалогена она достигает отметок в -4 500 м.

В тектоническом отношении, фундамент исследуемой территории делится на следующие мегаблоки (с северо-запада на юго-восток): Могилевский, Брянский, Курский, Хоперский и Волгоградский. Курский и Хоперский мегаблоки разделяет Лосевская шовная зона. Все мегаблоки разбиты разрывными нарушениями.

#### 4.3.2. Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность

Исследуемая территория располагается в пределах нескольких крупных неотектонических структур (с запада на восток): Смоленской, Днепрово-Деснинской, Среднерусской, Окско-Донской и Приволжской [Трегуб, 2005, Ежова и др., 2010]. Они представляют собой активизированные докембрийские морфоструктуры, для которых характерна широтная зональность. Днепрово-Деснинский (опущенный), Среднерусский (приподнятый) и Окско-Донской (опущенный) мегаблоки являются отражением Брянского, Курского и Хоперского мегаблоков в кристаллическом фундаменте [Ежова и др., 2013].

Линейные прогибы, разделяющие неотектонические поднятия, тесно связаны с зонами крупных разрывных нарушений в кристаллическом фундаменте. В современном рельефе им соответствуют речные долины с широким спектром неогеновых и четвертичных террас [Трегуб, 2005; Панина и др., 2016].

При анализе сейсмичности были рассмотрены материалы, полученные лабораторией

сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива за интервал времени с 1998. Мониторинг проводился с использованием местной сейсмической сети, состоявшей из семи цифровых и одной аналоговой станции [Надежка и др., 2010; Ефременко, 2011]. Отметим, что для каждого землетрясения, произошедшего на территории Воронежского массива, указан его энергетический класс. Для того чтобы объединить результаты этого сейсмического мониторинга с данными других каталогов [Сейсмологический..., 2019; Сейсмологический..., 2020] был произведен пересчет энергетического класса в энергию, а затем в магнитуду по следующим формулам:  $Ks = lgE$  [Сторчеус, 2008]  $lgE = 4,8 + 1,5Ms$ ,  $lgE = -1,2 + 2,4mb$  (предложены Рихтером) и  $mb = 2,3 + 0,63Ms$  (зависимость Гутенберга-Рихтера) [Gutenberg, Richter, 1956; Захаров, Смирнов, 2016], где  $Ks$  – энергетический класс землетрясения,  $E$  – энергия землетрясения (в Дж),  $Ms$  – магнитуда по поверхностным волнам,  $mb$  – магнитуда по объемным волнам. Путем преобразований получаем зависимость  $Ks + 1,2 = 2,4(2,3 + 0,63Ms)$ , в результате которой получаем, что  $Ms = \frac{Ks+1,2-2,3}{0,63}$ . На данной территории было зарегистрировано 412 землетрясения [Сейсмический..., 2020б; Землетрясения..., 2007]. Отмечено неравномерное пространственное распределение эпицентров землетрясений на территории Воронежской антеклизы. Эпицентры землетрясений северной группы образуют выпуклую на север дугу, в то время как эпицентры южной группы формируют крупные рои, простирающиеся в юго-восточном направлении. Эти же группы различаются характером сейсмичности: так, для северной группы характерно более частое возникновение землетрясений относительно высоких магнитуд ( $M=3-3,5$ ). Повторяемость северной группы землетрясений описывается уравнением  $Lg(\frac{N}{T}) = -0,87(\pm 0,13)M + 1,93(\pm 0,27)$ ,  $R_c=0,96$ ,  $R^2=0,93$ ,  $F_c=44,7$ , повторяемость землетрясений южной группы –  $Lg(\frac{N}{T}) = -0,82(\pm 0,16)M + 1,82(\pm 0,34)$ ,  $R_c=0,94$ ,  $R^2=0,89$ ,  $F_{ю}=25,4$ , повторяемость землетрясений в пределах всей Воронежской антеклизы описывается  $Lg(\frac{N}{T}) = -0,84(\pm 0,15)M + 2,15(\pm 0,32)$ ,  $R_c=0,95$ ,  $R^2=0,9$ ,  $F=29,89$  (рис. 1). Критические значения для регрессий одинаковы ( $F_{крит}=10,12$ ).

