

На правах рукописи



Баранов Юрий Валентинович

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН ВОЗМОЖНЫХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
ЗАПАДНОГО ПРИУРАЛЬЯ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТЕКТОНИКА РЕГИОНА И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ	10
1.1. Крупнейшие тектонические структуры.....	10
1.1.1. Восточно-Европейская платформа	10
1.1.2. Волго-Уральская антеклиза	12
1.1.3. Авлакогены исследуемого региона.....	13
1.1.4. Уральская складчатая система	20
1.1.5. Предуральский краевой прогиб.....	22
1.1.6. Печорская плита и Печорская антеклиза	23
1.2. Глубинное строение по данным сейсмических исследований	26
1.2.1. Строение земной коры по данным глубинного сейсмического зондирования.....	26
1.2.2. Строение границы Мохоровичича	35
1.3. Блоковое строение земной коры	37
1.4. Особенности тектонических нарушений, их расположение и время их заложения	39
1.5. Современные вертикальные движения земной коры.....	42
1.6. Мощность нижнего слоя земной коры	45
1.7. Геофизические поля.....	46
2. СЕЙСМИЧНОСТЬ И СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА	54
2.1. Основные этапы развития сейсмического районирования региона.....	54
2.2. Развитие сети сейсмологического мониторинга	57
2.3. Сводный каталог землетрясений.....	65
3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТНОШЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ (АДМИННАТНСА) ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН ВОЗ	78
4. ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН ВОЗМОЖНЫХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗАПАДНОГО ПРИУРАЛЬЯ	84
4.1. Сетевая аналитическая ГИС «ГеоПроцессор 2.0»	84
4.2. Выбор подхода к выделению зон ВОЗ	87
4.3. Выбор зоны влияния тектонических нарушений	90
4.4. Построение карты зон ВОЗ Западного Приуралья.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований

Сейсмические события, вызываемые развитием Уральской складчатой системы, движением Восточно-Европейской платформы, формированием региональных тектонических нарушений, сопровождали всю историю развития Западного Приуралья. Новый подход к изучению современной сейсмичности данного региона, связанный с анализом геофизической и геологической информации, позволяет уточнить строение земной коры и понять происходящие в ней процессы. Современные исследования геофизических и геологических полей, их интегрированный анализ позволяют найти наиболее значимые параметры, связанные с сейсмической активностью, и выделить зоны возможных очагов землетрясений (зоны ВОЗ) сейсмически слабоактивных территорий (Блинова и др., 2012; Баранов, 2016, 2017).

Развитие региональной сети сейсмического мониторинга позволяет наблюдать и анализировать современную природную сейсмическую активность восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающих территорий Урала, выявлять места с наибольшей вероятностью возникновения землетрясений, изучать техногенную сейсмичность на рудниках и шахтах Пермского края (Маловичко и др., 1998). Сбор и систематизация информации о землетрясениях позволяет достаточно быстро накопить материал для выводов о расположении зон возможных очагов землетрясений.

Анализ сейсмической активности позволяет оперативно реагировать на землетрясения, определять их интенсивность и расположение очагов, что необходимо для оценки и ликвидации их последствий.

В связи с развитием горнодобывающих предприятий региона, добычей нефти, калийных и магниевых солей и других полезных ископаемых, прокладкой нефте- и газопроводов, исследование сейсмичности и выделение зон возможных очагов землетрясений является актуальной хозяйственной

задачей (Маловичко и др., 2001). Природные и природно-техногенные сейсмические события, регистрируемые в рудниках, карьерах и на нефтяных месторождениях, в значительной степени влияют на безопасность производства, объемы добычи и даже на саму возможность дальнейшей разработки таких месторождений. Исследование природной и природно-техногенной сейсмичности является необходимой составляющей комплекса мер для обеспечения безопасного и эффективного функционирования горнодобывающих предприятий (Баранов, 2010).

Степень изученности проблемы

К первым исследованиям сейсмичности восточной окраины Восточно-Европейской платформы относятся работы А.П. Орлова и И.В. Мушкетова. В дальнейшем к этой теме обращались З.Г. Вейс-Ксенофонтова и В.В. Попов, которыми был составлен каталог, включивший 40 местных землетрясений за период с 1868 по 1939 гг. с выделением их типов.

В 1940 г. З.Г. Вейс-Ксенофонтова и П.Э. Штеллинг занимались исследованиями землетрясения, произошедшего 17 августа 1914 г., охватившего весь Средний Урал, и сопоставили полученную карту изосейст с геологическим строением региона. Эти же авторы составили первую «Схему сейсмичности Урала».

Проведенные работы носили преимущественно описательный характер, что было связано как с поставленными исследователями задачами, так и с недостаточной изученностью геологии, тектоники и сейсмичности региона.

С 1992 года научными сотрудниками лаборатории природной и техногенной сейсмичности ГИ УрО РАН А.А. Маловичко, Т.С. Блиновой, Р.А. Дягилевым и другими проводится работа по совершенствованию региональной сети сейсмического мониторинга, исследованию региональной природной и техногенной сейсмичности и сейсмическому районированию (Блинова, 2017; Маловичко, 2001; Баранов 2009, 2016). Разработана методика выделения геодинамически неустойчивых зон и построения прогнозных карт максимальных магнитуд возможных землетрясений (Блинова, 2003; Баранов, 2003, 2007).

Первая работа по выделению зон ВОЗ как участков земной коры, в которых возможно возникновение тектонических землетрясений определенной магнитуды, выполненная с помощью исследования исторических и инструментально зарегистрированных землетрясений, тектонических нарушений и других особенностей геологического строения исследуемого региона, была связана с построением комплекта карт «Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97)» (Общее..., 1998). В этой работе были использованы исследования ГИ УрО РАН.

Основа метода сейсмического районирования и выделения зон ВОЗ состоит в переходе от очагов землетрясений в земной коре и мантии к сотрясениям на поверхности Земли и построению зон, соответствующих определенным магнитудам землетрясений. Зачастую очаги землетрясений связаны с областями интенсивных современных тектонических движений земной коры, происходящими на границах крупных геоблоков, платформ и континентов. Прослеживается связь сейсмических явлений с разрывными нарушениями, их размерами и расположением.

Сложное строение земной коры, различная тектоническая активность, разная изученность регионов обуславливают большое количество методов сейсмического районирования, это же относится и к выделению зон ВОЗ. Основные исследования по этим темам отражены в работах Т.С. Блиновой, В.И. Бунэ, А.Д. Завьялова, А.И. Иоффе, Н.А. Логачева, Р.А. Дягилева, Е.А. Рогожина, В.Г. Трифанова, В.В. Удоратина, В.И. Уломова, Н.В. Шебалина, С. Cornel, V. Gao, D. Schwartz, Z. Shi, D. Slejko, S. Wesnousky, Y. Zhang и др., где зоны ВОЗ выделяются на основании разных признаков, по предлагаемым исследователями алгоритмам.

Появление новой геологической и геофизической информации, новых алгоритмов и пакетов программ позволяет впервые применить новый подход к выделению зон ВОЗ для восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающих территорий Урала (Баранов, 2016).

Использование в исследуемом регионе единой системы наблюдений для изучения магнитного и гравитационного поля, глубины залегания поверхности Мохоровичича позволяет повысить качество карт зон ВОЗ и дифференцировать их по значениям магнитуд.

Идея работы состоит в раскрытии связи геофизических полей и их комбинаций, и расположения крупнейших тектонических структур с сейсмической активностью региона.

Объектом исследования являются структуры и геофизические поля региона, включающего восточную окраину Восточно-Европейской платформы, Печорскую плиту и прилегающие территории Урала.

Предметом исследования является связь тектоники и геофизических полей региона с сейсмической активностью.

Целью работы является анализ геофизической и геологической информации для выделения зон возможных очагов землетрясений региона.

Основные задачи исследований

1. Формирование базы данных, на основе анализа которой возможно выявление информативных признаков, используемых для выделения зон возможных очагов землетрясений.
2. Выбор пакета программ, проведение анализа и сопоставления многомерной, многопараметровой и разнородной информации, необходимой для выделения зон возможных очагов землетрясений.
3. Использование комплексного параметра, описывающего соотношение аномального гравитационного и магнитного поля для выделения зон возможных очагов землетрясений.
4. Выделение зон возможных очагов землетрясений по комплексу геолого-геофизических данных для восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающей территории Урала.
5. Сопоставление выделенных зон возможных очагов землетрясений с результатами других исследований сейсмичности региона, выявление отличий и совпадений, выбор дальнейшего направления работ по оценке сейсмического потенциала исследуемого и других регионов.

Методы исследований

Использованы метод натуральных наблюдений и измерений и метод анализа разнородной и многопараметровой информации.

Защищаемые положения

1. Геологические и геофизические параметры: 1) близость к тектоническим нарушениям, 2) горизонтальный градиент гравитационного поля, 3) аномальное магнитное поле, 4) современные вертикальные движения земной коры, 5) мощность нижнего слоя земной коры, 6) глубина залегания поверхности Мохоровичича, выбранные на основе изучения их связи с региональной сейсмичностью, являются наиболее информативными для выделения зон возможных очагов землетрясений исследуемого региона [Блинова, 2012; Баранов, 2011, 2012, 2016].
2. Градиент отношения аномального гравитационного поля и аномального магнитного поля (адмиттанс), является одним из информативных параметров и впервые используется для выделения зон возможных очагов землетрясений [Баранов, 2013, 2016].
3. Зоны возможных очагов землетрясений Западного Приуралья выделены на основании нового подхода к анализу разнородной геолого-геофизической информации. Они позволяют уточнить и детализировать потенциал региона [Баранов 2012, 2015 – 2017; Блинова 2015].

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается значительным количеством сейсмологических наблюдений с использованием отечественного и зарубежного сейсмологического оборудования. Сейсмические события, зарегистрированные региональной сетью мониторинга, локальными сейсмическими сетями и временными сеймопавильонами, сопоставляются с геологическим строением, данными сети геофизической службы РАН и международных сейсмологических сетей. Обработанные результаты и научные выводы опубликованы и используются совместно с результатами работ российских и международных организаций и проверяются дальнейшими исследованиями. Выделенные зоны ВОЗ не

противоречат представлениям о сейсмическом потенциале региона, дополняют и детализируют их.

Научная новизна

1. Создана и проанализирована база разнородных и многопараметровых данных по геолого-геофизическому строению региона. Наиболее важными параметрами, связанными с сейсмической активностью, являются близость к тектоническим нарушениям, современные вертикальные движения земной коры, горизонтальный градиент гравитационного поля, аномальное магнитное поле, мощность нижнего слоя земной коры, глубина залегания поверхности Мохоровичича.
2. Впервые для исследуемого региона получена карта градиента адмиттанса гравитационного и магнитного полей, значения данного параметра использованы для построения зон возможных очагов землетрясений.
3. Впервые с помощью сетевой аналитической геоинформационной системы (ГИС) «Геопроектор 2» выделены зоны возможных очагов землетрясений для сейсмически слабоактивной восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающих территорий Урала.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе впервые использован новый комплексный подход к изучению сложного геологического строения региона, к исследованию геофизических полей и их отношений, данных о тектонике, о движениях земной коры, мощности ее слоев и сейсмичности для выделения зон ВОЗ. Изучение сейсмического потенциала региона, причин и последствий сейсмической активности необходимы для безопасного строительства и добычи природных ресурсов, эксплуатации предприятий и охраны окружающей среды.

Личный вклад автора

При непосредственном участии автора произведена постановка задач, сформирована и обработана база данных, включающая разнородную многопараметровую геологическую и геофизическую информацию, сведения

о тектонике региона, каталоги исторических и современных землетрясений. Проведенный анализ всей информации и использование сетевой аналитической ГИС «Геопроцессор 2» позволил автору получить карты зон возможных очагов землетрясений.

Публикации и апробации работы

По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них три статьи в журнале из перечня ВАК и одна монография.

Основные результаты работ докладывались на научной конференции «Современная сейсмология: достижения и проблемы», Москва, 1998 г, Второй Всероссийской конференции «Геофизика и математика», Пермь, 2001 г, Четвертой Уральской молодежной научной школе по геофизике, Пермь, ГИ УрО РАН, 2003 г, международной конференции «Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов», г. Пермь, 2003 г. и на ежегодных сессиях ГИ УрО РАН с 1998 по 2017 г.

Автор глубоко благодарен за поддержку и помощь в работе научному руководителю, д.т.н. Т.С. Блиновой, чл.-корр. РАН А.А. Маловичко, к.ф.-м.н. Р.А. Дягилеву, к.т.н. Д.Ю. Шулакову и к.т.н. П.Г. Бутырину, а также всем сотрудникам лаборатории природной и техногенной сейсмичности ГИ УрО РАН и сотрудникам Уральского сектора сейсмического мониторинга ГС РАН. Автор признателен за помощь и консультации д.г.-м.н. И.И. Чайковскому, д.г.-м.н. С.Г. Бычкову, к.т.н. А.А. Симанову и сотрудникам лабораторий МГП и ФПОГ ГИ УрО РАН, а также к.г.-м.н. В.В. Удоратину и коллективу сотрудников Института геологии Коми НЦ УрО РАН.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 128 страницах текста, включает 30 рисунков и одну таблицу. Список литературы содержит 195 наименований.

1. ТЕКТОНИКА РЕГИОНА И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

1.1. Крупнейшие тектонические структуры

Исследуемый регион расположен в пределах восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающих территорий Урала. Основные особенности тектоники региона достаточно полно отражены в трудах Е.М. Ананьевой, А.Д. Архангельского, В.В. Белоусова, Н.Г. Берлянд, С.Г. Бычкова, Р. Н. Валеева, Р. А. Гафарова, А.Ф. Грачёва, В.А. Дедеева, Г.Д. Дементьевой, Н.Я. Екидиной, В.Н. Зандера, В.А. Клубова, А.К. Маловичко, Е.Е. Милановского, Д.В. Наливкина, А.В. Никулина, В.М. Новоселицкого, М.И. Островского, В.В. Петропавловского, Л.Н. Розанова, Б.Г. Семёнова, Б.С. Ситдикова, М.А. Уразаева, В.С. Федоровского, Н.С. Шатского, С.А. Шихова, Ю.К. Щукина, Ф.Н. Юдахина, А.Я. Яроша, и др.

Исследуемый регион слагают крупные тектонические структуры: Печорская синеклиза, Волго-Уральская антеклиза и Уральская складчатая система. Эти структуры разделены Тиманской складчатой зоной, Притиманской впадиной и Предуральским краевым прогибом, а также осложнены многочисленными мелкими структурами.

Некоторые из структур изучены с помощью геологосъемочных и геологопоисковых работ, исследования обнажений и горных выработок. Значительно большее число структур выявлено по совокупности косвенных геологических данных, геофизических методов, данных космосъемки и т.д., в особенности это относится к погребенным структурам и к тектоническим нарушениям, которые являются их границами.

1.1.1. Восточно-Европейская платформа

Восточно-Европейская платформа представляет собой консолидированный блок земной коры континентального типа с кристаллическим фундаментом и мощным осадочным чехлом. Консолидация

платформы относится к концу среднего протерозоя, 1750-1650 млн. лет, к позднекарельской тектонической эпохе, хотя частичная переработка происходила и в позднем протерозое. Границы блока определились, в основном, в период от 1400 до 200 млн. лет.

Северо-восточная граница платформы прослеживается между островами Рыбачьим и Средним, вдоль побережья Кольского полуострова, далее через полуостров Канин, вдоль юго-западного склона Тиманского кряжа до Полудова кряжа. На всем этом протяжении граница выражена надвигом байкальского миогеосинклинального складчатого комплекса на древний фундамент эпикарельской платформы. Восточное ограничение платформы проходит в меридиональном направлении от Полудова кряжа, вдоль западной границы Предуральского краевого прогиба до верховьев Эмбы. Далее до Каспийского моря граница простирается на юго-запад, совпадая с Южно-Эмбенской зоной разломов. От Каспийского моря до северо-западного побережья Черного моря граница простирается в субширотном направлении. Начиная с побережья Черного моря на юге Молдавии до южного побережья Балтийского моря граница платформы имеет субмеридиональное простирание и, в дальнейшем, прослеживается вдоль фронта Скандинавских каледонид, замыкаясь возле полуострова Варангер (Хаин, 1977).

Крупнейшими элементами платформы являются Балтийский щит и Русская плита.

Древний кристаллический фундамент Восточно-Европейской платформы образован процессами раннедокембрийской складчатости. Поверхность фундамента погружена на глубину 1-3 километра и перекрыта чехлом преимущественно осадочных пород позднедокембрийского, кембрийского, среднедевонского возраста и более молодых отложений. Складчатое основание имеет раннедокембрийский возраст и сложено глубоко метаморфизированными и гранитизированными образованиями. В фундаменте наиболее распространены комплексы метаморфизированных пород, кристаллических сланцев и гнейсов. На поверхность фундамент

выступает в виде Украинского и Карельского щитов. На восточной окраине платформы фундамент ступенчато погружается, достигая глубины 7-12 километров в пределах Предуральского прогиба. Кристаллический фундамент Восточно-Европейской платформы прослеживается под западным склоном Урала, по крайней мере, до Главного Уральского глубинного разлома. Осадочный чехол характеризует горизонтальное или близкое к нему залегание пород. Положительные и отрицательные структуры имеют весьма пологие края, с падением от десятков минут до 1-5 градусов (Пастырин, 2008).

В прилегающей к Уралу части Восточно-Европейской платформы структурами первого порядка являются антеклизы и синеклизы, внутри которых выделяются структуры второго порядка – мегасводы и мегавпадины, структуры третьего порядка – валы, своды и впадины и мелкие структуры – брахиантиклинали, мульды и депрессии (Соболев, 1983).

1.1.2. Волго-Уральская антеклиза

Волго-Уральская антеклиза расположена в восточной части Восточно-Европейской платформы, к югу от Тиманской синеклизы. Восточный край антеклизы и ее граница с Предуральским краевым прогибом проводится по флексуорообразному уступу. Антеклиза осложняется структурами второго порядка: Верхнекамской впадиной и Камско-Башкирским сводом. На юго-востоке Предуральский прогиб ограничивает восточный склон Волго-Уральской антеклизы. Палеозойский чехол представлен тремя ярусами, среднедевонско-каменноугольный и нижнепермский ярусы погребены под более молодыми пермскими отложениями. Фундамент Волго-Уральской антеклизы сложен породами архейско-протерозойского возраста (Нестеренко, 2012).

Верхнекамская впадина наиболее отчетливо выделяется по пермским отложениям. Она пологая, углы падения краев составляют около 1 градуса. Южная часть впадины, выделена как Бирская седловина, разделяет Пермско-

Башкирский и Татарский своды и включает Карабаевский, Иванаевский, Андреевский, Чекмагушский и Базинский валы (Розанов, 1959).

Камско-Башкирский свод находится к югу от Тиманской антеклизы, отделяясь от нее Предтиманским прогибом, и осложнен Камским сводом, Чермозской седловиной и Пермско-Башкирским сводом.

Участки, связанные в тектоническом отношении с Верхнекамской впадиной, Башкирским сводом, Бымско-Кунгурской моноклиной, Соликамской депрессией и Колвинской седловиной, являются перспективными для разведки месторождений углеводородов (Соснин, 2015).

1.1.3. Авлакогены исследуемого региона

Изучением авлакогенов Восточно-Европейской платформы занимался целый ряд исследователей. По этой проблеме известны труды Т.В. Белоконь, Н.С. Шатского, Р.Н. Валеева, Е.Е. Милановского, В.М. Новоселицкого и др. В целом сходясь в описании общего плана авлакогенов, разные авторы оконтуривают их по-разному. На основании этих исследований и анализа результатов геолого-геофизических работ последних лет составлены схемы расположения авлакогенов центральной и восточной частей Восточно-Европейской платформы (Валеев, 1968, 1969; Милановский, 1983; Шатский, 1964).

Авлакогены Восточно-Европейской платформы в плане образуют пояса субконцентрической формы, радиусы которых постепенно увеличиваются с востока на запад. Самая восточная концентрическая система образуется Камско-Бельским, Кировско-Кажимским (Казанско-Кажимским, Камско-Вятским) и Абдулинским авлакогенами (Блинова, 2003, Валеев и др., 1969, Милановский, 1983, 1987). В осадочном чехле авлакогенам соответствуют выступы и поднятия. Авлакогены, представляющие собой совокупность крупных тектонических нарушений, заложенных и развившихся в различное геологическое время, являются важным объектом для сейсмологических наблюдений. Связь тектонических нарушений, авлакогенов и сейсмической активности является закономерной и подтверждается наблюдениями.

Кировско-Кажимский авлакоген. Исследованию Кировско-Кажимского авлакогена посвящено большое количество работ (Валеев, 1968, 1969; Милановский, 1983, 1987; Новоселицкий, 1971; Петропавловский, 1966; Эринчек, 1995; Удоратин, 2012 и др.). Авлакоген расположен в пределах Кировской области, Республики Марий Эл и Республики Коми. Он является крупной отрицательной структурой, вытянутой в субмеридиональном направлении. Длина структуры более 650 км, ширина меняется от 40 до 150 км. Авлакоген разделен тектоническими нарушениями на отдельные блоки (рис.1.1) (Шаламов, 2001).

В пределах Кировско-Кажимского авлакогена и его обрамления пробурено около 120 глубоких скважин, большинство из которых полностью прошли палеозойский комплекс и вскрыли нижезалегающие отложения венда или рифея, либо архейско-нижнепротерозойский фундамент (Трофимов, 2016).

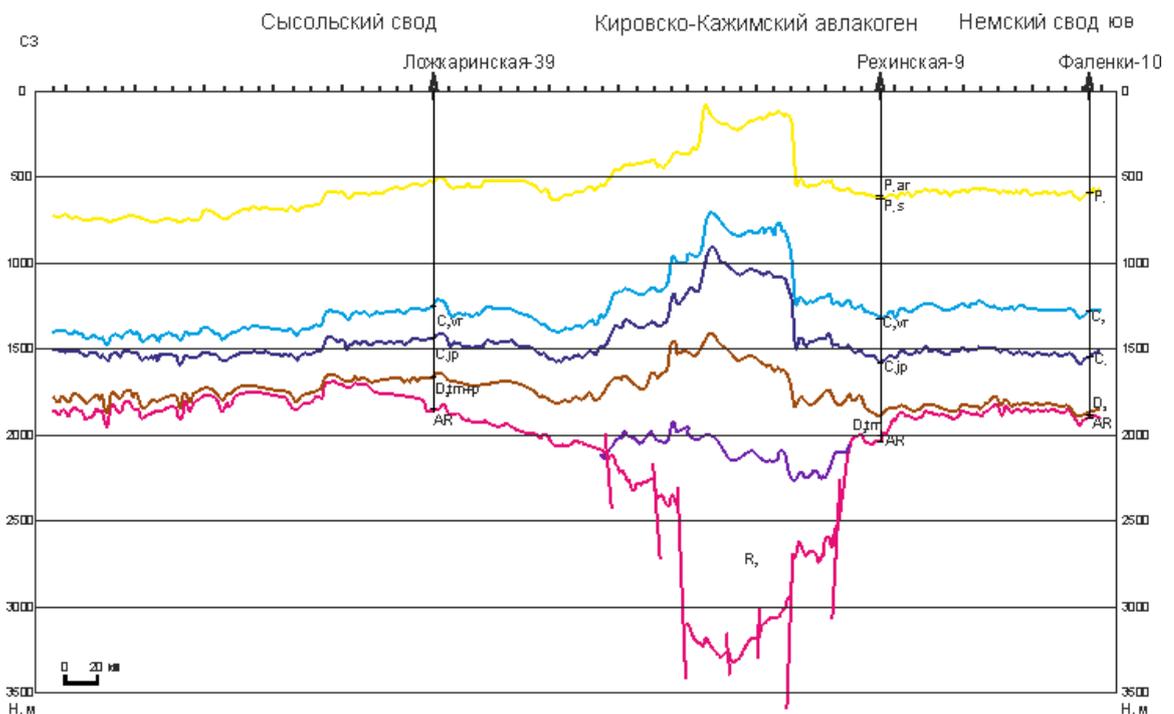


Рис. 1.1. Профиль через Кировско-Кажимский авлакоген (Шаламов, 2001)

Авлакоген имеет позднерифейский возраст заложения, но в среднем и позднем девоне испытывал повторные оседания. Длительное время он оставался основной отрицательной структурой в регионе. С интенсивным

прогибанием в позднем девоне связана вулканическая деятельность и накопление толщи туфогенных пород (Ляшенко, 1970).

К западу от авлакогена расположены Котельнический и Сысольский своды, к востоку Северо-Татарский и Коми-Пермяцкий своды. На севере авлакоген ограничен Вычегодским прогибом, на юге – Волго-Уральской антеклизой (рис.1.2). Структура отчетливо выделяется по низким гипсометрическим глубинам залегания поверхности кристаллического основания и резкому увеличению мощности верхнедевонских отложений. Границы структуры имеют тектоническую природу и в породах кристаллического основания сопровождаются серией тектонических разломов глубокого заложения субширотного, северо-западного и северо-восточного направлений, секущих основание структуры на крупные блоки.

По поверхности фундамента Кировско-Кажимский авлакоген представляет собой глубокий грабен (более 3 км), заполненный терригенными породами верхнего протерозоя и среднего и верхнего девона.

Вершины погребенных сводов, обрамляющих Кировско-Кажимский авлакоген, по поверхности фундамента имеют абсолютные отметки 1,6-1,8 км и разделяются небольшими седловинами (рис.1.1). Таким образом, узкий грабенообразный Кировско-Кажимский авлакоген разделил когда-то единый массив фундамента на два крупных обособленных поднятия – Сысольское и Коми-Пермяцкое. Именно здесь может происходить сброс всех напряжений, накопленных в течение длительного времени в пределах более плотных архейских сводов.

Анализ расположения очагов землетрясений, отмеченных в пределах юга Республики Коми и Кировской области, свидетельствуют об их приуроченности к Кировско-Кажимскому авлакогену, точнее, к зонам сопряжения эшелонированных систем разломов, ограничивающих авлакоген, либо его отдельные грабенообразные сегменты. В неотектоническом плане им, как правило, отвечают участки сочленения структур второго и третьего порядка, испытывающие разнонаправленные новейшие тектонические движения (Удуратин, 2012).



Рис. 1.2. Схема тектонического районирования по поверхности фундамента составлена по материалам Р.Н. Валева, В.М. Проворова, В.В. Удоратина, Н.Н. Носковой и др. (2008 г).

Условные обозначения: 1 – региональные профили МОВС, ГСЗ и МОГТ; 2 – границы тектонических структур: а – рифейских авлакогенов, б – сводов, перегибов, впадин; 3 – административные границы.

Камско-Бельский авлакоген расположен в юго-восточной части исследуемого региона, на восточной окраине Восточно-Европейской платформы. Авлакоген представляет собой крупную отрицательную структуру, разделяющую Пермско-Башкирский и Татарский своды (Ананьин, 1991; Белоусов, 1989; Блинова, 2003; Дружинин, 1976, 1986, 1998; Ивановская, 1988).

Камско-Бельский авлакоген заложен в раннерифейское время. К среднерифейскому времени относятся отложения вулканогенных пород. Мощность заполняющих его терригенных и карбонатных образований достигает 10-12 км. Основным источником обломочного материала для рифейских отложений авлакогена является Татарский свод, сложенный преимущественно архейскими образованиями отрадненской и большечеремшанской серий (Маслов, 2008).

Авлакоген прослеживается от Предтимастья до Верхнекамской впадины, далее до Бирской седловины и на юг до Бельского прогиба, простираясь с юго-запада на северо-восток, примерно до широты Перми и далее, сменив направление на северо-восточное, смыкается с Предуральским краевым прогибом. Северной границей прогиба служит региональная система разломов фундамента северо-восточного простирания, контролирующая развитие рифейских отложений. На востоке прогиб ограничивается Осинцевско-Красноуфимским выступом. Южная граница Камско-Бельского авлакогена четко не очерчена (Белоконь, 2001). По крупному Удмуртскому разлому авлакоген граничит с Татарской системой сводовых поднятий. Авлакоген является сложной структурой, состоящей из блоков и тектонических нарушений различных масштабов, выделяются центральный горст и система прибортовых грабенов. Можно выделить две обособленные впадины: северная – Камская или Осинская и южная – Бельская, разделенные Орйебаш-Татышлинско-Чернушинской зоной приподнятого залегания фундамента, расположенной вдоль границы Башкортостана с Удмуртией и Пермской областью. Как единая структура Камско-Бельский прогиб имеет

протяженность с севера на юг около 700 км при колебаниях ширины от 150 до 250 км (Белоконь, 2001).

Унаследованность современных и неотектонических структур в целом субширотному, северо-западному простиранию Камско-Бельского авлакогена показывает, что именно это направление является главным, долго живущим, проявляющимся в течение большого промежутка времени от 1,6 млрд. лет до современности (Горожанин, 2010).

Авлакоген ограничивают и пересекают несколько глубинных разломов.

Удмуртский глубинный разлом, расположенный на территории Западного Урала, имеет протяженность 240 километров. Возраст разлома определяется как постархейский, при этом разлом проявлял свою активность на протяжении длительного времени. О наличии разлома свидетельствует нарастание мощности рифейских отложений, габбро-норритовые интрузии и значительные рифейские вулканические проявления. Разлом имеет субмеридиональное простирание и ограничивает с востока Татарскую систему сводовых поднятий (Валеев, 1963; Пейве, 1956). Зона разлома прослеживается по геофизическим данным, магнитным максимумам и гравитационной ступени. Разлом является сбросом с амплитудой 1000-1500 м со сложной системой дробления и вторичными разломами диагональных направлений, по которым произошло образование мелких грабенов (Валеев, 1970). Такое сочетание разломов позволяет предположить, что Камско-Бельский авлакоген образовался в зоне раздвига при горизонтальном смещении блоков Татарских сводовых поднятий в западном направлении.

Прикамский глубинный разлом северо-восточного простирания прослеживается вдоль северо-западной границы Альметьевского массива и является главным в Камской системе сдвигов. В восточной части разлом осложнен опережающими разломами и сочленяется с Удмуртским глубинным разломом.

Афансьевский грабен имеет вторичное происхождение и представляет собой осложнение северо-западной границы Камско-Бельского авлакогена. Грабен отображается в виде узких полос по магнитным и гравитационным

данным, подтверждается бурением и сейсмическими исследованиями (Валеев, 1968).

Центральная часть авлакогена разделена на грабены и седловины. Узкий и глубокий Сарапульский грабен расположен вдоль восточной окраины Татарской системы сводовых поднятий. Параллельно ему расположен Бородулинский грабен, на юге они сливаются с Бирским, а на севере – с Косинским грабенами.

Косинский грабен замыкает Камско-Бельский авлакоген с севера, смыкаясь с Чердынской шовной зоной и Гаинско-Кудымкарской системой разломов.

Гаинско-Кудымкарская полоса разломов имеет субмеридиональное простирание и с востока ограничивает Камско-Бельский авлакоген, разделяя Коми-Пермяцкий и Камский массивы. Протяженность системы разломов составляет 370 километров. Система выделяется по данным грави- и магниторазведки и подтверждается сейсмическими исследованиями (Новоселицкий, 1971).

Чермозский глубинный разлом ограничивает с юга Коми-Пермяцкий и Камский массивы. К северу от этого разлома на породах фундамента залегают вендские отложения, а к югу, в средней части Камско-Бельского авлакогена, – преимущественно рифейские. Разлом отмечается в магнитном и гравитационном полях. Он уточняется бурением и сейсмическим профилированием, а также проявляется в тектонике Майкорского и Верещагинского валов. На поверхности фундамента разлом отмечен ступенью 0,2 км, а в вышележащих слоях – унаследованными тектоническими нарушениями. Ширина нарушения достигает 20 км. На юге Чермозскую полосу разломов ограничивает Пермский разлом (Новоселицкий и др., 1985).

Верещагино-Куединская полоса разломов на юго-востоке ограничивает Камско-Бельский авлакоген от Пермско-Башкирского и Камского сводов.

Глубинные разломы в пределах Камско-Бельского авлакогена в основном имеют западное падение, но в Куединском блоке происходит смена

направления, и к востоку от него разломы характеризуются восточным направлением падения (Дружинин и др., 1974).

Красноуфимский глубинный разлом имеет субмеридиональное простирание, он прослеживается по поверхности фундамента и в палеозойских отложениях, выделяясь в гравитационном и магнитном полях (Новоселицкий и др., 1985). К разлому приурочены долины рек Камы и Сылвы, а также эпицентры сейсмических событий.

1.1.4. Уральская складчатая система

По современным данным Уральская складчатая система линейного типа состоит из нескольких крупных структурно-фациальных зон, вытянутых в меридиональном направлении на сотни километров. На территории исследуемого региона выделяют Западно-Уральскую складчатую зону и Центрально-Уральское поднятие. Все эти структуры в свою очередь осложнены многочисленными складчатыми структурами и разрывными нарушениями различных порядков (Геология СССР...; 1969 Дружинин, 1974, 2000; Семенов, 1983; Shapiro, 1986).

Урал простирается на 2500 км от Карского моря на севере до Туранской плиты на юге. На Полярном Урале геологические структуры постепенно меняют свое субмеридиональное и северо-восточное простирание на северо-западное, продолжают на Пай-Хое и на Новой Земле. На востоке Уральская складчатая система сопрягается с Западно-Сибирской плитой, на юге – с Туранской плитой. В западной части уральские структуры огибают Печорскую и Русскую плиту. Ширина всей Уральской складчатой системы на разных широтах составляет 310-370 км (Соболев, 1983). Глубина залегания поверхности фундамента варьирует, увеличиваясь с запада на восток и с севера на юг от 0 до 3 км.

Уральская система сформировалась на раннедокембрийском кристаллическом основании в результате длительного развития и сложена различными по возрасту и составу осадочными, магматическими и метаморфическими породами. Крупные магнитные и гравитационные

аномалии связываются с влиянием кристаллического фундамента, разделенного региональными разломами на блоки различных размеров.

Основой тектонического районирования Уральской складчатой системы являются четко выраженные крупные линейные структуры, имеющие субмеридиональное простирание. Такие положительные и отрицательные структуры чередуются в широтном направлении. Структуры первого порядка являются синклинорными и антиклинорными сооружениями, протягивающимися вдоль всего Урала на 2000 км и более. Можно выделить следующие крупные структуры с запада на восток: Западно-Уральская зона складчатости – линейный палеозойский прогиб, Центрально-Уральское поднятие, Тагильско-Магнитогорский прогиб, Восточно-Уральское поднятие, Восточно-Уральский прогиб, Зауральское поднятие и ряд других структур, расположенных к востоку.

Большую часть Уральской складчатой системы составляют уралиды. Это геоструктурный комплекс, сформированный в течение длительной ордовикско-среднепалеозойской эпохи геосинклинального развития. По характеру и интенсивности магматизма и метаморфизма, по составу и строению уралиды разделяются на эфгеосинклинальные и миогеосинклинальные. Среди последних менее распространены магматические образования, осадочные породы слабее метаморфизированы. Преобладают близкие по составу к платформенным базальтоиды и ультрабазиты. Миогеосинклинальные уралиды слагают Западно-Уральскую зону складчатости (Соболев, 1983).

