

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Бямбасурэн Зундуйжамц

Оценка техногенной сейсмичности в горнопромышленных районах Монголии для обеспечения геоэкологической безопасности

Специальность 1.6.21 «Геоэкология»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – докт.техн.наук Батугин А.С.

Москва, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ.....	10
1.1 Влияние индуцированных геодинамических процессов на окружающую среду и безопасность освоения недр	10
1.1.1 Геодинамическая опасность как часть экологической опасности	10
1.1.2 Техногенная сейсмичность в соседних с Монголией странах	15
1.2 Характеристики тектонического строения и геодинамического состояния территории Монголии	23
1.2.1 Геодинамическая позиция Монголо-Охотского орогенного пояса	23
1.2.2 Аналитический обзор результатов сейсмологических исследований на территории Монголии.....	29
1.2.3 Сейсмическое районирование территории	34
1.2.4 Аналитический обзор результатов геомеханических исследований в пределах МООП и влияния на окружающую среду наведенных геодинамических процессов.....	37
1.3 Основные задачи исследования:	43
Глава 2. Исследование природы сейсмических явлений в районах освоения недр Монголии.....	44
2.1 Анализ применимости известных подходов по установлению природы сейсмических явлений для условий Монголии	44
2.2 Проявление сейсмичности в районах освоения недр на территории Монголии	57
2.2.1 Угольное месторождение Таван-Толгой.....	58
2.2.2 Нефтяное месторождение Матад	62
2.3 Доказательства возникновения техногенной сейсмичности на территории Монголии	66
2.3.1 Оценка природы (техногенная / естественная) сейсмичности района Таван-Толгой	66

2.3.2 Оценка природы (техногенная/ естественная) сейсмичности района Матад.....	73
Вывод по главе 2	81
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ и максимально ожидаемой МАГНИТУДЫ ТЕХНОГЕННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ	82
3.1 Анализ подходов к оценке максимально возможной магнитуды тектонического землетрясения	82
3.2 Анализ подходов к оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения и их применимости для условий Монголии .	85
3.2.1 Статистические методы оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения.....	85
3.2.2 Анализ применимости имеющихся физических моделей и подходов к оценке M_{max} для объектов на территории Монголии	87
3.3 Концепция предельно напряженного состояния земной коры и возможная природа техногенного землетрясения с большой магнитудой и глубоким гипоцентром	91
3.4 Подход к оценке максимально возможной магнитуды техногенных землетрясений для территории Монголии	92
3.5 Закономерность увеличения глубин гипоцентров локальной сейсмичности в районах освоения недр и подход к оценке максимально ожидаемой магнитуды землетрясения.....	95
3.6 Вклад процесса реактивации тектонических нарушений при техногенной сейсмической активизации в загрязнение атмосферы горнопромышленных районов.....	98
3.6.1 Проблема загрязнения атмосферы газами земных недр	98
3.6.2 Реактивация нарушений в горнопромышленных районах.....	99
3.6.3 Обоснование параметров компьютерной модели	101
3.6.4 Компьютерное моделирование	105
3.6.5 Оценка результатов моделирования и область практического использования результатов.....	112
Выводы по главе 3.	115
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В УСЛОВИЯХ МОНГОЛИИ.....	117

4.1 Подход к оценке потенциального влияния техногенной сейсмичности на окружающую среду горнопромышленных регионов Монголии.	118
Выводы по главе 4.	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	127
Приложение 1	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

В настоящее время Монголия испытывает бум развития горно-промышленной и строительной отраслей. Разведаны и разрабатываются крупные месторождения полезных ископаемых, стремительно растет добыча угля на месторождении Таван-Толгой, добыча нефти на месторождении Матад. На территории Монголии регулярно происходят сильные землетрясения, однако геодинамическая и экологическая опасность крупномасштабного воздействия на недра на территории страны не оценена. В то же время в горнодобывающих странах геодинамическая опасность признается одним из видов экологической опасности при освоении недр в связи с развитием сейсмичности и ее влиянием на окружающую среду и социум. Имеются разработки в области установления генезиса сейсмичности (техногенная/естественная) и подходы к ее оценке и регулированию на основе трехуровневых шкал опасности (TL протоколов), но их применимость для условий Монголии не изучена. Для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития Монголии важно учесть имеющийся опыт других стран и не допускать возникновения критических ситуаций с развитием техногенной сейсмичности. В связи с этим актуальной научно-практической задачей является исследование природы сейсмичности (техногенная/естественная) районов освоения недр Монголии и разработка подхода к оценке ее потенциального воздействия на окружающую среду.