Анализ сейсмичности позволил сделать вывод о ее взаимосвязи со структурами рельефа. Так, большинство сейсмических событий тяготеет к локальным впадинам, а часть эпицентров землетрясений – к сводовым частям локальных новейших поднятий, выделенных при структурно-геоморфологическом анализе. Эти данные хорошо согласуются с ранее полученными результатами других исследователей. Так, в работе И.Т. Ежовой и ее коллег [2010] говорится о связи пространственного распределения эпицентров землетрясений с линейными неотектоническими прогибами неоген-четвертичного возраста, а наличие большого количества разноранговых новейших поднятий, выделенных Н.И. Корчугановой и ее коллегами [2012], может свидетельствовать о возможности накопления

напряжений на границах новейших структур (блоков), которые потом проявляются в виде сейсмической активности.

Для северного участка Воронежской антеклизы, как области, в которой с большей частотой возможны землетрясения с  $M \geq 3$ , выполнено структурно-геоморфологическое дешифрирование, позволившее установить основные особенности пространственного рисунка «слабых» зон. Проведенный анализ построенной розы-диаграммы показал, что в пределах рассматриваемой территории преобладают «слабые» зоны субмеридиональной, диагональной (северо-западной и северо-восточной) и субширотной ориентировки (в порядке уменьшения значимости). Установлено, что ряд разломов фундамента находит прямое отражение в рельефе [Кузьмин и др., 2015; Зайцев и др., 2016; Зайцев и др. 2017; Панина и др., 2017]. Этот факт является одним из аргументов в пользу их геодинамической активности. Данные о геометрии и расположении таких разломов были в дальнейшем использованы при проведении компьютерного моделирования.

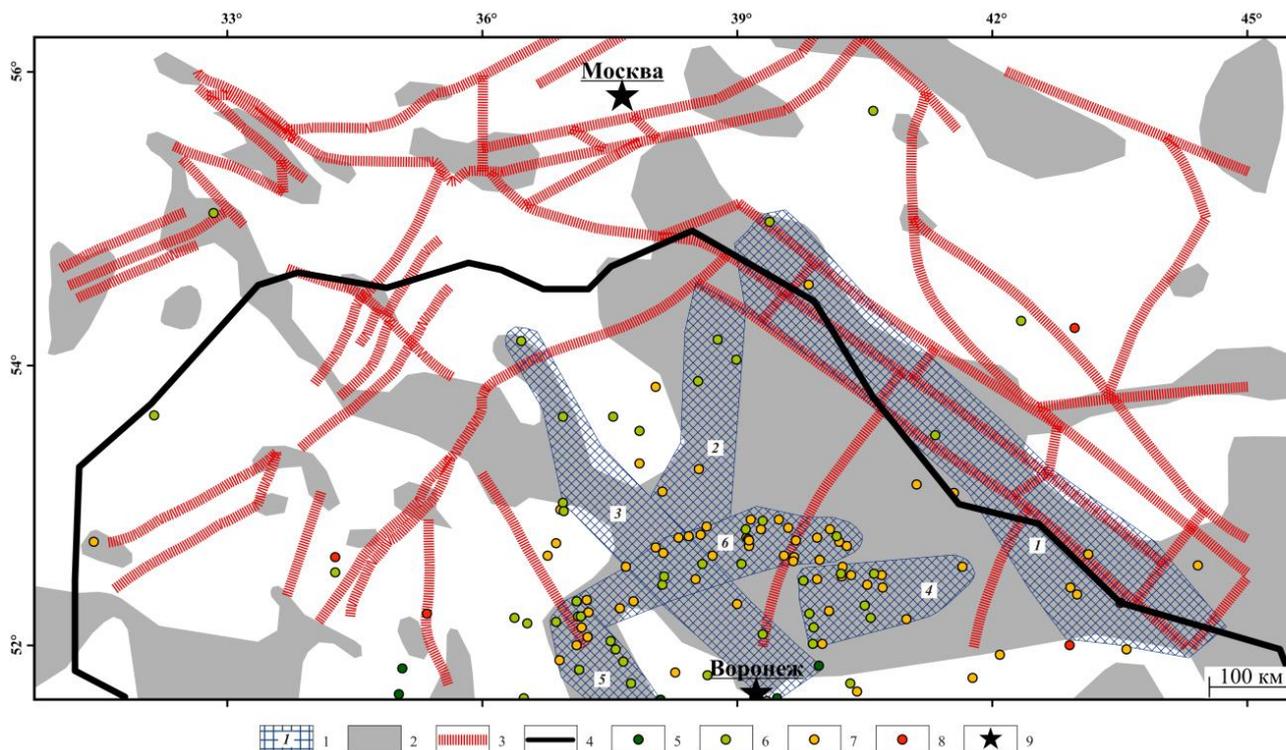
#### 4.3.3. Компьютерное моделирование новейшей геодинамики