Сопряжение уралид с платформенными областями может определяться как постепенным упрощением уральских складчатых структур с их погружением с востока на запад и полной заменой на платформенные структуры в Предуральском краевом прогибе, так и наличием большого количества тектонических нарушений и надвигов различных масштабов. Такие типы сопряжений встречаются в восточном крыле Верхнепечорской впадины.

Западно-Уральская зона складчатости в целом образует моноклиналиную структуру, осложненную многочисленными крупными и мелкими складками, тектоническими нарушениями. В основном складки имеют линейный характер. Разрывные нарушения различны по типам, направлениям перемещения блоков и т.д. Широко развиты субмеридиональные взбросы и сбросы. Развиты надвиги с преимущественно восточным падением и амплитудами до 5 км. Наиболее значительные надвиги развиты в подзоне сопряжения Западно-Уральской внешней зоны и Предуральского краевого прогиба.

В Западно-Уральской зоне складчатости по особенностям строения можно выделить Вайгачско-Пайхойский антиклинорий, Едунейско-Саледскую, Щугорско-Вишерскую, Кизеловско-Дружининскую и Ашинско-Алимбетовскую структуры. Каждая из них включает в себя структуры меньших размеров.

В целом для Урала характерна несколько повышенная мощность земной коры (от 42-47 до 52 км) по сравнению с восточными районами Русской плиты (35-42 км). Земная кора на Урале отличается хорошо выраженной слоистостью, которая также фиксируется и в верхней мантии. Эта субгоризонтальная расслоенность часто нарушается зонами глубинных разломов, уходящих ниже границы Мохоровичича, что придает земной коре также и блоковый характер. (Короновский, 1976).

1.1.5. Предуральский краевой прогиб

Предуральский краевой прогиб представляет собой крупную линейную структуру первого порядка, протягивающуюся вдоль всего Урала. Его формирование началось на границе карбона и пермского периода и продолжалось в течение всего пермского периода одновременно с общим поднятием Уральской геосинклинали. В позднем карбоне в Уральской складчатой области начался усиленный рост гор, и зарождающийся краевой прогиб смещается к западу.

Несмотря на то, что Предуральский краевой прогиб представляет собой единую структуру, история геологического развития и характер разреза различаются в разных частях. Наиболее глубоко (более 9 км) опущены южные районы Бельской впадины. В северном направлении мощность отложений, выполняющих прогиб, уменьшается до 5-6 км, а в Уфимско-Соликамской впадине она не превышает 3 км (Короновский, 1976).

В прогибе развиты молассовые формации с наличием соленосных и угленосных фаций. Прогиб асимметричен, его западное крыло, примыкающее к восточному краю Русской плиты, более пологое и широкое, а восточное – узкое и крутое. Прогиб слагают структуры второго порядка: Кортаихинско-Воркутинская, Большесынинско-Верхнепечерская, Уфимско-Соликамская и Бельская впадины, разделенные поднятиями и осложненные многочисленными тектоническими нарушениями. Прогиб выполнен мощной толщей в основном пермских отложений, среди которых распространены морские (в низах) и континентальные (в верхах) отложения. В нижней перми развита соленосная толща, к северу замещающаяся угленосной.

Прогиб резко асимметричен, причем отложения восточной части прогиба смяты в узкие складки линейного типа, часто опрокинутые на запад. В этом же направлении складчатость быстро затухает, и только западный край прогиба фиксируется серией флексур. В тех впадинах, где развита кунгурская соленосная толща, широко проявляются диапировые складки и соляные купола (Короновский, 1976). В западной части прогиба имеются многочисленные рифовые постройки и структуры их облекания (Кононенко, 1990; Новоселицкий, 1985).

1.1.6. Печорская плита

Печорская плита находится к северо-востоку от Восточно-Европейской платформы и отделена от основной ее части невысоким Тиманским кряжем (Хаин, 1977). Плита расположена между Притиманским прогибом на юге, Предуральским прогибом на востоке, а на севере уходит под акваторию Баренцева моря (Милановский, 2007).

В пределах плиты выделяются различные по строению и геологическому развитию региональные тектонические структуры: Тиманская (Канино-Тиманская) гряда, Печорская синеклиза, северные части Предуральяского краевого прогиба и Уральской складчатой системы (Дедеев и др., 1985).

Печорская синеклиза занимает большую часть Печорской плиты. Печорской грядой она делится на Большеземельскую и Ижма-Печорскую впадины, которые также делятся на мелкие структуры (Хаин, 1977).

Фундамент синеклизы имеет рифейско-вендский возраст, он представлен магматическими и метаморфическими породами, разделенными на несколько комплексов. Данные по возрасту комплексов, особенностям метаморфизма и структурам фундамента указывают на значительные различия в тектоническом развитии территории.

В фундаменте выделяются Тиманский блок и прилегающая к нему с северо-востока Ижемская зона и Большеземельский блок. Фундамент опускается до глубины 7-8 км под Колвинским и Печоро-Кожвинским валами и приподнят в области Денисовского прогиба и Хорейверской впадины, формируя Лапский выступ и Большеземельский свод.

Осадочный чехол Печорской синеклизы сложен ордовикско-кайнозойскими неметаморфизированными образованиями. Представлены как терригенные (нижний палеозой), так и карбонатные отложения, и вулканогенные образования.

Наблюдается резкое несогласие в залегании различных структурных этажей. Наиболее контрастные структурные формы развиты на уровне девона-перми (триаса) и образованы в результате позднегерцинских – раннекембрийских движений. Самыми крупными из этих форм являются простирающаяся с юго-запада на северо-восток широкая и плоская Ижма-Печорская впадина с глубиной залегания фундамента до 4 км и весьма пологими поднятиями над его ступенями фундамента, резко выраженный сложный вал Печорской гряды – Печоро-Кожвинский, ограниченный по фундаменту и докарбоновой части чехла разломами, неширокий (40-60 км) Денисовский прогиб, Колвинский сложный вал, Хорейверская впадина и,

наконец, вал Сорокина, представляющий уже переходную структуру к складчатой зоне гряд Гамбурцева-Чернова, замыкающей Печорскую синеклизу на северо-востоке. Схожая по строению зона гряды Чернышева замыкает северо-восточную часть Печорской впадины на юго-западе, в то время как Ижма-Печорская впадина довольно постепенно через флексуру переходит к востоку в Верхнепечорскую впадину Предуральяского прогиба (Хаин, 1977).

Мощность платформенного чехла изменяется от 10-15 км в пределах Предуральяского краевого прогиба, до 4-7 км в центральной части Печорской синеклизы, а на сводах и поднятиях обычно не превышает 3-4 км (рис.1.3) (Литосфера..., 2008).

Тиманская антеклиза является древним горстообразным поднятием, протянувшимся от Полюдова камня до полуострова Канин. Выделяются Омринский выступ, Кедвинско-Вольская впадина, Вычегодско-Колвинский вал и другие структуры, сложенные карбонатными и карбонатно-терригенными отложениями. По разломам антеклиза граничит с Притиманским прогибом и Ижма-Печорской впадиной.

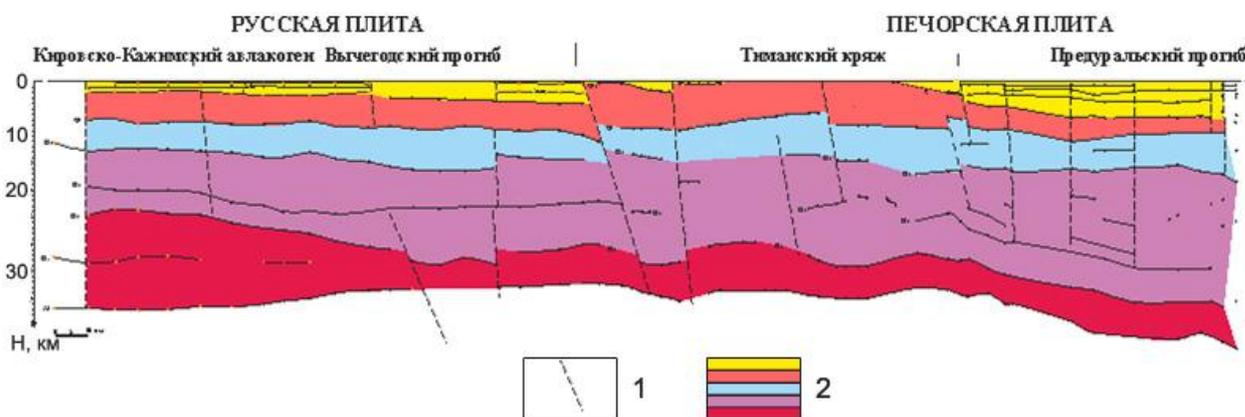


Рис.1.3. Геологический разрез по профилю MEZTIMPECH (Удоратин, 2008)
Условные обозначения: 1– основные разломы; 2 – опорные поверхности в земной коре

В области Тиманской антеклизы и севернее фундамент сложен различными метаморфизированными породами и имеет позднерифейский возраст. Допалеозойские магматические образования представлены отдельными выходами. Известно около десяти выступов фундамента, образующих возвышенности – «камни», самым крупным из которых является Четласский Камень на Среднем Тимане.

Таким образом, рассмотрена тектоника исследуемого региона, включающего восточную окраину Восточно-Европейской платформы, Печорскую плиту и прилегающие территории Урала.

Данный регион представляет собой совокупность структур различной направленности, разделенных глобальными и региональными разломами. Особое внимание уделено Предуральскому прогибу, Кировско-Кажимскому и Камско-Бельскому авлакогенам, разломам Печорской плиты как структурам, которые могут генерировать землетрясения.

1.2. Глубинное строение региона

1.2.1. Строение земной коры

по данным глубинного сейсмического зондирования

Для изучения сейсмичности исследуемого региона и решения вопросов сейсмического районирования необходимо иметь представления о глубинном строении земной коры. Сейсмические исследования по изучению глубинного строения представляют собой целый комплекс, включающий работы методом отраженных волн (МОВ), региональные площадные сейсмические исследования и профильные глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ).

Наиболее важными для исследования глубинного строения земной коры являются результаты ГСЗ и его модификаций (ГСЗ-КМПВ и ГСЗ-МОВЗ). Схема расположения профилей ГСЗ на территории исследуемого региона представлена на рис. 1.4 (Атлас..., 2013). Одним из первых профилей ГСЗ, который был отработан в исследуемом регионе, является Свердловский субширотный профиль ГСЗ протяженностью 1100 км вдоль линии Ижевск-

Красноуфимск-Ишим (рис.1.4, рис.1.5.) (Дружинин,1976, 1981, 1986; Халевин, 1975).

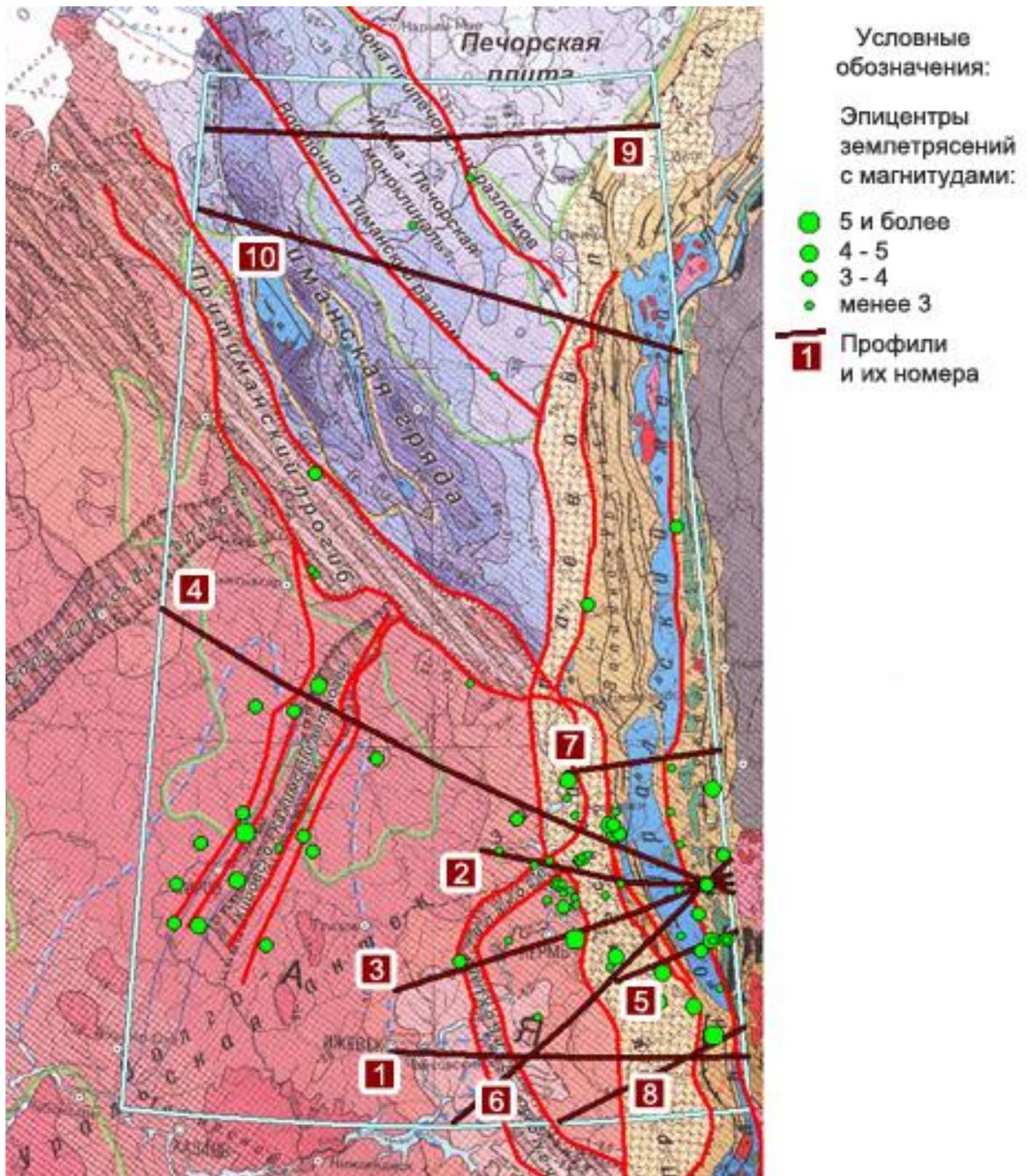


Рис. 1.4. Схема расположения профилей ГСЗ на территории исследуемого региона (Атлас..., 2013)

1 – Свердловский, 2 – Красноуральский, 3 – Уральский, 4 – Рубин 1, 5 – UWARS, 6 – Гранит, 7 – Березники-Кытлым-Серов-Гари, 8 – Арти-Байкалово; 9 – Кварц, 10 – Агат-2



Рис. 1.5. Свердловский профиль ГСЗ (Дружинин и др., 1976)

1 – Линия профиля с пикетами наблюдений и пунктами взрыва; 2 – меридиан населенных пунктов; сейсмические границы, построенные 3 – по отраженным волнам (а), по преломленным волнам (б), 4 – по четко выраженным отраженным, или преломленным волнам, обладающим повышенной интенсивностью, 5 – по нечетко выраженным волнам, обладающим слабой интенсивностью записи; 6 – предполагаемое положение сейсмических границ при отсутствии наблюдений; 7 – поверхность осадочной, эффузивно-осадочной и метаморфической толщи палеозоя; 8 – поверхность древнего фундамента, или кристаллической коры; 9 – поверхность переходного (гранулитового) слоя; 10 – поверхность базальтового слоя; 11 – поверхность Мохоровичича; 12 – поверхность Мохоровичича с пониженной скоростью распространения упругих колебаний; 13 – участки границ, соответствующие осложнениям записи волн; 14 – точки дифракции; 15 – разрывные нарушения в верхней части разреза; 16 – зоны нарушений в залегании сейсмических границ, или предполагаемые глубинные разломы: 1, 1а – Камская зона разломов, 2, 2а – Усинская зона разломов, 3, 3а – Березовско-Чернушинская зона разломов, 4 – Маутинско-Иргинский разлом, 5 – Красноуфимская зона разломов, 6 – Сосновский разлом, 7 – Бардымская зона разломов; 17 – геологические структуры (над разрезом), границы мегаблоков и блоков (под разрезом), 18 – пограничные участки между мегаблоками и блоками: I – Верхнекамский мегаблок, II – Куединский блок, III – Башкирский мегаблок, IV – Западно-Уральский мегаблок.

Исследование профиля позволяет выделить несколько различающихся областей, соответствующих восточной окраине Восточно-Европейской платформы, Уральской геосинклинальной системе и Западно-Сибирской плите. В каждой из этих областей можно выделить блоки и зоны с различным строением земной коры, отчетливо выраженные в сейсмическом и геолого-геофизическом разрезах.

В большей части сейсмического разреза восточной окраины Восточно-Европейской платформы поверхность Мохоровичича выражена четкой сейсмической границей. С запада Верхнекамского блока на восток поверхность испытывает плавное поднятие с глубины 42 км до 33 км в Куединском блоке. Затем, после некоторого погружения до 43 км в восточной части Башкирского блока, она вновь поднимается до 36 км на востоке Предуральяского прогиба. Общая амплитуда колебания рельефа поверхности Мохоровичича составляет около 10 км. Далее на восток в сторону Уральской геосинклинальной системы поверхность Мохоровичича погружается.

Значительное изменение мощности земной коры, от 23 до 40 км, связано со сложным блоковым строением кристаллического фундамента. Наибольшая мощность соответствует восточной части Башкирского блока за счет погружения границы Мохоровичича и поднятия поверхности фундамента. Наименьшая мощность земной коры соответствует Куединскому блоку. Также отмечается слоисто-блоковое строение земной коры (Дружинин и др., 1976).

На профиле выделено большое количество зон нарушений залегания сейсмических границ, или предполагаемых глубинных разломов. Часть таких зон прослеживается от границы Мохоровичича до верхней части разреза, другие зоны прослеживаются лишь на глубинах 30-10 км, а зоны в районе Верхней Саввы и Березовки прослеживаются ниже границы Мохоровичича. Все зоны нарушений расположены наклонно и имеют мощность от 30 до 50 км. Крупнейшие из этих зон можно отнести к сейсмогенерирующим, причем

положение эпицентра землетрясения будет смещено относительно области выхода этой зоны нарушений на дневную поверхность.

Еще одним из геотраверсов, проходящих через исследуемый регион, является геотраверс «Рубин-1» (Солодилов, 1994), протянувшийся от г. Костомукши до г. Семипалатинска (рис.1.4 и рис 1.6).

Геотраверс «Рубин-1» пересекает основные крупные структуры региона: Мезенскую синеклизу, Кировско-Кажимский авлакоген, Коми-Пермяцкий погребенный свод, Камско-Бельский авлакоген, Камский наложенно-погребенный свод, Предуральский прогиб и Западно-Уральскую складчатую зону. Выделена целая серия блоков второго порядка, в основном соответствующих этим структурам. Границами их являются глубинные разломы консолидированной коры. В пределах профиля выделяются два поднятия границы Мохоровичича, соответствующие Предуральскому прогибу и Кировско-Кажимскому авлакогену, где глубина залегания поверхности составляет 38-40 км. Уменьшение глубины залегания границы Мохоровичича, вероятно, связано с процессами в верхней мантии и свидетельствует о разуплотнении вещества в ее пределах. (Блинова, 2003). Именно с этими районами связаны крупные региональные сейсмические события.

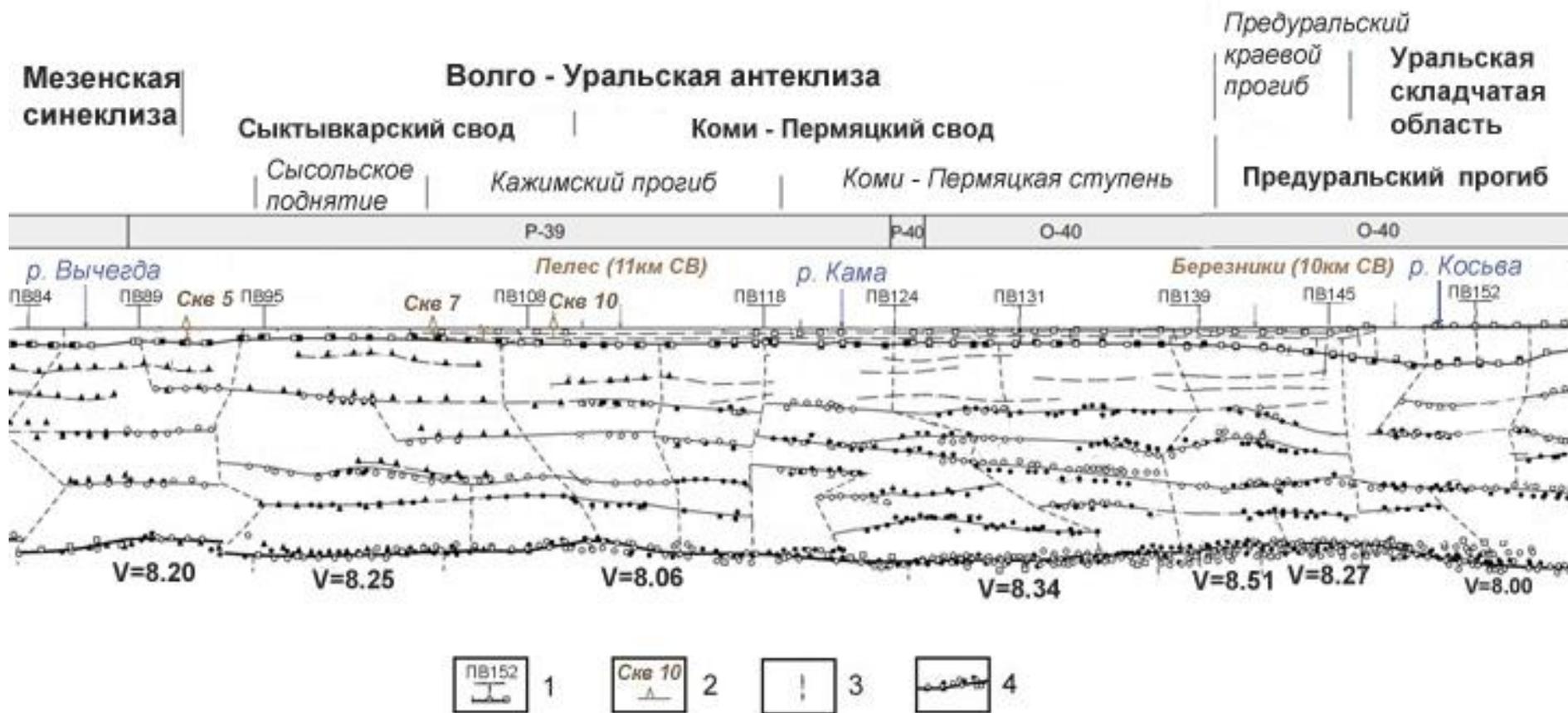


Рис. 1.6. Профиль ГСЗ Рубин 1 (Атлас... 2013)

Условные обозначения:

- 1 – пункты возбуждения; 2 – исследовательские скважины; 3 – границы блоков; 4 – сейсмические границы, построенные по разным типам волн

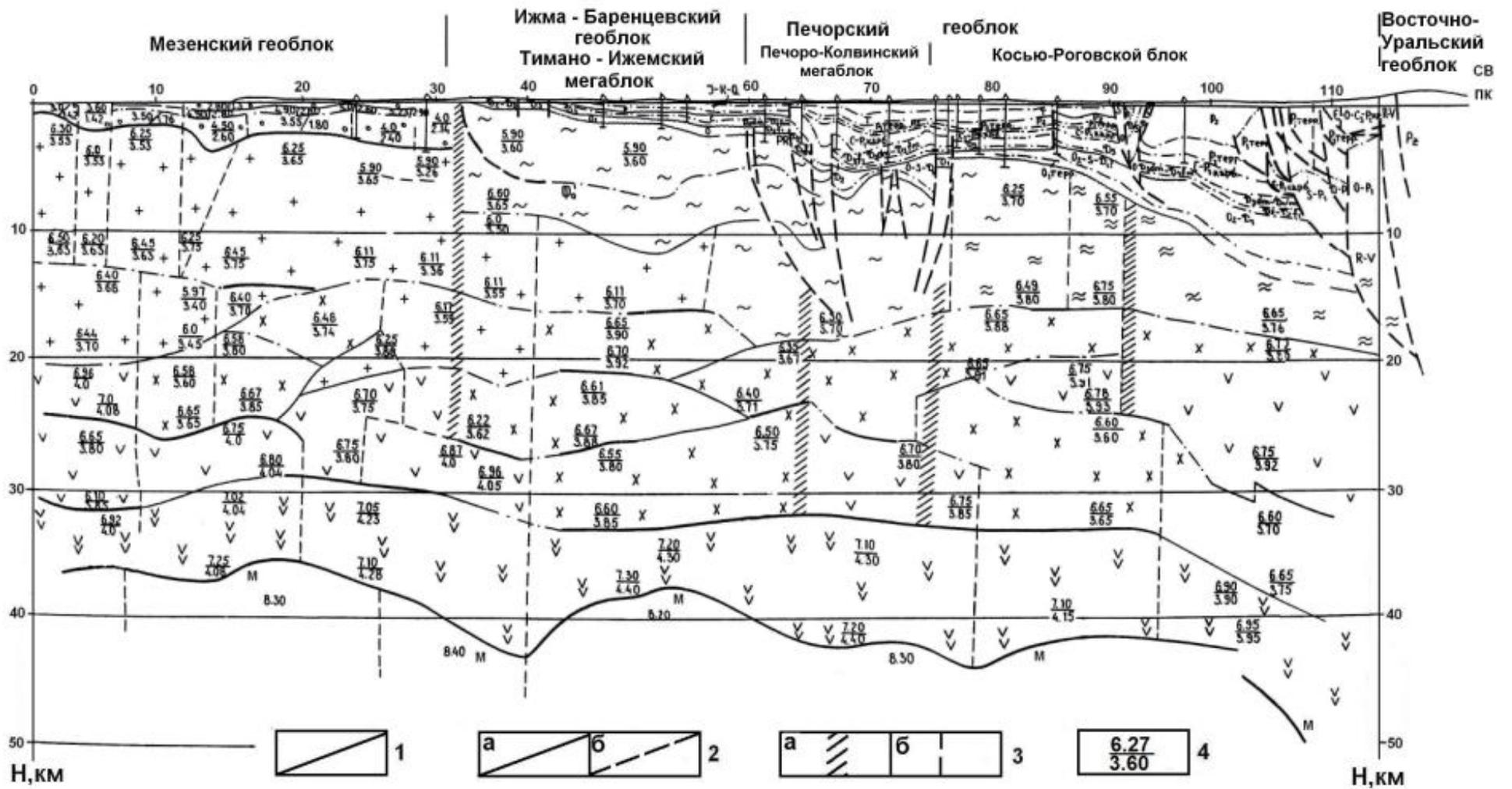


Рис. 1.7. Геосейсмический разрез по линии профиля «Агат-II»

Геосейсмические разрезы составлены А.С. Воиновым (ПГО «Ухтанефтегазгеология») – осадочный чехол, А.В. Егоркиным и др. (НПО «Нефтегеофизика») – фундамент с дополнения И.В. Запорожцевой. Условные обозначения. 1 – сейсмические границы, построенные по двум и более типам волн; 2 – сейсмические границы, построенные по монотипному волновому полю: а – которым соответствуют теоретические годографы, б – по обманным волнам; 3 – тектонические нарушения: а – по геофизическим данным, б – по геолого-геофизическим данным; 4 – значения скоростей, км/с: а – над чертой – продольных волн, под чертой – поперечных волн.

Субширотный профиль ГСЗ «Агат II» проходит в северной части исследуемого региона (рис. 1.4, 1.7). По совокупности геофизических характеристик и геологического строения на профиле выделяются крупные структуры: Ижма-Баренцовский, Печорский и Восточно-Уральский геоблоки, осложненные блоками меньших масштабов.

Глубина залегания поверхности Мохоровичича увеличивается по профилю с запада на восток. Минимальные значения 35 км соответствуют Мезенскому геоблоку, максимальные, 45 км и более - Восточно-Уральскому геоблоку.

Граница Мезенского и Ижма-Баренцевского геоблоков характеризуется погружением границы Мохоровичича до глубины 40-43 км, после чего следует ее поднятие до глубины 36-38 км.

Мощность земной коры меняется от 35 км в Мезенском геоблоке, до 45 и более км в Восточно-Уральском геоблоке. На геосейсмическом разрезе отчетливо выделяются слоистое строение земной коры и субвертикальные зоны тектонических нарушений, часть из которых берет начало ниже границы Мохоровичича. Особо отмечены выделенные по геологическим данным разломы Печорского геоблока, прослеживающиеся

на глубину до 15-18 км. С зонами этих тектонических нарушений может быть связана современная сейсмическая активность региона.

Геотраверс «Гранит», соединяющий Криворожскую, Ново-Елховскую, Уральскую и Тюменскую сверхглубокие скважины, также пересекает исследуемый регион. Комплекс геолого-геофизических исследований на этом профиле включил сейсморазведку на преломленных и отраженных волнах, аэромагнитные исследования, гравиразведку, электрохимические исследования, гелиевую съемку, изучение теплового потока, дешифрирование космоснимков и анализ большого количества имеющихся геологических и тектонических карт и схем. (Соколов, 2000; Alexandrov, 1997).

Помимо изучения структуры коры по данным промышленных взрывов, большой интерес представляет изучение строения консолидированной коры и мантии по записям удаленных землетрясений, что можно видеть по результатам исследований на 600-километровом профиле ГСЗ-МОВЗ «Уральский» и 250-километровом профиле «Арти-Байкалово», которые охватывают основные геологические структуры Предуралья, Урала и Зауралья (Дружинин, 2000; Золотов, 1984, 1995).

Проведены электромагнитные исследования по профилю Березники-Кытлым-Серов-Гари протяженностью около 300 км. Получен значительный объем информации о геоэлектрическом строении земной коры и верхней мантии (Дьяконова, 2001), получена геолого-геофизическая модель литосферы по этому профилю В.С. Дружининым и Ю.С. Каретиным (Центр «ГЕОН», Институт геофизики УрО РАН, 2000 г).

На уровне г. Красноуральска был отработан еще один непродольный профиль ГСЗ UWARS. Наблюдения на профиле протяженностью 175 км выполнялись с целью прослеживания рельефа подошвы земной коры и изучения характера сейсмической анизотропии всей мощности земной коры (Кашубин, 1996, 2001).

Проведено обобщение данных по глубинному строению исследуемого региона до верхней мантии. Используются сведения о строении поверхностей переходного и базальтового слоев земной коры, характеристика мощностей

гранито-гнейсового, переходного и базальтового слоев, а также суммарная мощность консолидированной части земной коры (Краснопевцева, 1992; Семенов, 1993; Халевин, 1975; Ярош, 1968), данные о рельефе фундамента (Дружинин, 1986; Золоев, 1998; Новоселицкий, 1985; Чекунов, 1993; Ярош, 1965, 1968) и о строении поверхности Мохоровичича (Дружинин, 1976, 1986; Золотов, 1994, 1995; Кунин, 1993; Леонов, 1994; Ломакин, 1978; Ярош, 1968). Установлено, что земная кора восточной части Восточно-Европейской платформы состоит из осадочного чехла, гранито-гнейсового, переходного и базальтового слоев (Дружинин, 1976, 1986; Померанцева, 1961-1975; Ярош, 1965, 1968; и др.).

Данные, полученные с помощью глубинного сейсмического зондирования, были использованы для уточнения положения границ земной коры и границы Мохоровичича, исследования блокового строения земной коры, выявления закономерностей расположения крупнейших тектонических нарушений и получения другой важной геологической и геофизической информации о строении исследуемого региона.

1.2.2. Строение границы Мохоровичича исследуемого региона

Граница Мохоровичича – планетарная поверхность раздела, которая является границей между земной корой и верхней мантией и является сложной переходной зоной с наличием значительных горизонтальных неоднородностей и зонами пониженных скоростей. Граница четко фиксируется в волновом поле. К особенностям данной границы относятся увеличение граничных скоростей от 7.0 до 8.0 км/с, и сложный рельеф (рис.1.5, рис. 1.7).

Поверхность Мохоровичича в северной части Волго-Уральского геоблока фиксируется на глубинах 40-42 км. В восточном направлении от свода поверхность Мохо постепенно поднимается до 40 км. В центральной части Печорской плиты граница Мохоровичича отмечается на глубинах в 36 км. В Предуральском краевом прогибе прослеживается опускание поверхности Мохоровичича до глубин 42-44 км, а восточнее, под Уралом,

до 46-47 км и, возможно, более. При этом наиболее глубокое залегание поверхности Мохоровичича отмечается в восточной части исследуемого региона и соответствует Западно-Уральской складчатой области. Также большая глубина залегания выделяется в юго-западной части региона. Минимальная глубина залегания поверхности Мохоровичича соответствует восточной части Мезенской синеклизы, Предуральскому прогибу и Ижма-Печорской моноклинали (рис.1.8).

Анализ связи землетрясений и глубины залегания поверхности Мохоровичича показывает, что 68 из 90 землетрясений, или 75% приурочены к глубинам залегания от 40 до 44 км.

