

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2018

Работа выполнена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» - филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ТИ УрО РАН»), г. Пермь.

Научный руководитель:

Блинова Татьяна Сергеевна

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории природной и техногенной сейсмичности «ТИ УрО РАН» (г. Пермь)

Официальные оппоненты:

Гершанок Валентин Александрович

доктор технических наук, профессор кафедры геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета (г. Пермь)

Панжин Андрей Алексеевич

кандидат технических наук, ученый секретарь Института горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург)

Ведущая организация:

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова РАН (г. Архангельск)

Защита состоится «__» _____ 2018 года в __. __ часов на заседании диссертационного совета Д 999.207.02 на базе ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

Электронная версия текста диссертации доступна на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: www.psu.ru.

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ: vak.ed.gov.ru/vak и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: www.psu.ru

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.

Тел. (342) 239-62-89, факс: (342)239-68-32;

e-mail: olgam.psu@gmail.com

Ученый секретарь, к.т.н.

Мещерякова Ольга Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, 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) в сейсмически слабоактивных регионах.

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. 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 последствий землетрясений.

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 ВОЗ является актуальной хозяйственной задачей. 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.

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-Ксенофонта 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-Ксенофонта 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».

С 1992 г. 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 [4, 5, 6, 9, 10, 16]. Разработана методика выделения геодинамически неустойчивых зон и построения прогнозных карт максимальных магнитуд возможных землетрясений [7, 8].

Первая работа по выделению зон возможных очагов землетрясений 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)».

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, Р.А. Дягилева, А.Д. Завьялова, А.И. Иоффе, Н.А. Логачева, 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 по разным признакам, 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 [3].

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 ВОЗ.
4. Выделение зон ВОЗ по комплексу геолого-геофизических данных для восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и прилегающей территории Урала.
5. Сопоставление выделенных зон ВОЗ 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 натурных 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 [1, 3, 11, 12].

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 [2, 3, 14].
3. Зоны возможных очагов землетрясений Западного Приуралья выделены на основании нового подхода к анализу разнородной геолого-геофизической информации. Они позволяют уточнить и детализировать сейсмический потенциал региона [2, 4, 12, 14, 17].

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) «Геопроцессор 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 ВОЗ.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основании данных Е.М. Ананьевой, А.Д. Архангельского, В.В. Белоусова, Н.Г. Берлянд, С.Г. Бычкова, Р.Н. Валеева,

Р.А. Гафарова, А.Ф. Грачева, В.А. Дедеева, Г.Д. Дементьевой, В.С. Дружинина, А.К. Маловичко, Е.Е. Милановского, Д.В. Наливкина, В.М. Новоселицкого, Л.Н. Розанова, Б.С. Ситдикова, М.А. Уразаева, Н.С. Шатского, С.А. Шихова, Ю.К. Щукина, Ф.Н. Юдахина, А.Я. Яроша и других авторов описана тектоника исследуемого региона, расположенного в пределах восточной окраины Восточно-Европейской платформы, Печорской плиты и Уральской складчатой системы. 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.

В качестве основы для анализа тектонических нарушений, расположения крупнейших структур и выделения зон ВОЗ была выбрана тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий (ред. Е.Е. Милановский, масштаб 1:4000000, 2007, М: ФГУП Производственное картографическое объединение «Картография»).

Для выделения зоны ВОЗ использованы данные гравитационной съемки, Satellite Geodesy; данные магнитной съемки, EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution); граница залегания поверхности Мохоровичича: The Moho Depth of the European Plate (2012); карта современных вертикальных движений земной коры под ред. Л.А. Кашина (1989). Карта мощности нижнего слоя консолидированной коры Г.В. Краснопевцевой (1992) использована из базы данных сетевой аналитической ГИС «Геопроцессор 2». Каталог землетрясений с 1788 по 2015 гг. включает 90 сейсмических событий с магнитудами от 1.0 до 5.5.

Изучение строения земной коры, современных вертикальных движений, крупнейших тектонических нарушений и авлакогенов, анализ геофизических полей и осадочного чехла позволили выделить зоны возможных очагов землетрясений в регионе [4, 11, 12, 14].