Компьютерное моделирование новейшей геодинамики северной части Воронежской антеклизы показало, что она находится в сдвиговом поле напряжений, с ориентировкой оси сжатия по азимуту  $335^\circ$ . Это подтверждается численной корреляцией между плотностями эпицентров землетрясений и вероятностью формирования новых разрывов (коэффициент Пирсона равен 41%). Отметим, что исследуемая область является уже третьей в пределах Восточно-Европейской платформы, в фундаменте которой сохраняется ориентировка оси сжатия в северо-западном направлении. Объяснением данного напряженного состояния Воронежской антеклизы является возможное наложение влияний Кавказа [Копп, 2000] и Урала [Зыков, Полещук, 2016], совместное воздействие которых приводит к образованию северо-западной оси сжатия. Также существует мнение о том, что Прикаспийская впадина может перекрывать или снижать воздействие вышеуказанных складчатых сооружений на структуры, расположенные в центральной части Восточно-Европейской платформы [Макаров, 1996; Юдахин и др., 2003]. Исходя из их расположения относительно Воронежской антеклизы, можно предположить, что влияние впадины будет приводить к возникновению обстановки северо-западного сжатия [Зыков, 2004].

#### 4.3.4. Схема зон возможных очагов землетрясений

По результатам компьютерного моделирования выделены пять зон ВОЗ (рис. 4, табл. 3). Шестая, Курско-Липецкая зона, выделена на основании следующих критериев: 1) пространственного рисунка эпицентров землетрясений, 2) приуроченности землетрясений к границам неотектонических структур, 3) приуроченности землетрясений к градиентным границам гравитационного поля, о чем говорится в работе М.А. Ефременко [2011]. Часть выделенных зон ВОЗ соответствует тектоническим структурам. Так, Пачелмская зона соответствует одноименному авлакогену, Северо-Воронежская – центральной части

Лосевской шовной зоны, ограниченной разрывными нарушениями первого порядка [Землетрясения..., 2007], Липецкая зона приурочена к границе двух новейших поднятий с умеренной интенсивностью движения: Лебедянь-Липецкой и Орловско-Тульской [Соколов, 2013]. Тербунскую зону можно соотнести с локальными поднятиями в пределах Кшень-Оскольского блока третьего ранга в пределах центральной части Среднерусского сегмента Воронежской антеклизы [Трегуб, 2001]. Липецкая, Тербунская, Курско-Липецкие, Пачелмская и Калужско-Елецкая зоны ВОЗ совпадают с геодинамическими зонами неоген-четвертичных движений [Ефременко, 2011].



**Рис. 4** Схема зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) для северного склона Воронежской антеклизы и сопредельных территорий. 1 — зоны ВОЗ, выделенные в фундаменте (1 — Пачелмская, 2 — Липецкая 3 — Калужско-Елецкая, 4 — Северо-Воронежская, 5 — Тербунская, 6 — Курско-Липецкая); 2 — области формирования новых разрывов; 3 — выраженные в рельефе разломы фундамента по [Кузьмин и др., 2015], используемые при компьютерном моделировании; 4 — северная граница Воронежской антеклизы; 5-8 — землетрясения (по [Землетрясения..., 2007; Сейсмологический..., 2020]): 5 — с  $M_s \leq 1$ ; 6 —  $1 < M_s \leq 2$ ; 7 —  $2 < M_s \leq 3$ ; 8 —  $3 < M_s$ , 9 — Крупные населенные пункты.

**Таблица 3** Краткое описание зон ВОЗ северного склона Воронежской антеклизы.

№ зоны ВОЗ	Название зоны	Размеры, км×км	$M_{\max}$
1	Пачелмская	825×160	3,8
2	Липецкая	324×74	2,7
3	Калужско-Елецкая	620×100	2,7
4	Северо-Воронежская	2220×96	2,7
5	Тербунская	135×81	2,4
6	Курско-Елецкая	347×76	3,2

**Выводы.** Проведенный структурно-геоморфологический анализ позволил предположить активность большинства разрывных нарушений фундамента, которые выражены в рельефе в виде крупных «слабых» зон. Установлена взаимосвязь между

новейшими структурами, выраженных в рельефе и пространственным распределением землетрясений. Проведенное компьютерное моделирование позволило установить в фундаменте новейшее сдвиговое поле напряжений с ориентировкой оси сжатия в  $335^\circ$ , а также выявить 6 зон ВОЗ.