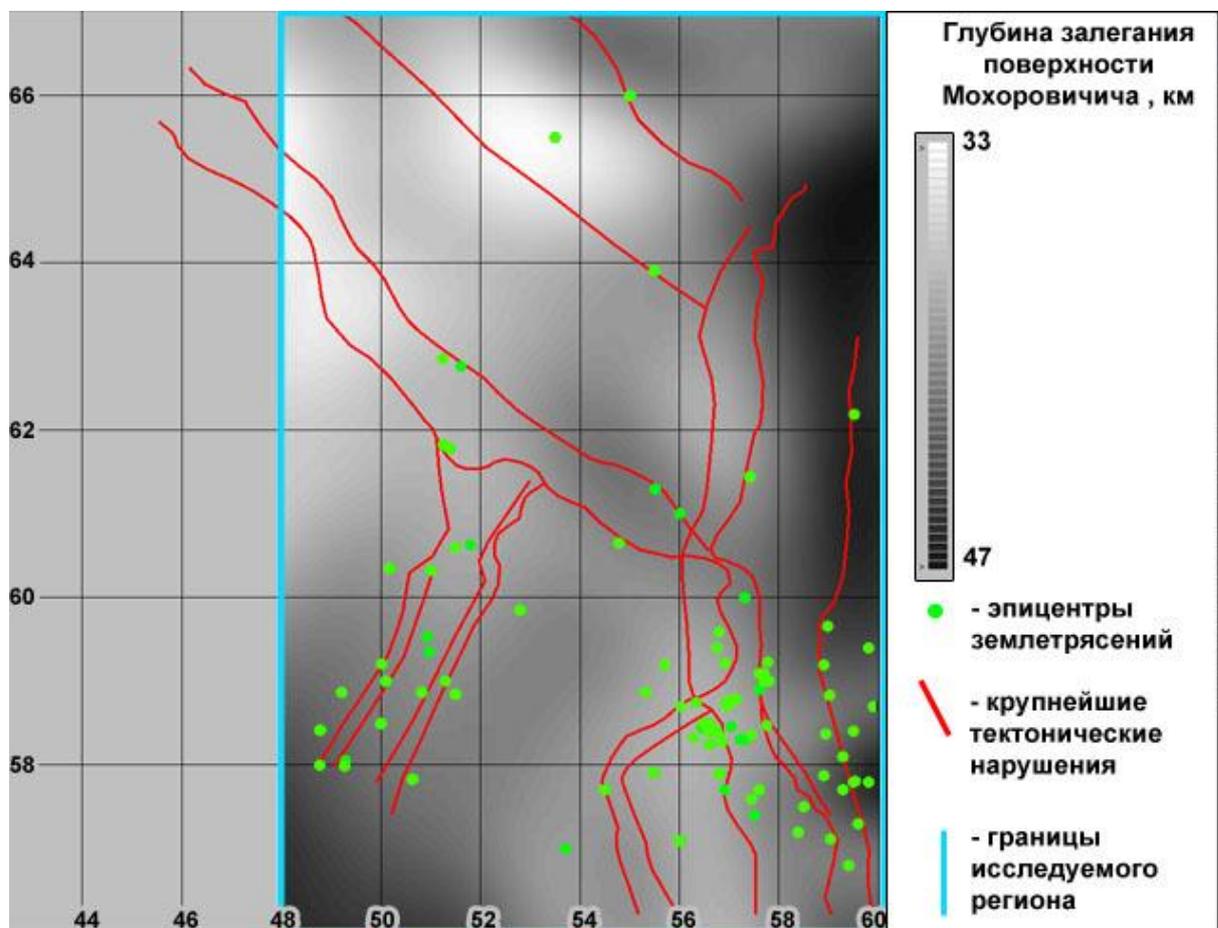


Рис. 1.8. Карта глубины залегания поверхности Мохоровичича в исследуемом регионе (по данным «The Moho Depth...»)

Таким образом, изучено изменение глубины залегания границы Мохоровичича. В большинстве случаев в тех частях региона, где граница

Мохоровичича испытывает подъем, можно наблюдать скопление эпицентров землетрясений.

1.3. Блоковое строение земной коры

Строение литосферы является блоковым. Блоки являются долгоживущими, крупными (сотни тысяч – миллионы кв. км.), в основном изометричными структурами со своими характерными особенностями литогенеза, магматизма и метаморфизма. Как правило, геоблоки ограничены зонами тектонических нарушений.

Наиболее крупные геоблоки разделены зонами тектонических нарушений, достигающих мантии. Вдоль таких нарушений, как правило, происходит внедрение интрузивных тел, четко выражающихся в геофизических полях. Мелкие геоблоки, как правило, разграничены тектоническими нарушениями, не выходящими за пределы гнейсо-гранулитового комплекса.

Мобильность геоблоков вызывает на их границах складчато-надвиговые дислокации с горизонтальными амплитудами до нескольких десятков километров, причем границам более крупных блоков соответствуют дислокации большей амплитуды (Запорожцева, 1994).

Формирование блоковых структур происходило на разных этапах платформенного развития, поэтому блоки соответствуют разным типам платформенных структур – плитным, перикратонным и авлакогенным.

Исследователями (Гвишиани, 1988; Завьялов, 2006) отмечается, что тектоническая активность разломов выше тектонической активности блоков, а тектоническая активность узлов пересечений разломов выше активности самих разломов.

В пределах исследуемого региона выделяются Волго-Уральский, Ижма-Баренцевский и Печорский геоблоки.

Волго-Уральский геоблок состоит из приподнятых участков – сводов, где мощность осадочного чехла уменьшается до 1.5 км, и опоясывающих прогибов, где мощность увеличена, главным образом, за счет рифей-

вендских образований. Для Волго-Уральского геоблока характерны зоны выклинивания рифей-вендских толщ. Геоблок обладает континентальным типом земной коры, присущей древним платформам с мощностью гнейсо-гранулитового комплекса 22-24 км, гранулитито-метабазитового 16-18 км.

Ижма-Баренцовский геоблок характеризуется увеличенными мощностями верхнепротерозойских отложений, достигающими 6-8 км, и пониженными мощностями гнейсо-гранулитового комплекса, составляющими 8-10 км. Мощность гранулитито-метабазитового комплекса составляет 16-18 км.

Печорский геоблок выражается в региональных геофизических полях в виде полос аномалий гравитационного и магнитного полей, имеющих северо-западное простирание. В пределах геоблока наблюдается увеличение мощности базальтового слоя, уменьшение мощности гнейсо-гранулитового слоя и увеличение верхнепротерозойской толщи до 10 км и более (Запорожцева, 1994).

Большая часть региональных сейсмических событий связаны с тектоническими нарушениями, ограничивающими эти блоки.

С точки зрения сейсмического районирования исследуемого региона, особый интерес представляют те блоки, которые испытывают относительное воздымание и находятся в непосредственной близости от неотектонических глубинных разломов (Бунэ, 1980). Неотектоническая схема блоково-иерархического строения осадочного чехла получена по результатам структурного дешифрирования космических снимков (Вохмянина, 1982). В пределах Предуралья можно отметить Кизеловский и Верхнеуфимский макроблоки, сопряженные с генеральными разломами, ограничивающими его. В пределах восточной окраины Восточно-Европейской платформы это Ульвинский макроблок, расположенный в непосредственной близости от активного в новейшее время Красноуфимского глубинным разлома, а также Менделеевский и Краснокамский макроблоки, сопряженные с Чермозским глубинным разломом. В пределах Камско-Бельского авлакогена можно выделить

воздымающиеся части Калтасинского сложного блока: Частинский макроблок, сопряженный с его восточной границей, и Сарапульский макроблок, сопряженный с Удмуртским глубинным разломом, а также западную часть Верхнекамского макроблока. В западной части исследуемого региона хотелось бы отметить Чепецкий сложный блок, испытывающий относительное воздымание и сопряженный с активными в новейшее время разломами, которые ограничивают Кировско-Кажимский авлакоген (Островский, 1966).

Для выделения блоков используются данные сейсморазведки, исследования гравитационного и магнитного полей, исследования геотермического и геоэлектрического поля и другая геофизическая информация. Выделяются трендовые (криповые) и циклические движения блоков, естественного и техногенного происхождения (Панжин, 2015).

Геодинамика региона обуславливается процессами, происходящими внутри Земли, и проявляется в виде землетрясений, движений блоков, развития тектонических нарушений и т.д. Блоки перемещаются по наклонным поверхностям, дробясь, изгибаясь и наклоняясь. В целом, в платформенных областях блоки имеют меньшие амплитуды движений и деформаций, чем в подвижных поясах, что обуславливает меньшую интенсивность сопровождающих их землетрясений.

1.4. Особенности тектонических нарушений, их расположение и время их заложения

На земной поверхности в пределах исследуемого региона не выявлены сейсмогенные движения и сеймотектонические дислокации, соответствующие современным тектоническим движениям. Возможны отдельные изменения в рельефе, связанные с обрушением карстовых полостей и соответствующими им обвальными землетрясениями, а также с техногенными событиями, происходящими на рудниках Урала.

В результате дешифрирования материалов космических съемок в пределах исследуемого региона выявлена сеть линеаментов, выделенная

по системе эрозионных и денудационных уступов, обрывов, долин и пологих понижений рельефа протяженностью в десятки и сотни километров (Вохмянина, 1982).

Имеющийся опыт геоморфологических исследований (Вохмянина, 1982; Голиздра, 1988; Трегуб, 2001) свидетельствует о корреляции линеаментов с крупными разломами кристаллического фундамента и пликативными деформациями осадочного чехла. Они развиты параллельно им или непосредственно их продолжают, что говорит об унаследованной активизации многих разломов в новейший тектонический этап. К активным в новейшее время относятся разломы, ограничивающие Печорскую плиту, зона Припечорских разломов и Восточно-Тиманский разлом, западный борт и внутренняя зона Среднеуральского краевого прогиба, Кировско-Кажимский авлакоген и юго-восточная часть Камско-Бельского авлакогена, а также часть разломов Татарского свода. Отмечается частичная активизация разломов вдоль Камско-Кинельской системы впадин. Уверенно выявлены линеаменты, пересекающие группы крупных тектонических структур и отражающие, вероятно, разломы древнего заложения. Они имеют в большинстве широтное или восток-северо-восточное простирание, прослеживаются на сотни километров и наиболее отчетливо проявляются в строении земной коры.

В основе тектоники исследуемого региона лежит система глубинных разломов консолидированной коры. Тектонические структуры закладывались и развивались в различное время – от рифея и венда до мезо-кайнозоя, движения по некоторым из них проявлялись в течение всего последующего геологического времени. Крупные дизъюнктивные дислокации непосредственно или косвенно контролировали заложение авлакогенов и блоковых массивов, определяя формирование и пути эволюции исследуемого региона (Блинова, 2003). Сейсмическая активность и новейшие неотектонические движения указывают на продолжение формирования тектонических структур и в настоящее время.

По данным разных авторов на территории исследуемого региона выделяется большое количество разрывных тектонических нарушений различных рангов, возраста и глубины (рис. 1.9).

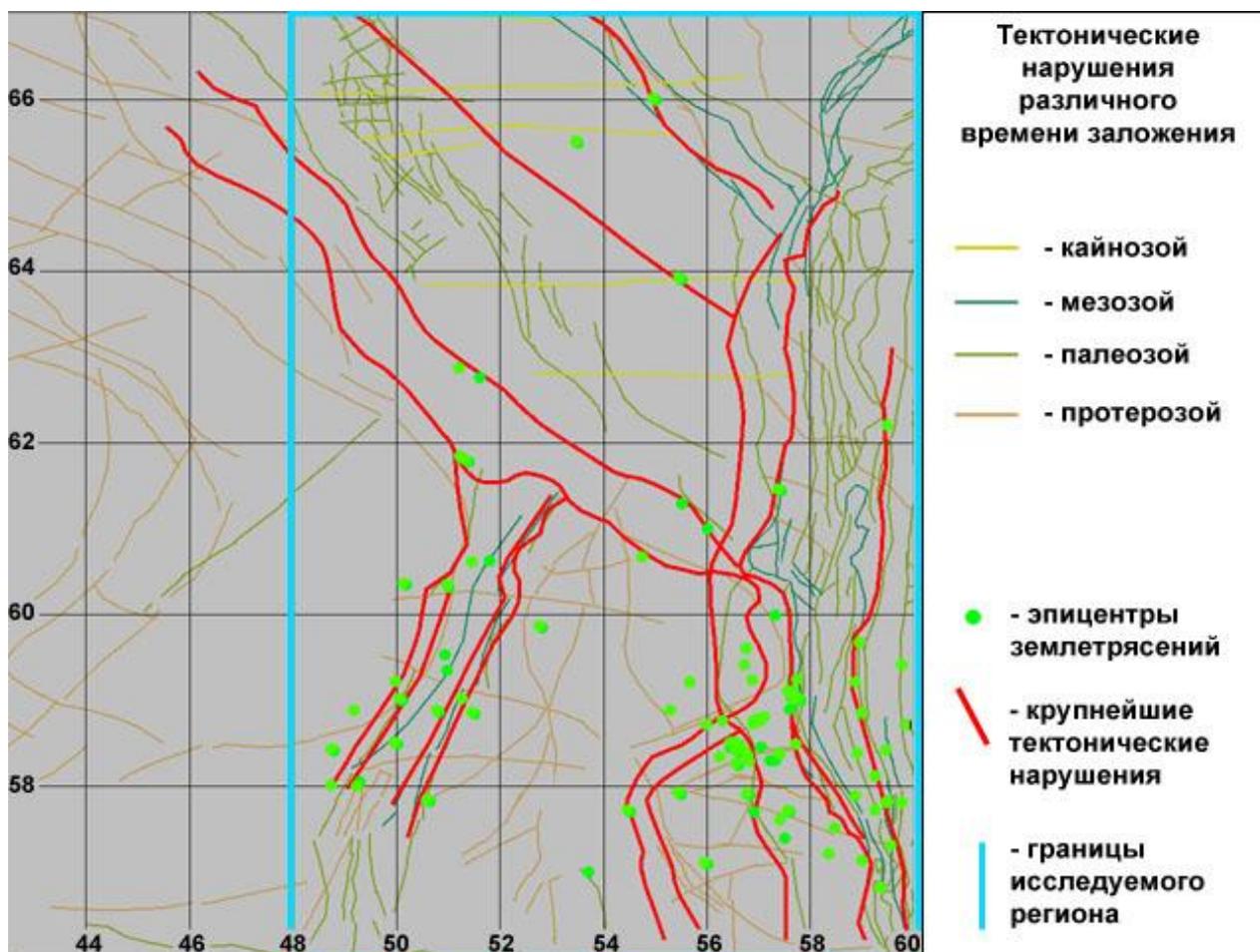


Рис. 1.9. Карта региональных тектонических нарушений разного времени заложения (данные «Тектонической карты...», 2007) и др.)

В исследуемом регионе наблюдается связь сейсмичности с глобальными и региональными тектоническими нарушениями. Очаги исторических и современных землетрясений подчинены геометрии долгоживущих активных разломов (Логачев, 1995). Они не рассеяны хаотично в пространстве, а расположены в одних и тех же местах, наиболее благоприятных для смещения геоблоков. Размеры разломов и расстояния между ними обусловлены толщиной и прочностными свойствами соответствующих слоев, подвергшихся в геологические эпохи трещинообразованию. Чем толще слой, расчлененный разломами на блоки,

тем мощнее и протяженнее сами разломы, тем больше межразломное расстояние и крупнее образованные ими геоблоки.

Для исследований выбраны разломы, активность которых подтверждается современной сейсмичностью. 80 из 90 эпицентров сейсмических событий, или 89% из них, расположены на расстоянии 25 км и менее от выбранных тектонических нарушений, то есть попадают в зону их динамического влияния.

1.5. Современные вертикальные движения земной коры

Первые нивелирные работы, пригодные для изучения современных вертикальных движений земной коры на Урале и в Западной Сибири, были выполнены в начале 20-го столетия (Ященко, 1989).

Взаимосвязь современных вертикальных движений земной коры и сейсмических событий исследуется для понимания процессов, вызывающих сейсмичность и выделения зон возможных очагов землетрясений.

Вертикальные движения земной коры сопровождали всю историю развития региона, но наиболее доступны для исследования современные вертикальные движения земной коры. Для сопоставления вертикальных движений земной коры и сейсмичности была использована карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территории СССР масштаба 1:5000000, ГУГК 1989 г, составленная под руководством ЦНИИГАиК и ГУГК СССР. Карта базируется на результатах планомерных геодезических работ, проводимых на протяжении ста лет. Для построения карты использовались линии повторного нивелирования с наибольшими интервалами между измерениями: средний интервал составляет 26 лет, интервалы более 30 лет составляют 30%, менее 10 лет – 10% от общего объема линий. Общая протяженность линий повторного нивелирования составила около 214 тысяч километров, при этом более 45 тысяч километров линий нивелировались три и более раза. При построении карты учитывались

морфоструктуры, геологическое строение земной коры и другие данные. Кроме того, использовались результаты многолетних наблюдений на 41 уровнемерном посту, расположенном на морских побережьях, а также использовались скорости, полученные на уровнемерных постах, расположенных на участках, слабо обеспеченных линиями повторного нивелирования. Уравнивание скоростей узловых точек, полигонов, линий повторного нивелирования было выполнено параметрическим способом на ЭВМ (Кашин, 1989).

Для проведения исследования используемая часть карты была оцифрована. На исследуемом участке выделяются как зоны погружений, так и зоны поднятий земной поверхности.

Сопоставление карты современных вертикальных движений с тектонической картой было выполнено с помощью программы «Геопроцессор 2», разработанной Институтом проблем передачи информации РАН (Институт проблем передачи информации, электронный ресурс). Для исследования использовался каталог тектонических землетрясений, произошедших на территории региона с 1795 по 2016 год. Анализ данных показывает, что на территории Пермского края, являющегося частью исследуемого региона, расположение зон максимальных скоростей погружения земной коры совпадает с Предуральским краевым прогибом и со структурами, связанными с Камско-Бельским авлакогеном, к которым приурочено наибольшее количество землетрясений в регионе. Отмечается связь зон повышенных скоростей оседания земной поверхности и поднятий поверхности Мохоровичича (Баранов, 2014). Расположение 63 из 90 эпицентров сейсмических событий, или 70% из них, соответствует области современных вертикальных движений земной коры от 4 до 6 мм/год.

С помощью программы «Геопроцессор 2» были выделены зоны, которым соответствуют скорости оседания земной поверхности более 4 мм/год. Полученные зоны были сопоставлены с эпицентрами сейсмических событий (рис 1.10).

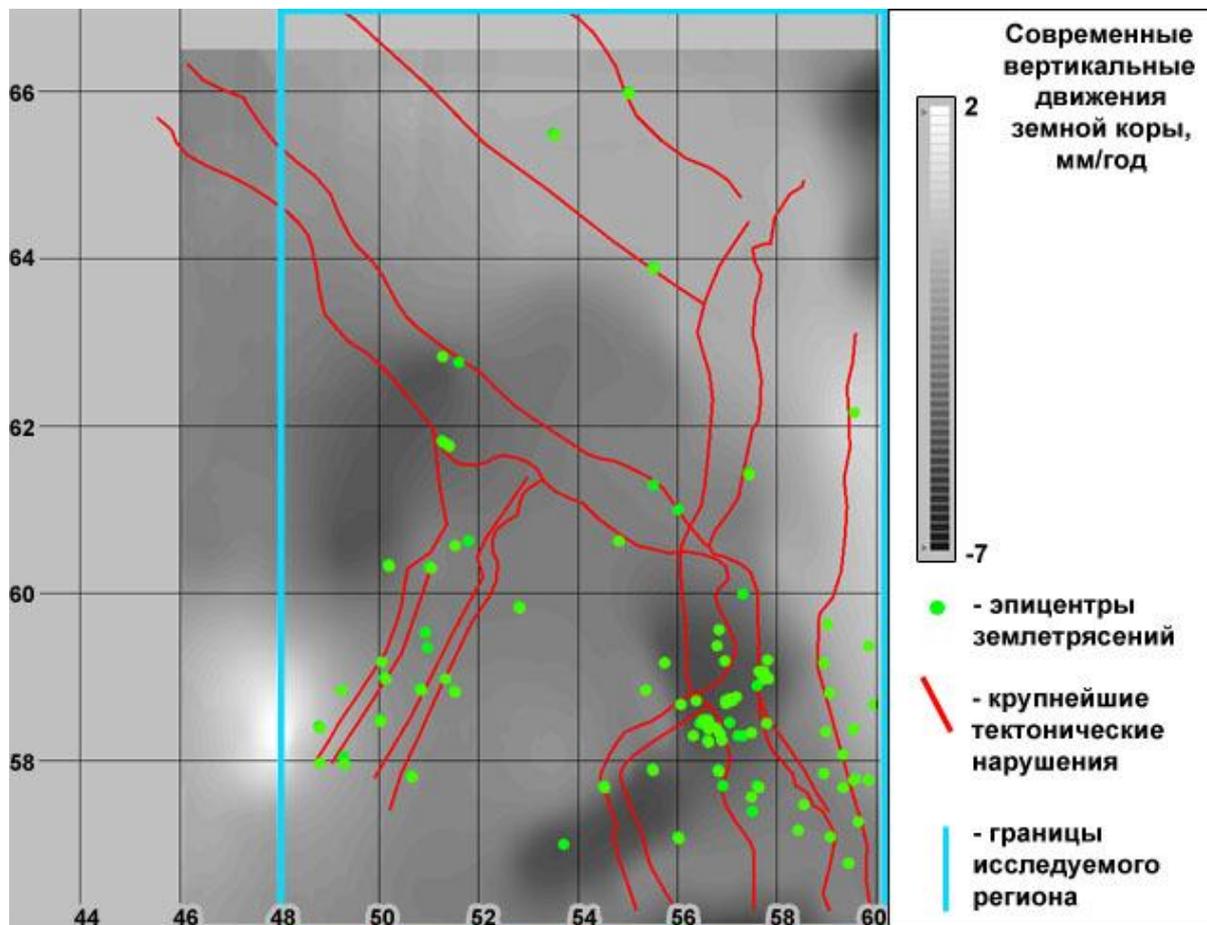


Рис.1.10. Карта современных вертикальных движений земной коры региона (данные «Карты СВДЗК, ЦНИИГАиК и ГУГК СССР», 1989 г.)

Совпадение значительной части эпицентров землетрясений и выделенных зон позволяет отнести скорости современных вертикальных движений земной поверхности к важному признаку, востребованному для выделения зон возможных очагов землетрясений.

Из анализа полученных данных следует, что наличие больших скоростей современных вертикальных движений земной коры не является обязательным фактором для возникновения сейсмической активности. Разным тектоническим структурам соответствует своя связь между сейсмичностью и современными вертикальными движениями земной коры. Так Кировско-Кажимскому авлакогену не соответствуют ярко выраженные зоны с положительными или отрицательными скоростями современных вертикальных движений земной коры. Очевидно, что причины и условия возникновения сейсмичности этого района отличаются

от условий, характерных для возникновения сейсмичности в Пермском крае. Рассматривая Кировско-Кажимский авлакоген как отдельную структуру, можно выявить взаимосвязь сейсмической активности и глубины залегания фундамента земной коры.

В настоящее время недостаточно данных для оценки влияния современных вертикальных движений земной коры на формирование механизма региональных землетрясений. Причины, вызывающие такие движения, также изучены слабо. Можно лишь предположить, что техногенная нагрузка, вызванная образованием водохранилищ и разработкой месторождений полезных ископаемых, не оказывает решающего влияния ни на движения земной коры, ни на региональную сейсмичность. Таким образом, исследование связи современных вертикальных движений земной поверхности с границей Мохоровичича, глубиной залегания фундамента и региональной сейсмической активностью позволяет выделить еще один параметр, необходимый для построения зон возможных очагов землетрясений. Относительная доступность метода повторного нивелирования, а также появление новых методов точного измерения не только вертикальных, но и горизонтальных движений земной коры с помощью GPS наблюдений позволяет использовать его для выделения и уточнений зон возможных очагов землетрясений на исследуемой территории.

Параметр не является универсальным и может быть использован лишь в качестве дополнительного. При использовании этого параметра требуется учитывать как природу исследуемого объекта, его происхождение, тектонику, геологическое строение, так и длительность проводимых наблюдений, точность используемой аппаратуры, цикличность процессов, происходящих в Земле, и другую информацию.

1.6. Мощность нижнего слоя земной коры

В качестве одного из параметров, связанных с землетрясениями была выбрана мощность нижнего слоя земной коры. Минимальная мощность

слоя составляет 6-8 км на севере и северо-востоке исследуемого региона и увеличивается до 21 км на юго-востоке региона, под Уралом. Изменения мощности этого слоя хорошо сопоставляются с крупными тектоническими нарушениями и с Кировско-Кажимским авлакогеном. Глубина залегания этого слоя на восточной окраине Восточно-Европейской платформы составляет 20-30 км и увеличивается под Уралом и Тиманским регионом до 36-38 км (Юдахин, 2003). 67 землетрясениям, составляющим 74% от общего количества землетрясений, соответствуют мощности слоя от 9 до 13 км при изменении мощности слоя от 4 до 21 км (рис. 1.11).

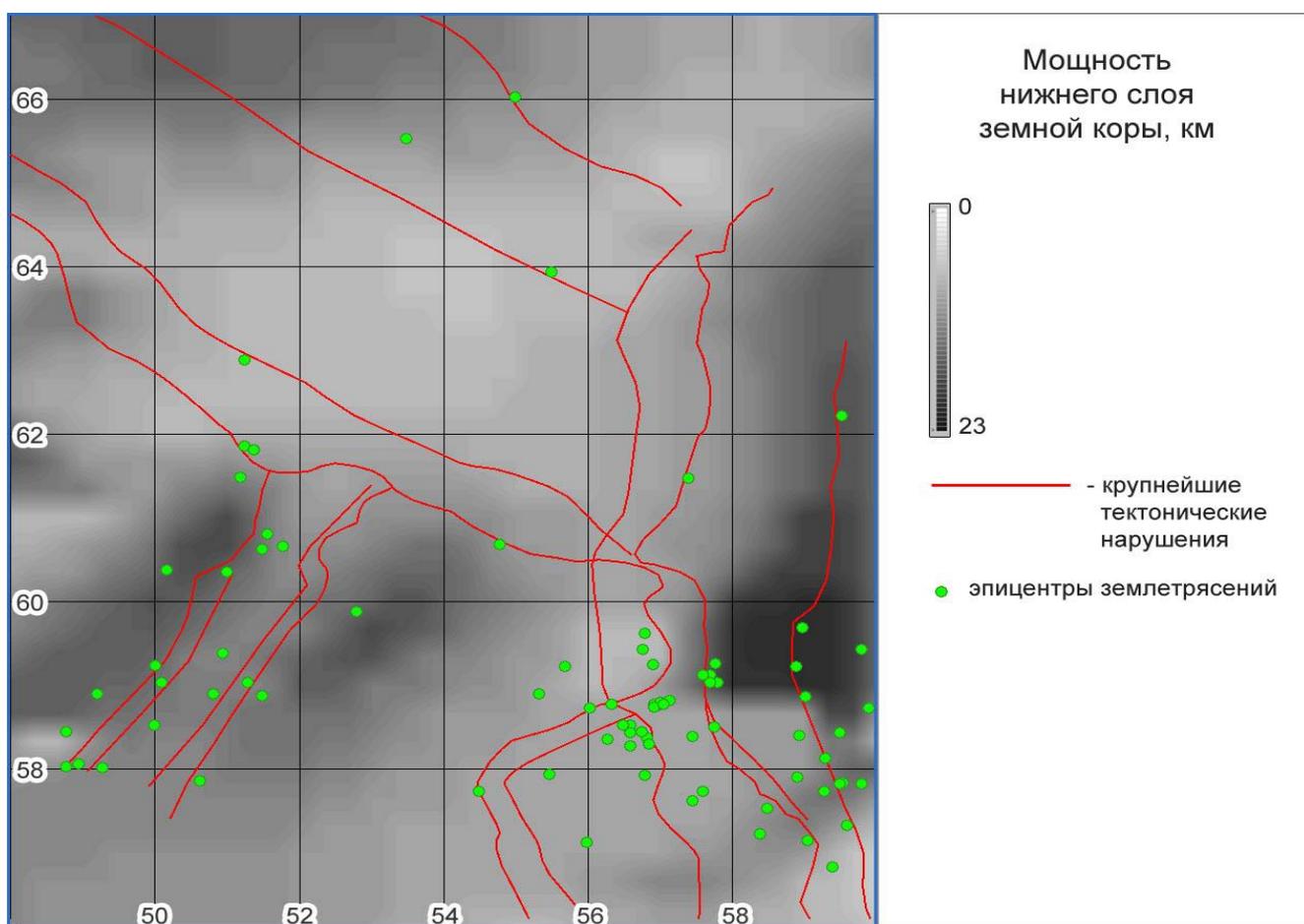


Рис. 1.11. Мощность нижнего слоя земной коры
(данные «Института проблем...»)

1.7. Геофизические поля

В работе использовалось гравитационное поле в редукции Буге, полученное по данным спутниковых наблюдений (Sandwell и др., 2009-

2013; New..., 2014), (рис.1.12). Для исследуемого региона характерны комбинации крупных положительных и отрицательных аномалий гравитационного поля в редукции Буге. Наиболее выражена расположенная в восточной части крупная положительная аномалия, связанная с Уралом. Крупные положительные аномалии связаны с Восточно-Европейской платформой и Тиманской грядой. Положительные аномалии осложнены рядом мелких аномалий изометричной формы.

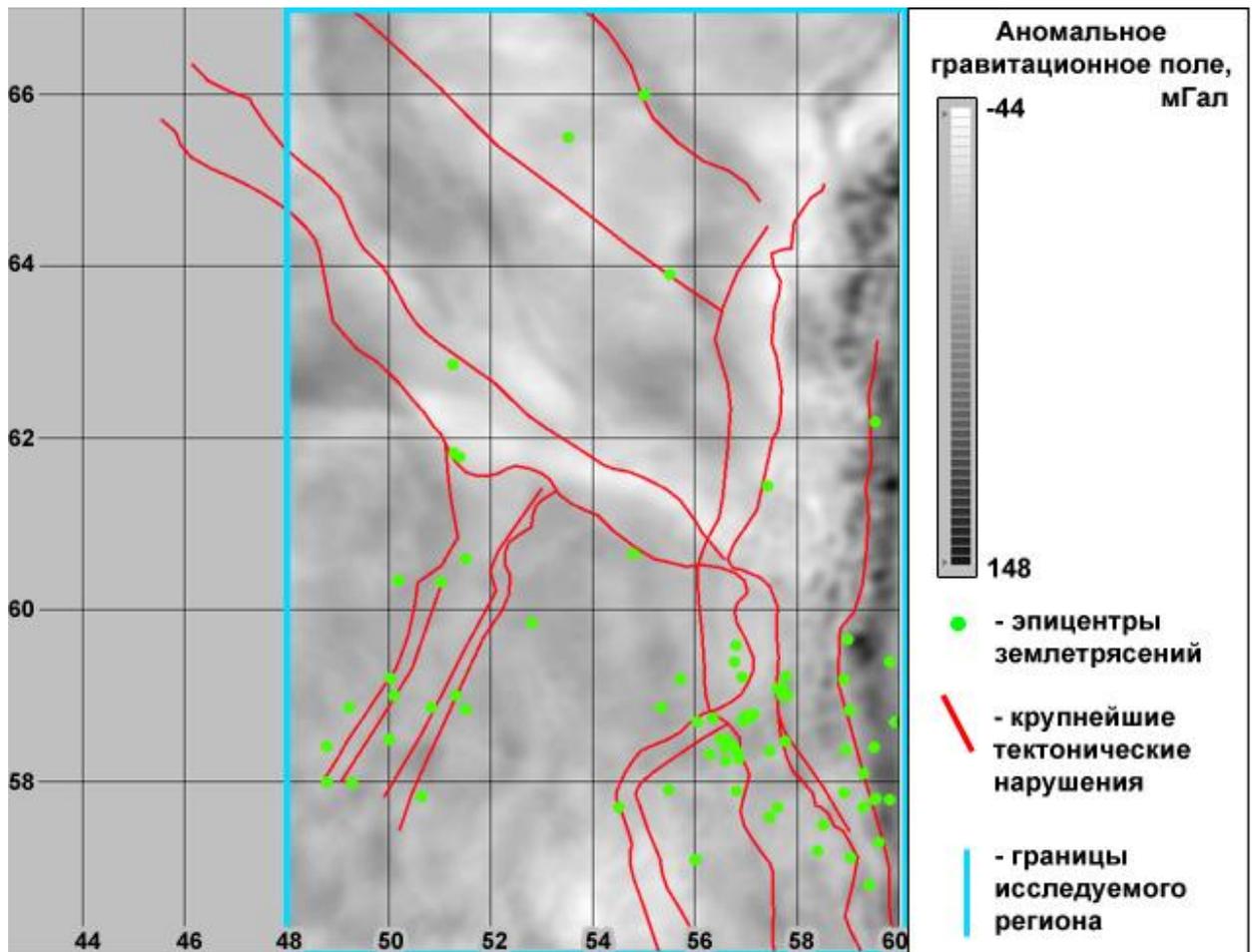


Рис. 1.12. Карта гравитационного поля исследуемого региона (по данным «Satellite Geodesy...»)

Крупнейшие отрицательные аномалии связаны с северной частью Предуральского краевого прогиба, с Притиманским прогибом и Ижма-Печорской моноклиналью. Крупная аномалия расположена в месте сочленения зоны Припечорских разломов и Предуральского краевого прогиба. В южной части отрицательная аномалия связана с Камско-

Бельским авлакогеном. Слабая отрицательная аномалия, возможно связанная с Верхнекамским месторождением калийных солей, находится в юго-восточной части исследуемого региона. С аномалиями гравитационного поля хорошо сочетаются крупнейшие тектонические нарушения, но связь поля с расположением эпицентров землетрясений не прослеживается. Анализ гравитационных аномалий позволяет выявить их источники и определить глубины (Гершанок, 1997).

Для выявления связи сейсмичности и геофизических полей, использовался модуль горизонтального градиента гравитационного поля (рис. 1.13).

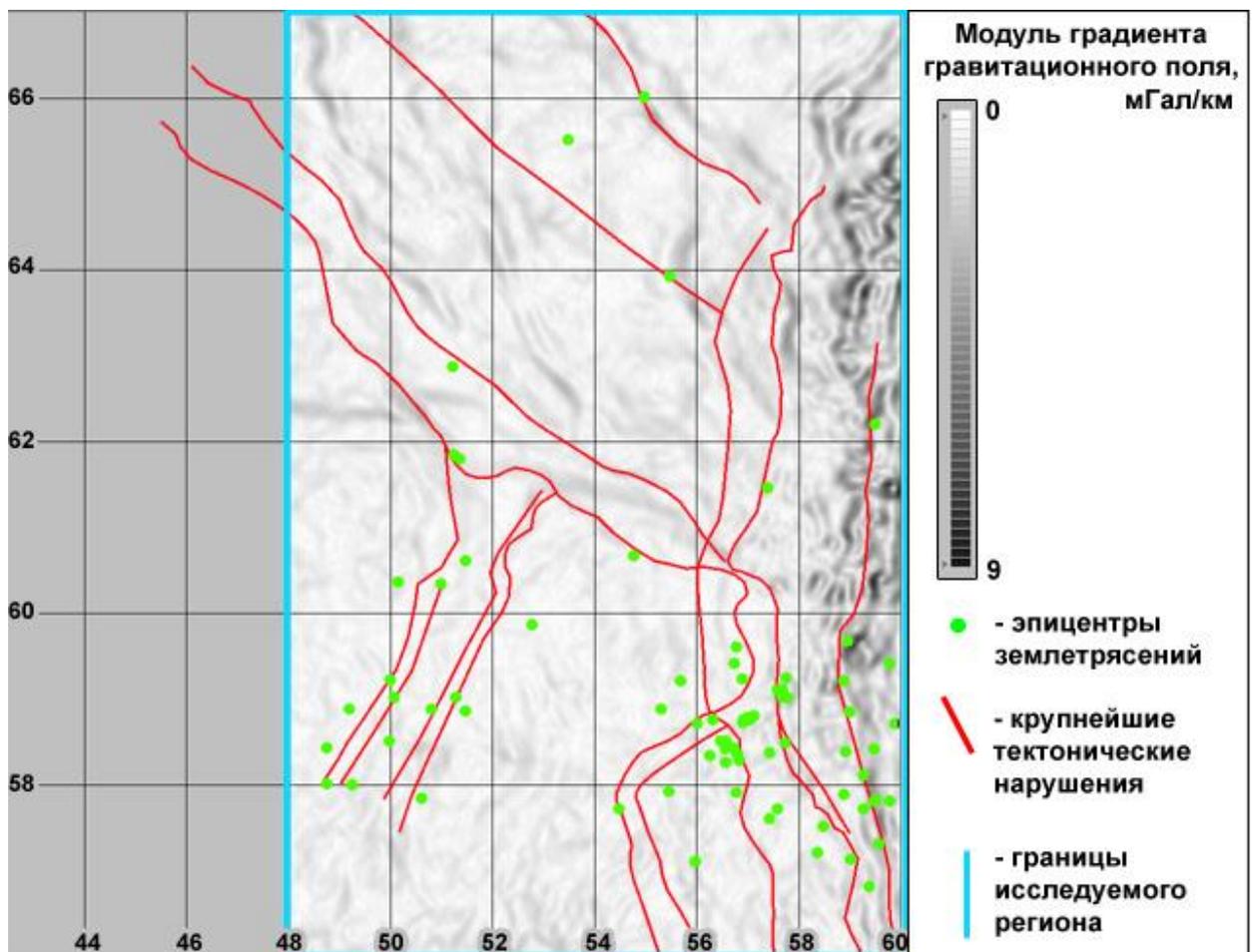


Рис. 1.13. Карта модуля горизонтального градиента гравитационного поля исследуемого региона

Основные максимумы модуля градиента гравитационного поля расположены в восточной части исследуемого региона и связаны со

структурами Урала. Также прослеживается связь максимумов модуля градиента гравитационного поля с восточной окраиной Восточно-Европейской платформы и зоной ее сочленения с Печорской плитой, на которой также можно выделить отдельные линейные зоны максимальных значений данного параметра.