Из всех исследованных параметров для изучаемого региона наиболее информативными являются близость к тектоническим нарушениям, градиент гравитационного поля, современные вертикальные движения земной коры, мощность нижнего слоя земной коры, глубина залегания поверхности Мохоровичича, что подтверждается следующими соотношениями:

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 от 0,3 до 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 [15].

Изменения мощности нижнего слоя земной коры хорошо сопоставляются с крупными тектоническими нарушениями и с Кировско-Кажимским авлакогеном. 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.

Анализ связи землетрясений и глубины залегания поверхности Мохоровичича показывает, что все землетрясения приурочены к глубинам залегания от 39 до 43 км, при изменении глубины залегания от 33 до 47 км, причем большая их часть относится к глубинам 40–41 км [17].

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

Во второй главе приведено описание сейсмичности и сейсмического районирования исследуемого региона. Исследованиями сейсмичности на основании исторических записей в XIX веке занимались А.П. Орлов и И.В. Мушкетов, первые инструментальные сейсмологические наблюдения на Урале связаны с работами Б.Б. Голицына, открывшего сейсмостанцию в г. Екатеринбурге в 1906 году. Теме сейсмичности и сейсмического районирования посвящены работы З.Г. Вейс-Ксенофоновой, А.Я. Левицкой, И.В. Ананьина, А.А. Никонова и других авторов.

С 1992 года научными сотрудниками лаборатории природной и техногенной сейсмичности ГИ УрО РАН проводится изучение сейсмичности Западного Приуралья [5, 6, 7]. Результаты работ были использованы при построении комплекта карт ОСР-97.

В настоящее время “ГИ УрО РАН”, Институтом геологии Коми НЦ УрО РАН, геофизической службой РАН и другими организациями проводятся инструментальные исследования региональной сейсмичности [4, 11, 12]. К 2018 г. в Пермском крае ГИ УрО РАН и Геофизическая служба РАН при поддержке администрации Пермского края развернули современную сейсмологическую сеть, включающую федеральную и шесть региональных сейсмических станций. В настоящее время непрерывные сейсмологические наблюдения на территории региона проводятся с помощью более чем 70 сеймопавильонов, одиночных сейсмостанций и сейсмических групп.

Увеличение количества станций привело к улучшению регистрационных возможностей региональной сети сейсмического мониторинга. Впервые на всей территории Пермского края возможна регистрация без пропусков сейсмических событий магнитудой более 2.5, а на территории Западно-Уральского региона – начиная с 3.0 [13]. Внутри сейсмической сети регистрируются события с магнитудой от 1.0 (рис. 1). Ежегодно регистрируются и обрабатываются примерно 5-6 тысяч сейсмических событий разной природы, 20-25 из которых являются региональными землетрясениями [9, 16, 17].

Изначально сейсмическая сеть формировалась исходя из принципа равномерности с учетом расположения крупных градопромышленных агломераций и горнодобывающих предприятий региона. Исследование сейсмического потенциала и построение зон ВОЗ позволяет выбрать наиболее перспективные направления для дальнейшего развития сети наблюдений.