#### 4.4. Волго-Уральская антеклиза

Волго-Уральская антеклиза располагается в восточной части Восточно-Европейской платформы. На востоке граничит с Предуральским краевым прогибом, на юге - с Прикаспийской синеклизой, на юго-западе - с Воронежской антеклизой, на западе - с Московской синеклизой и на севере - с Мезенской синеклизой. Случившиеся здесь землетрясения, такие как Сыктывкарское 1939 г с  $M \approx 4,5$  [Землетрясения..., 2007] дают основание рассматривать этот участок платформы как сейсмоопасный.

##### 4.4.1 Геологическое строение

Фундамент антеклизы сложен архейскими и протерозойскими гнейсами и гранито-гнейсами, который перекрыт мощной толщей осадочного чехла и разбит системой глубинных разломов на крупные блоки. Сам фундамент погружается в южных и юго-восточных румбах. В этих направлениях увеличивается и мощность осадочного чехла платформы от 1700 м на южном склоне Татарского свода до 6 км и более - на северной бортовой части Прикаспийской впадины. Глубина погружения фундамента в Предуральском прогибе достигает 8-16 км [Короновский, 2011]. Осадочный чехол представлен терригенными породами палеозой-мезозойского возраста — песчаниками, аргиллитами, глинами, мергелями и т.д.

##### 4.4.2. Современная сейсмическая активность

На территории Волго-Уральской антеклизы с 1798 по 2020 года произошло 73 землетрясения. Анализ пространственного распределения землетрясений показал, что наибольшая сейсмичность характерна для северной части антеклизы, в частности, для Кажимского авлакогена, с которым связано одно из сильнейших зарегистрированных событий, случившееся 13.01.1939, ( $M=4,5$ ) [Землетрясения..., 2007]. На основании имеющихся данных построен график повторяемости для данного участка Восточно-Европейской платформы. Этот график (рис. 2) описывается следующим уравнением  $Lg\left(\frac{N}{T}\right) = -0,60(\pm 0,07)M + 0,91(\pm 0,26)$ ,  $R_c=0,953$ ,  $R^2=0,9$ ,  $F=69,85$  и  $t=5,43$  при  $F_{\text{крит}}=5,59$  и  $t_{\text{крит}}=2,36$ . На представленном графике видно, что землетрясение с  $M=4,5$  «выбивается» из общего тренда. Вероятнее всего, оно является уникальным, и повторяемость подобных событий не может быть описана приведенной выше регрессионной моделью и требует специального подхода к своему изучению. При решении этого линейного уравнения получаем, что землетрясения с  $M=5-5,5$  происходят на рассматриваемой территории раз в 245 лет, а с  $M=1-1,5$  – приблизительно один раз в год. Большинство землетрясений мелкофокусные, глубины гипоцентров располагаются на

отметках до 20 км.

#### 4.4.3. О новейших движениях на территории Волго-Уральской антеклизы

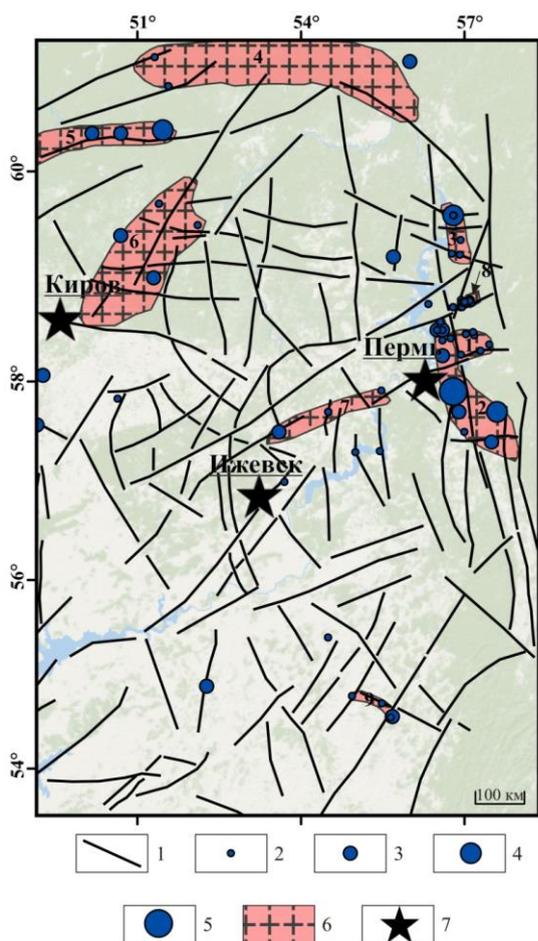
В данном разделе приведены результаты морфометрических исследований. На основании разности базисных поверхностей водотоков 1-го и 2-го порядка, крутизны склонов и максимальной кривизны рельефа было установлено, что наибольшие амплитуды новейших движений приурочены к восточной части антеклизы, для которой характерна большая сейсмичность.