Хорошо прослеживается связь региональных тектонических нарушений и линейных зон максимальных значений параметра, также можно выделить линейные зоны, связанные с Кировско-Кажимским и Камско-Бельским авлакогенами.

При детальном анализе выявлена связь расположения эпицентров землетрясений со значениями модуля градиента гравитационного поля. 79 эпицентрам землетрясений, или 88% от всех очагов землетрясений соответствуют значения горизонтального градиента гравитационного поля – 0,3–1,5 мГал/км при изменении поля в регионе от 0 до 8,7 мГал/км.

Землетрясения не находятся вблизи зон с максимальными значениями параметра. Наличие большого количества аномалий создает весьма дифференцированную общую картину, что затрудняет использование модуля горизонтального градиента гравитационного поля, позволяя использовать его лишь в качестве дополнительного параметра для выделения зон ВОЗ.

В работе использовалось аномальное магнитное поле. Его значения рассчитаны по двухминутной сетке по данным спутниковой, морской, аэромагнитных и наземных магнитных съемок (рис. 1.14).

Карта аномального магнитного поля хорошо соответствует тектонике исследуемого региона и имеет полосовидную структуру (Гершанок, 2005). На карте можно выделить крупные аномалии, соответствующие Уралу, восточной окраине Восточно-Европейской платформы, Печорской плите и Предуральскому краевому прогибу. Хорошо выделяются зоны аномалий, связанные с Кировско-Кажимским и Камско-Бельским авлакогенами. Прослеживается связь аномалий с крупнейшими тектоническими нарушениями.

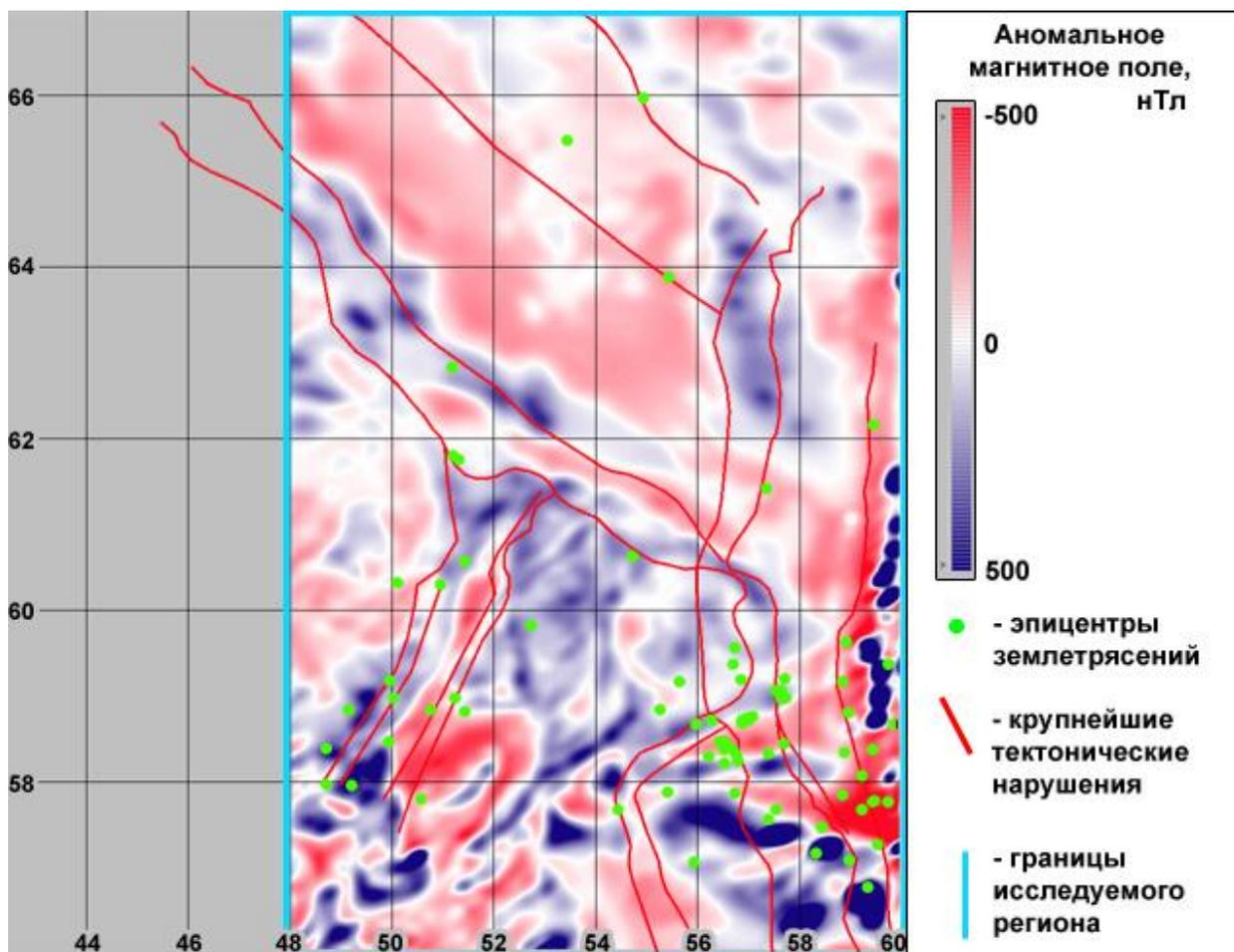


Рис. 1.14. Карта аномального магнитного поля исследуемого региона
(по данным «Earth Magnetic Anomaly Grid...»)

Для региона характерна связь пониженных значений аномального магнитного поля с расположением крупных и некоторых мелких отрицательных структур. Так пониженные значения поля соответствуют центральной части Притиманского прогиба, и южным частям Камско-Бельского и Кировско-Кажимского авлакогенов. В южной части Предуральского краевого прогиба отмечены несколько положительных аномалий со значениями до 500 нТл, которые сопряжены с крупной отрицательной аномалией. Рядом с границами этих аномалий находятся эпицентры крупнейших землетрясений исследуемого региона. Также отрицательная аномалия находится в центральной части прогиба в зоне сочленения Урала с Печорской плитой.

Ярко выражены субширотные аномалии, расположенные в восточной части региона, к северу от Перми. Так Пермская субширотная магнитная аномалия характеризуется значениями 150-500 и более нТл. К северу от нее расположена Висимская субширотная отрицательная магнитная аномалия, а к югу положительная Кунгурская аномалия. Именно с границами этих аномалий связаны крупнейшие землетрясения Пермского края.

Крупнейшая отрицательная аномалия расположена в северо-западной части региона и связана с северной частью Тиманской гряды и с Ижма-Печорской моноклиной. Южной части Тиманской гряды и сопряженной с ней части Притиманского прогиба соответствуют положительные значения аномального магнитного поля. Восточную окраину Восточно-Европейской платформы также характеризует крупная положительная аномалия.

При исследовании связи сейсмичности и аномального магнитного поля выявлено, что многие эпицентры землетрясений расположены вблизи нулевой изолинии. Особенно это характерно для юго-восточной части региона. Наименьшее соответствие расположения эпицентров и нулевой изолинии аномального магнитного поля характерно для сейсмических событий, произошедших лишь в юго-западной части Кировско-Кажимского авлакогена. Исследование позволяет использовать аномальное магнитное поле в качестве одного из основных информативных признаков для выделения зон ВОЗ.

Исследование связи сейсмичности с рельефом земной поверхности, мощностью среднего и верхнего слоя земной коры, тепловым потоком и данными GPS наблюдений показало, что эти параметры являются неинформативными для выделения зон возможных очагов землетрясений в регионе.

Выводы:

Исследуемый регион представляет собой совокупность структур различной направленности, разделенных глобальными и региональными

разломами. Выявлены структуры, которые могут генерировать землетрясения. Это Предуральский прогиб, Кировско-Кажимский и Камско-Бельский авлакогены и разломы Печорской плиты.

Изучение строения земной коры, современных вертикальных движений, крупнейших тектонических нарушений, анализ геофизических полей позволили выделить объемы среды со специфическими свойствами, благоприятными для возникновения землетрясений в исследуемом регионе.

Проведен анализ разнородной многопараметровой информации, включающей геологические и геофизические данные о строении региона, на основании которого определены информативные параметры, необходимые для выделения зон возможных очагов землетрясений.

Наиболее информативными признаками, позволяющими выделить зоны ВОЗ, являются: расположение тектонических нарушений, градиент гравитационного поля, скорости современных вертикальных движений, мощность нижнего слоя земной коры и глубина залегания поверхности Мохоровичича.

Связь сейсмичности с этими параметрами позволяет определить их информативность и возможность их использования для построения зон ВОЗ.

80 из 90 эпицентров сейсмических событий, или 89% из них, расположены на расстоянии 25 км и менее от выбранных тектонических нарушений.

Информативным элементом является горизонтальный градиент гравитационного поля. 79 эпицентрам землетрясений, или 88% от всех очагов землетрясений, соответствуют значения горизонтального градиента гравитационного поля – 0,3-1,5 мГал/км при изменении поля в регионе от 0 до 8,7 мГал/км.

Расположение 63 из 90 эпицентров сейсмических событий, или 70% из них, соответствует области современных вертикальных движений земной коры от 4 до 6 мм/год (Баранов, 2014).

Изменения мощности нижнего слоя земной коры хорошо сопоставляются с крупными тектоническими нарушениями и с Кировско-Кажимским авлакогеном. 68 землетрясениям, составляющим 76% от общего количества землетрясений, соответствуют мощности слоя от 9 до 14 км, при изменении мощности слоя от 4 до 21 км.

Анализ связи землетрясений и глубины залегания поверхности Мохоровичича показывает, что 68 из 90 землетрясений, или 75%, приурочены к глубинам залегания от 40 до 44 км, при изменении глубины залегания от 33 до 47 км, причем 51 из них относится к глубинам 40-42 км [Баранов, 2017].

Таким образом, выявлены наиболее информативные параметры, свидетельствующие о сейсмическом потенциале региона. Первое защищаемое положение доказано.

2. СЕЙСМИЧНОСТЬ И СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

2.1. Основные этапы развития сейсмического районирования региона

К первым исследованиям сейсмичности восточной окраины Восточно-Европейской платформы относятся работы А.П. Орлова и И.В. Мушкетова (Орлов, 1873; Мушкетов, 1893). В дальнейшем к этой теме обращались З.Г. Вейс-Ксенофонтова и В.В. Попов, которыми был составлен каталог, включивший 40 местных землетрясений за период с 1868 по 1939 гг. с выделением их типов.

З.Г. Вейс-Ксенофонтова и П.Э. Штеллинг в 1940 г. занимались исследованиями землетрясения, произошедшего 17 августа 1914 г., охватившего весь Средний Урал, и сопоставили полученную карту изосейст с геологическим строением региона. Эти же авторы составили первую «Схему сейсмичности Урала» (Вейс-Ксенофонтова, 1940).

В 1961 г. А.Я. Левицкой была опубликована составленная на основании каталога Института Физики Земли АН СССР карта распределения эпицентров землетрясений Урала с 1693 по 1958 год, основанная на историческом описании и инструментальных наблюдениях 40 региональных землетрясений (Левицкая, 1961).

В 1978 г. была построена «Карта сейсмического районирования СССР», в соответствии с которой восточная окраина Восточно-Европейской платформы была отнесена к асейсмичным территориям, с интенсивностью землетрясений не более 4-5 баллов по сейсмической шкале MSK.

И.В. Ананьин в период с 1970 по 1980 гг. провел анализ имеющихся исторических и инструментальных наблюдений, зарегистрированных в исследуемом регионе, связав их с геологическими и геофизическими особенностями строения Восточно-Европейской платформы и Урала (Ананьин, 1968-1980). Им были построены карты изосейст сильных

землетрясений и предложена формула для вычисления магнитуды землетрясения по данным макросейсмологии. И.В. Ананьин установил изменение сейсмической активности во времени и выделил периоды повышенной сейсмической активности. На основании этих исследований в 1980 году на «Карту сейсмического районирования СССР» в районе Среднего Урала была нанесена зона 6-ти балльных землетрясений.

С 1992 года научными сотрудниками лаборатории природной и техногенной сейсмичности ГИ УрО РАН А.А. Маловичко, Т.С. Блиновой, Р.А. Дягилевым и другими проводится обширная работа по совершенствованию региональной сети сейсмического мониторинга и исследованию сейсмичности. Получены и опубликованы уникальные материалы, связанные с сейсмической активностью региона, построены схемы зон возможных очагов землетрясений различных иерархических уровней для Западно-Уральского региона (Блинова, 1994-2003; Баранов, 2003; Маловичко, 1992-2011 и др.). Результаты этих исследований использованы для построения серии карт «Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97)» (Общее..., 1998). На этой карте Пермская и Кировская области входят в состав зоны 6-7 балльных землетрясений, а Удмуртия – 6-ти балльных землетрясений (рис. 2.1).

В 2000 г. А.А. Никонов составил каталог ощутимых землетрясений Вятского края, включив в него шесть землетрясений (Никонов, 2000). Для этих землетрясений составлены схемы макросейсмических полей и определены основные параметры. До этого в каталогах Вятского края значилось три землетрясения (Ананьин, 1988). Исследованиям сейсмической активности на севере региона, а также в районе Кировско-Кажимского авлакогена, посвящены работы В.В. Удоратина и В.А. Лютоева, Институт геологии Республики Коми (Удоратин, 2002 – 2012, Лютоев, 2001). В результате работ, после анализа разностороннего материала по геологическому и тектоническому строению региона, неотектонической активности и другой информации были выделены

потенциально активные участки возможных очагов землетрясений (рис. 2.2).

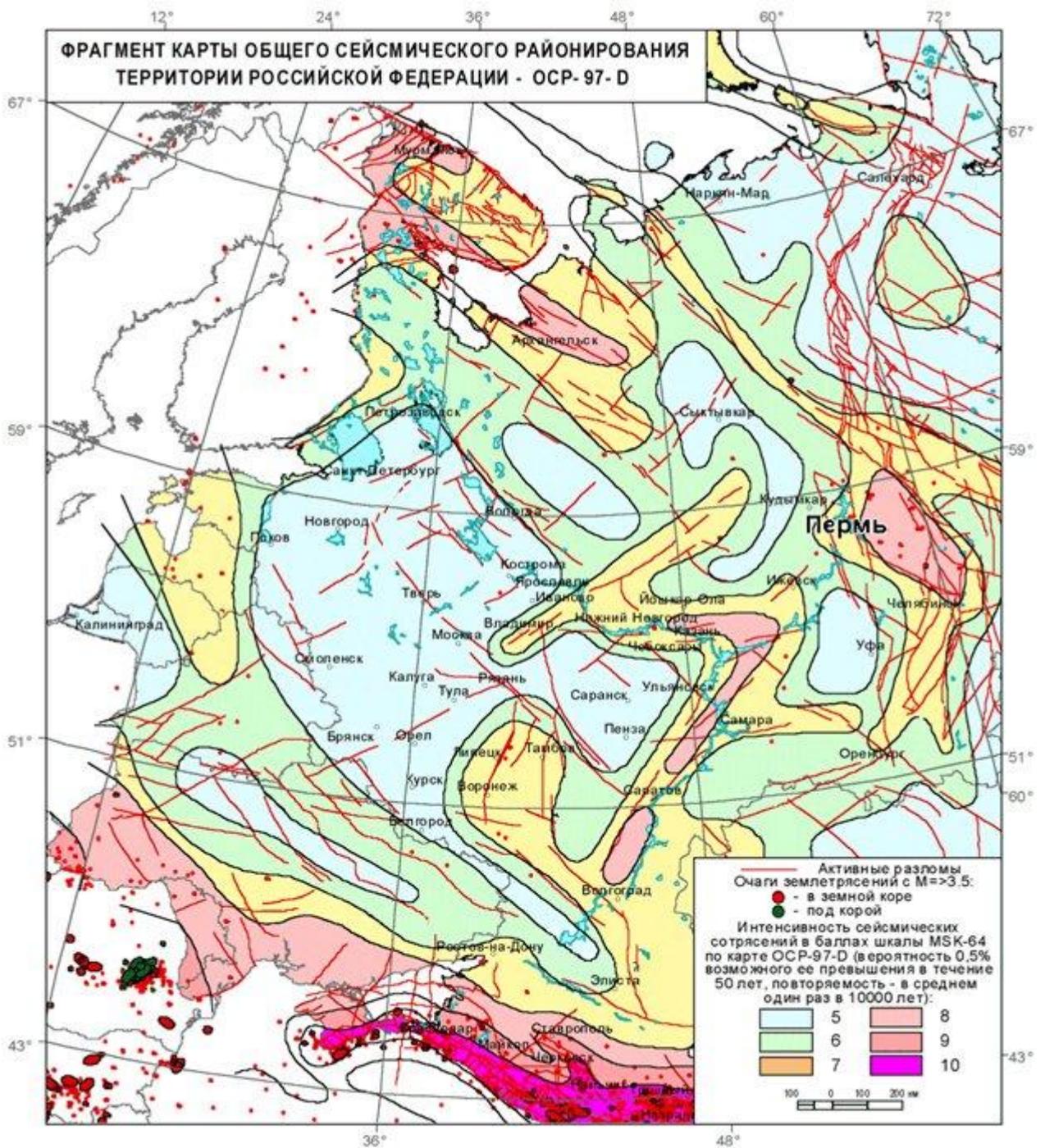


Рис. 2.1. Фрагмент карты ОСР-97-D для территории Российской Федерации

Исследованию сейсмичности и выделению зон ВОЗ Уральского региона посвящены работы А.Н. Гуляева, Институт Геофизики им. Булашевича, г. Екатеринбург (Гуляев 2016, 2017).

В настоящее время продолжается работа по исследованию региональных землетрясений, пополнению каталога, развитию сети региональных сейсмических станций и разработка новых методов сейсмического районирования слабоактивных регионов.

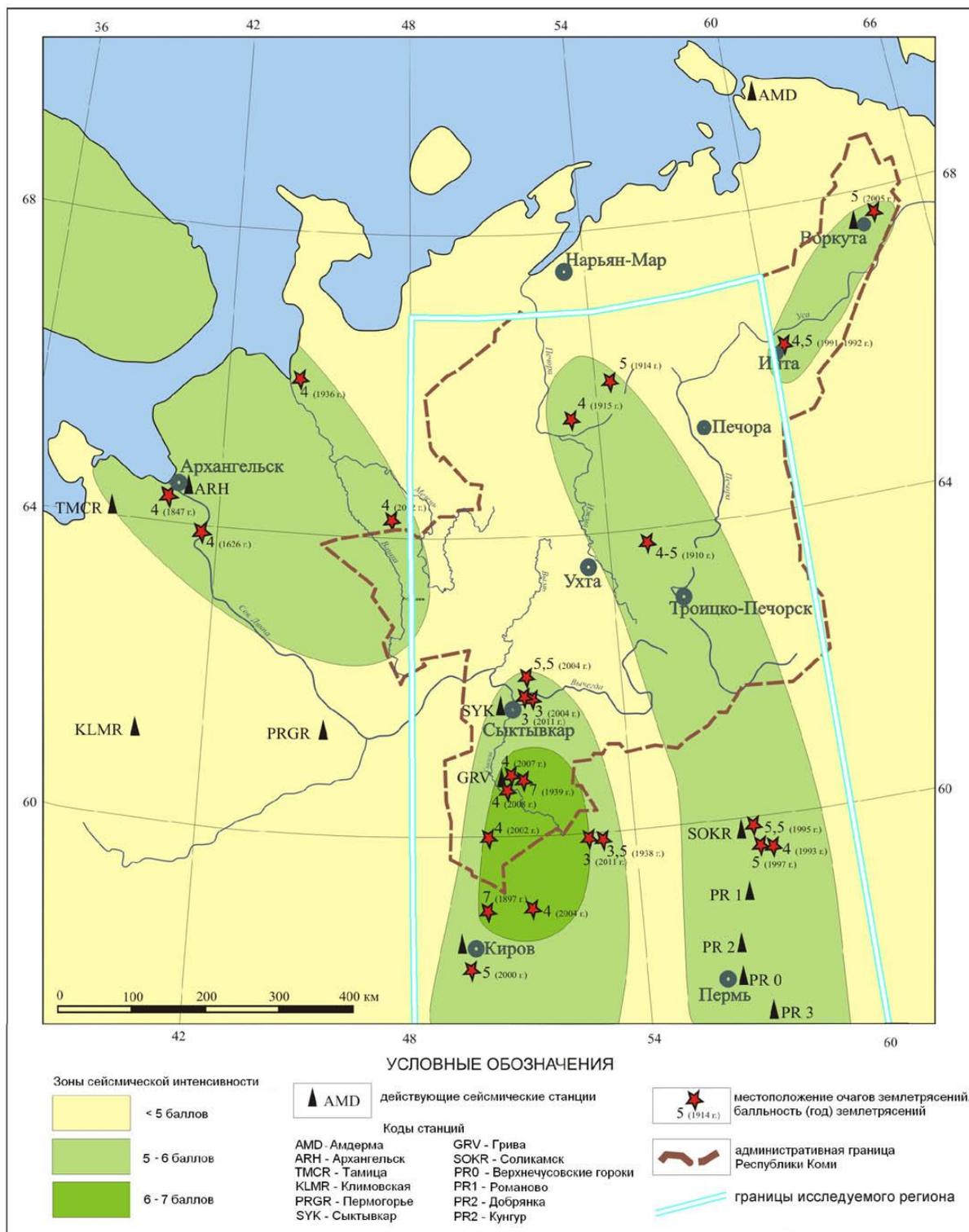


Рис. 2.2. Схема сейсмического районирования Республики Коми и прилегающих территорий. (Глубинное..., 2011)

Небольшое количество землетрясений в исследуемом регионе требует анализа многопараметровой разнородной геологической и геофизической информации для выделения зон возможных очагов землетрясений. Построение зон ВОЗ возможно только на основе комплексного анализа всех имеющихся геологических, геофизических, геоморфологических, космических, геодезических материалов и других данных, получения и обработки результатов инструментальных исследований с помощью региональной сети сейсмического мониторинга (Глубинное..., 2011).

Для дальнейшего совершенствования исследований, решения фундаментальных задач сейсмологии, получения оценки сейсмической опасности исследуемого региона необходимо развивать сеть наблюдательных пунктов, сбор и передачу сейсмической информации в центры ее обработки.

2.2. Развитие сети сейсмологического мониторинга

Территория Западного Урала традиционно относится к областям со слабой сейсмической активностью. За исторический период на Урале не было зарегистрировано катастрофических землетрясений. Самое сильное землетрясение, произошедшее в районе Билимбаевского завода, в 56 км к северо-западу от г. Екатеринбурга в 1914 году, имело магнитуду, по разным источникам, от $M=5.5$ до $M=5.0$ и не привело к значительным разрушениям (Блинова, 2003; Землетрясения, 2007). Тем не менее, неотектоническая активность, наличие которой подтверждается нивелированием и наблюдениями на станциях спутниковой геодезической сети (GPS) (Уткин, 2010, Панжин, 2015), создает возможную угрозу возникновения землетрясений, потенциально опасных для городских агломераций, систем нефтепроводов и газопроводов, ГЭС и других важных социальных и технических объектов. Добыча углеводородов и разработка месторождений полезных ископаемых также приводит к разного рода техногенным сейсмическим событиям, воздействие которых на жизнь людей и инфраструктуру различных объектов требует изучения. Свой вклад в

сейсмичность вносят происходящие на территории Западного Урала процессы карстообразования и связанные с ними денудационные землетрясения (Вейс-Ксенофонтова, 1940). Таким образом, исследование сейсмического режима региона является важной научной и прикладной задачей, для решения которой необходимо использовать комплекс разномасштабных инструментальных измерений, различные методы обработки полученных данных, специальные методы прогноза сейсмической активности и ее воздействия на окружающую среду.

Первые инструментальные сейсмологические наблюдения на Урале связаны с работами Б.Б. Голицына, открывшего в 1906 году сейсмостанцию в г. Екатеринбурге, которая функционирует по настоящее время. Сейсмостанция была оснащена высокочувствительными электромеханическими приемниками. Результаты наблюдений публиковались в специальном бюллетене. В настоящее время сейсмическая станция Екатеринбург входит в сейсмическую сеть Геофизической службы РАН.

С 1957 года проводились исследования в Кизеловском угольном бассейне, связанные с безопасностью разработки месторождения и прогнозом горных ударов. В конце 1983 года на шахте «Северная» была запущена в эксплуатацию современная по тому времени аналоговая 10-канальная сеть сейсмического контроля. Осуществляя наблюдения за горными ударами в угольных шахтах, эта система также позволяла регистрировать наиболее крупные местные землетрясения на территории, прилегающей к бассейну. Исследования проводились вплоть до прекращения работ шахт бассейна. Их результаты были использованы в дальнейшем при развитии сейсмических сетей на других горнодобывающих объектах.

В 1970 году начала работу сейсмическая станция Арти. В 1989 году она была включена в международную сеть IRIS и оборудована в соответствии с современными стандартами. Станция (кодовое наименование ARU) оснащена широкополосными сейсмометрами типа *STS-IVVBB Streckeisen* и короткопериодными *GS 13 Teledyne-Geotech*. Диапазон регистрируемых

колебаний: от лунно-солнечных приливов до 40 Гц. Обработка данных с 2003 года выполняется в оперативном режиме в обсерватории «Арти». Для этого используется программа *WSG*, разработанная в Геофизической Службе РАН для этого типа аппаратуры. Обработка сейсмических записей производится также и с помощью программы *SeisGram*. Сейсмометры станции в 2009 г. были установлены в новое подземное приборное сооружение, что позволило значительно улучшить качество записи сейсмограмм

В 1983 г. на Полярном Урале (в административном отношении – на крайнем северо-востоке Архангельской области) была запущена в эксплуатацию сеймостанция «Амдерма». В 1993 году на ней было установлено цифровое оборудование.

Проводились сейсмологические исследования на Северо-Уральском бокситовом руднике, а также эпизодические исследования, связанные с проведением ГСЗ и ядерными взрывами (Дружинин, 1975, 1976; Сейсмичность..., 2015). Разрозненность и направленность исследований на решение узкого круга задач не позволяли получать сведения об очагах землетрясений, собирать и систематизировать сведения о сейсмичности большого региона, проводить сейсмическое районирование, основанное не только на исторических данных, но и на результатах инструментальных наблюдений.

Первые работы по исследованию сейсмичности на Верхнекамском месторождении калийных солей были проведены лабораторией природной и техногенной сейсмичности ГИ УрО РАН в 1994 году. С 1995 года после аварии на руднике СКРУ-2 работы по исследованию сейсмической активности на территории шахтных полей стали проводиться систематически.

Несмотря на первоначальную нацеленность работ на решение конкретных практических задач в пределах месторождения, полученные данные также были использованы для оценки сейсмического режима в регионе. В настоящее время шахтные сети сейсмологического мониторинга

являются важным инструментом для целого ряда исследований, таких как построение скоростной модели земной коры и верхней мантии (Верхоланцев, 2011), повышение возможностей локации региональных сейсмических событий и др.

Постоянные инструментальные наблюдения в Республике Коми начались в 1995 году после установки в г. Сыктывкаре аналоговой сейсмической станции на базе Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Сейсмостанция расположена на Сысольском своде Русской плиты. Первоначально регистрация производилась с помощью короткопериодных сейсмоприемников СКМ-3М аппаратурой РС-II с записью на фотобумагу. С 1996 данные регистрируются с помощью цифрового регистратора «Дельта-01», а в дальнейшем был использован комплекс цифровой записи РССЦ. В 2000 году на сейсмостанции «Сыктывкар» был установлен модуль «SDAS» (Сейсмичность..., 2015). С 2003 года работает сейсмостанция «Ижма», которая в 2011 году была перенесена к югу от сейсмостанции «Сыктывкар» и получила название «Грива». Также в регионе проводятся временные сейсмологические исследования (Удоратин, 2011).

В 1999 году в рамках Государственной программы «Развитие федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений» выполнялись работы по развертыванию на территории Пермского края первой федеральной сейсмостанции. Местом ее размещения был выбран калийный рудник СКРУ-2 в г. Соликамск. Основная цель федеральной сейсмостанции «Соликамск» – регистрация и изучение крупных землетрясений, как на территории России, так и за ее пределами. Вместе с тем, по дополнительному соглашению с Геофизической службой РАН (г. Обнинск) было выполнено дооснащение сейсмостанции специальным высокочастотным оборудованием, позволяющим осуществлять контроль за региональной и местной сейсмичностью. Сейсмостанция представляет собой интегрированную систему сбора данных и обеспечивает регистрацию электрических сигналов в широком диапазоне частот. Основой регистрирующего комплекса стала американская система сбора

сейсмических данных фирмы REF TEC, состоящая из 2-х модулей: наземного и шахтного. Шахтный модуль Digital Acquisition System (DAS) имеет защищенное исполнение выше, чем IP67, пониженное энергопотребление и рассчитан на установку вблизи сейсмометров.

Модуль DAS включает: усилители, 16-ти разрядную АЦП, DSP-процессор, компьютер на базе SUN с жестким диском, коммуникационные порты для связи с терминалом или другим совместимым с IBM PC компьютером и порт связи для непосредственной передачи данных на приемный блок ARS.

Наземный модуль выполнен для установки внутри здания и предполагает обслуживание. Он состоит из блока ARS (Auxiliary Record System), антенны GPS и приемного блока GPS-receiver. ARS получает данные из DAS, управляет конфигурацией записывающих устройств, количеством и характеристиками сейсмических каналов, передает данные по последовательному порту в компьютер сбора данных для дальнейшей обработки пакетом ПО WSG. Для обеспечения бесперебойного питания применяются сетевой трансформатор (гальваническая развязка питающей сети) и блок питания с аккумуляторами.

В настоящее время в Соликамске используется следующая конфигурация: три непрерывных канала с сейсмодатчиками СМЗ-ОС с собственным периодом колебаний 50 с и частотой оцифровки $F_{adc} = 20$ Гц, три триггерных канала с сейсмодатчиками СМЗ-КВ с собственным периодом колебаний 2 с и частотой оцифровки $F_{adc} = 200$ Гц. Обе группы обеспечивают регистрацию сейсмических колебаний в полосе частот от 0.01 Гц до 40 Гц по трем ортогональным направлениям.

К 2003 году для изучения сейсмичности в Пермском крае Горный институт УрО РАН и Геофизическая служба РАН развернули современную сейсмологическую сеть, включающую федеральную и пять региональных сейсмических станций. Был создан региональный и два локальных центра сбора, обработки и хранения сейсмологической информации (Четырехуровневая..., 2011).

Проведенные работы позволили значительно увеличить регистрационные возможности сейсмической сети (рис. 2.3) (Сейсмичность..., 2015).

Для информирования о состоянии сейсмичности разработан информационный сайт «Сейсмологический мониторинг территории Западного Урала», на котором отображены общие сведения о сейсмичности и сейсмической опасности, информация о сети наблюдений на территории региона.

Проводимые работы по исследованию сейсмической активности исследуемого региона имеют большую практическую и научную значимость. В настоящее время непрерывные сейсмологические наблюдения на территории региона проводятся с помощью 12 одиночных сейсмостанций и одной локальной сейсмической группой. Увеличение количества станций привело к улучшению регистрационных возможностей региональной сети сейсмического мониторинга. На всей территории Пермского края возможна регистрация событий магнитудой более 2.5, а на территории исследуемого региона – начиная с 3.0 (Землетрясения, 2007).

Ежегодно сейсмическими станциями региона регистрируется примерно 5-6 тысяч сейсмических событий разной природы, из которых лишь незначительная часть (0.4%) являются региональными землетрясениями и микроземлетрясениями [Баранов, 2016, 2017].

Постоянно пополняется каталог региональных сейсмических событий, на основе которого проводятся работы по уточнению карт сейсмического районирования Западного Урала. По состоянию на конец 2017 года каталог насчитывал более 250 сейсмических событий природного и природно-техногенного характера. Материалы, полученные при исследованиях, проводимых для решения специальных задач по инженерной сейсмологии, оценке состояния трубопроводов, исследованиях на месторождениях углеводородов, также вносятся в единую базу данных и используются в научных целях.