Выделение зон ВОЗ напрямую связано с исследованием сейсмичности и

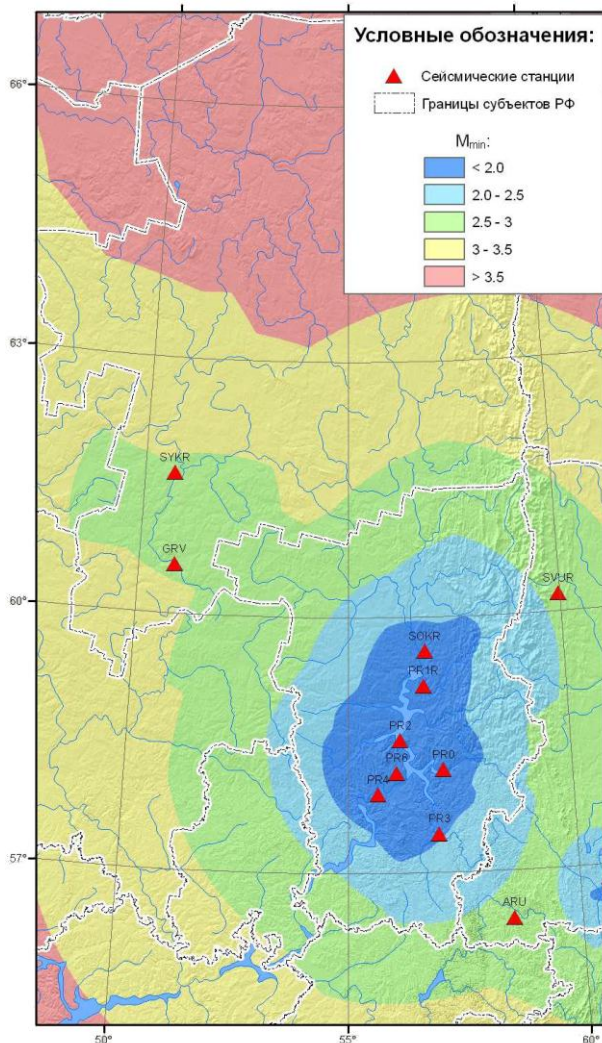


Рис. 1. Предельные регистрационные возможности сейсмической сети

использованием каталога землетрясений, который должен включать не только исторические данные, но и результаты современных наблюдений.

Сейсмический каталог включает 90 землетрясений. В него вошли землетрясения, описанные в исторических документах, опубликованные различными исследователями и зарегистрированные сейсмической группой PERM. Из каталога исключены слабые сейсмические события, связанные с разработкой шахтных полей рудников на Верхнекамском месторождении калийных солей, горные и горно-тектонические удары на шахтах Кизеловского угольного бассейна, глубина которых составляла менее 3 км, предположительно обвальные и импактные землетрясения, а также

все сейсмические события с магнитудой ниже представительного порога регистрации ($M_l < 1.0$). Описан ряд макросейсмических наблюдений региональных сейсмических событий.

В третьей главе исследован адмиттанс, как соотношение гравитационного поля в редукции Буге и аномального магнитного поля и описаны используемые программы.

Впервые для оценки сейсмического потенциала исследуемого региона использовался адмиттанс. Способ адмиттанса позволяет оценить взаимосвязи между различными физическими полями, создаваемыми геологическими телами разных масштабов [14]. Такие исследования проводятся М.С. Чадаевым, В.А. Гершанок и др. с 1999 года.

Связь гравитационного и магнитного поля 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.

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. Модель аномального магнитного поля над расположенным во вмещающей породе вертикально намагниченным телом представлена на рис. 2.

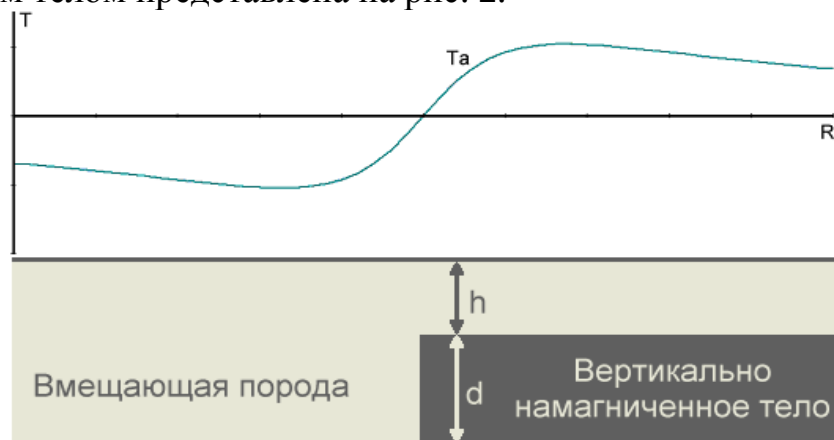


Рис. 2. Модель аномального магнитного поля над вертикально намагниченным телом

Использование адмиттанса аномального гравитационного поля и аномального магнитного поля является информативным фактором, позволяя связать гравитационные и магнитные аномалии. Анализ полученной карты показал наличие связи расположения эпицентров региональных землетрясений и значений адмиттанса [3, 4]. Более наглядна карта модуля горизонтального градиента адмиттанса (рис. 3), вычисляемого по формуле