#### 4.4.4. Компьютерное геодинамическое моделирование новейшей геодинамики

Геодинамическое моделирование территории Волго-Уральской антеклизы показало, что плотность эпицентров землетрясений в этой области коррелирует с вероятностью формирования новых разрывов в сдвиговом поле напряжений с ориентировкой оси сжатия в  $90^\circ$  (коэффициент Пирсона равен 0,28) [Агибалов и др, 2021a]. Обоснованность выбора ориентировок внешних главных нормальных осей напряжений подтверждается данными М.Л. Коппа и его коллег [2017].

#### 4.4.5. Схема зон возможных очагов землетрясений

По результатам моделирования выделены 9 зон ВОЗ (рис. 5). Почти все зоны ВОЗ приурочены к окончаниям крупных «линеаментов» или границам авлакогенов. Припермская (1) зона ВОЗ простирается в восток-северо-восточном направлении с  $M_{\max}=3,5$  и размерами  $90 \times 57$  км. Пермская (2) зона вытянута в северо-западном направлении с  $M_{\max}=5,8$  и размерами  $266 \times 77$  км. Геологически она связана с восточной границей Калтасинского авлакогена. Предуральская (3) зона простирается также в меридиональном направлении и находится у западной границы Предуральского прогиба.  $M_{\max}=5,2$ , а размеры  $130 \times 46$  км. Присыктывкарская зона (4), размерами  $614 \times 114$  км и  $M_{\max}=3,3$  преимущественно субширотная. Геологически она связана с Кажимским авлакогеном и северной границей Волго-Уральской антеклизы. Кирово-Сыктывкарская зона (5) также ориентирована субширотно,  $M_{\max}=5$  и имеет размеры  $375 \times 50$  км. С этой зоной связано землетрясение 1939 года, произошедшее на западном крыле Кажимского авлакогена. Кажимская зона ВОЗ северо-восточного простирания (6) с  $M_{\max} = 4,3$  связана с южной частью одноименного авлакогена, а ее линейные размеры достигают  $370 \times 135$  км. Ижевско-Пермская (7) зона простирается в северо-восточном направлении, ее размеры —  $270 \times 40$  км,  $M_{\max}=3,7$ . Яринская (8) зона субизометричная ( $30 \times 35$  км), имеет  $M_{\max}= 3,5$ . Бирская (9) зона ориентирована в северо-западном направлении, имеет размеры  $100 \times 10$  км и  $M_{\max}=3,8$ . В целом полученные результаты существенно дополняют данные Ю.В. Баранова [2016].



**Рис. 5** Схема зон ВОЗ Волго-Уральской антеклизы. 1 – разломы фундамента и «слабые» зоны, используемые при моделировании (по [Агибалов и др., 2021а] с изменениями); 2-5 – эпицентры землетрясений (2 – с  $M \leq 3$ , 3 –  $3 < M \leq 4$ , 4 –  $4 < M \leq 5$ , 5 –  $5 < M \leq 6$ ); 6 – зоны ВОЗ в фундаменте антеклизы; 7 – города. Цифрами показаны зоны ВОЗ

**Выводы.** На территории Волго-Уральской антеклизы установлено сдвиговое поле напряжения с субширотной осью сжатия. Проведенное моделирование позволило выделить 9 зон ВОЗ, а построенный график повторяемости — скорректировать сейсмический прогноз.