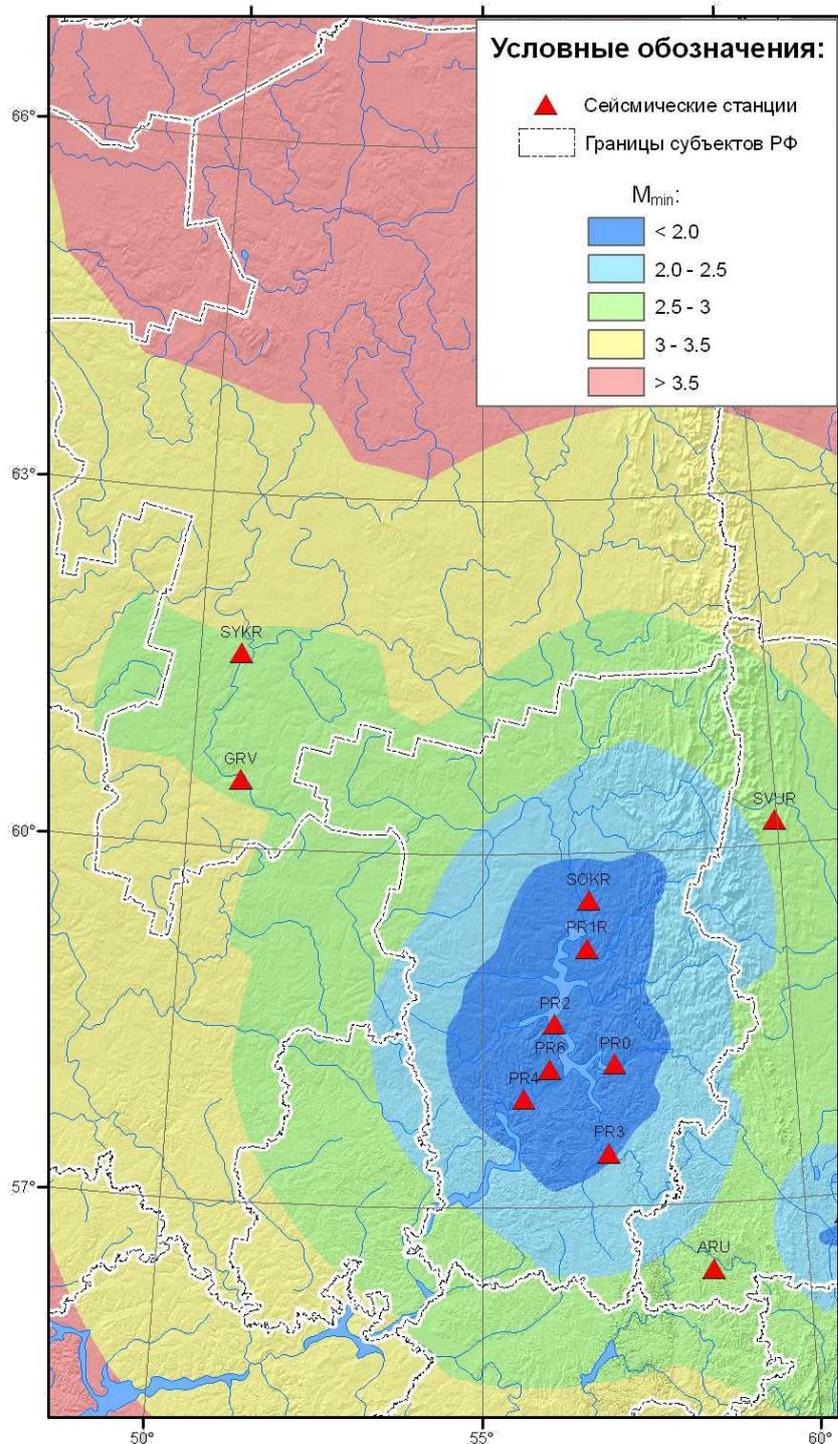


Рис. 2.3. Возможности регистрации сейсмических станций
Западного Приуралья

Развернутая сеть сейсмических станций позволяет уверенно проводить комплексную оценку различных региональных сейсмических событий, определять их параметры и сейсмический эффект. В случае необходимости сеть может быть дополнена, что позволит исследовать локальные сейсмические процессы. Результаты, полученные в ходе разномасштабных

наблюдений, не являются разрозненными, а интегрируются в общую базу данных и могут быть использованы совместно со всеми имеющимися материалами для обработки и обобщения полученной информации с целью дальнейших научных исследований региональной сейсмичности.

2.3. Сводный каталог землетрясений

В каталог вошли землетрясения, описанные в исторических документах, опубликованные различными исследователями (Сейсмические события, 2002; Блинова, 2003 и др.), зарегистрированные сейсмическими группами NORSAR и PERM. Из каталога были исключены землетрясения, эпицентры которых находились в пределах шахтных полей рудников на Верхнекамском месторождении калийных солей, горные и горно-тектонические удары на шахтах Кизеловского угольного бассейна, глубина которых составляла менее 4 км, предположительно обвальные землетрясения, а также все сейсмические события с магнитудой ниже представительного порога регистрации ($M_l < 1$).

При составлении каталога особое внимание было уделено отбраковке природно-техногенных событий и технологических взрывов, производимых в карьерах, расположенных в разных частях региона.

ОПИСАНИЕ КАТАЛОГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Каталог содержит информацию о 90 землетрясениях за период с 1788 по 2015 г. с магнитудами от 1.0 до 5.5 и глубиной от 3 до 33 км (таб. 1). У части землетрясений глубина не определена. Крупнейшим землетрясением, зарегистрированным на территории исследуемого региона, является Билимбаевское землетрясение 1914 года, имевшее магнитуду 5.5. Распределение сейсмических событий по магнитудам представлено на рис. 2.4.

Таблица 1

Дата	Время UTC	Широта	Долгота	Н, км	М	I(МСК)	Район	Источник
1788.05.04		57.80	59.80	15	3.7	4-5	Район Н.Тагила	Ананьин, 1977; Вейс-Ксенофонтова, 1940; Левицкая, 1961
1795.06.16–28		58.87	50.82	4	2	4	Кировская обл., р. Б.Холуница	Никонов, 1996
1798.05.23	00:30:00	57.90	56.80	26	5.3	6	Окр-ти г.Перми (п. Насадка)	Ананьин, 1977; Вейс-Ксенофонтова; Левицкая, 1961
1809.03.09	23:30:00	58.50	50.00	9	4.2	6	Вятский уезд, окр. г. Вятка,	Ананьин, 1977; Никонов, 1990, 1996
1813	00:00:00	58.70	59.90	15	3.7	4-5	Район В. Туры	Ананьин, 1977; Вейс-Ксенофонтова, 1940
1832.11.29	06:00:00	57.80	59.50	20	4.4	5	Район Н. Тагил	Ананьин, 1977, Вейс-Ксенофонтова;
1837.01.17	18:00:00	58.50	56.50	10	3.6	5	с. Добрянка	Ананьин, 1977; Вейс-Ксенофонтова, 1940, Левицкая, 1961
1845.01.19		58.50	56.50	7	3	4	с. Добрянка	Ананьин, 1977, Вейс-Ксенофонтова, 1940; Левицкая, 1961
1847.04.27	08:00:00	58.40	59.50	15	4.8	6	Район г. Кушва, р-н горы Благодать	Ананьин, 1977, Вейс-Ксенофонтова, 1940; Левицкая, 1961
1847.05.15		58.40	59.50		3	5	Район г. Кушва	Вейс-Ксенофонтова, 1940
1852.01		58.50	56.50		2.5	3,5	с. Добрянка	Вейс-Ксенофонтова, 1940
1868.05.23		57.50	58.50	15	4.3	6-7	Кын	Кабушин, 2001; Кабушин,1988; Каталог, 2005
1897.08.25	00:00:00	59.00	50.10		5	7	Землетрясение ощущалось по всей Вятской губернии	Ананьин, 1977, 1988
1902.09.19	17:03:00	58.10	59.30	12	3.5	4-5	Среднее течение р. Чусовой (Серебрянка)	Ананьин, 1977; Вейс-Ксенофонтова, 1940

1905.03.29		66.00	55.00		2	5	с. Мутный Материк	Special...
1908.03.13		58.85	51.50	10	3	4	г. Вятка, Слободской район Отмечено 2 толчка	Никонов, 1996
1908.07.01	07:41:00	57.70	54.50	10	3	5	с. Б. Соснова	Вейс-Ксенофонтова, 1940; Каталог, 1995
1910.01.01	20:00:00	63.90	55.50		2	4	с. Ухта, Кемского р-на	Special...;Белорусский...
1914.04.20	16:00:00	65.50	53.50		2		Пильегоры, Б.Печорского уезда	Special...; Белорусский...
1914.04.30		58.00	48.78	7	3	4	Нижнее течение р. Вятки	Никонов, 2000
1914.05.13		58.42	48.78	7	3	4	г. Котельнич, нижнее течение р. Вятки	Никонов, 1996
1914.08.17	04:57:01	56.80	59.40	26	5.5	6	Билимбаевский завод, 56 км от Екатеринбурга	Ананьин, 1977; Вейс-Ксенофонтова, 1940
1919.02.06		57.80	59.80		2	4	Н. Тагил	Вейс-Ксенофонтова, 1940;
1931.01.15	03:58:00	58.50	56.60	2	2.7	6	с. Добрянка	Ананьин, 1977; Вейс-Ксенофонтова, 1940
1931.01.16	21:30:00	58.50	56.60		2	3	с. Добрянка	Вейс-Ксенофонтова, 1940;
1931.01.19	08:00:00	58.50	56.60		2	3	с. Добрянка	Вейс-Ксенофонтова, 1940;
1938.12.31		59.85	52.80	10	3.2	4	Кайский район, северо-восток Кировской области	Вейс-Ксенофонтова, 1940; Никонов, 1996
1939.01.13	16:47:12.4	60.60	51.50	10	4.5	6	с. Нючпас, южные районы Республики Коми	Вейс-Ксенофонтова, 1940; Ананьин, 1977; Никонов и др., 2001
1955.04.19	08:46:12	59.00	57.70	15	4.0	5	г. Кизел	Ананьин, 1977; Каталог, 1995
1956.07.28	22:02:42	57.70	57.60	15	4.8	6	Пермь-Серьга-Кунгур	Ананьин, 1977; Шимановский, 1957; Каталог, 1995
1958.09.13	04:39:50	57.20	58.40	16	3.2	3	п.Шамары-Шаля	Ананьин, 1977
1968.07.02	23:17:00	59.00	57.80		2.7	5	г. Кизел	Данные, Ломакин...;

1970.02.21	07:09:15	59.40	59.80	10	4.0	5-6	Серов-Павда	Ананьин, 1977
1970.06.13	02:09:18	59.00	57.80	10	3.3	4	г. Кизел	Ананьин, 1977
1984.08.28	03:04:47	61.44	57.41	33	3.7		70 км на ю-в от г. Сыктывкара	Каталог, 1995
1986.08.28	11:06:53	58.25	56.60	5	3.5	4	Окр-ти г.Перми (п. Ляды)	NORSAR; Каталог, 1995
1986.12.22	10:31:47	59.20	55.70	5	3.5	4	п. Майкор	Кабушин, 2001; Кабушин, 1988; ,NORSAR;
1987.04.28	20:39:00	59.10	57.60	15	4.0	5,5	г. Кизел	Кабушин, 2001; Кабушин, 1988; ,Данные, Сысолятин...;
1989.07.14	10:31:00	58.40	56.60		2.0	4	п. Ярино	Данные, Сысолятин...;
1989.08.11	10:34:00	58.40	56.60		2.0	4	п. Ярино	Данные, Сысолятин...;
1990.10.10	07:39:00	59.10	57.70	5	2.7	3	г. Кизел	Кабушин, 2001; Кабушин, 1988; Данные, Сысолятин...; Каталог, 1995а
1990.12.07	15:01:47	59.10	57.70	5	3.0	4	г. Кизел	Данные, Сысолятин...; ,20, Каталог, 1995а
1993.10.25	13:31:04	59.23	57.77	4	2.6	4	г. Березники	Маловичко, 1997
1995.01.05	12:46:02	59.59	56.80	3	4.7	5,5	г. Соликамск	Маловичко, Блинова, 1997
1995.07.03	09:04:10	59.22	56.92		2.1		г. Березники	Данные ГИ УрО РАН
2000.01.18	04:05:43	57.99	49.28	10	4.0	5	пос. Нижнеивкино и Верхошижемье, центральная часть Кировской области	Шаров, Маловичко, Щукин и др., 2007; Габсатарова, Чепкунас, 2006
2000.01.29	10:20:08	57.10	56.00		2.0		Пермский край, Кунгурский район, п.Березовка	Данные ГИ УрО РАН
2002.11.09	06:47:15	60.35	50.17		3.1		Респ. Коми, д.Загарье,	Данные ГИ УрО РАН
2003.07.18	22:59:03	58.42	56.75		1.8		Пермский край, Добрянский район, д.Ярино	Данные ГИ УрО РАН
2004.01.17	17:07:29	58.75	56.34		1.1		Пермский край, Добрянский район, п.Н. Лух	Данные ГИ УрО РАН

2004.04.11	20:13:39	59.20	58.90		1.6		Пермский край, Горнозаводский район, п.Средняя Усьва	Данные ГИ УрО РАН
2004.05.18	15:59:00	59.00	51.3	10	3.7		Нагорский район Кировской области	Шаров, Маловичко, Шукин и др., 2007; Землетрясения в России в 2004 г., 2007
2004.05.28	19:59:00	61.78	51.38		2.8		с. Додзь, Корткеросский район Республики Коми	Шаров, Маловичко, Шукин и др., 2007
2004.06.16	17:25:51	58.37	58.94		2.2		Пермский край, Горнозаводский район, п.Старый Бисер	Данные ГИ УрО РАН
2004.09.17	18:58:08	62.85	51.25	11	3.5	5.5	пгт. Емба, п. Ракпас, п. Тракт	Шаров, Маловичко, Шукин и др., 2007; Землетрясения в России в 2004 г., 2007
2005.01.02	04:23:31	58.70	56.04		1.1		Пермский край, Ильинский район, г.Чермоз	Данные ГИ УрО РАН
2005.02.28	21:30:10	57.59	57.46		1.0		Пермский край, Березовский район, д.Марково	Данные ГИ УрО РАН
2005.09.21	20:40:19	57.30	59.60		2.9		Свердловская обл., г.В.Тагил	Данные ГИ УрО РАН
2005.11.12	17:45:32	58.84	59.03		1.5		Пермский край, Горнозаводский район, п.Медведка	Данные ГИ УрО РАН
2005.12.03	04:05:13	58.35	56.83		1.1		Пермский край, Чусовской район, п.Мутная	Данные ГИ УрО РАН
2006.10.03	22:22:47	58.74	56.93		1.0		Пермский край, Добрянский район, с.Перемское	Данные ГИ УрО РАН
2006.10.04	03:36:05	58.75	56.93		1.1		Пермский край, Добрянский район, с.Перемское	Данные ГИ УрО РАН
2006.10.04	03:40:13	58.75	56.93		1.2		Пермский край, Добрянский район, с.Перемское	Данные ГИ УрО РАН
2006.10.04	04:18:31	58.75	56.93		1.0		Пермский край, Добрянский район, с.Перемское	Данные ГИ УрО РАН
2006.10.04	06:11:30	58.75	56.93		1.5		Пермский край, Добрянский район,	Данные ГИ УрО РАН

							с.Перемское	
2006.10.04	07:45:13	58.75	56.93		1.1		Пермский край, Добрянский район, с.Перемское	Данные ГИ УрО РАН
2007.01.29	19:39:11	58.87	55.33		1.7		Пермский край, Ильинский район, д.Нифонтово	Данные ГИ УрО РАН
2007.04.27	20:29:16	57.70	59.29		3.1		Свердловская обл., г.Н.Тагил	Данные ГИ УрО РАН
2007.05.21	16:51:40	58.47	57.76		1.6		Пермский край, Чусовской район, д.Грузди	Данные ГИ УрО РАН
2007.11.17	18:38:50	57.81	59.54		1.8		Свердловская обл., г.Н.Тагил	Данные ГИ УрО РАН
2008.09.22	23:21:07	60.32	51.01		3.3		Койгородский район Республики Коми	Голубева, Верхованцев, Белевская, 2008
2008.12.16	17:04:47	57.91	55.48	20	2.8		Пермский край, г.Нытва	Данные ГИ УрО РАН
2009.10.20	04:45:50	57.83	50.64	10	3		Кировская область, п.Богородское	Данные ГИ УрО РАН
2011.01.19	17:18:12.6	61.83	51.26		2.8		с. Додзь, Корткеросский район Республики Коми	Удоратин, Арихина, 2011
2011.03.13	21:07:13	58.33	56.28		1.3		Добрянский район	Данные ГИ УрО РАН
2011.04.25	02:38:35	59.21	50.02		3.0		Нагорский район Кировской области, граница с Республикой Коми	Данные ИГ КНЦ УрО РАН, ГИ УрО РАН
2012.02.07	00:04:57	59.40	56.77		1.3		г. Березники	Данные ГИ УрО РАН
2012.02.23	22:32:10	58.74	57.06		1.3		Добрянский район	Данные ГИ УрО РАН
2012.05.23	02:57:33	58.72	56.96		1.9		Добрянский район	Данные ГИ УрО РАН
2012.12.28	21:15:15	58.77	57.01		1.6		Добрянский район	Данные ГИ УрО РАН
2013.04.27	11:32:34	57.88	58.91		2.9		Свердловская область	Данные ГИ УрО РАН
2013.09.21	21:39:41	59.66	58.98		1.7		Свердловская область	Данные ГИ УрО РАН

2014.01.05	06:29:57	58.27	56.85		1.5		Граница Добрянского и Чусовского районов	Данные ГИ УрО РАН
2014.01.28	04:41:43	62.19	59.53		3.1		Граница республики Коми и Ханты-Мансийского АО	Данные ГИ УрО РАН
2014.03.08	19:20:09	58.79	57.14		1.4		Добрянский район	Данные ГИ УрО РАН
2015.03.21	14:14:43	60.65	54.79		2.9		Республика Коми	Данные ГИ УрО РАН
2015.05.29	19:05:49	58.71	56.93		1.7		Добрянский район	Данные ГИ УрО РАН
2015.07.03	17:06:06	58.87	49.21		3.2		респ. Коми	Данные ГИ УрО РАН
2015.08.25	21:04:54	58.36	57.46		2.2		Чусовской район	Данные ГИ УрО РАН
2015.10.18	21:44:55	57.12	59.05	12	4.7		Свердловская область	Баранов, 2016

Распределение сейсмических событий по магнитудам

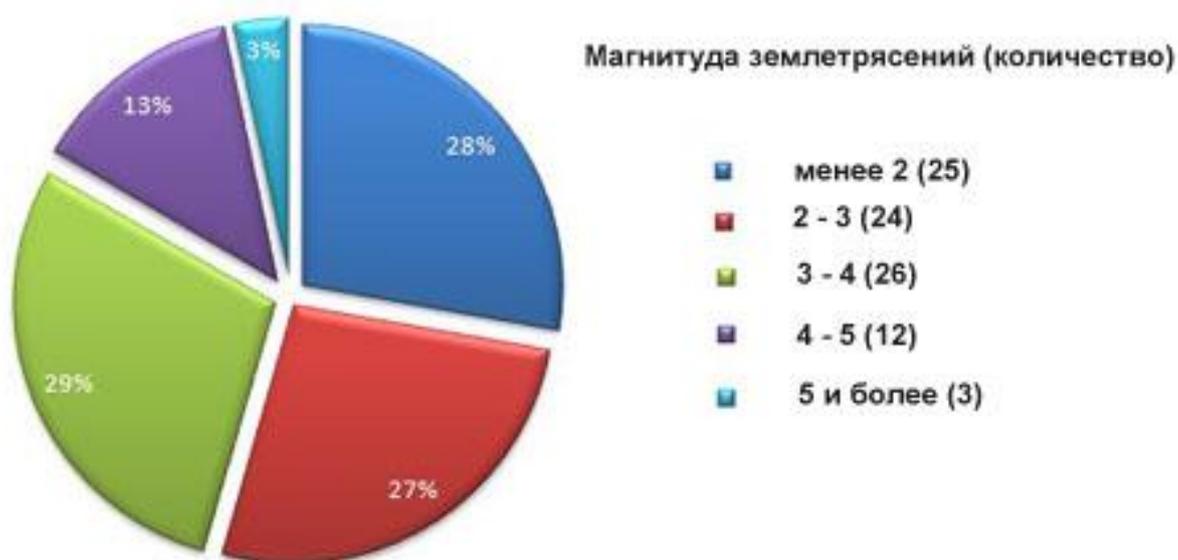


Рис. 2.4. Распределение сейсмических событий по магнитудам

На территории Западно-Уральского региона за исторический период не происходили катастрофические землетрясения, но при этом регион нельзя отнести к асейсмичным. С конца XVIII века описаны и инструментально зарегистрированы более сотни землетрясений различной интенсивности, значительную часть которых исследователи относят к тектоническим землетрясениям. Исследование исторических данных и современные инструментальные наблюдения показывают, что землетрясения с интенсивностью 5 – 6 баллов по шкале MSK происходят в регионе раз в 10 – 20 лет, при этом большая часть землетрясений имеет природно-техногенный характер и связана с разработкой полезных ископаемых – угля, солей и месторождений углеводородов.

Макросейсмические данные по землетрясениям Западного Приуралья

Большинство региональных землетрясений имеет магнитуду 2 – 3 и слабо ощущаются на поверхности, но в ряде случаев землетрясения сопровождаются значительными макросейсмическими проявлениями и даже повреждениями находящихся на поверхности технических объектов.

Землетрясение 23 мая 1798 г. произошло в окрестностях г. Перми, его интенсивность в эпицентре оценивается в 6 баллов. Землетрясение продолжалось несколько секунд и особенно ощущалось в каменных зданиях. «В соборной церкви качались паникадила и слышен был какой-то гул (глухой шум). В домах колебались стены и мебель и трещали окна». Землетрясение охватило Пермский, Осинский, Кунгурский, Екатеринбургский и Верхотурский уезды (Вейс-Ксенофонтова, 1940).

Землетрясение 17 января 1837 г. наблюдалось в районе г. Добрянка, было «столь сильное, что спавшие на печи работники пробудились и думали, что обвалилась печь». Интенсивность землетрясения оценивается в 5 баллов (Вейс-Ксенофонтова, 1940).

Землетрясение 15 января 1931 г. наблюдалось в окрестностях г. Добрянка. «Дома шатались, открывались и закрывались двери», в 3-4 км к юго-западу от Добрянки люди теряли равновесие на ходу. Интенсивность составила 3-4 балла. Землетрясение с меньшей силой повторилось 16 и 19 января.

Землетрясение 19 апреля 1955 г. Сведения из фондов с/ст «Свердловск», копия письма гл. инженера треста «Губахтяжстрой», г. Губаха Молотовской обл. Филимонова начальнику с/ст. «Свердловск»: «В районе города Губаха – поселок «Северный» 19 апреля 1955 г. примерно в 2 часа дня был обнаружен сильный подземный толчок. Просим сообщить, зафиксирован ли данный толчок, и какой была его сила в районе гор. Губахи. Просим также сообщить природу этого толчка и возможно ли его повторение. Указанное необходимо знать на предмет принятия мер по предохранению строящихся объектов от возможных разрушений, так как вследствие указанного толчка – удара в ряде строящихся объектов обнаружены деформации».

Приведенный документ подчеркивает неординарность и крупный масштаб сейсмического события. Это землетрясение отнесено А.Я. Левицкой по инструментальным данным к категории наиболее сильных землетрясений (Левицкая, 1961). В Новом каталоге сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен по 1975 год и в Каталоге землетрясений Урала за

период с 1693-1997 гг. глубина эпицентра этого землетрясения составляет 15 км, в то же время А.А. Годзиковская относит это землетрясение к горно-тектоническим ударам. (Годзиковская, 2002).

В ряде случаев региональные землетрясения ощущаются на территории нескольких районов Пермского края и прилегающих областей.

Землетрясение 29 июля 1956 г. описал Г.А. Максимович в 1960 г. «В 1956 г. 29 июля в 2 часа 3 мин. по местному времени произошло землетрясение длительностью 3-4 секунды, которое было отмечено на значительной территории Пермской области». ... «В распоряжении автора имеются наблюдения очевидцев по г. Перми (данные собраны И.Рябовой), по Пермско-Сергинскому и Кунгурскому районам (Л.А. Шимановский, 1957) и по Кишертскому, Суксунскому и Лысьвенскому районам (результаты личных опросов)». «Землетрясение произошло ночью, когда большинство жителей спало. Наблюдали его бодрствующие и проснувшиеся» (MSK, 4 балла).

Это же землетрясение описано Л.А. Шимановским в 1957 г. «В ночь с 28 на 29 июля 1956 г. в Молотовской области произошло землетрясение. В 2 ч. 3 мин. по местному времени в Молотове и прилегающих районах ясно чувствовался сильный толчок, сопровождавшийся колебаниями земной коры, продолжавшимися в течение 3-4 с. Толчок был настолько силен, что многие спавшие проснулись (MSK, 4 балла – сопровождается пробуждением от сна людей, которые, однако, не испытывают страха), в шкафах зазвенела посуда, дребезжали оконные стекла и на поверхности прудов и рек появилась рябь. Направление колебаний в районе г. Кунгура и с. Серга отчетливо ощущалось с востока на запад. Из опроса местного населения выяснилось, что в Пермско-Сергинском и Кунгурском районах толчок и колебания ощущались значительно сильнее, чем к северу и югу от них. Очевидно, что эпицентр землетрясения восточнее участка Пермь-Серга-Кунгур. В некоторых карстовых районах землетрясение вызвало небольшие обвалы. Так в районе Пермь-Серга в Андроновской ледяной пещере перед входом обрушилась масса гипса весом около 3-4 т. Обрушения произошли и в самой пещере, в той ее части, куда нельзя проникнуть. Уровень воды в озере изменился после

землетрясения. Вероятно, подвижки горных пород закрыли полностью, или частично, трещины, по которым воды озера сообщались с рекой Сылва, а обвалившиеся массы вызвали резкий подъем уровня. Обследование склонов и присклоновой части водораздела рек Сылвы и Серги, в котором находится Андроновская пещера, показало, что свежих провалов здесь нет. Это указывает на незначительные масштабы обвалов в пещере, которые, конечно, не могли служить причиной землетрясения, а, скорее всего, являлись его следствием. Землетрясение, вероятно, относится к типу тектонических, поскольку площадь его распространения достаточно велика и выходит за пределы карстовых областей. Велика и сила землетрясения, достигавшая 4-5 баллов (по ОСТ ВКС 4537)».

Макросейсмические данные землетрясения 28-29 июля 1956 года получены также из фондов сейсмостанции «Свердловск», копия письма рабочих Попцова и Фролова.

«Бригада плотников в несколько человек находимся в командировке в деревне Шиловка, Красноуфимского р-на Свердловской области, живем в деревянном одноэтажном доме. В ночь с 28-го на 29-е число, июля м-ца, в 2 часа 4 минуты местного времени, когда мы двое Попцов и Фролов, случайно не спали, а лежали на топчанах, произошло сотрясение нашего дома, закрипел потолок, задребезжали стекла в окнах и нас качнуло несколько раз с боку на бок, в направлении, примерно, с востока на запад, в это время мы и заметили время по ручным часам. Но наши расспросы по деревне у нескольких человек ничего не дали (т.е. спящие не проснулись и не почувствовали землетрясения). Это продолжалось несколько секунд. (Шиловка-4 балла)».

Вот что пишет об этом землетрясении житель г. Лысьвы К.П. Войтников. «29 июля в 2 часа 3 минуты ночи я находился в пятидесяти километрах от станции Лысьва. Отойдя от железной дороги, ведущей в Свердловск, метров на 100 южнее, разложил костер и ждал утра, чтобы пойти за малиной. В начале был слышен тихий раскат, похожий на грозовой, который завершился очень сильным взрывом. Это длилось примерно 6-10

секунд. Спустя 2-4 секунды произошло колебание земной поверхности столь сильное, что я, лежа на боку, опрокинулся на спину, колебание в начале было слабое, а к концу – сильный толчок. Это произошло севернее моего места нахождения». Используются данные сейсмостанции «Свердловск».

Пример землетрясения, произошедшего в ночь с 28 на 29 июля 1956 г., показывает возможность определения его силы, направления распространения и определения охватываемой им области по макросейсмическим данным.

А.А. Годзиковская относит это землетрясение к категории «Сомнительное», объясняя это необходимостью уточнения природы и местоположения очага (Годзиковская, 2002).

Землетрясение 18 октября 2015 года, произошло в 21:44:55 GMT на Среднем Урале. Магнитуда землетрясения составила 4.7, таким образом, это землетрясение стало сильнейшим за последние 100 лет. Землетрясение зарегистрировано всеми региональными сейсмическими станциями. Собрано большое количество данных о макросейсмических проявлениях землетрясения.

Люди отчетливо ощущали землетрясение на расстоянии до 100 км от эпицентра. В радиусе 10-20 км от эпицентра наблюдались сильные толчки, звон посуды, раскачивание легких предметов. Многие очевидцы просыпались и выбегали на улицу. Люди описывают свои ощущения «Толчок вибрация, гул, грохот, будто в дом въехал грузовик». Ощутимые колебания распространялись по-разному в разных направлениях, так, в Перми, на расстоянии 190 км от эпицентра, на верхних этажах ощущалась тряска, дрожь, толчки. Ни в одном из населенных пунктов повреждения не выявлены.

Уникальность землетрясения заключается в том, что его эпицентр находился внутри сейсмической сети, что позволило провести исследования его очага, построить карту изосейст, оценить анизотропию в распространении сейсмических волн и характере распространения макросейсмических эффектов (Дягилев и др., 2016).

Выводы:

В данной главе показаны основные этапы сейсмического районирования и сейсмологического мониторинга в Западном Приуралье. Составлен каталог региональных землетрясений. Все это необходимо для решения задач, поставленных в работе. Каталог региональных сейсмических событий является одной из основных частей, используемых для анализа геофизической информации с целью построения карт возможных очагов землетрясений. Изучение сейсмичности и поиск новых методов сейсмического районирования являются необходимой и важной задачей для оценки сейсмических рисков, обеспечения жизнедеятельности и производства на территории исследуемого региона.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТНОШЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ (АДМИТТАНСА) ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН ВОЗ

Исследованиями геофизических полей, связанных с сейсмологией, занимались многие исследователи. Так W.F. Hanna, S.H. Burch, и T.W. Dibblee изучали гравитационное и магнитное поля сейсмически активного нарушения Сан-Андреас в США (Hanna, 1972). D.V. Chandrasekhar, Bijendra Singh, Md. Firozishah и D.C. Mishra исследовали геофизические поля над Нью-Мадридской сейсмической зоной США и рифтовым бассейном Кач (Kachchh) в Индии (Chandrasekhar, 2005). Предлагаемый А.Д. Завьяловым алгоритм прогноза землетрясений и построения карты ожидаемых землетрясений (КОЗ) использует в качестве прогнозных признаков не только сами значения геофизических полей, но и их отклонения от соответствующих долговременных значений (Завьялов, 2008). При этом для выделения зон ВОЗ для сейсмически слабоактивной территории исследуемого региона изучение соотношения гравитационного и магнитного полей, или адмиттанс, используется впервые.

Способ адмиттанса позволяет оценить взаимосвязи между различными физическими полями, создаваемыми геологическими телами разных масштабов. Такие исследования проводятся М.С. Чадаевым, В.И. Костицыным, Р.Г. Ибламиновым, В.А. Гершанок и др. с 1999 г. (Чадаев и др., 2010; Чадаев и др., 2012). Для Западного Приуралья изучалось отношение гравитационного поля в редукции Буге к аномальному магнитному полю (адмиттанс).

Связь гравитационного и магнитного полей выражается через формулу Пуассона

$$U = -\frac{J}{f\sigma} \frac{\partial V}{\partial i}, \quad (1)$$

где U – магнитный потенциал, J – намагниченность, V – гравитационный потенциал, f – гравитационная постоянная, σ – плотность вещества.

Для исследования было выбрано отношение аномального гравитационного поля Δg и значения вектора аномального магнитного поля Ta .

Геологические тела обладают разной степенью намагниченности и создают самые различные аномалии магнитного поля и их комбинации. Землетрясения, как правило, связаны с границами крупных блоков земной коры, смещенных относительно друг друга, такие границы представлены уступами и надвигами различных форм, направлений и амплитуд, поэтому для интерпретации аномалий в данном случае лучше всего подходит модель уступа или контакта двух тел с разным намагничением.

Частный случай модели значений аномального магнитного поля над расположенным во вмещающей породе вертикально намагниченным телом представлен на рис. 3.1. В этом случае значение компонент магнитного поля в некоторой точке x будет определяться по формулам:

$$Z = 2J \operatorname{arctg} \frac{(d-h)x}{hd+x^2}, \quad (2)$$

и

$$H = J \ln \frac{x^2+d^2}{x^2+h^2}, \quad (3)$$

где J – намагниченность, h – глубина залегания тела, d – его мощность.

Полный вектор аномального магнитного поля высчитывается по формулам (2) и (3), равен:

$$T = \sqrt{Z^2 + H^2}. \quad (4)$$

(Гершанок, 2009)

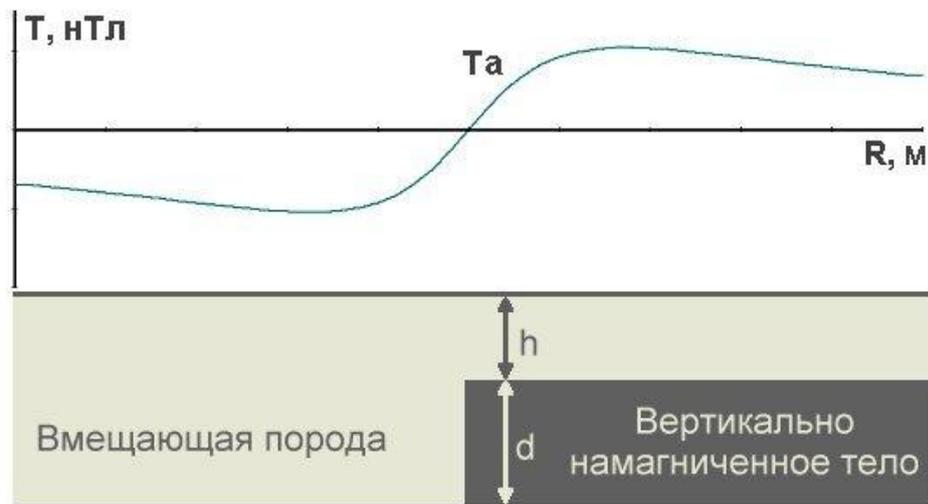


Рис. 3.1. Модель аномального магнитного поля над вертикально намагниченным телом

На представленной модели граница вертикально намагниченного тела будет совпадать в плане с нулевой изолинией аномального магнитного поля T_a .

Исходя из формулы Пуассона, для применения метода адмиттанса требуется построение поля отношений V_{zz}/T_a , но учитывая подобие полей V_{zz} и Δg , в этом нет практической необходимости (Чадаев и др., 2012).

Для исследований использовались данные гравитационной съемки (Satellite...) и данные магнитной съемки (Earth...).

Для построения карты адмиттанса использованы приведенные и нормированные по максимальным значениям аномальные гравитационные и магнитные поля. Такой подход использовался В.А. Гершанок и М.С. Чадаевым и др. для анализа геофизических данных и уточнения строения региона. Изучение карты, отражающей взаимное расположение сейсмичности и адмиттанса, показало совпадение большинства эпицентров региональных землетрясений с высокими значениями адмиттанса. Из 90 сейсмических событий 74 связаны со значениями адмиттанса 3 и более (рис.3.2) [Баранов, 2016].