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

где для приведенного ниже участка сеточного слоя

	i_4	
i_1	I	i_2
	i_3	

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

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, x – значение поля. Если в каком-нибудь из узлов сетки слоя i_1, i_2, i_3, i_4 поле не

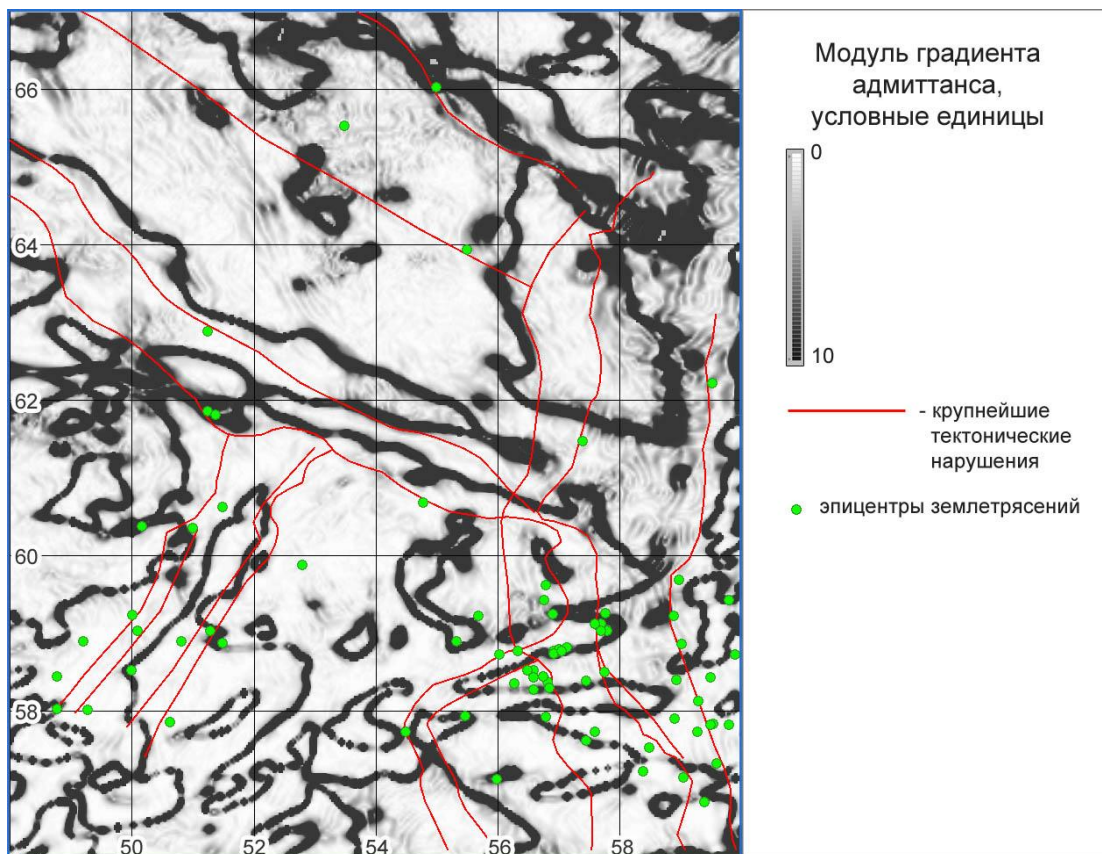


Рис. 3. Карта модуля градиента адмиттанса

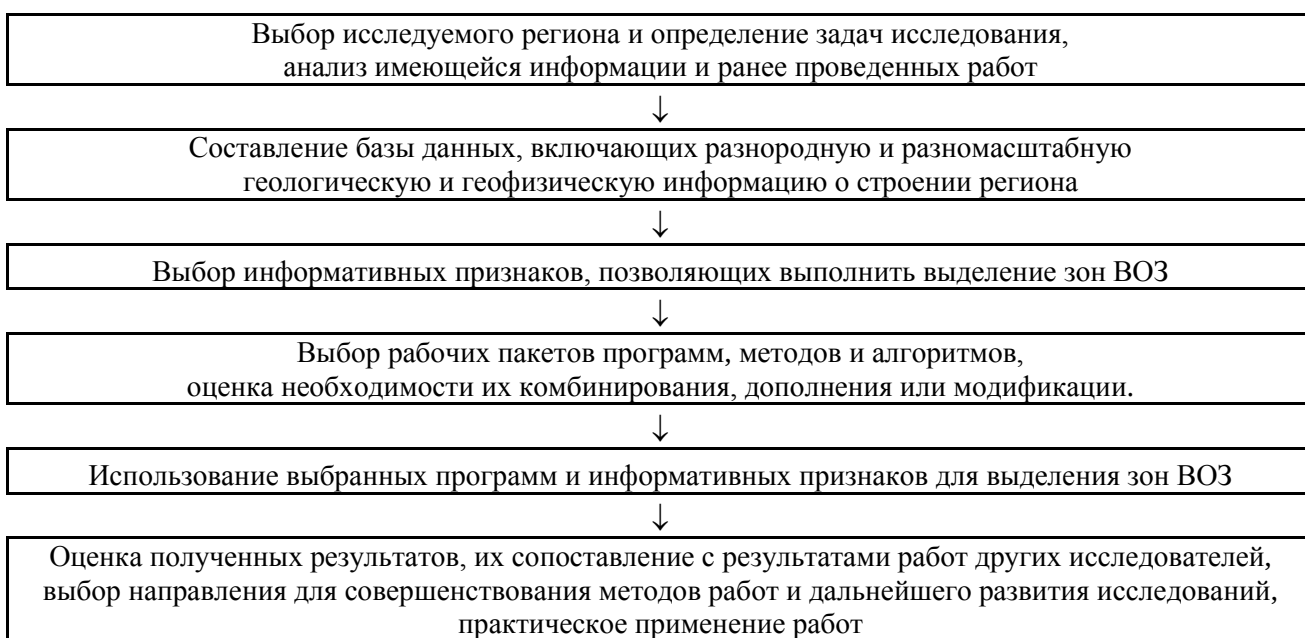
задано, то вместо данного значения берется $x(I)$ и соответственно в два раза уменьшается знаменатель (база оценки производной).

Из 90 эпицентров землетрясений 66 находятся внутри десятикилометровой зоны от линий максимальных значений модуля горизонтального градиента адмиттанса.

Такое соотношение показывает возможность использования адмиттанса в качестве одного из основных параметров для выделения зон возможных эпицентров землетрясений. Таким образом, второе защищаемое положение доказано.

Четвертая глава посвящена вопросам выделения зон возможных очагов землетрясений.

Подход к выделению зон ВОЗ можно формализовать следующим образом:



Для выделения зон ВОЗ использовалась сетевая аналитическая геоинформационная система «Геопроцессор 2.0» разработанная в Институте проблем передачи информации РАН, автор В.Г. Гитис. Она предназначена для интерактивного представления и анализа различной векторно-растровой информации. Для исследований также использовались пакеты программ ESRI ArcGIS 9.3 и MapInfo 12.

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 сейсмотектоническом 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 параметр, 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.

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. Выделение зон ВОЗ в областях со слабой сейсмичностью и относительно небольшим каталогом осложняется недостаточным количеством сейсмических событий нужной интенсивности.

После выбора ячеек по определенному алгоритму производится 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.

Необходимо учитывать ширину зон влияния тектонических нарушений, которые 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). Исследования ОДВР проводили С.И. Шерман, Б.В. Костров, В.И. Мякин, М.А. Садовский, М.В. Родкин, С.Н. Scholz, M.D. Finna др. По оценкам С.И. Шермана на территориях с низкой тектонической активностью, при мощности земной коры 40-45 км для различных типов разломов были получены значения ширины ОДВР от 38 до 54 км. На основании исследований региональных тектонических нарушений, шага гравиметрической и магнитной съемки и масштаба тектонической карты для крупнейших тектонических нарушений в исследуемом регионе ширина зон ОДВР выбрана равной 44 км, чему соответствовал используемый в программе параметр близости к крупным тектоническим нарушениям, составлявший 22 км.