Цель работы – исследовать проявления сейсмичности в районах освоения недр на территории Монголии для определения ее генезиса и обоснования подхода к оценке ее влияния на окружающую среду.

Идея работы состоит в адаптации методов установления генезиса сейсмичности применительно к горно-промышленным районам и разработки

подхода к оценке влияния сейсмичности на окружающую среду на основе концепции предельно напряженного состояния верхней части земной коры.

Задачи исследования.

1. Выполнить аналитический обзор по вопросам влияния индуцированных геодинамических процессов на окружающую среду и безопасность освоения недр.

2. Исследовать природу сейсмических явлений (техногенная/естественная) в районах освоения недр на территории Монголии.

3. Обосновать подход к оценке максимально возможной и максимально ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения для территории Монголии.

4. Оценить вклад процесса реактивации тектонических нарушений в загрязнение атмосферы горнопромышленных районов.

5. Обосновать подход и рекомендации к оценке влияния техногенной сейсмичности на окружающую среду в условиях Монголии.

Методы исследований.

В работе использованы методы оценки природы (техногенная/естественная) сейсмических активизаций в районах освоения недр, метод оценки максимально возможной и максимально ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения, метод оценки и регулирования воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду на основе концепции предельно напряженного состояния верхней части земной коры с использованием трехуровневой цветовой шкалы (зеленый-желтый-красный), метод геодинамического районирования, компьютерное моделирование процесса миграции шахтных газов к поверхности при сейсмической реактивации тектонических нарушений, методы анализа и обобщения данных, теоретические разработки в области геодинамики и геомеханики.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Возникновение сейсмических явлений в районах месторождений Таван-Толгой и Мадад связано с процессом их разработки и является новым для Монголии видом геодинамической опасности (техногенная сейсмичность), оказывающим влияние на окружающую среду.

2. Глубина гипоцентров техногенных сейсмических явлений в районах освоения недр характеризует размер очага максимально ожидаемого техногенного землетрясения, его магнитуду и потенциальное воздействие на

окружающую среду, включая загрязнение атмосферы шахтными газами при реактивации тектонических нарушений.

3. Увеличение глубин гипоцентров техногенных сейсмических явлений в процессе разработки месторождения является признаком усиления геодинамической опасности района его расположения, используемым для оценки потенциального воздействия сейсмичности на окружающую среду.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

1. Впервые доказано существование техногенной сейсмичности на территории Монголии на примерах районов угольного разреза Таван-Толгой и месторождения нефти Матад.

2. Обоснован подход к оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения по потенциальному размеру его очага, измеряемому от земной поверхности до глубин расположения гипоцентров сейсмических событий на участке освоения недр.

3. На основании результатов компьютерного моделирования установлена закономерность миграции шахтных газов к земной поверхности за счет поршневого эффекта, возникающего при реактивации нарушения с неровным сместителем, заключающаяся в том, что процесс миграции газа развивается в 2 основные фазы: активизируется при скачкообразном повышении давления газа в пустотном пространстве (1-я фаза) и продолжает развиваться уже после прекращения импульса и снижении давления до первоначального (2-я фаза).

4. Обоснован подход к оценке потенциального воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду для условий Монголии, согласно которому она осуществляется по глубине расположения гипоцентров сейсмической активизации в районах освоения недр.

Теоретическая значимость заключается в создании научного задела для исследования взаимодействия глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов, возникающих при освоении недр Монголии и оценки влияния этого взаимодействия на геоз экологическую ситуацию.