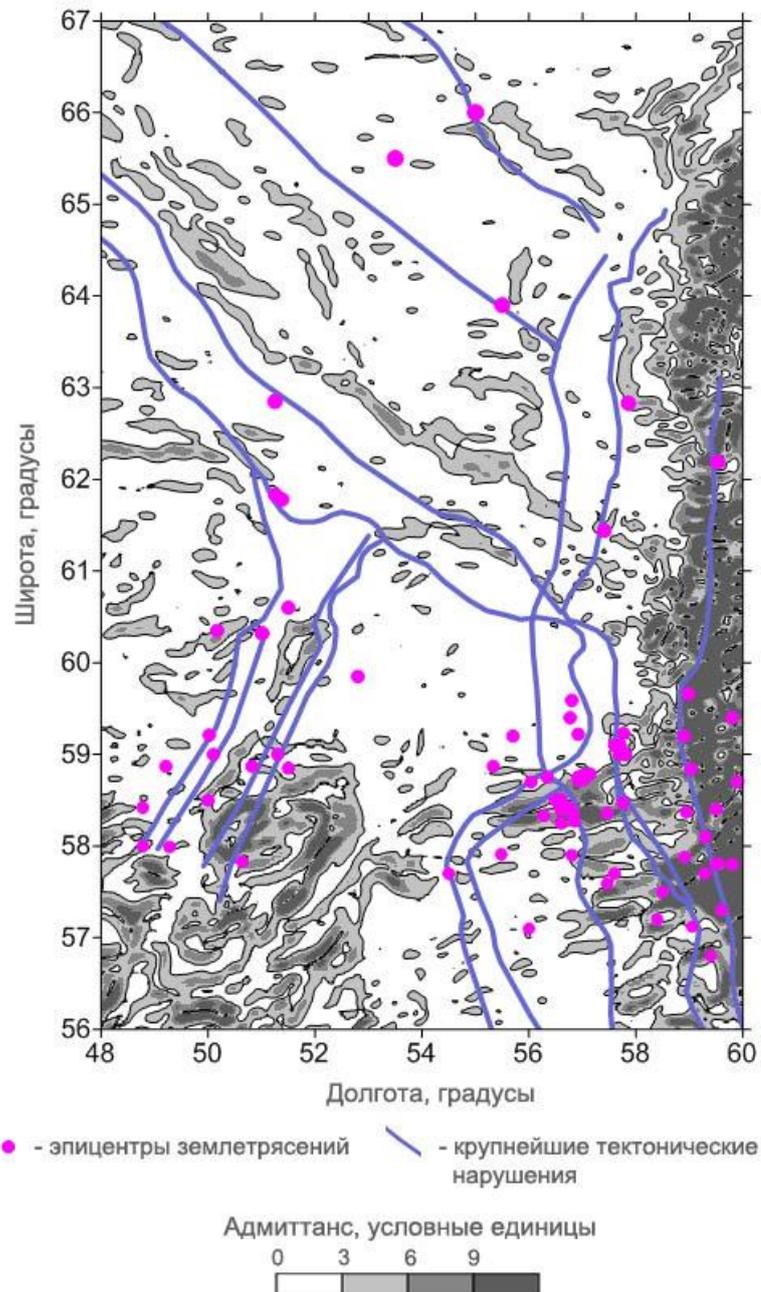


Рис.3.2. Карта отношения нормированных приведенных значений аномального гравитационного и магнитного поля (адмиттанс)

Такое соотношение позволяет сделать вывод о перспективности использования адмиттанса в качестве одного из параметров для выделения зон ВОЗ. К недостаткам такого подхода можно отнести относительно большую площадь, занимаемую адмиттансом с повышенными значениями.

Другим параметром, используемым для выделения зон ВОЗ, является соотношение аномального гравитационного поля и аномального магнитного поля.

Более наглядна карта модуля горизонтального градиента этого отношения (рис.3.3), вычисляемого по формуле:

$$|\text{grad } I| = (A^2 + B^2)^{1/2}, \quad (5)$$

где для приведенного ниже участка сеточного слоя,

	i_4	
i_1	I	i_2
	i_3	

$$A = (x(i_2) - x(i_1)) / (i_2 - i_1), \quad B = (x(i_4) - x(i_3)) / (i_4 - i_3), \quad (6)$$

где $(i_2 - i_1)$ и $(i_4 - i_3)$ – расстояние между узлами сетки (i_2 и i_1) и (i_4 и i_3) в километрах. Если в каком-нибудь из узлов сетки слоя i_1, i_2, i_3, i_4 поле не задано, то вместо данного значения берется $x(I)$ и соответственно в два раза уменьшается знаменатель (база оценки производной).

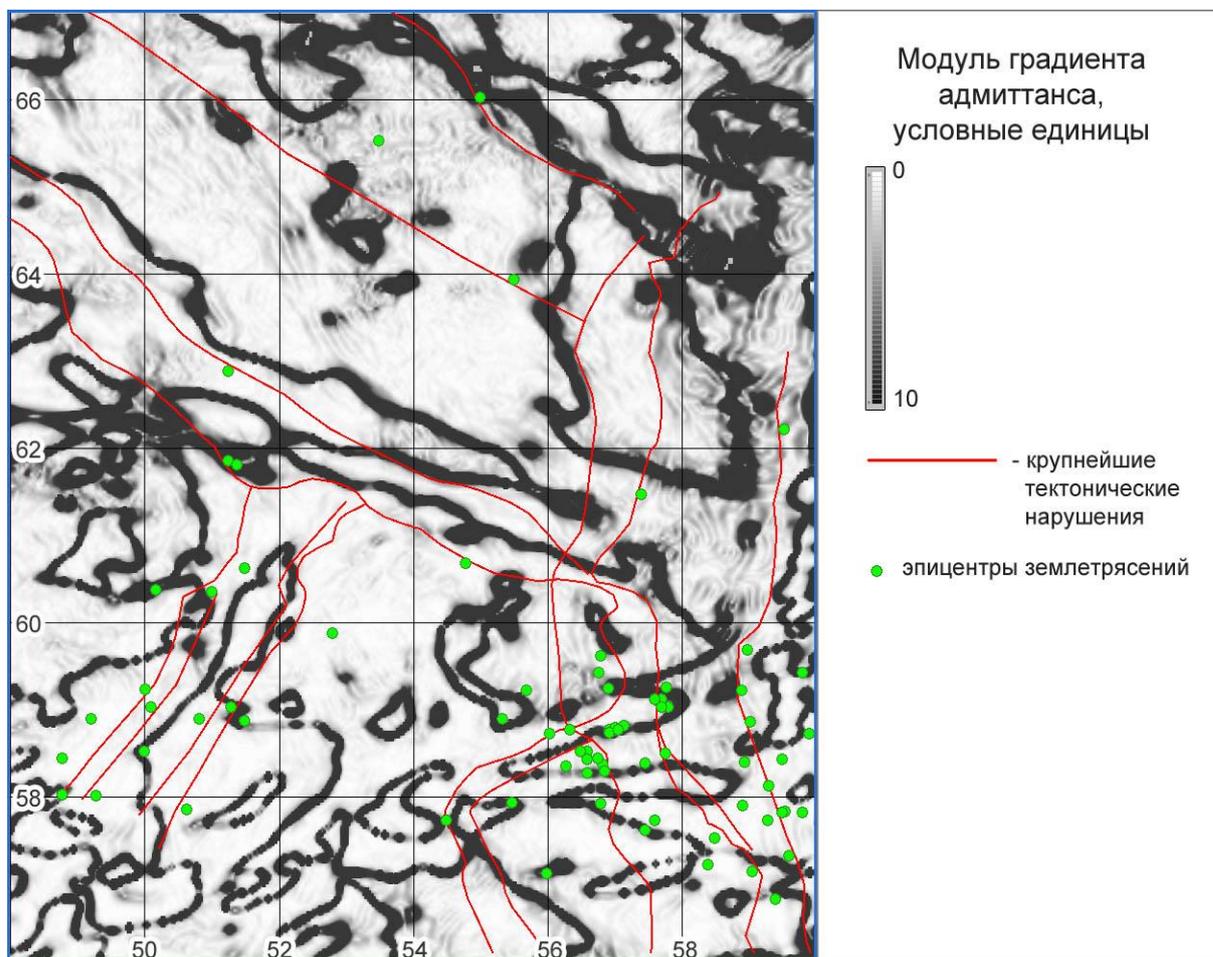


Рис. 3.4. Карта модуля горизонтального градиента адмиттанса

Из 90 эпицентров землетрясений 66 находятся внутри десятикилометровой зоны от линий максимальных значений модуля горизонтального градиента адмиттанса, что позволяет считать его информативным для выделения зон возможных очагов землетрясений (рис. 3.4).

Такое соотношение показывает возможность использования метода адмиттанса в качестве одного из основных параметров для выделения зон возможных очагов землетрясений. Использование такого подхода позволяет выявить переходы и связи между максимальными значениями градиента адмиттанса, которые не отражаются в расположении нулевой изолинии аномального магнитного поля. Использование градиента адмиттанса позволяет создать целостную картину аномалий и сопоставить ее с региональной сейсмичностью.

Таким образом, второе защищаемое положение доказано.

4. ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН ВОЗМОЖНЫХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗАПАДНОГО ПРИУРАЛЬЯ

4.1. Сетевая аналитическая ГИС «Геопроцессор 2.0»

Для выделения зон ВОЗ использовалась сетевая аналитическая геоинформационная система «Геопроцессор 2», разработанная в Институте проблем передачи информации РАН (Гитис, Ермаков, 2004; Сетевая..., электронный ресурс). Она предназначена для интерактивного представления и анализа векторно-растровой географической информации. Области применения – комплексный анализ пространственных данных, изучение геологической среды и поддержка принятия решений в таких задачах как оценка природной опасности, прогноз природных ресурсов, оценка экологического состояния среды.

Для написания используемой программы использовался язык Java 1.5, что обеспечивает ее кроссплатформенность и возможность запуска через браузер. Программа быстро загружается и подключается к серверам. Имеется большое количество уже готовых ГИС-проектов, что значительно упрощает работу с системой.

Система построена по принципу клиент-сервер, что позволяет через сеть Интернет подключать и использовать данные, расположенные на разных Интернет-серверах, а также сохранять конфиденциальность данных, используемых на локальном компьютере клиента (рис.4.1).

Она имеет понятный, общепринятый интерфейс, данные структурированы по слоям, с каждым из которых, в зависимости от его типа, можно выполнять различные операции. Возможна работа с сеточными, векторными и растровыми данными, можно сопоставлять и анализировать различные физические поля, решать задачи с неполной информацией за счет комплексного использования всей доступной информации (рис.4.2).

Система «Геопроцессор 2» поддерживает следующие функции (Гитис, Ермаков, 2004):

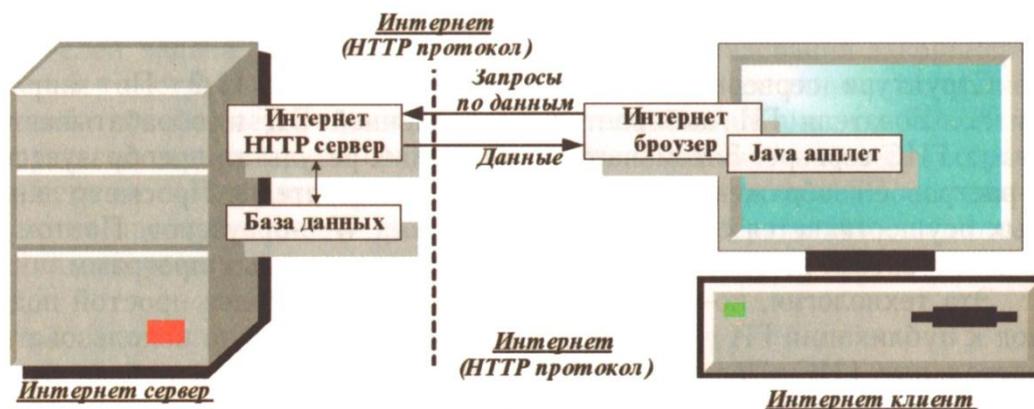


Рис.4.1. Взаимодействие по схеме клиент-сервер (Гитис, Ермаков, 2004)

1. *Представление информации*

Интерактивное картографическое представление и анализ цифровых сеточных моделей, линейных и точечных данных.

Композиция и представление карт, состоящих из нескольких сеточных, векторных и точечных слоев.

Интерактивное управление визуализацией слоев карты.

Изменение размеров пространственной области и сдвиг карты с интерполяцией и без интерполяции сеточных значений.

Анализ растровой информации с помощью изменения закрашки.

Построение моделей освещенности сеточного слоя.

Чтение значений всех сеточных слоев карты в произвольных точках.

Построение разрезов сеточных слоев карты по произвольному профилю с возможностью изменения значений по разрезу.

Формирование учебных выборок в виде совокупностей единичных точек или полигонов.

Построение карт сходства с прецедентом по произвольному набору сеточных слоев.

2. *Преобразование данных*

Генерирование растров с помощью операций над линейными слоями.

Генерирование растров с помощью операций над точечными слоями.

Генерирование растров с помощью операций растровой фильтрации.

Генерирование растров с помощью алгебраических и логических операций над несколькими растрами, а также с помощью набора элементарных функций.

3. Вывод и оценка информации

Правдоподобный вывод прогнозных карт по комплексу сеточных слоев.

Оценивание границы для монотонных зависимостей.

Оценивание функций сходства.

Оценивание функций принадлежности к классу.

Оценивание непараметрической регрессии.

Подробная информация и примеры использования сетевой ГИС «ГеоПроцессор 2.0» описаны в книге (Гитис, Ермаков, 2004) и в документации, размещенной на сайте программы (Сетевая..., электронный ресурс).

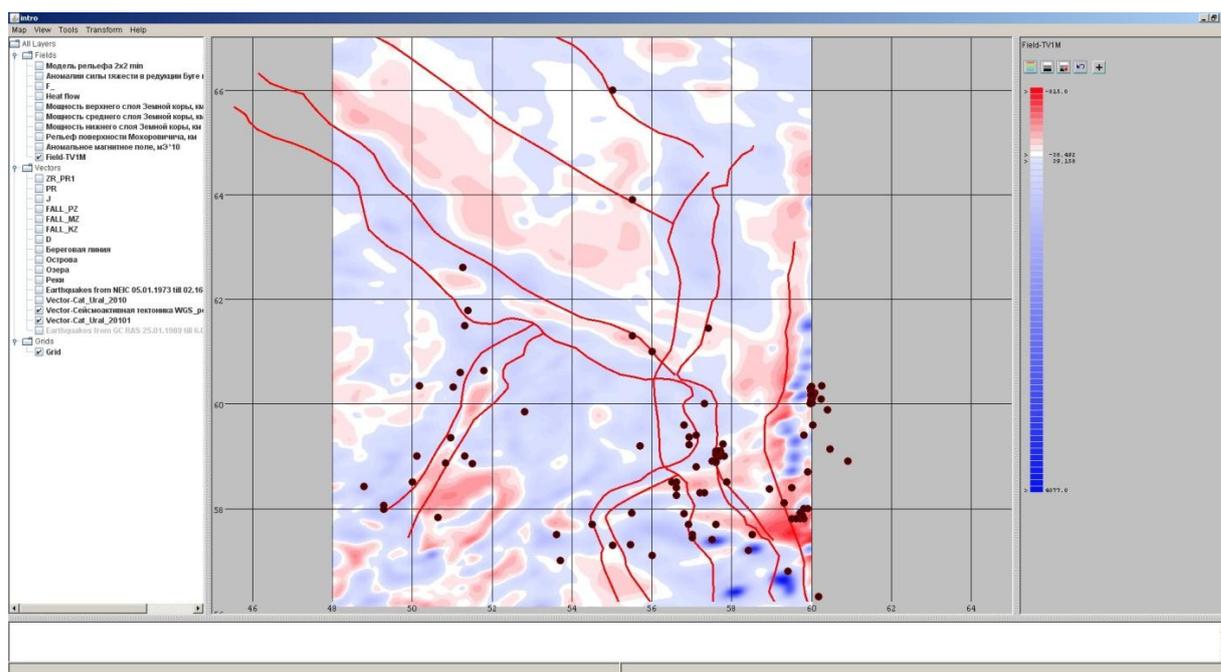


Рис.4.2. Окно программы «ГеоПроцессор 2.0»
для исследуемого региона

Разработчики программы предоставляют большое количество данных, хранимых на собственном сервере. Это карта рельефа земной поверхности, карта аномалий силы тяжести в редукции Буге, карта аномального

магнитного поля, карта теплового потока, карты мощности различных слоев земной коры и глубины залегания поверхности Мохоровичича, схемы тектонических нарушений, сгруппированных по времени их заложения, география местности, каталог землетрясений и другие данные. Системой поддерживаются форматы PNG, JPG, GIF и формат данных ESRI SHP, включая атрибутивную информацию, а также свои форматы для представления данных. Для использования других данных их необходимо внести в систему в соответствии с используемыми ею форматами.

Для исследований также использовались пакеты программ ESRI ArcGIS 9.3 и MapInfo 12.

4.2. Выбор подхода к выделению зон ВОЗ

До последнего времени методы прогнозной оценки сейсмического потенциала, связанного с анализом геофизической информации и построением зон ВОЗ, остаются разработанными недостаточно. Это относится и к сейсмоактивным областям, обеспеченным обширной сейсмологической информацией и хорошо изученным в сеймотектоническом отношении, и к менее изученным областям со слабой сейсмической активностью.

Зачастую очаги землетрясений связаны с областями интенсивных современных тектонических движений земной коры, происходящими на границах крупных геоблоков, платформ и континентов. Прослеживается связь сейсмических явлений с разрывными нарушениями, их размерами и расположением. Глубинные тектонические нарушения, рифты и авлакогены характеризуются большей сейсмичностью, чем тектонические нарушения с меньшей глубиной и амплитудой смещений. Отмечается связь между сейсмичностью и расположением границы Мохоровичича, мощностью слоев, составляющих земную кору, зонами с разными скоростями прохождения упругих волн, тепловым потоком и современными вертикальными движениями земной коры.

Невозможно выделить единственный признак, значение которого может свидетельствовать о сейсмическом режиме региона, для выделения зон ВОЗ необходимо использовать комплекс различных параметров.

В настоящее время нет строгой математической модели, позволяющей определить вероятность и интенсивность землетрясения на основании анализа геолого-геофизической информации о строении земной коры в окрестности потенциального очага. Выбор информативных параметров основывается как на изученности региона и доступности информации, так и на представлениях исследователя о причинах и проявлениях сейсмической активности.

Обобщенный подход к выделению зон ВОЗ можно формализовать следующим образом (рис. 4.3).

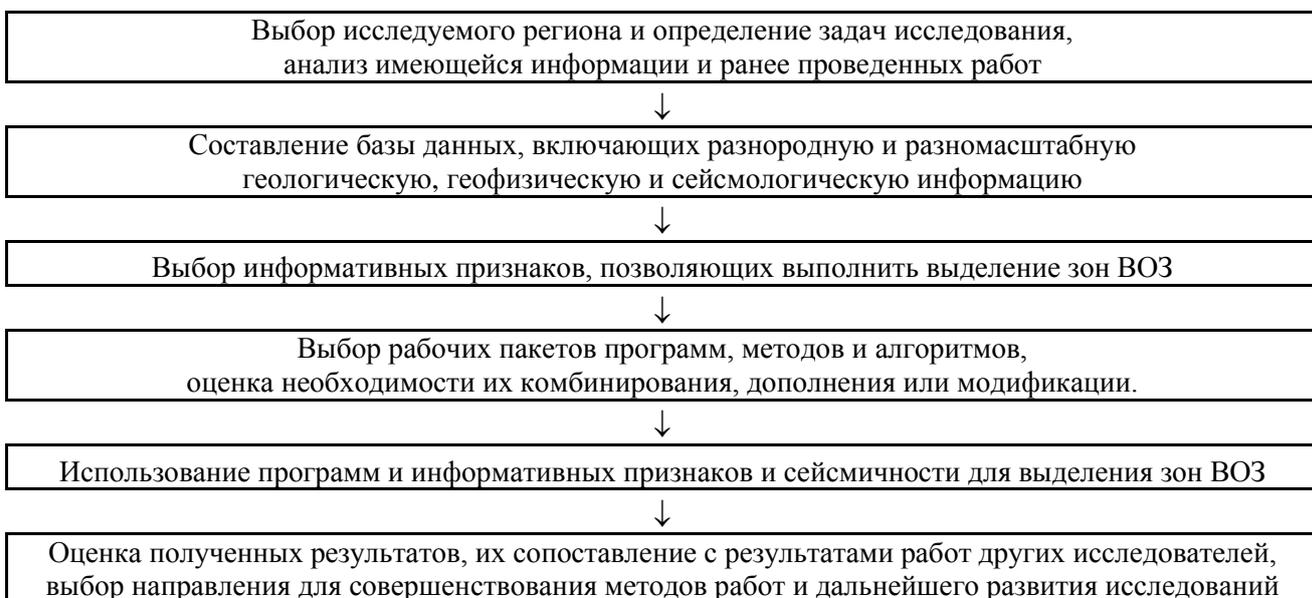


Рис. 4.3. Граф обработки данных для выделения зон ВОЗ

Проведение работы основывается на следующих предположениях:

1. В районе исследований за исторический период зарегистрированы многочисленные землетрясения. В настоящее время не наблюдается существенного изменения сейсмической активности, что позволяет использовать имеющийся каталог сейсмических событий для выделения зон возможных очагов землетрясений.

2. Исследуемый регион находится на древней платформе с устоявшейся тектоникой, на которой отсутствует вулканизм. Человеческая деятельность – технологические и ядерные взрывы, добыча полезных ископаемых и создание водохранилищ – оказывает ограниченное влияние на имеющиеся процессы, свойства же самой геологической среды, по сравнению с периодом наблюдений, изменяются относительно слабо.
3. Крупные тектонические землетрясения связаны с движениями больших блоков земной коры вдоль региональных и глобальных тектонических нарушений, причем на границах более крупных блоков генерируются сейсмические события с большей энергией.
4. Используемые методы, основанные на анализе имеющейся геофизической информации, позволяют выделить зоны ВОЗ в исследуемом регионе.

В основе формализованного метода построения зон ВОЗ лежит алгоритм нахождения возможной связи землетрясений с геолого-геофизическим строением региона. Выбираются элементарные ячейки с центрами, привязанными к координатной сетке, при этом каждая ячейка обладает своим набором физических характеристик. Предполагается, что возможность возникновения землетрясения в этой ячейке является функцией от них. Размер ячеек и набор их характеристик выбираются исследователем на основании доступности и детальности имеющихся данных, шага съемки, размеров региона и другой информации.

Выделение зон ВОЗ, дифференцированных по интенсивности землетрясений, осуществляется с помощью выбора ячеек, соответствующих, по оценке исследователя, разным значениям максимальных магнитуд землетрясений. Построение зон ВОЗ в областях со слабой сейсмичностью и относительно небольшим каталогом сейсмических событий осложняется недостаточным количеством сейсмических событий нужной интенсивности.

После выбора ячеек по определенному алгоритму проводится вычисление и нанесение на карту ячеек с соответствующими геолого-геофизическими параметрами и оконтуривание полученных зон.

Выбор параметров для построения зон ВОЗ не является строго определенным ввиду как разного строения и сейсмической активности исследуемых регионов, так и разной степени их изученности.

Для выделения зон возможных очагов землетрясений восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающих территорий Урала использовалась база геологических и геофизических данных. Это данные гравитационной съемки, Satellite Geodesy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi, данные магнитной съемки, EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geomag.org/models/emag2.html>, граница залегания поверхности Мохоровичича: The Moho Depth of the European Plate [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.seismo.helsinki.fi/mohomap/>, тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий (ред. Е.Е. Милановский, 2007 г., масштаб 1:4000000). Карта нижнего слоя земной коры (ред. Г.В. Краснопевцева) использована из базы данных сетевой ГИС, карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территории СССР. (ред. Л.А. Кашин, 1989 г., масштаб 1:5000000). Каталог землетрясений с 1788 по 2015 гг. включает 90 сейсмических событий с магнитудами от 1.0 до 5.5.

4.3. Выбор зоны влияния тектонических нарушений

Одним из основных информационных признаков для выделения зон ВОЗ является наличие и сейсмическая активность тектонических нарушений. В сейсмологии к настоящему времени хорошо разработаны модели очагов землетрясений и предложен целый ряд моделей нарушения прочности сплошной среды литосферы, или динамической устойчивости ее блоковой структуры. Исследованиями, связанными с этой темой, занимались Б.В. Костров, В.И. Мячкин, М.А. Садовский, М.В. Родкин, С.И. Шерман С.Н. Scholz, M.D. Finna и другие.

Для выделения зон возможных очагов землетрясений необходимо учитывать ширину зон влияния тектонических нарушений. Исследования областей активного динамического влияния разломов проводил С.И. Шерман (Шерман и др., 1983). Под термином «разлом» подразумевается крупная дизъюнктивная дислокация земной коры, распространяющаяся на большую глубину и имеющая значительную длину и ширину (Геологический словарь, 1978, Т 2).

Разломы могут быть классифицированы по масштабу и значимости: трещины – 1-100 см – 10 м, локальные разломы – метры, сотни метров, километры, региональные разломы – километры, десятки километров, трансрегиональные разломы – сотни километров, планетарные разломы – тысячи километров, генеральные, или глубинные разломы, которые охватывают группы региональных и более крупных разрывов литосферы (Шерман, 1977).

Разломы представляют собой сложные геологические структуры с не менее сложным внутренним строением. Связанные с ними сейсмически опасные зоны контролируются не только дислоцированной осевой, или центральной, частью разломов, но и более широкой областью, окружающей приразломное пространство, или областью динамического влияния разломов (ОДВР). Под ОДВР подразумевается часть окружающего разлом во всех трех измерениях пространства, в котором проявляются остаточные (пластические или разрывные) и упругие деформации, вызванные формированием разлома и движением по нему. Область, в которой проявляются остаточные деформации, является областью активного динамического влияния разлома (ОАДВР) (Шерман и др., 1983).

Для оценки площади зон активного динамического влияния разломов С.И. Шерманом были проведены серии экспериментов на моделях с разным типом деформаций, вязкости материала, скоростями и типами нагружения и т.д. Схема эксперимента по оценке области активного динамического влияния разлома на примере модели разрыва представлена на рис.4.3.

Для соответствия экспериментальной работы сложным геологическим процессам в земной коре выполнялся ряд условий подобия. Обеспечивались пропорциональность форм и размеров (геометрическое подобие), пропорциональность ускорений и направлений движений (кинематическое подобие), пропорциональность движений и сил, пропорциональность движений между массами (материальное подобие), пропорциональность друг другу всех физических величин, характеризующих физико-химические процессы.

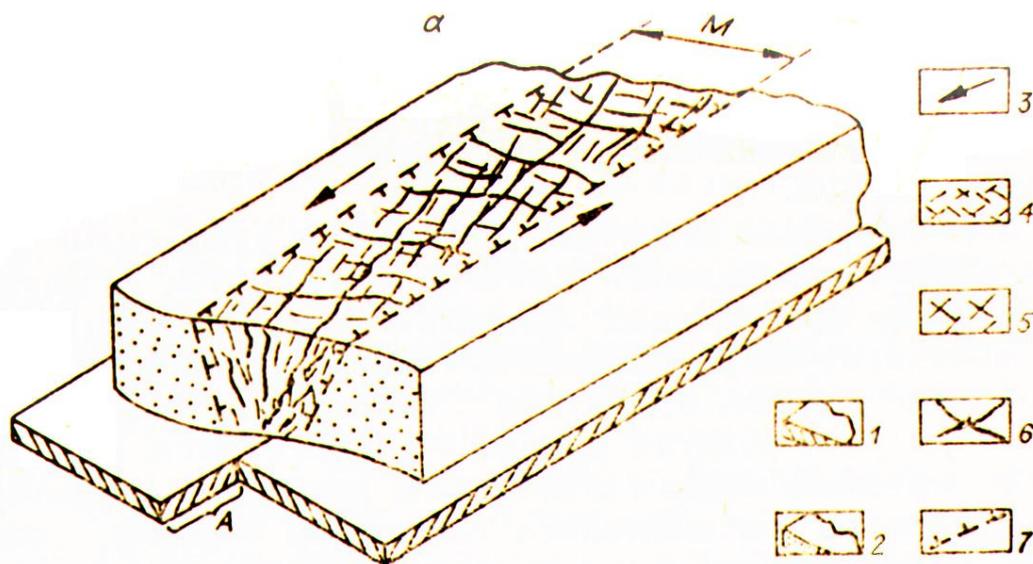


Рис.4.3. Область активного динамического влияния разрыва
(Шерман, 1983)

Условные обозначения: а – выделение области активного геодинамического влияния разрыва: 1 – основание экспериментальной установки; 2 – модель; 3 – направляющие смещения; 4 – трещины первого ранга длины; 5 – второго ранга и 6 – третьего ранга; 7 – граница ОАДВ разрыва; М – ширина области динамического влияния разрыва (Шерман, 1983).

Вещество твердых оболочек Земли ведет себя по отношению к действующим силам подобно вязкой жидкости, способной к релаксации напряжений. Течение твердого материала объясняется скольжением кристаллических зерен по тонким пограничным слоям, расположенным

вдоль границ зерен, и другими причинами, которые способствуют диффузии и перемешиванию вещества. Вязкость земной коры зависит от температуры. Так вязкость вещества верхней мантии оценивается приблизительно в 10^{22} пуаз (10^{21} Па·с) (Геологический словарь, 1978, Т 1). Вязкость земной коры оценивалась С.И. Шерманом $10^{21} - 10^{23}$ Па·с. Е.В. Артюшков связывает менее вязкие верхние слои земной коры с зонами максимальной концентрации напряжений в литосфере, при разрядке которых происходят землетрясения.

Основная масса землетрясений, за исключением зон субдукции, происходит на глубинах 15-25 км, в нижней части земной коры напряжения, в основном, релаксируют за счет вязкого течения (Артюшков, 1979).

Результаты наблюдений обрабатывались с помощью методов математической статистики.

Эксперименты наглядно показывают развитие, направление и размеры зоны влияния разлома. В результате моделирования была получена аналитическая зависимость ширины влияния разлома от типа дислокации и мощности коры или слоя. Во всех экспериментах парные значения корреляции толщины модели и ширины ОАДВ разрыва превышали 0.95. Примерно на 90-98% толщина модели определяла ширину ОАДВ для различных типов деформаций. С.И. Шерман подчеркивает, что мощность модели является определяющим фактором для оценки ОАДВ разрывных зон, сопоставимых, в натуральных условиях, с генеральными и межплитными разломами. Ориентировка мелких разрывов и трещин, из которых, в общем, и состоит ОАДВ разрыва или разлома, зависит от морфологогенетического типа основного нарушения. Густота мелких разрывов и трещин зависит от их длины, вязкости материала и скорости деформирования.

Генеральные разрывные тектонические нарушения на исследуемой территории имеют мантийное заложение, они прослеживаются в фундаменте, в осадочных отложениях земной коры и, в некоторых случаях, выходят на дневную поверхность. Глубина гипоцентра региональных тектонических землетрясений оценивается в первые десятки километров, что соответствует

глубине залегания фундамента, прочность пород в котором позволяет накопить достаточно энергии для возникновения сейсмического события. Таким образом, ширина зоны возможных очагов землетрясений, полученная с помощью оценки расположения их эпицентров, не будет равняться рассчитанной ширине ОАДВР на поверхности Земли.

Предлагаемая С.И. Шерманом методика использовалась со значениями, соответствующими земной коре исследуемого региона. Для территорий с низкой тектонической активностью и мощностью земной коры 40 км для различных типов разломов были получены значения ширины ОАДВ от 38 до 54 км, что хорошо совпадает с выбранной шириной зон возможных очагов землетрясений, составляющей 44 км, чему соответствовал используемый в программе параметр близости к крупным тектоническим нарушениям, составлявший 22 км.

4.4. Построение карты зон ВОЗ Западного Приуралья

Зоны ВОЗ выделялись с использованием различных геофизических полей и их комбинаций. В основе выделения зон лежал анализ монотонности этих полей.

На территории исследуемого региона расположены два основных комплекса сейсмически активных структур – Кировско-Кажимский авлакоген и место сочленения Печорской плиты, Урала и восточной окраины Восточно-Европейской платформы. Поскольку условия, благоприятные для возникновения землетрясений, в этих комплексах отличаются, необходимо использовать несколько выборок для выделения всех зон возможных очагов землетрясений.

Зоны ВОЗ выделены с использованием анализа монотонности функций. Считается, что прогнозируемое свойство $S(x)$, например, возможность возникновения очага землетрясения на данной территории возрастает или не изменяется при увеличении значения одной из характеристик

$$\frac{\partial S(x)}{\partial x_i} \geq 0, i = 1, \dots, I. \quad (6)$$

Оценивалась и оконтуривалась граница множества $A = \{x: F(x) > 0\}$. Использовалось экспертное решение с картографическим вводом выборки, основанной на выборе географического слоя прецедентов. Результатом стало построение функции распределения вида $F(x) = vx/N$, где vx обозначает число прецедентов, для которых $x_i(n) < x_i$ для всех $i = 1, \dots, I, n = 1, \dots, N$, построение матрицы точек и расчет принадлежности этих точек к зонам возможных очагов землетрясений.

Для каждого из m параметров со значением x для каждой выборки строилась функция:

$$\Phi^{(m)}(x) = \min_{(i)} \{\varphi_i^{(m)}(x_i)\}. \quad (7)$$

где:

$$\Phi^{(m)}(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq (x_i^{(m)} - \Delta x_i), \\ \frac{0,75(x_i - (x_i^{(m)} - \Delta x_i))}{\Delta x_i}, & (x_i^{(m)} - \Delta x_i) < x_i \leq x_i^{(m)}, \\ 0,75 + \frac{0,25(x_i - x_i^{(m)})}{\Delta x_i}, & x_i^{(m)} < x_i \leq (x_i^{(m)} + \Delta x_i), \\ 1, & (x_i^{(m)} + \Delta x_i) < x_i. \end{cases} \quad (8)$$

Параметр Δx_i определяет точность аппроксимации (Гитис, 2004).

Выделение зон возможных очагов землетрясений проводилось с помощью двух выборок, в которых учитывались особенности регионального строения земной коры региона. В качестве основных признаков зон ВОЗ были использованы зоны влияния тектонических нарушений, выделяемых по геолого-геофизическим данным, и близость к линиям максимальных значений градиента адмиттанса гравитационного и магнитного поля.

Первая выборка была взята на севере региона, в районе Восточно-Тиманского разлома (рис.4.4). Выборка связывает размер зоны влияния тектонического нарушения, градиент гравитационного поля, мощность нижнего слоя земной коры и глубину залегания поверхности Мохоровичича.

Вторая выборка взята в южной части исследуемого региона (рис.4.4). Выборка связывает адмиттанс и современные вертикальные движения земной коры, а также учитывает влияние градиента гравитационного поля, мощность нижнего слоя земной коры и глубину залегания поверхности Мохоровичича.

Работу программы можно описать следующим образом:

Все точки на карте проверяются с помощью следующего алгоритма:

Для первой выборки

Если в точке соблюдаются следующие условия: близость к крупным тектоническим нарушениям < 22 км, градиент гравитационного поля $> 0,3$ мГал/км, глубина залегания поверхности Мохоровичича > 40 км, мощность нижнего слоя земной коры > 8 км, скорость современных вертикальных движений земной коры $> 1,9$ мм/год, то в этой точке возможен эпицентр землетрясения с магнитудой 1 и более.