Зоны ВОЗ выделялись с использованием различных геофизических полей и их комбинаций. Под термином «геофизические поля» подразумеваются физические поля, создаваемые геологическими объектами. 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

$$\frac{\partial S(x)}{\partial x_i} \geq 0, i = 1, \dots, I. \quad (3)$$

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.

Выделение зон возможных очагов землетрясений проводилось с помощью двух выборок, в которых учитывались особенности регионального строения земной коры в северной и южной частях региона. В качестве основных параметров зон ВОЗ были использованы зоны влияния тектонических нарушений, выделяемых по геолого-геофизическим данным, и линии максимальных значений адмиттанса.

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

$$\Phi^{(m)}(x) = \min_{\langle i \rangle} \{ \varphi_i^{(m)}(x_i) \}, \quad (4)$$

где

$$\Phi^{(m)}(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq (x_i^{(m)} - \Delta x_i), \\ \frac{0,75(x_i - (x_i^{(m)} - \Delta x_i))}{\Delta x_i}, & (x_i^{(m)} - \Delta x_i) < x_i \leq x_i^{(m)}, \\ 0,75 + \frac{0,25(x_i - x_i^{(m)})}{\Delta x_i}, & x_i^{(m)} < x_i \leq (x_i^{(m)} + \Delta x_i), \\ 1, & (x_i^{(m)} + \Delta x_i) < x_i. \end{cases} \quad (5)$$

где параметр Δx_i определяет точность аппроксимации.

Первая выборка была взята на севере региона, в районе Восточно-Тиманского разлома (рис. 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). 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.

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.

Результирующая карта строится с помощью сложения двух карт, построенных по двум выборкам.

Таким образом, были учтены наиболее значимые 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 (рис. 4). Занимаемая ими площадь составляет 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).

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. 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 года, $M = 5,0$. Зона является наиболее перспективной для развития сейсмической сети, установки временных и постоянно действующих сейсмопавильонов (рис. 5).

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.