Практическая значимость заключается в установлении факта возникновения техногенной сейсмичности на территории Монголии, что необходимо учитывать при выдаче разрешений на недропользование; обосновании пути оценки и регулирования возможного воздействия индуцированных геодинамических явлений на окружающую среду,

обосновании выбора для мониторинга опасных участков по миграции газов из недр на земную поверхность. Рекомендовано разрабатывать регламент ведения горных работ для месторождений Монголии, на которых глубины техногенных сейсмических явлений превышают глубину ведения горных работ для профилактики геодинамической безопасности.

Обоснованность и достоверность исследования подтверждается результатами анализа геодинамического состояния недр Монголии, представительной выборкой данных по проявлению сейсмичности на месторождениях Таван-Толгой и Матад (5400 и 3500 сейсмических событий за период 2015-2024 годы соответственно), использованием принятых в международной практике методов установления природы (техногенная/естественная) сейсмичности, использованием при экологических оценках применяемых в сейсмологии эмпирических зависимостей, опорой на развиваемые в международной практике научные концепции в области взаимодействия глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора. Лично автором была выполнена систематизация и интерпретация имеющихся данных по геодинамике Монголии, систематизированы данные по проявлению сейсмичности в районах месторождений Матад и Таван-Толгой, проведен анализ природы (техногенная/естественная) этих сейсмических явлений, оценена мощность слоя предельно напряженного состояния массива в горнопромышленных районах, оценена максимально возможная магнитуда техногенного землетрясения для условий Монголии, обоснован подход к оценке и регулированию воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду, подготовлены данные для компьютерного моделирования поршневого эффекта выдавливания шахтных газов на земную поверхность во время сейсмических активизаций и проинтерпретированы результаты моделирования, составлен текст диссертации. Автор участвовал в определении цели работы и постановке задач, написании статей и патентов, а также в апробации защищаемых научных положений.

Апробация работы.

Основные результаты работы доложены на научных семинарах кафедры БЭГП НИТУ МИСИС, конференциях: Международный круглый стол

монголо-российских специалистов нефтегазовой отрасли, 22.11.2022 года «Об оценке геодинамической опасности освоения недр и земной поверхности территории Монголии»; XXX Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика», май 2023 года; «Совещание с технической дирекцией Улан-баторской железной дороги», 13 декабря 2022 года, Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2025», Международная конференция «Геодинамика сильно сжатых массивов», 2025, г. Владивосток.

Помимо этого, было принято участие в качестве исполнителя НИР по международному проекту «Геодинамическое районирование приграничной (Россия-Монголия) территорий в пределах Монголо-Охотского орогенного пояса» в 2022 году.

Публикации.

Основное содержание работы отражено в 6 научных статьях, 3 из которых в журналах, входящих в список, рекомендованный ВАК и включенных в наукометрическую базу Scopus, в тексте патента РФ, а также в опубликованном пре-принте.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка используемой литературы и приложения. Работа изложена на 143 страницах и содержит 57 рисунков, 12 таблиц, библиографический список и приложение.

Благодарности.

Автор выражает особую благодарность научному руководителю д.т.н. Батугину А.С. за помощь, оказанную при работе над диссертацией, Президенту Монгольской Академии Наук С. Дэмбэрэлу и заведующему отделом сейсмологии института Астрономии и Геофизики АН Монголии У. Ульзийбату за поддержку и ценные консультации. Кроме того, автор благодарит коллектив кафедры безопасности и экологии горного производства Горного института НИТУ МИСИС во главе с заведующим кафедрой д.т.н. Коликовым К.С. за помощь в организационных вопросах.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ

1.1 Влияние индуцированных геодинамических процессов на окружающую среду и безопасность освоения недр

1.1.1 Геодинамическая опасность как часть экологической опасности

В. Маршал в своей книге «Основные опасности химических производств» дал определение опасности, согласно которому под опасностью понимают такое состояние техносферы и окружающей среды, при котором возможно развитие неблагоприятных явлений, способных поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую человека среду. В соответствии с этим, под геодинамической опасностью понимают такое состояние техносферы и окружающей среды, при котором возможно возникновение неблагоприятных геодинамических явлений, способных поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую человека среду [1] (Временные, 1997). К неблагоприятным геодинамическим событиям, способным влиять на окружающую среду, относят техногенные землетрясения с их последствиями, реактивацию тектонических нарушений в зонах техногенного влияния на земную кору, аварии на инженерных объектах, расположенных в геодинамически активных зонах и другое. Все эти явления вносят свой негативный вклад в изменение окружающей среды.