Для второй выборки:

Если в точке соблюдаются следующие условия: близость к линиям максимальных значений адмиттанса < 8 км, градиент гравитационного поля $> 0,3$ мГал/км, глубина залегания поверхности Мохоровичича > 40 км, мощность нижнего слоя земной коры > 8 км, скорость современных вертикальных движений земной коры $> 5,5$ мм/год, то в этой точке возможен эпицентр землетрясения с магнитудой 1 и более.

Таким образом, были учтены наиболее информативные геолого-геофизические параметры, наличие которых позволяет выделить зоны возможных очагов землетрясений на территории исследуемого региона для восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающей территории Урала. Занимаемая ими площадь равна $269,7$ тыс. км², что составляет 35% площади территории исследуемого региона. Из 90 эпицентров сейсмических событий 83 находятся на этой

площади, что составляет 92% от всех очагов землетрясений и позволяет сделать вывод о правильности выбранного подхода (рис.4.4).

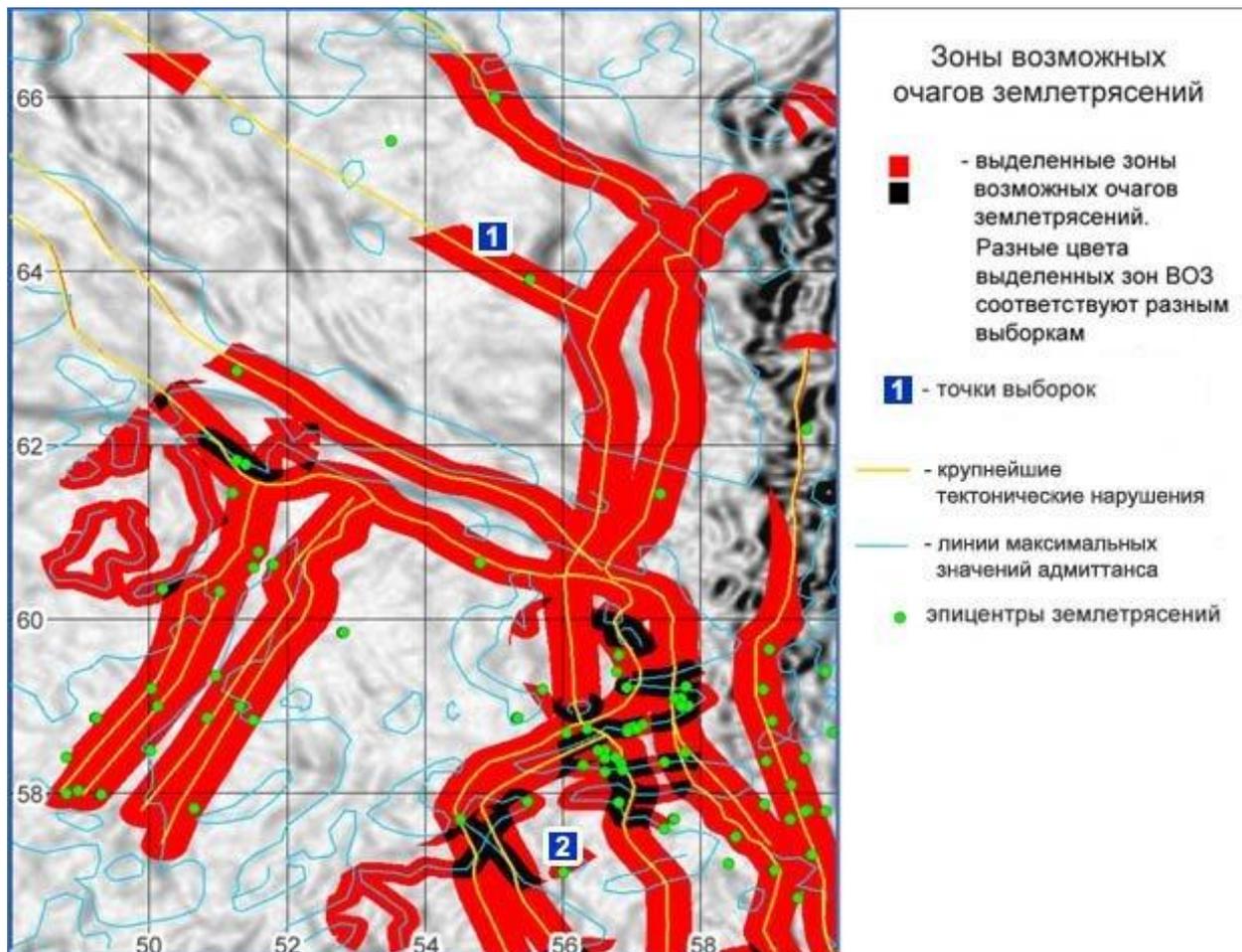


Рис. 4.4. Зоны возможных очагов землетрясений исследуемого региона

Дополнительный анализ данных позволил провести дифференциацию зон ВОЗ по магнитуде землетрясений. Были выделены зоны ВОЗ, соответствующие возможным магнитудам землетрясений 3- 4, 4-5 и более 5 (рис. 4.5). Для выделения дифференцированных зон ВОЗ использовался тот же алгоритм. Выборки определялись следующим образом:

Для выделения зоны ВОЗ, соответствующей магнитуде 5 и более, использовалась одна выборка, расположенная в юго-восточной части региона, в районе эпицентра Билимбаевского землетрясения. Выделенная зона охватывает 98,3 тыс. км². Внутри зоны расположены эпицентры Билимбаевского землетрясения, $M=5,5$, Насадкинского, $M=5,3$ и Вятского землетрясения 1897 г., $M=5,0$. Зона является наиболее перспективной для

развития сейсмической сети, установки временных и постоянно действующих сейсмопавильонов. Для выделения зоны ВОЗ с магнитудами 4–5 использовались две выборки. Первая выборка также находилась в юго-восточной части региона, вторая была выбрана в юго-западной части региона, в районе Кировско-Кажимского авлакогена.

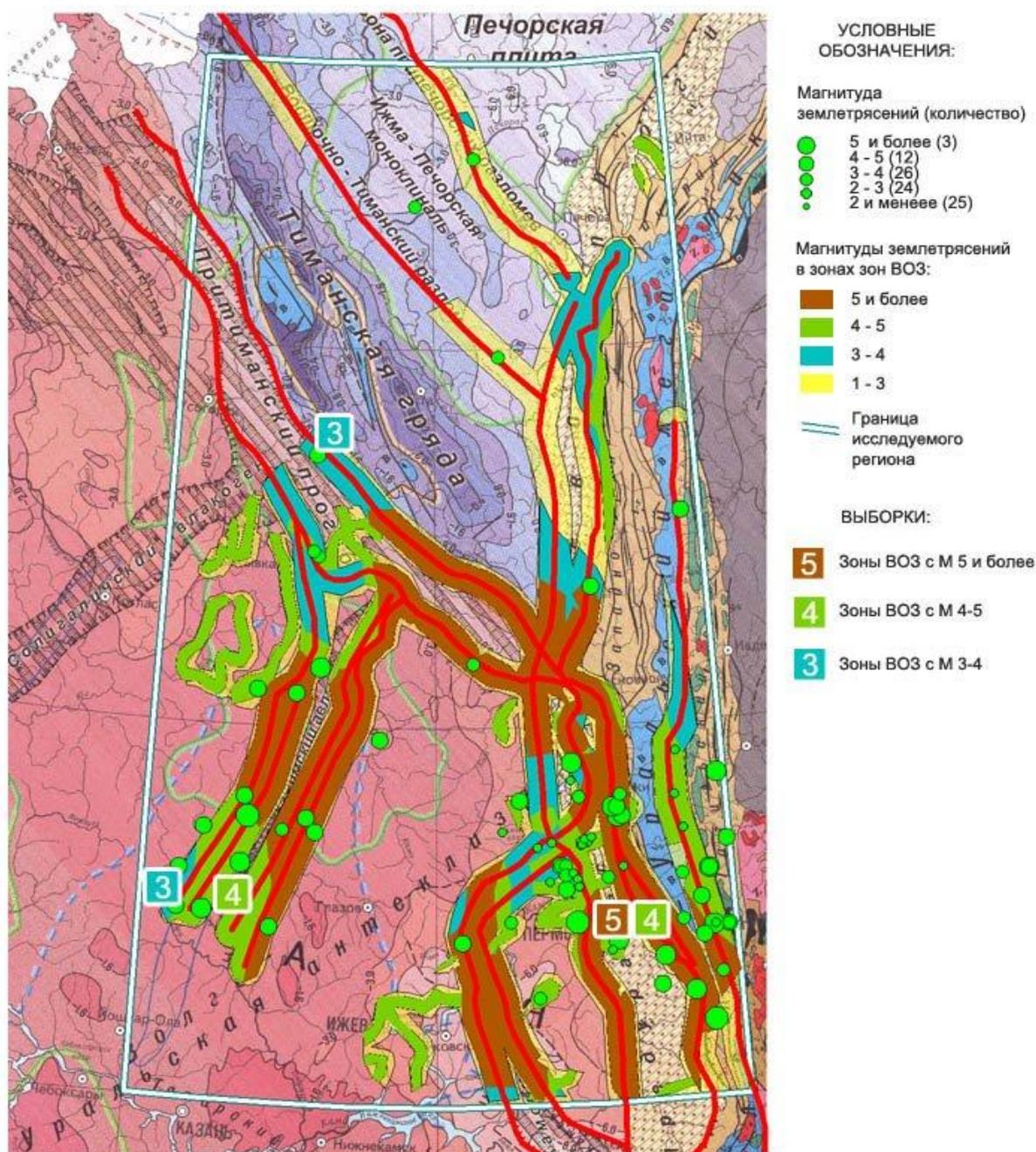


Рис.4.5. Расположение зон возможных очагов землетрясений.

Зоны ВОЗ наложены на тектоническую карту России, сопредельных территорий и акваторий под ред. Е.Е Милановского, 2007 г.

Площадь зоны составляет 151,9 тыс. км². Для выделения этой зоны также использовались линии максимальных значений адмиттанса. Выделенная зона полностью включает в себя зону ВОЗ с магнитудами 5 и более. В пределах выделенной зоны расположены 11 из 12 землетрясений с магнитудой от 4 до 5. На территории зоны расположены важные производственные объекты и горнопромышленные предприятия региона.

Зона ВОЗ для землетрясений с магнитудами 3-4 была выделена с помощью двух выборок, одна из которых расположена в юго-западной части Кировско-Кажимского авлакогена, а вторая находится в северной части региона, в районе Восточно-Тиманского разлома. Площадь зоны составляет 189,7 тыс. км², зона включает зоны ВОЗ с магнитудами 4, 5 и более. 23 из 26 сейсмических событий с магнитудами от 3 до 4 расположены внутри и на границах выделенных зон. Увеличение балльности зон совпадает с увеличением скорости современных вертикальных движений земной поверхности, уменьшением глубины залегания поверхности Мохоровичича и уменьшением мощности нижнего слоя земной коры.

Проведено сопоставление карты зон возможных очагов землетрясений с тектонической картой под ред. Е.Е. Милановского (рис. 4.5), которое показывает хорошее совпадение зон ВОЗ с крупнейшими структурами исследуемого региона. Наиболее сейсмически активными участками являются места сочленения зон ВОЗ, связанных с Предуральским краевым прогибом и Камско-Бельским авлакогеном, а также зоны ВОЗ, связанные с Кировско-Кажимским авлакогеном. В то же время, расположенное в восточной части участка субмеридиональное тектоническое нарушение частично находится вне выделенной зоны ВОЗ, что может свидетельствовать об особенностях сейсмического режима Западно-Сибирской платформы.

Небольшое число землетрясений в северной части региона может быть связано как с низкой тектонической активностью, так и с недостаточной изученностью сейсмического режима.

Проведено сопоставление полученных результатов с другими исследованиями, основанными на разных подходах к оценке сейсмического потенциала региона.

Сопоставление выделенных зон возможных очагов землетрясений с расположением доменов на карте возникновения очагов землетрясений, входящей в состав карт ОСР-97, показывает хорошее совпадение в южной и юго-восточной части исследуемого региона (рис. 4.6).

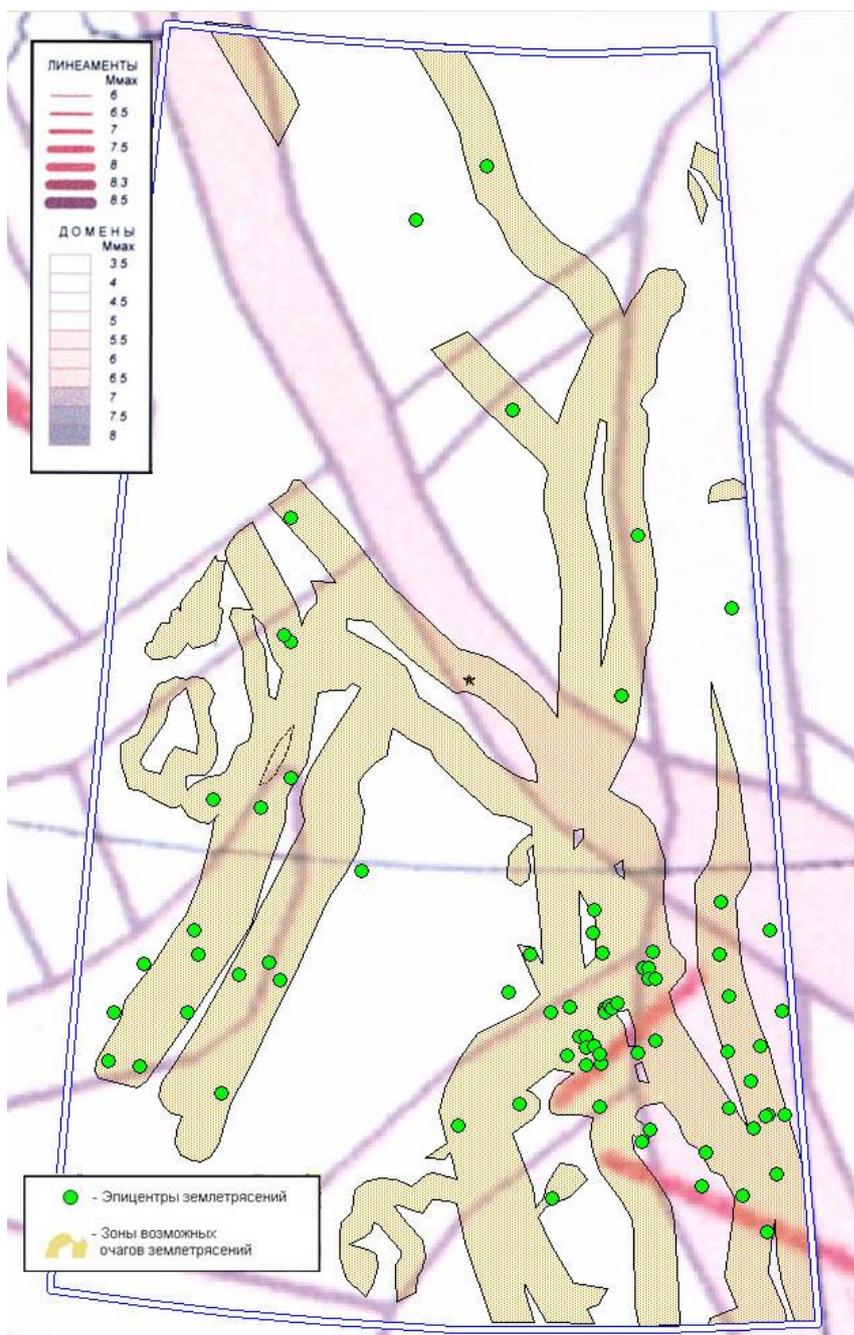


Рис.4.6. Сопоставление выделенных зон ВОЗ с картой расположения зон очагов землетрясений, входящую в комплект карт ОСР-97

На обеих картах выделяются зоны, связанные с Камско-Бельским и Кировско-Кажимского авлакогенами, зоны, связанные с сочленением Восточно-Европейской платформы и Тиманской плиты, а также сейсмически активный Предуральский краевой прогиб. При этом выделенные зоны ВОЗ обладают большей детальностью и основаны на подходе, отражающем строение и сейсмический режим исследуемого региона. Карты различаются в северной части региона, в зоне с низкой сейсмической активностью.

Сопоставление карты зон ВОЗ со схемой сейсмического районирования Республики Коми (рис. 4.7) и прилегающих территорий показывает хорошее совпадение выделенных зон ВОЗ практически на всей территории региона, при этом выделенные зоны ВОЗ обладают большей детальностью и понятным геологическим обоснованием, что позволяет выделить их на участках со слабо исследованным сейсмическим режимом, где нет данных об исторических землетрясениях.

Сопоставление карты выделенных зон ВОЗ с картой максимальных магнитуд землетрясений (Блинова, 2016) (рис. 4.8) также показывает хорошее совпадение в южной части региона, в районе Кировско-Кажимского и Камско-Бельского авлакогенов, а также совпадение в северо-западной части региона. При этом карта максимальных магнитуд землетрясений и карта зон ВОЗ построены по разной методике и с разными наборами данных.

Выводы:

Впервые в исследуемом регионе на основании нового подхода к анализу разнородной геофизической и геологической информации выделены зоны возможных очагов землетрясений, дополняющие и детализирующие имеющиеся представления о сейсмическом потенциале региона.

Третье защищаемое положение доказано.

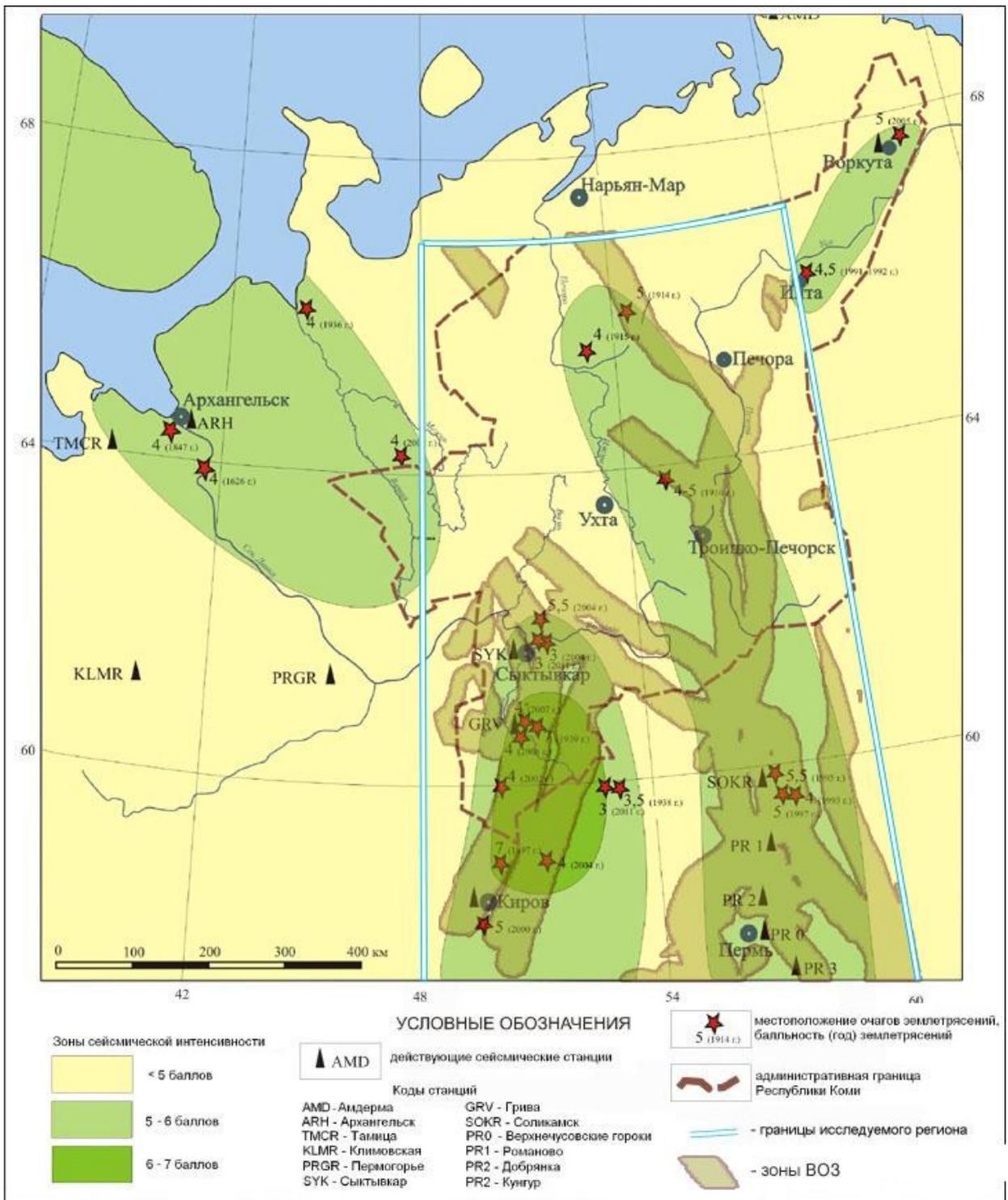


Рис.4.7. Сопоставление выделенных зон ВОЗ со схемой сейсмического районирования Республики Коми и прилегающих территорий.

(Глубинное..., 2011)

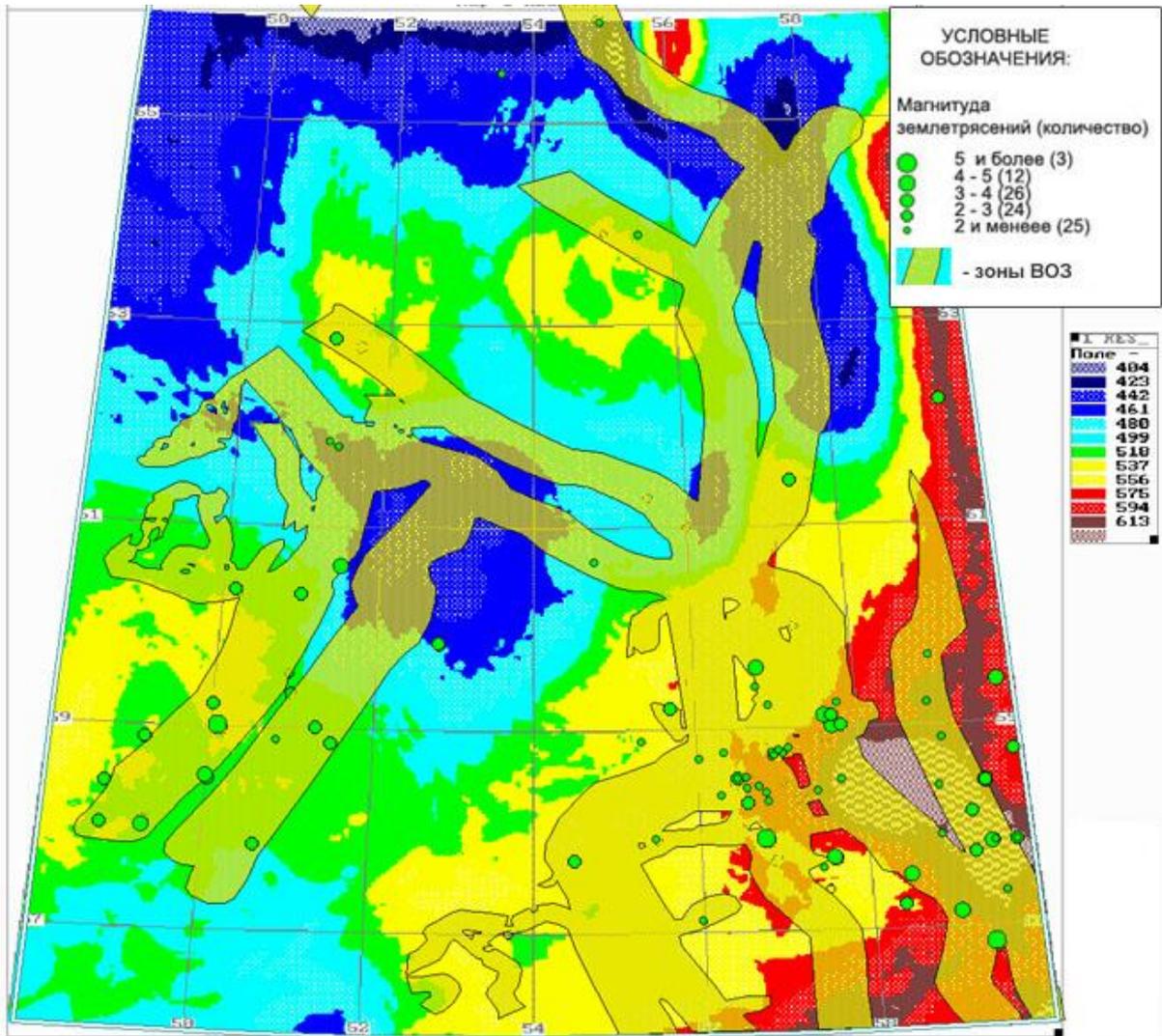


Рис.4.8. Сопоставление выделенных зон ВОЗ с картой ММах
(Блинова, 2016)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты работы можно сделать следующие выводы:

Данная работа посвящена анализу и интерпретации геологической и геофизической информации, на основании которой выделяются зоны возможных очагов землетрясений для сейсмически слабоактивных территорий. Несмотря на отсутствие разрушительных землетрясений, исследование сейсмичности остается важной задачей, решение которой позволит повысить безопасность человеческой жизни и хозяйственной деятельности и получить новые знания о развитии земной коры региона.

Впервые для выделения зон ВОЗ сейсмически слабоактивной восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающих территорий Урала использован метод, основанный на сопоставлении геофизической информации с тектоническим строением региона.

Сформирована и проанализирована база данных, позволяющая оценить связь различных геофизических полей и их комбинаций с сейсмичностью, выявлены наиболее значимые факторы, связанные с возникновением землетрясений. Впервые для выделения зон ВОЗ использован адмиттанс, связывающий гравитационное и магнитное поля. Использование адмиттанса позволило выделить новую связь сейсмической активности и аномалий геофизических полей.

Построенные зоны ВОЗ хорошо согласуются с другими исследованиями региональной сейсмической активности, дополняют и подтверждают распределение сейсмического потенциала в данном регионе. В тоже время, выделенные зоны ВОЗ имеют более дифференцированный характер и уточняют имеющиеся представления о региональной сейсмичности.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения метода, основанного на сборе и интерпретации разнородной геологической и геофизической информации для оценки сейсмического потенциала территории при проведении строительных, горных и иных работ,

при проектировании и эксплуатации трубопроводов, железных дорог и других объектов транспортной и городской инфраструктуры, при оценке рисков землетрясений и связанных с ними разрушений хозяйственных объектов.

Работа имеет важное значение для понимания строения исследуемого региона и его геологического развития, для оценки человеческой деятельности и естественных причин природы сейсмической активности, она определяет направление развития региональной сейсмической сети, позволяя рационально выбирать места для новых сейсмических станций, расширяя и сгущая современную сейсмическую сеть в наиболее важных и ответственных участках региона.

Использованный подход для выделения зон возможных очагов землетрясений не может являться универсальным решением, но позволяет применить ранее не востребованные данные, оценить их значимость и возможность их совместной интерпретации.

Результаты работы являются достоверной основой для дальнейшего развития сети сейсмических наблюдений и районирования других сейсмически слабоактивных регионов.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьин И.В. Связь сейсмичности Русской платформы с современными тектоническими движениями / И.В. Ананьин // Сб. «Современные движения земной коры». – М., Наука, 1968. – №8. – С. 282 - 295 (+4 с. карта - вклейка).
2. Ананьин И.В. Европейская часть СССР, Урал, Западная Сибирь / И.В. Ананьин. // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М., 1977. – С. 465-470.
3. Ананьин И.В. Русская равнина и Урал / И.В. Ананьин. // Сейсмическое районирование территории СССР: методологич. Основы и регион. описание карты 1978 г. – М., 1980. – С.109-114.
4. Ананьин И.В. Сейсмоактивные зоны Восточно-Европейской платформы и Урала / И.В. Ананьин // Комплексная оценка сейсмической опасности. – М., 1991. – С.106-121. – (Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.32.)
5. Ананьин И.В. К вопросу о проявлении некоторых землетрясений в восточной части Восточно-Европейской платформы /И.В. Ананьин // Исследования по сейсмической опасности. – М., 1988. — С. 119-124. – (Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.29.)
6. Артюшков Е.В. Геодинамика / Е.В.Артюшков. – М.: Недра, 1979. – 326 с.
7. Архангельский А.Д. Тектоника докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы по данным общей магнитной съемки СССР / А.Д. Архангельский, Н.В. Розе, В.В. Колюбакин // Изв. АН СССР. Сер. География и геофизика. – 1937. – №2. – С.155-194.
8. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год [Электронный ресурс] / Роснедра, ВСЕГЕИ. – 2013. – Режим доступа: <http://www.vsegei.ru/ru/info/seismic/>

9. Баранов Ю. В. Оценка магнитуд разномасштабных сейсмических событий, регистрируемых системами сейсмологического контроля Западного Урала. / Ю. В. Баранов // Четвертая Уральская молодежная научная школа по геофизике: сб. учеб.-науч. материалов / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2003. – С. 12-15.
10. Баранов Ю. В. Оценка магнитуд разномасштабных сейсмических событий, регистрируемых системами сейсмологического контроля Западного Урала / Ю. В. Баранов // Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов: материалы междунар. конф. и науч. сес. ГИ УрО РАН. – Пермь, 2003. – С. 131-134.
11. Баранов Ю. В. Критерии типизации локальных сейсмических событий / Ю. В. Баранов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2006 г. – Пермь, 2007. – С. 223-225.
12. Баранов Ю. В. Информационное сопровождение сейсмологических наблюдений на Западном Урале / Ю. В. Баранов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. – Пермь, 2010. – С. 167-168.
13. Баранов Ю. В. Сейсмическое районирование Тимано-Североуральского региона / Ю. В. Баранов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 9. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2011. – С. 193-195.
14. Баранов Ю.В. Сейсмическое районирование Западно-Уральского региона / Ю. В. Баранов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – С. 194-195.
15. Баранов Ю.В. Развитие системы сейсмологических наблюдений в Западно-Уральском регионе / Ю. В. Баранов // Горное эхо. – 2012. – № 3 (49). – С. 19-22.
16. Баранов Ю.В. Построение зон возможных очагов землетрясений для восточной окраины Восточно-Европейской платформы / Ю. В. Баранов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 193-195.

17. Баранов Ю.В. Использование современных вертикальных движений земной поверхности при выделении зон возможных очагов землетрясений / Ю.В. Баранов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 201-203.
18. Баранов Ю.В. О вкладе землетрясения 18 октября 2015 года в представления о сейсмичности Урала / Ю.В. Баранов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 182-184.
19. Баранов Ю. В. Выделение зон возможных очагов землетрясений Восточной окраины Восточно-европейской платформы и Урала // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. - № 6-5 (48). – С. 119-122.
20. Баранов Ю. В. Анализ геофизических полей для выделения зон возможных очагов землетрясений восточной окраины Восточно-Европейской платформы // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2016. – Вып. 4 (33). – С. 36-40.
21. Баранов Ю.В. Выделение и дифференциация зон возможных очагов землетрясений Западного Приуралья / Ю.В. Баранов// Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 198-201.
22. Белоконь Т.В. Строение и нефтегазоносность рифейско-вендских отложений востока Русской платформы / Т.В. Белоконь, В.И. Горбачев, М.М. Балашова. – Пермь: Звезда, 2001. – 108 с.: ил.
23. Белорусский сейсмологический бюллетень. – Минск, 1991. – Вып.1. – 118 с.
24. Белоусов В.В. Основы геотектоники / В.В. Белоусов. – М.: Недра, 1989. – 382 с.
25. Блинова Т.С. Оценка сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических данных в регионах с платформенным режимом на примере Западно-Уральского региона / Т.С. Блинова // Экологическая

- безопасность городов Урала: тез. докл. регион. науч.-техн. конф. / ПГУ. – Пермь, 1994. – С. 14-16.
26. Блинова Т.С. Выделение сейсмоактивных зон в Западно-Уральском регионе по комплексу геологических данных / Т.С. Блинова // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / ОИФЗ РАН. – М., 1995. – Вып. 2-3. – С. 331-342.
27. Блинова Т.С. Оценка сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических данных для Западно-Уральского региона / Т.С. Блинова, А.А. Маловичко // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: тез. докл. Междунар. симп. SPM-95 / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 1995. – С. 28-29. Блинова Т.С. Оценка сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических данных для южной части Западно-Уральского региона /Т.С. Блинова // Тез. докл. регион. научно-технич. конференции «Экологическая безопасность населения в зонах градопромышленных агломераций Урала», 18-20 октября. – Пермь: Пермский ун-т, 1995. – С.33-34.
28. Блинова Т.С. Выделение сейсмоактивных зон в Западно-Уральском регионе по комплексу геологических данных /Т.С. Блинова // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. – М.: ОИФЗ РАН, 1995. – Вып.2-3. – С.331-342.
29. Блинова Т.С. Сейсмичность и сейсмическое районирование Западно-Уральского региона (до 54°N) / Блинова Т.С., Маловичко А.А. // Недра Поволжья и Прикаспия / НВ НИИГГ. – Саратов, 1996. – Вып.13 (спецвып.). – С. 83-90.
30. Блинова Т.С. Прогноз региональных геодинамически неустойчивых зон по комплексу геолого-геофизических и сейсмологических данных для территории Западно-Уральского региона / Блинова Т.С., Маловичко А.А. // X Межотраслевое координационное совещание по проблемам геодинамической безопасности: материалы совещ. / УГГГА. – Екатеринбург, 1997. – С. 75-79.

31. Блинова Т.С. Сейсмичность и глубинное строение Западно-Уральского региона / Блинова Т.С., Маловичко А.А. // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. конф. / ПГУ. – Пермь, 1997. – С. 162-164.
32. Блинова Т.С. Прогноз региональных геодинамически неустойчивых зон для Западно-Уральского региона / Т.С. Блинова, А.А. Маловичко // Горные науки на рубеже XXI века: материалы междунар. конф. 1997 г. / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1998. – С. 138-143.
33. Блинова Т.С. Прогноз геодинамически неустойчивых зон. / Т.С. Блинова. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. - 164 с.
34. Блинова Т. С. Сейсмический потенциал Тимано-Североуральского региона / Т. С. Блинова, В. В. Удоратин, Н. В. Конанова, Н. Н. Носкова, Ю. В. Баранов // Вестн. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2012. – №1. – С.18-21.
35. Валеев Р.Н. К геологическому строению кристаллического фундамента Вятско-Камского междуречья / Р.Н. Валеев, Б.С. Сидтиков // Докл. АН СССР. – 1963. – Т.152, №6. – С.1414-1419.
36. Валеев Р.Н. Тектоника Вятско-Камского междуречья / Р.Н. Валеев. – М.: Недра, 1968. – 116 с.
37. Валеев Р.Н. Сравнительный анализ условий формирования и пространственного размещения авлакогенов Русской платформы / Р.Н. Валеев, В.А. Клубов, М.И. Островский // Советская геология. – 1969. – № 4. – С. 58-67.
38. Валеев Р.Н. Разломы кристаллического фундамента и их роль в формировании структур осадочного чехла / Р.Н. Валеев // Выявление и трассирование разломов по геофизическим аномалиям Волго-Камского края. – М., 1970. – С. 75-93.
39. Вейс-Ксенофонтова З.Г. К вопросу о сейсмической характеристике Урала / З.Г. Вейс-Ксенофонтова, В.В. Попов; АН СССР. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. – 12 с. – (Труды Сейсмологического института № 104).