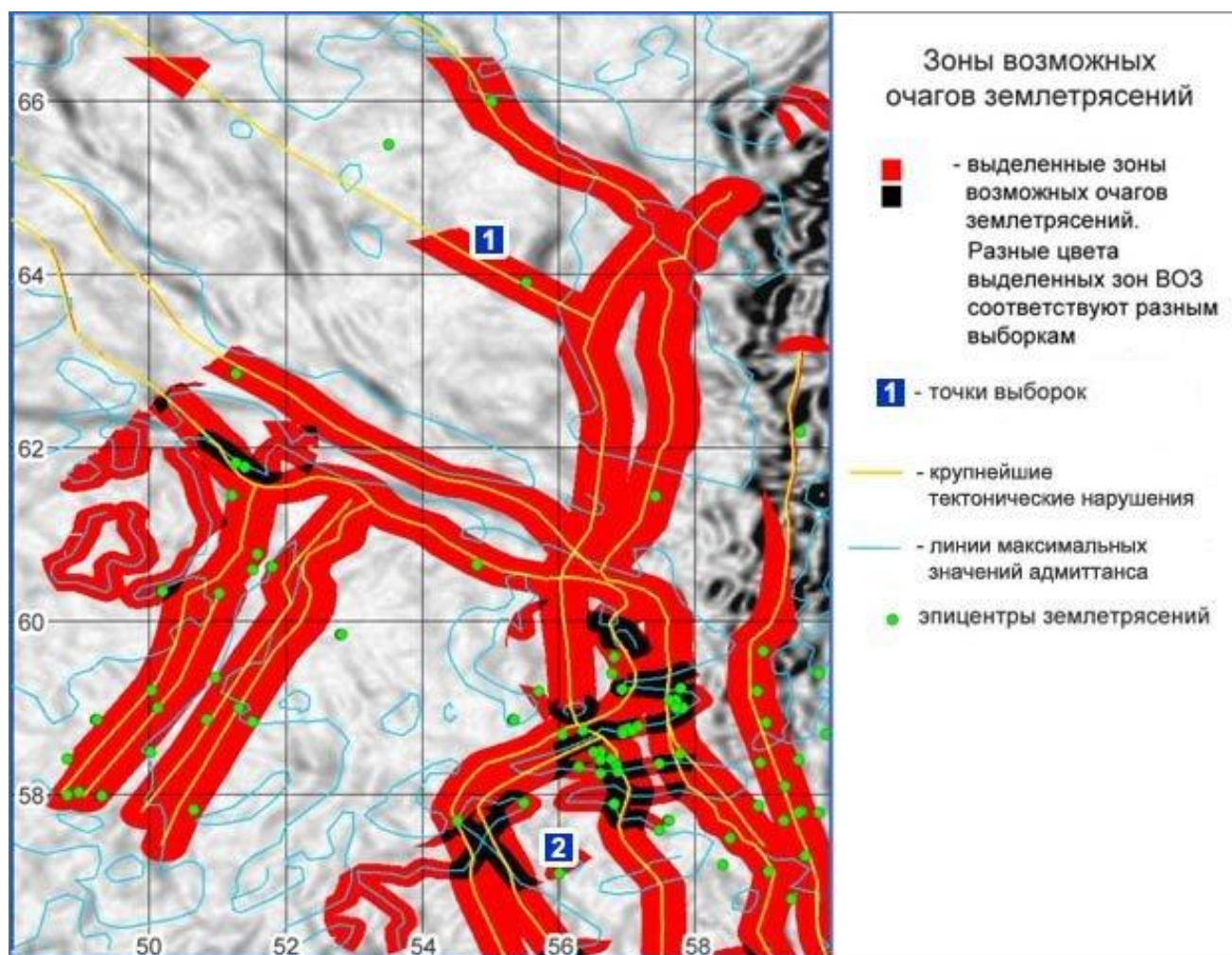


Рис. 4. Зоны возможных очагов землетрясений исследуемого региона

Площадь зоны составляет 151,9 тыс. км². Для выделения этой зоны также использовались линии максимальных значений градиента 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 (рис. 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 коры, уменьшением глубины залегания поверхности Мохоровичича и уменьшением мощности нижнего слоя земной коры.