### Заключение

В результате выполнения настоящей работы получены новые данные о сеймотектонике ВЕП:

1. Анализ землетрясений, произведенный на основе сводного сейсмического каталога, составленного автором на базе международных и региональных, позволил выделить наиболее сейсмоактивные области Восточно-Европейской платформы: Фенноскандию, Балтийскую синеклизу, Воронежскую и Волго-Уральскую антеклизы. Меньшей представительностью данных отмечены территории Мезенской синеклизы, Прикаспийской синеклизы и Украинского щита.

2. По результатам проведенного компьютерного геодинамического моделирования на территорию Фенноскандии была предложена схема зон ВОЗ, состоящая из тринадцати наименований, была проведена оценка максимальных магнитуд этих зон. Было установлено, что эти зоны реализуются в разных полях напряжений.

3. Компьютерное геодинамическое моделирование позволило установить два типа напряженного состояния, инициирующих сейсмичность в пределах Балтийской синеклизы: 1) сдвиговое поле в кристаллическом фундаменте (ориентировка субгоризонтальной оси сжатия –  $330^\circ$ ) и, подчиненное ему, 2) соосное поле растяжения (субгоризонтальная ось растяжения –  $330^\circ$ ). Выделено 3 зоны ВОЗ в фундаменте и 5 в осадочном чехле

4. При геодинамическом моделировании северного склона Воронежской антеклизы использовалась только одноярусная модель (фундамент) ввиду отсутствия мощного осадочного чехла на данной территории. На основе результатов моделирования было выделено шесть зон ВОЗ в фундаменте данной территории.

5. На территории Волго-Уральской антеклизы было выделено 9 зон ВОЗ, которые были получены по результатам компьютерного геодинамического моделирования. Установлено, что наиболее вероятный механизм, описывающий локализацию землетрясений, является сдвиговое поле напряжений с субширотной осью сжатия.

## 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

### 25.00.03 – «Геотектоника и геодинамика»

- 1) *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. Т. 8. №4. 2017. С. 791-807 (**0,63 авторского листа, 0,93 п.л., личный вклад – 25%, импакт-фактор в РИНЦ 0,871**).
- 2) *Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А.* Сравнительный анализ новейшей геодинамики Балтийской синеклизы и северного склона Воронежской антеклизы // Геодинамика и тектонофизика. Т. 12. №4. 2021б. С. 951-968. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0565> (**0,98 авторского листа, 1 п.л., личный вклад – 33,3%, импакт-фактор в РИНЦ 0,871**).
- 3) *Сенцов А.А., Агибалов А.О.* Выделение зон возможных очагов землетрясений Фенноскандии по данным анализа сейсмичности и компьютерного геодинамического моделирования // Вестник МГУ. Серия 4: Геология. №1. 2021. С. 15-22 (**0,61 авторского листа, 0,4 п.л., личный вклад – 50%, импакт-фактор в РИНЦ 0,763**).
- 4) *Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Полещук А.В., Мануилова Е.А.* Морфометрические параметры рельефа и локализация месторождений углеводородов Волго-Уральской антеклизы // Вестник Московского университета. Серия 5: География. Москва. Изд-во МГУ. 2021а. №.4. С. 116-128 (**1,12 авторского листа, 0,7 п.л., личный вклад – 20%, импакт-фактор в РИНЦ 1,031**).

### Иные публикации

- 5) *Агибалов А.О., Зайцев В.А., Мануилова Е.А., Мошкин И.В., Сенцов А.А.* О влиянии неотектонических движений на особенности локализации месторождений нефти и газа Волго-Уральской антеклизы // Динамическая геология. Электронный научно-образовательный журнал. Москва. 2020. № 2. С. 125-137 (**0,1 авторского листа, 0,7 п.л., личный вклад – 20%**).
- 6) *Зайцев В.А., Панина Л.В., Мануилова Е.А., Сенцов А.А.* Современные методы и результаты изучения неотектоники центральной части Восточно-Европейской платформы / Труды всероссийской научной конференции "Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей" // М.: Издательство "Перо". 2016. С. 49-55 (**0,15 авторского листа, 0,27 п.л., личный вклад – 25%**).
- 7) *Панина Л.В., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Агибалов А.О.* Неотектоника центральной части Восточно-Европейской платформы // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. Т. 91. № 4-5. 2016. С. 51-60 (**0,23 авторского листа, 0,4 п.л., личный вклад – 25%, импакт-фактор в РИНЦ 0**).
- 8) *Зайцев В.А., Панина Л.В., Сенцов А.А.* Структурно-геоморфологические исследования центральной части Русской плиты // Тектоника современных и древних океанов и их окраин. Материалы XLIX Тектонического совещания, посвященного 100-летию академика Ю.М. Пуцаровского. Москва. 2017. Т. 2. С. 177-180 (**0,1 авторского листа, 0,2 п.л., личный вклад – 33,3%**).
- 9) *Панина Л.В., Зайцев В.А., Мануилова Е.А., Агибалов А.О., Сенцов А.А.* Новейшая тектоника Восточно-Европейской платформы как отражение деформации фундамента // Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей. Москва. 2016а. С. 22-26 (**0,12 авторского листа, 0,23 п.л., личный вклад – 20%**).
- 10) *Полещук А.В., Маркин А.Г., Прянишников К.Г., Сенцов А.А.* О возможности привлечения данных по изменению нормального хода роста растительности для оценки возраста современных движений Онежской структуры Балтийского щита / Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты. Материалы XLVII Тектонического совещания // М.: ГЕОС. 2015. Т.2. С. 40-43 (**0,1 авторского листа, 0,2 п.л., личный вклад – 25%**).