Приведем только некоторые примеры. При горно-тектоническом ударе на Кировском руднике под землю ушел ручей Аллулайв [2] (Прогноз, 1997). Сильнейший горно-тектонический удар на Южно-Уральском руднике (1990) связывают с прорывом реки Ай в горные выработки [3] (Kozyrev и др., 2022). Земная поверхность проседала при горных ударах и техногенных землетрясениях на угольных, рудных и нефтяных месторождениях [4] (Батугин, Алферова, 2011). Техногенная сейсмичность в районах старых горных разработок, где процессы сдвижения были завершены много лет назад, вызвала повторные оседания поверхности и возможно, реактивацию нарушений [5] (Li et al., 2007). При реактивации нарушений при сейсмических событиях возможен выход шахтных газов на земную поверхность [6] (Batugin и др., 2023). Размещение углепородных отвалов в геодинамических зонах повышает риск их самовозгорания [7] (Batugin, Musina, Golovko, 2018). Можно

видеть, что геодинамические процессы оказывают влияние на все компоненты окружающей среды, таблица 1.1.

Таблица 1.1 – Примеры воздействия геодинамических процессов на окружающую среду горнопромышленных районов

Компонент окружающей среды	Примеры	Источник
Земная поверхность и горный массив	Тремор при техногенной сейсмичности, образование трещин, повторное проявление процессов сдвижения	[8] (Козырев, 1997) [9] (Рассказов, 2016) [5] (Li et al., 2007)
Атмосфера	Выход шахтных газов в атмосферу при реактивации нарушений и техногенной сейсмичности, повышение риска возгорания углепородных отвалов при расположении их в геодинамических зонах, выход газов из недр по геодинамическим зонам при изменении напряженного состояния процессами освоения недр	[6] (Batugin et al., 2022); [7] (Batugin et al., 2018);
Гидросфера	«Уход» поверхностных водотоков в горные выработки по образующимся трещинам при активизации геодинамических процессов и последующий сброс загрязненных шахтных вод в водоемы	[8] (Козырев и др., 1997) [3] (Batugin), [10] (Цяо, 2016)
Комплексное воздействие	Техногенная сейсмичность при затоплении шахт, прорыве поверхностных вод в горные выработки, дополнительный выброс газов в атмосферу при сейсмических событиях	[11] (Батугин, Климанова) [12] (Goldbach) [2] (Kozirev et al., 2022) [6] (Batugin et al., 2023)

Кроме прямого экологического ущерба окружающей среде при техногенных землетрясениях возможен косвенный ущерб, связанный с авариями вследствие сейсмичности на опасных промышленных объектах. В

качестве примера можно привести ту озабоченность, которая возникла у руководства Кемеровской области после Бачатского землетрясения (2013) в районе одноименного разреза. В районе областного центра Кемерово, являющегося крупным промышленным центром с развитой химической промышленностью, эксплуатировалось в то время несколько крупных угольных разрезов. Вероятность того, что подобное землетрясение произойдет в районе г. Кемерово и его экологические последствия оценить было трудно. Также большую озабоченность у общественности вызвало землетрясение, произошедшее во Франции в районе Ла-Тэйл (2019), вблизи карьера строительных материалов. На рисунке 1.1, взятого из работы [13] (Godano et al., 2025) показаны три атомные станции и несколько плотин. Авторы указывают, что расположение этих опасных объектов вблизи эпицентра землетрясения и разлома, образовавшегося на земной поверхности длиной до 5 км вызвало высокую озабоченность возможностью экологического ущерба при аварии на любом из этих объектов вследствие сейсмичности.