40. Верховланцев А.В. Построение одномерной скоростной модели земной коры Западного Урала / А.В. Верховланцев // Вестн. Поморского ун-та. Сер. Естественные науки. – 2011. – № 4. – С. 5-10.
41. Вохмянина Е.И. Некоторые результаты дистанционных исследований при нефтепоисковых работах на севере Урала-Поволжья / Е.И. Вохмянина, Ю.А. Ильиных // Методика поисков и разведки нефти и газа на севере Урало-Поволжья. – М., 1982. – С.44-49. – (Науч. тр. ВНИГНИ. Вып. 243).
42. Габсатарова И.П. Верхошижемское землетрясение 18 января 2000 года с $M_{PSP}=4.0$, $K_p=11.2$, $I_0=5$ (Кировская область) / И.П. Габсатарова, Л.С. Чепкунас // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году / ГС РАН. – Обнинск, 2006. – С. 230 - 236.
43. Гафаров Р.А. Строение докембрийского фундамента севера Русской платформы: (По данным регион. геофизич. исследований / Р.А. Гафаров. – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 212 с., 5 л. карт.: ил., карт. – (Труды АН СССР. Геол. ин-т. Вып. 85).
44. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности / А.Д. Гвишиани [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 174с.
45. Геологический словарь. В 2-х т. – 2-е изд., испр. – М.: Недра, 1978. – Т 1. А-М. – 486 с.
Геологический словарь. В 2-х т. – 2-е изд., испр. – М.: Недра, 1978. – Т 2. Н-Я. – 456 с.
46. Гершанок В.А. Полосовидная структура магнитного поля на территории Пермского Прикамья / В.А. Гершанок, Л.А. Гершанок, М.С. Чадаев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: мат-лы 32-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2005. – С. 55–56.
47. Гершанок В.А. Районирование гравитационных аномалий на территории Пермского Прикамья по глубине залегания их источников / В.А.

- Гершанок, М.С. Чадаев // Вестник Пермск. ун-та, вып. 4, Геология. – Пермь, 1997. – С. 193-198.
48. Гершанок Л.А. Магниторазведка / Л.А. Гершанок. – Перм.ун-т. –Пермь, 2009. -421 с.
49. Сейсмические события Уральского региона за 1914-2002г. / А.А. Годзиковская, В.С. Ломакин, Н.Е. Прибылова, И.К. Силина, Н.В. Митенкова. – М.:ЦСГНЭО РАО «ЕЭС России», 2002. – 86с.
50. Голубева И.В. Обзор сейсмичности Уральского региона в 2007 году / Голубева И.В., Верхованцев Ф.Г., Белевская М.А. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 3-й Междунар. сейсмолог. шк. / ГС РАН [и др.]. – Обнинск, 2008. – С. 41-43.
51. Голиздра Г.Я. Анализ линеаментов космических снимков в пределах Урала и прилегающей территории // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1988 – № 12. – С.12-17.
52. Горожанин В.М. О субширотных структурах юго-востока Русской плиты и Южного Урала // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Материалы VIII Межрегион. науч.-практ. конф. Республики Башкортостан. – Уфа, 2010. – С. 57-59.
53. Гитис В.Г. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике / В.Г Гитис, Б.В. Ермаков. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.
54. Геология СССР. Т. 12. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч.1. Геологическое описание. Кн.1 и 2 / [Гл. ред. А.В. Сидоренко]. – М.: Недра, 1969. – С. 304, 723.
55. Глубинное строение Тимано-Североуральского региона / [А.М. Пыстин и др.]; отв. ред. А.М. Пыстин. – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 261 с.: ил.
56. Гуляев А.Н. Область возможного возникновения очагов ощутимых землетрясений на Среднем Урале / А. Н. Гуляев // Известия вузов. Горный журнал. – 2017. – № 6. С 109 – 117.

57. Гуляев А.Н. Сейсмичность и сейсмическое районирование Урала / А. Н. Гуляев // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. – № 6. С 116 – 124.
58. Изгибные деформации и сейсмичность литосферы Восточно-Европейской платформы / А.Ф. Грачев, В.А. Магницкий, Ш.А. Мухамедиев, С.Л. Юнга // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / ОИФЗ РАН. – М., 1995. – Вып. 2-3. – С. 242-247.
59. Тензорные характеристики неотектонических изгибных деформаций и кривизны поверхности фундамента литосферы Восточно-Европейской платформы / А.Ф. Грачев, В.А. Магницкий, Ш.А. Мухамедиев, С.Л. Юнга // Доклады РАН. – 1995. – Т.340, №3. – С.250-255.
60. Об оценке максимальных магнитуд платформенных землетрясений на основе анализа сеймотектонических и неотектонических деформаций / А.Ф. Грачев, В.А. Магницкий, Ш.А. Мухамедиев, С.Л. Юнга // Доклады РАН. – 1996. – Т.346, №1. – С. 108-111.
61. К оценке максимальных магнитуд платформенных землетрясений на основе анализа неотектонических и сеймотектонических деформаций / А.Ф. Грачев, В.А. Магницкий, Ш.А. Мухамедиев, С.Л. Юнга // Неотектоника и современная геодинамика континентов и океанов. – М.,1996. – С. 37-39.
62. Дедеев В.А. Геоблоки европейской части СССР: Докл. на заседании президиума Коми филиала АН СССР, 16 сент. 1976 г. / В.А. Дедеев, Л.Е. Шустова. – Сыктывкар, 1976. – 48 с.
63. Дедеев В.А. Восточное ограничение Печорской плиты / В.А. Дедеев, И.В. Запорожцева, Н.И. Тимонин, В.В. Юдин // Тектоника, магматизм, метаморфизм и металлогения зоны сочленения Урала и Восточно-Европейской платформы: тез. докл. совещ. – Свердловск; Миасс, 1985. – С. 12-14.
64. Дружинин В.С. Проблемы связи верхних структур земной коры с глубинным строением Уральского региона / В.С. Дружинин, В.М. Рыбалка, И.Д. Соболев // Советская геология. – 1974. – № 10. – С. 42-54.

65. Дружинин В.С. Связь тектоники и магматизма с глубинным строением Среднего Урала по данным ГСЗ / В.С. Дружинин, В.М. Рыбалка, И.Д. Соболев. – М.: Недра, 1976. – 157 с.
66. Дружинин В.С. Новые данные о глубинном строении Урала (по результатам исследований на Красноуральском профиле ГСЗ) / В.С. Дружинин, Ю.С. Каретин, В.М. Рыбалка, Н.И. Халевин // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 258, № 1. – С. 173-176.
67. Дружинин В.С. Глубинное строение Уральского региона / В.С. Дружинин, В.М. Рыбалка, Н.И. Халевин // Советская геология. – 1986. – № 2. – С. 111-117.
68. Дружинин В.С., Специфика глубинного строения, сейсмичности и минерагении центральной структуры Уральского подвижного пояса / В.С. Дружинин, Ю.С. Каретин // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерагении подвижных поясов и платформенных областей литосферы: Материалы Междунар. конф. / Ин-т геофизики УрО РАН. – Екатеринбург, 1998. – С. 66-68.
69. Дружинин В.С. Глубинное геокартирование Уральского региона по данным ГСЗ / В.С. Дружинин, Ю.С. Каретин, С.Н. Кашубин // Региональная геология и металлогения. – 2000. – №10. – С. 152-161.
70. Дьяконова А.Г. Результаты электромагнитных исследований на профиле Яйва-Кытлым-Серов-Гари / А.Г. Дьяконова [и др.] // Уральский геофизический вестник. – 2001. – № 2. – С. 30-37.
71. Дягилев Р.А. Параметры Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. по инструментальным данным / Р.А. Дягилев, И.В. Голубева // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 5-й Междунар. сейсмолог. шк. / ГС РАН [и др.]. – Обнинск, 2010. – С. 89-93.
72. Дягилев Р.А. Техногенная сейсмичность горнодобывающих регионов и ее влияние на сейсмическую опасность / Р.А. Дягилев // Проблемы региональной экологии. – 2011. – №5. – С. 116-120.

73. Дягилев Р.А. Анизотропия макросейсмического поля Среднеуральского землетрясения 18 октября 2015 года / Р.А. Дягилев, Н.С. Гусева, Ф.Г. Верховланцев // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 42-46.
74. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация / А.Д. Завьялов. – М.: Наука, 2006. – 254 с.: ил.
75. Запорожцева И.В. Строение дофанерозойской литосферы европейского Северо-Востока России / И.В. Запорожцева, А.М. Пыстин; отв. ред. В.В. Гречухин. – СПб.: Наука, 1994. – 110 с.: ил.
76. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы: в 2-х кн. кн. 1. Землетрясения / ГС РАН [и др.]; под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. – Петрозаводск, 2007. – С. 28-29.
77. Золоев К.К. Разломы, сейсмичность, подвижные пояса: характерные черты, минерагения / К.К. Золоев // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерагении подвижных поясов и платформенных областей литосферы: Материалы Междунар. конф. / Ин-т геофизики УрО РАН. – Екатеринбург, 1998. – С. 78-80.
78. Золотов Е.Е. Модель литосферы под профилем «Уральский» по наблюдениям объемных продольных и обменных волн / Е.Е. Золотов, В.А. Ракитов, Л.Н. Солодилов // Разведка и охрана недр. – 1994. – № 10. – С. 15-18.
79. Строение коры и мантии центрального Урала по данным профильных телесейсмических наблюдений / Е.Е. Золотов, В.А. Ракитов, Г.Л. Косарев, А.В. Треусов // Разведка и охрана недр. – 1995. – № 5. – С. 16-18.
80. Долговременное прогнозирование сейсмической опасности по комплексу геолого-геофизических данных / Л.В. Ивановская, Д.Б. Фирсова, Ю.К. Щукин, Ю.В. Хоменюк. – М.: Наука, 1988. – 108 с.
81. Институт проблем передачи информации: сетевая аналитическая ГИС Геопроцессор 2.0: Руководство пользователя [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: <http://www.geo.iitp.ru/GeoProcessor-2/new/GeoProc2-UG.htm>

82. Опыт непродольного профилирования методом ГСЗ на Р и S волнах на Среднем Урале / С.Н. Кашубин и др. // Глубинное строение и развитие Урала. – Екатеринбург, 1996. – С. 147-161.
83. Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе / С.Н. Кабушин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 181 с.
84. Кашин Л.А. Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территории СССР [Карты] / Л.А. Кашин. – 1:5000000. – Баку: Азербайджанаэрогеодезия, 1989. – 1 к.
85. Короновский Н.В. Краткий курс региональной геологии СССР / Н.В. Короновский. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 398 с.
86. Современная геодинамика Урала / И.И. Кононенко, Н.И. Халевин, М.А. Блюмин, В.Р. Ященко. – Свердловск: УрО РАН СССР, 1990. – 100 с.
87. Кунин Н.Я. Исследование литосферы докритическими отраженными волнами / Н.Я. Кунин, Э.Р. Шейх-Заде. – М.: Наука, 1993. – 223 с.
88. Кусонский О.А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 280 с.
89. Левицкая А.Я. Землетрясения Урала / А.Я. Левицкая // Землетрясения в СССР / АН СССР. Совет по сейсмологии. – М., 1961. – С. 384-386.
90. Леонов Ю.Г. Строение литосферы в отраженных волнах / Ю.Г. Леонов // Геотектоника. – 1994. – № 4. – С. 85-98.
91. Литосфера Тимано-Североуральского региона: геологическое строение, вещество, геодинамика / отв. ред. А.М. Пыстин, А.И. Антошкина, Л.В. Махлаев. – Сыктывкар: Геопринт, 2008. – 234 с.
92. Современная динамика литосферы континентов. Подвижные пояса / [Н.А. Логачев, В.А. Хромовских, А.А. Никонов и др.]; под ред. Н.А. Логачева, В.С. Хромовских. – М.: Недра, 1995. – 560 с.
93. Ломакин В.С. Годографы сейсмических волн для Урала / В.С. Ломакин, В.В. Колмогорова, Г.И. Парыгин // Упругие волны промышленных

- взрывов и исследование земной коры Урала: [сб. ст.] / УНЦ АН СССР. – Свердловск, 1978. – С. 14-20.
94. Лютоев В.А. Сейсмоемкие зоны Республики Коми и особенности микрорайонирования г. Сыктывкара / В.А. Лютоев. – Сыктывкар: Геопринт, 2001. – 32с.
 95. Нефтегазоносные и перспективные комплексы центральных и восточных областей Русской платформы. Т.П. Девонские отложения Волго-Уральской нефтегазоносной области / [под ред. А.И. Ляшенко, Г.И. Гассановой]. – Л.: Недра, 1970. – 272с.
 96. Максимович Г.А. Землетрясение 1956 г. в Пермской области / А.Г. Максимович // Записки Пермского отделения ВГО СССР. – 1960. – Вып. 1. – С. 155-159.
 97. Землетрясения Западно-Уральского региона и оценка уровня сейсмической опасности зон градопромышленных агломераций / А.А. Маловичко, Т.С. Блинова, Л.В. Некрасова, А.Ю. Лебедев // Экологическая безопасность городов Урала: тез. докл. регион. науч.-техн. конф. / ПГУ. – Пермь, 1994. – С. 81-82.
 98. Маловичко А.А. Каталог землетрясений на территории Западно-Уральского региона / А.А. Маловичко, Ф.В. Сысолятин // Белорусский сейсмологический бюл. – 1992. – Вып.2. – С. 145-150.
 99. Маловичко А.А. Некоторые результаты изучения сейсмических явлений по спектрам сейсмозаписей для Западно-Уральского региона / Маловичко А.А., Блинова Т.С., Ипатов Ю.П. // Сейсмологические исследования / Ин-т геолог. наук АН Беларуси. – Минск, 1995. – Вып. 1. – С. 73-77.
 100. Геодинамическая активизация недр Верхнекамского промышленного района / А.А. Маловичко, Т.С. Блинова, А.Ю. Лебедев, Л.В. Некрасова // Современные проблемы геологии Западного Урала: тез. докл. науч. конф. / ПГУ. – Пермь, 1995. – С. 17-18.
 101. Маловичко А. А. Прогнозирование сейсмоопасных зон при сейсмическом мониторинге в рудниках и шахтах Западного Урала / А.

- А. Маловичко, Р. А. Дягилев, Д. Ю. Шулаков, Ю. В. Баранов // Современная сейсмология: достижения и проблемы: материалы науч. конф. – М., 1998. – С. 33-34.
102. Маловичко А. А. Мониторинг природной и техногенной сейсмичности на территории Западно-Уральского региона / А. А. Маловичко, Р. А. Дягилев, Д. Ю. Шулаков, П. Г. Бутырин, Ю. В. Баранов // Геофизика и математика: материалы 2-й Всерос. конф. / ГИ УрО РАН [и др.]; под ред. В. Н. Страхова. – Пермь, 2001. – С. 367-371.
103. Маслов А.В. О некоторых особенностях формирования отложений рифея Камско-Бельского авлакогена / А.В. Маслов, М.В. Ишерская // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Материалы VII Межрегион. научно-практ. конф. – Уфа, 2008. – С. 117-119.
104. Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли: (рифтогенез на древних платформах) / Е.Е. Милановский. – М.: Недра, 1983. – 280 с.: ил.
105. Милановский Е.Е. Геология СССР: в 2 т. – М.: Изд.-во МГУ, 1987. – 497 с.
106. Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий [Карты] / Е.Е. Милановский, О.А. Мазарович, С.Л. Костюченко, Д.И. Жив. – 1:4000000. – М: ПКО «Картография», 2007.
107. Мушкетов И.В. Каталог землетрясений Российской империи: с картой распространения землетрясений в России, чертежами и рисунками / И. Мушкетов и А. Орлов. – СПб.: Тип. Императорской акад. наук, 1893. – 582 с.: ил., табл. – (Записки Императорского Русского географического общества по общей географии; Т. 26).
108. Нестеренко М.Ю. Геоэкология недр нефтегазоносных районов Южного Предуралья / М.Ю. Нестеренко. – Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – 132 с.: ил.
109. Никонов А.А. Проблемы выделения нетектонических землетрясений на Восточно-Европейской платформе в оценке ее сейсмической опасности

- /А.А. Никонов // Недра Поволжья и Прикаспия / НВ НИИГГ. – Саратов, 1996. – Вып.13 (спецвып.). – С. 42-49.
110. Никонов А.А. Сейсмические сотрясения на Русской равнине в XI–XVII вв. / А.А. Никонов // Физика Земли. – 1990. – №1. – С. 85-94.
111. Никонов А.А. Исторические землетрясения Вятского края / А.А. Никонов, Н.Г. Мокрушина, Л.И. Лубягина // Вестник Вятского государственного педагогического университета – 2000. – № 2. – С. 76-80.
112. Никонов А.А. Сысольское землетрясение 13 января 1939 г. на Русском Севере (ревизия данных) /А.А. Никонов, Л. С. Чепкунас, В.В. Удоратин // Геология Европейского Севера России: сб. 5. / Ин-т геологии Коми НЦ. – Сыктывкар, 2001. – С. 1-43.
113. Новоселицкий В.М. О связи региональной зональности физических параметров осадочного чехла со структурой кристаллического фундамента платформенной части Пермского Прикамья / В.М. Новоселицкий, В.К. Серов, С.А. Шихов // Научное обоснование направлений и методики поисковых и разведочных работ на нефть и газ в Пермском Прикамье. – Пермь, 1971. – С.345-350. – (Науч. тр. ВНИГНИ. Вып. 117).
114. Новоселицкий В.М., Физические свойства пород осадочного чехла севера Урало-Поволжья / В.М. Новоселицкий, В.М. Проворов, А.А. Шилова – Свердловск: УНЦ АН СССР,1985. – 132 с.
115. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР – 97 [Карты]: Комплект карт и другие материалы для Строительных норм и правил – СНиП «Строительство в сейсмических районах». – М.: ОИФЗ РАН, 1998. – 31 с.
116. Орлов А.П. О землетрясениях в приуральских странах / А.П. Орлов // Труды Об-ва естествоиспытателей при Казанском университете. – Казань, 1876. – Т. III, № 3. – 8с.
117. Островский М.И. Блочное строение фундамента и его влияние на формирование палеоструктур осадочного покрова в северных районах

- Волго-Уральской области / М.И. Островский, Р.Б. Давыдов, В.А. Шеходанов // Новые данные о геологическом строении и нефтегазоносности Пермского Прикамья: – Пермь, 1966. – С. 65-73. – (Науч. тр. ВНИГНИ; Вып. LVII).
118. Панжин А.А. Исследование геодинамических движений CORS для обоснования методики контроля процесса сдвижения на месторождениях Уральского региона / А.А. Панжин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. –2015. –№ 1 – С. 22-25.
119. Пейве А.В. Общая характеристика, классификация и пространственное расположение глубинных разломов. Главнейшие типы глубинных разломов / А.В. Пейве // Изв АН СССР. Сер. геологическая. – 1956. – №3. – С. 30-37.
120. Тектоническое районирование Волго-Уральской области в свете новых данных и общие условия нефтегазоносности региональных структур / В.В. Петропавловский, В.А. Клубов, С.К. Нечитайло, В.В. Поповин // Новые данные о геологическом строении и нефтегазоносности Пермского Прикамья: – Пермь, 1966. – С. 29-34. – (Науч. тр. ВНИГНИ; Вып. LVII).
121. Померанцева И.В. Результаты работ по изучению строения кристаллической толщи земной коры в некоторых районах юго-востока Русской платформы / И.В. Померанцева // Прикладная геофизика. – М.: Недра, 1961. – Вып.31. – С. 11-53.
122. Померанцева И.В. Природа волн, связанных с промежуточными границами раздела в кристаллической толще земной коры, и глубинное строение юго-востока Русской платформы / И.В. Померанцева // Прикладная геофизика. – М.: Недра, 1965. – Вып.41. – С.53-68.
123. Померанцева И.В. Модели земной коры, полученные по данным станций «Земля» на территории некоторых разновозрастных платформ, платформенных впадин и передовых прогибов / И.В. Померанцева, Л.П.

- Барскова, А.И. Мозженко // Глубинное строение земной коры: [сб. ст.]. – М.,1975. – С. 49-59.
124. Рейснер Г.И. Сейсмический потенциал Западной России, других стран СНГ и Балтии / Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / ОИФЗ РАН. – М., 1993. – С. 186-195.
125. Розанов Л.Н. Основные черты тектонического строения платформенной части Башкирии / Л.Н. Розанов // Геологическое строение и нефтегазоносность Восточных районов Русской платформы. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – С. 173-180.
126. Сейсмическое районирование СССР / под ред. С.В. Медведева. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
127. Сейсмические события Уральского региона за 1914-2002 гг. / под ред. А.И. Савича, О.Е. Старовойта. – М.: ЦГСНЭО РАО «ЕЭС России», 2002. – 86 с.
128. Сейсмическое районирование территории СССР: Метод. и регион. описание карты 1978 г. /под ред. В.И. Бунэ и Г.П. Горшкова. – М.: Наука, 1980. – 307 с.
129. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий / Т.С. Блинова, В.В. Удоратин, Р.А. Дягилев, Ю.В. Баранов, Н.Н. Носкова, Н.В. Конанова; ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2015. – 178 с.
130. О глубинной структуре земной коры Урала и прилегающих к нему территорий / Б.Г. Семенов, Е.М. Ананьева, Н.Я. Екидина, Н.Г. Берлянд и др. // Геотектоника. – 1983. – № 4. – С. 37-47.
131. Ситдииков Б.С. Петрография и строение кристаллического фундамента Татарской АССР / Б.С. Ситдников. – Казань: КГУ,1968. – 436 с.
132. Соснин Н.Е. Отложения доманикового типа на территории Пермского края. Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности /Н.Е. Соснин, Л.В. Мягкова , Н.В. Четина,Н.В. Медведева,Д.Г. Михайлов// Oil&Gas Journal Russia. – 2015. – С. 22-28.

133. Тектоническая карта Урала масштаба 1:1000000 (объяснительная записка) [Карты] / И.Д. Соболев, С.В. Автонеев, Р.П. Белковская [и др.]. – Свердловск, 1983. – 168 с.
134. Современная динамика литосферы континентов. Подвижные пояса / под ред. Логачева Н.А., Хромовских В.С. – М.: Недра, 1995. – 560 с.
135. Соколов В.Б. Новый тип внутриплитных структур и динамика их развития (по результатам геолого-геофизических исследований на Геотраверсе «Гранит») / В.Б. Соколов, Т.М. Хисматулин, С.Н. Кашубин // 300 лет горно-геологической службе России: тез. докл. междунар. геофизич. конф. – СПб., 2000. – С.
136. Солодилов Л.Н. Центр «ГЕОН» – 25 лет глубинных сейсмических исследований / Л.Н. Солодилов // Разведка и охрана недр. – 1994. – № 10. – С. 2-7.
137. Страхов В.Н. К новой парадигме сейсмологии / В.Н. Страхов // Природа. – 1989. – № 2. – С. 4-9.
138. Трегуб А.И. Соотношение систем разломов и разломов территории ВКМ / А.И. Трегуб, В.И. Жаворонкин // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: материалы Междунар. конф. / Воронеж. ун-т. – Воронеж, 2001. – С. 198-199.
139. Трофимов В.А. Тектоника и нефтеносность Казанско-Кажимского авлакогена, восточно-европейская платформа / В.А. Трофимов, В.Т. Хромов, А.В. Трофимов // Геотектоника. – 2016. – № 7. – С. 36-46.
140. Удоратин В.В. Глубинное строение и сейсмичность юга Республики Коми / В.В. Удоратин. – Екатеринбург, 2002. – 72 с.
141. Удоратин В.В. Республика Коми, 2001–2005 гг. / В.В. Удоратин, Р.С. Михайлова // Землетрясения северной Евразии, 2005 год / ГС РАН. – Обнинск, 2011. – С. 257-268.
142. Удоратин В.В. Землетрясение 19 января 2011 г. вблизи г. Сыктывкара / В.В. Удоратин, В.И. Арихина // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2011. – №2. – С. 25.

143. Удоратин В.В. Глубинное строение Кировско-Кажимского авлакогена // Геологическая среда, минерагенические и сеймотектонические процессы: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2012. – С. 372-376.
144. Урузаев И.М. Характеристика разломов востока Русской платформы, выявленных по магнитным и гравитационным аномалиям / И.М. Урузаев // Выявление и трассирование разломов по геофизическим аномалиям Волго-Камского края: [сб. ст.]. – М., 1970. – С.61-74.
145. Уткин В.И. Исследование геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS / В.И. Уткин, А.А. Белоусова, Д.С. Тягунов, Д.В. Баландин // Докл. Акад. наук. – 2010. – Т. 431, № 2. – С. 246-251.
146. Фотиади В.В. Геологическое строение Русской платформы по данным региональных геофизических исследований и опорного бурения / В.В. Фотиади. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 224 с.
147. Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Внеальпийская Европа и западная Азия / В.Е. Хаин. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
148. Хаин В.Е. От тектоники плит к более общей теории глобального тектогенеза / В.Е. Хаин // Геотектоника. – 1978. – № 3. – С. 3-25.
149. Халевин Н.И. Сейсмология взрывов / Н.И. Халевин. – М.: Наука, 1975. – 125 с.
150. Хачай Ю.В. Сейсмичность Урала – проявление плитной тектоники? / Ю.В. Хачай, И.А. Свяжина // Проблемы геодинамики, сейсмичности и минерагении подвижных поясов и платформенных областей литосферы: материалы Междунар. конф. / Ин-т геофизики УрО РАН. – Екатеринбург, 1998. – С. 207-209.
151. Гравиметрия, магнитометрия, геоморфология и их параметрические связи / М.С. Чадаев, В.А. Гершанок, Л.А. Гершанок, И.С. Копылов, А.В. Коноплев; Перм. гос. нац.-исслед. ун-т. – Пермь, 2012. – 91 с.
152. Чекунов А.В. Глубинное строение литосферы центральной и юго-восточной Европы / А.В. Чекунов, В.Б. Соллогуб, Н.В. Соллогуб [и др.]

// Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии / ОИФЗ РАН. – М., 1993. – С. 152-161.

153. Шаламов В.Н. Информационный отчет о результатах региональных геофизических работ методом ОГТ в центральной и восточной частях Московской синеклизы (профиль VI программы «Рифей») в Кировской области в 1992-1993 гг. / отв. исполн. В.Н. Шаламов. – Кострома, 2001. –
154. Шаров Н.В. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. В 2 кн. / Н.В. Шаров, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукин. – Петрозаводск, 2007. – 477 с.
155. Шатский Н.С. Избранные труды. Т II. / Н.С. Шатский. – М.: Наука, 1964. –720 с.
156. Шерман С.И. Физические закономерности формирования разломов земной коры / С.И. Шерман. – Новосибирск, Наука, 1977. – 101 с.
157. Шерман С.И. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования) / С.И. Шерман, С.А. Борняков, Ю.В. Буддо. – Новосибирск: Наука, 1983. – 112 с.
158. Шерман С.И. Тектонофизическая модель байкальской сейсмической зоны, ее тестирование и возможности среднесрочного прогноза землетрясений / С.И. Шерман, С.В. Лысак, Е.А. Горбунова // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 4. – С. 508-526.
159. Шимановский Л.А. Землетрясения в Молотовской области // Природа. – 1957. – № 5. – С. 115-116.
160. Четырехуровневая система сейсмического мониторинга на территории Среднего Урала / А.А. Маловичко, Р.А. Дягилев, Д.А. Маловичко, Д.Ю. Шулаков, П.Г. Бутырин, Ф.Г. Верхоланцев // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 8-17.
161. Эринчек Ю.М. Рифейский рифтогенез центральной части Восточно-Европейской платформы / ВСЕГЕИ; Ю.М. Эринчек, Е.Д. Мильштейн. – СПб., 1995. – 48 с.
162. Юнга С.А. Сейсмотектонические деформации как основа шкалы геологических магнитуд M_{max} в вопросах оценки сейсмической

- опасности // Недра Поволжья и Прикаспия / НВ НИИГГ. – Саратов, 1996. – Вып.13 (спецвып.). – С. 32-38.
163. Ярош А.Я. Структура кристаллического фундамента Западного Приуралья / А.Я. Ярош // Геологические результаты прикладной геофизики. – М.: Недра, 1965. – С.231-234.
164. Ярош А.Я. Внутреннее строение земной коры востока Русской платформы / А.Я. Ярош, Г.Д. Дементьева // //Вопросы разведочной геофизики: сб. ст. – Свердловск, 1968. – С. 31-38. – (Тр. горного ин-та им. В.В. Вахрушева. Вып. 54)
165. Ященко В.Р. Геодезические исследования вертикальных движений земной коры / В.Р. Ященко. – М.: Недра, 1989. – 192 с.
166. Каталог землетрясений Восточно-Европейской платформы: [Кат. для лич. пользования / сост. В.И. Ананьин]. – Саратов, 1995.
167. NORSAR Норвежская сейсмологическая сеть. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.norsar.no>
168. PERM Лаборатория природной и техногенной сейсмичности / ГИ УрО РАН; А.А. Маловичко, Р.А. Дягилев. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pts.mi-perm.ru/region/>
169. Special Earthquake Catalogue of Northern Eurasia From Ancient Times Through 1995. / Eds. Kondorsraya N.V., Ulomov V.I. System of data bases, 1996. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scgis.rij>.
170. Данные ИГ КНЦ УрО РАН, ГИ УрО РАН.
171. Данные Кизеловской лаборатории горных ударов УФ ВНИМИ: [кат. для лич. пользования / сост. Ф.В. Сысолятин]
172. Geotraverse «Granit» Confirms the Volga-Kama Convective Domain: Abstracts. / V.K. Alexandrov, V.A. Trofimov, N.Y. Shabalin, F.V. Gusev, G.E. Kuznetsov // The 29th, General Assembly of the International Association of seismology and Physics of the Earth's interior. Thessaloniki, Greece. August 18-28. – 1997. – P.145-152.
173. Bulashevitch Yu.P. Geodynamics of the Urals / Bulashevitch Yu.P., Aleynikov A.L. // Tectonophysics. – 1976. – Vol.35. – P. 15-26.

174. Analysis of gravity and magnetic anomalies of Kachchh rift basin, India and its comparison with the New Madrid seismic zone, USA / D.V. Chandrasekhar, B. Singh, M. Firozishah, D.C. Mishra // *Current science.* – 2005. – V. 88, № 10. – P. 1601-1608.
175. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 1968. – Vol. 58. – P. 1583-1906.
176. Crampin S. Earthquake prediction: a new physical basis / Crampin S., Evans R., Atkinson B. // *Geophys. J. R. astr. Soc.* – 1984. – Vol. 76 – P. 147-156.
177. Gao M. The discussion about the relationship between the probabilistic distribution of magnitude in seismic province and that distribution in seismic potential source // *Earthquake Research in China.* – 1993. – № 1. – P. 15-19.
178. Gao V. Seismic zonation method based on homogenous spatial and magnitude random field // *Proc. of First Across-the-Straits Conference on Earthquake, May 6-8, 1992. Beijing, China.* – 1992. – P. 324-337.
179. Hanna W.F. Gravity, Magnetism, and Geology of the San Andreas Fault Area Near Gholame, California / W.F. Hanna, S.H. Burch, T.W. Dibblee // *Geophysical field investigations: [Электронный ресурс].* – 1972. — Режим доступа: <https://pubs.usgs.gov/pp/0646c/report.pdf>
180. Iarwin L. Where prediction is not possible? // *Earthquakes and Volcanoes.* – 1990. – Vol.22. – № 2. – P. 8-16.
181. Kagan Y.Y. Long-term earthquake clustering / Kagan Y.Y., Jackson D.D. // *Geophys. J. Intern.* – 1991. – Vol.104, № 1. – P. 117-133.
182. Molchan G.M. Structure of optimal strategies in earthquake prediction // *Tectonophysics.* – 1991. – Vol. 193. – P. 267-276.
183. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure / D.T. Sandwell, R.D. Müller, W.H.F. Smith, E. Garcia, R. Francis // *Science.* – 2014. – Vol. 346, № 6205. – P. 65-67.
184. Sandwell D.T. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate [electronic resource]/ D.T. Sandwell, W.H.F. Smith // *Journal of Geophysical Research.* – 2009. – V. 114. – Режим доступа: <http://topex.ucsd.edu/sandwell/publications/122.pdf>

185. Towards 1 mGal Global Marine Gravity from CryoSat-2 / D.T. Sandwell, E. Garcia, K. Soofi, P. Wessel, W.H.F. Smith // *Envisat, and Jason-1, The Leading Edge*. – 2013. – № 32(8). – P. 892-899.
186. Shapiro V.A. The anomalous magnetic field and its dynamics used to study the deep structure and modern geodynamic processes of the Urals / Shapiro V.A., Tsirulsky A.V. // *Journ. of Geodynamics*. – 1986. – Vol. 5. – P. 221-235.
187. Schenk V. Characteristic Features of Geonomic Forecasting Function for the Maximum Possible Earthquake / Schenk V., Schenkova Z., Gitis V.G. // *Natural Hazards*. – 1994. – Vol. 10. – P. 97-115.
188. Shi Z. Study on principle and methodology of seismic zonation – a trial in northern China / Shi Z., Yan J., Gao V. // *Acta Seismol. Sin.* – 1991. – Vol. 13, № 4. – P. 179-188.
189. Shi Z. Review of the study of seismic zonation in China / Shi Z., Gao M. // *Ann. Rev. of Development in Geophysics*. Beijing: Seismological Press. – 1992. – P. 15-24.
190. Slejko D. Seismic hazard assessment for the main seismogenic zones in the Eastern Alps. / Slejko D., Kijko A. // *Tectonophysics*. – 1991. – Vol. 191. – P. 165-183.
191. Stegena L. Correlation between seismicity and horizontal variation of heat flow density in Central Europe // *Tectonophysics*. – 1990. – Vol. 179. – P. 55-61.
192. Wang S. Seismo-Tectonic stress field in Eastern Sea area of China / Wang S., Xu Zh., Ge M. // *Earthquake Research in China*. – 1990. – Vol. 2. – P. 285-296.
193. Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic hazard: a case study of Japan / Wesnousky S.G., Scholz C.H., Shimazaki K., Mastuda T. // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 1984. – Vol. 74, № 2. – P. 687-708.

194. Wesnousky S.G. Seismicity as a function of cumulative geologic offset: Some observation from southern California // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 1990. – Vol. 80, № 5. – P. 1374-1381.
195. Zhang Y. Determining potential source by using both seismic and geological data / Zhang Y., Xu J. // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Seismic Zonation. – San Francisco, USA. – 1991. – Vol.3. – P.409-414.