- 11) **Сенцов А.А.** Использование данных о временных вариациях гравитационного поля для уточнения прогноза маломagnitudeных землетрясений по времени на примере Балтийского щита и Воронежской антеклизы // Труды всероссийской научной конференции "Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей". Москва, 24 – 26 мая 2016 г. Москва. 2016. С. 212-216 (**0,12 авторского листа, 0,23 п.л., личный вклад – 100%**).
- 12) **Сенцов А.А.** Предварительные результаты анализа сейсмической активности Восточно-Европейской платформы // Динамическая геология. Электронный научно-образовательный журнал. Москва. 2021. №.1 С. 93-97 (**0,16 авторского листа, 0,23 п.л., личный вклад – 100%**).
- 13) **Сенцов А.А.** Современная геодинамика и зоны возможных очагов землетрясений территории Фенноскандинавского щита, установленные с помощью компьютерного моделирования // Проблемы тектоники континентов и океанов. Материалы LI тектонического совещания. Москва. 2019. Т.2. С. 228-233 (**0,24 авторского листа, 0,27 п.л., личный вклад – 100%**).
- 14) **Сенцов А.А., Агibalов А.О.** Сейсмичность Фенноскандинавского щита и её связь с геоморфологическим строением региона // Материалы всероссийской научной конференции «Восточно-Европейская платформа: геология, неотектоника, геоморфология». Москва. 2018. С. 102-103 (**0,1 авторского листа, 0,05 п.л., личный вклад – 50%**).
- 15) **Сенцов А.А., Агibalов А.О., Зайцев В.А.** Особенности сейсмической активности Восточно-Европейской платформы // Материалы всероссийской научной конференции «Современные проблемы динамической геологии». Москва. 2021б. С. 114-119 (**0,1 авторского листа, 0,27 п.л., личный вклад – 33,3%**).
- 16) **Сенцов А.А., Агibalов А.О., Рогожин Е.А.** Анализ сейсмичности прибрежных районов Фенноскандии и Баренцевоморского региона // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики [электронный ресурс]: сборник науч. материалов Всерос. конф. с междунар. участием, посвящен. 90-летию со дня рождения акад. Николая Павловича Лавёрова. Архангельск. 2021а. С. 825-828 (**0,23 авторского листа, 0,2 п.л., личный вклад – 33,3%**).
- 17) **Сенцов А.А., Зайцев В.А., Агibalов А.О.** О возможности применения данных системы GRACE для прогноза маломagnitudeных платформенных землетрясений // Динамическая геология. Электронный научно-образовательный журнал. Москва. 2020. № 2. С. 138-145 (**0,1 авторского листа, 0,41 п.л., личный вклад – 33,3%**).
- 18) **Сенцов А.А., Зайцев В.А., Полещук А.В., Бардышев Г.П.** Новейшая геодинамика сейсмоактивных областей Восточно-Европейской платформы (на примере Балтийской синеклизы, Фенноскандинавского щита и Воронежской антеклизы) // Материалы всероссийской научной конференции «Прикладные аспекты динамической геологии», посвященной 110-й годовщине со дня рождения Г.П. Горшкова (1909-1984). Москва. 2019. С. 129-146 (**0,81 авторского листа, 0,97 п.л., личный вклад – 25%**).