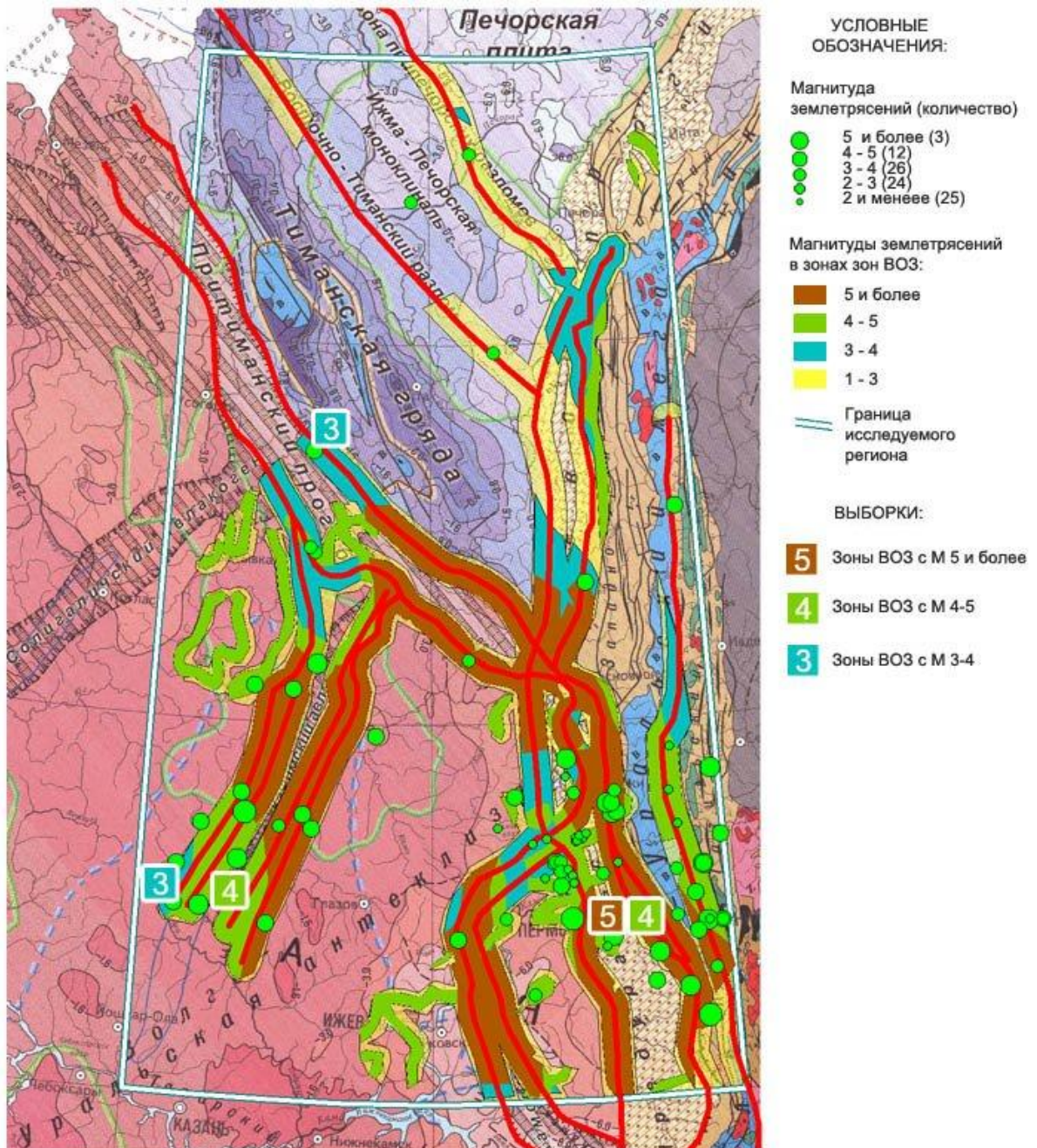


Рис. 5. Расположение зон возможных очагов землетрясений. Зоны ВОЗ Западного Приуралья наложены на тектоническую карту России, сопредельных территорий и акваторий под ред. Е.Е. Милановского, 2007 г.

Проведено сопоставление карты зон возможных очагов землетрясений с тектонической картой под ред. Е.Е. Милановского (рис. 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 плиты [14, 17].

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

Таким образом, впервые в исследуемом регионе на основании нового подхода к анализу разнородной геофизической и геологической информации выделены зоны возможных очагов землетрясений. Третье защищаемое положение доказано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты работ, можно сделать следующие выводы:

Данная работа посвящена интегрированному 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 строении и развитии земной коры региона.

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

Сформирована и проанализирована база данных, позволяющая дать оценку связи различных геофизических полей и их комбинаций с сейсмичностью, выявлены наиболее значимые факторы, связанные с возникновением землетрясений. Впервые для выделения зон ВОЗ использован градиент адмиттанса гравитационного и магнитного 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

возможных очагов землетрясений имеют более дифференцированный характер и уточняют имеющиеся представления о региональной сейсмичности.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения нового подхода, 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, 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 позволяет применить ранее не востребованные геолого-геофизические данные, оценить их значимость и возможность их совместной интерпретации.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. 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.
2. **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.
3. **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.

Монография:

4. Блинова Т.С. 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.

Прочие издания:

5. 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.
6. 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.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **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.
12. **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.
13. **Баранов Ю.В.** Развитие системы сейсмологических наблюдений в Западно-Уральском регионе / Ю.В. Баранов // Горное эхо. – 2012. – № 3 (49). – С. 19-22.
14. **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.
15. **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.

16. **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.

17. **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.