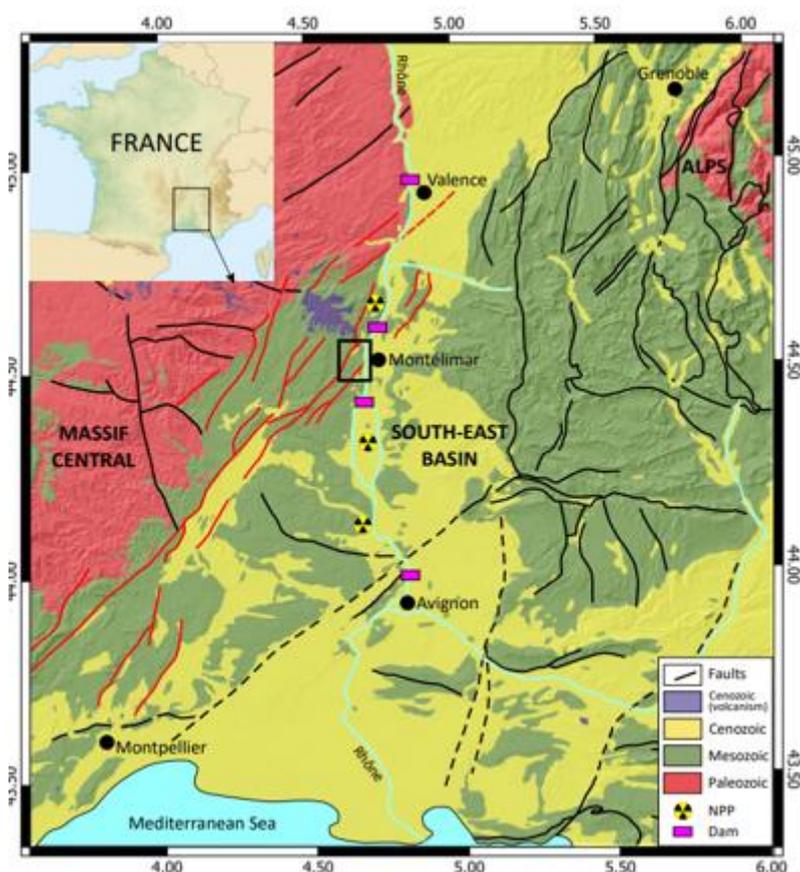


Рисунок 1.1 – Опасные промышленные объекты вблизи эпицентральной зоны землетрясения Mw 4.9 в Ла-Тэйл, Франция, 2019 г. (рисунок из работы [13] Godano et al., 2025)

Проблемы воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду актуальны и в других странах мира. Специалисты Ассоциации профессиональных инженеров, геологов и геофизиков Альберты выделили для разработки несколько первостепенных экологических аспектов, связанных с влиянием техногенной сейсмичности на окружающую среду:

- Обоснование сбалансированных решений, учитывающих экономические и экологические интересы.
- Открытый процесс принятия решений по вопросам регулирования работы предприятий в проблемных районах.
- Изучение возможных экологических проблем.
- Как принимать окончательные решения (UDMA).
- Как осуществлять экологическое планирование для профилактики и смягчения последствий.
- Как организовать открытое сотрудничество: добывающая компания, власть и общественные, неправительственные организации (НПО).

Одним из наиболее известных случаев учета и регулирования воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду в европейской практике является ситуация с газовым месторождением Гронинген в Нидерландах. На этом крупнейшем в Европе газовом месторождении сейсмичность отмечалась с 1992 г. В 2012-2013 гг. сейсмическая активность возросла и под влиянием общественных организаций по защите окружающей среды объем добычи газа на месторождении был сокращен вдвое, с 50 до 25 млрд. куб.м. После очередного землетрясения с магнитудой 3,6 в 2016 г. объем добычи вновь сократили вдвое, до 12 млрд. куб.м. В правительстве была разработана программа ограничения добычи и в 2023 г. добыча газа на месторождении была прекращена. Основная официальная причина состояла в том, что техногенная сейсмичность воздействует на окружающую среду и жилой фонд.

В Монголии горная промышленность бурно развивается. На карте рисунка 1.2 зеленым цветом со штриховкой показаны угленосные площади севера страны. Добычу угля в ближайшее время планируется довести до 70 млн. т/год. Опыт горнодобывающих стран мира показывает, что затраты на прогнозирование и обеспечение готовности к природно-техногенным явлениям катастрофического характера во много раз меньше, чем затраты на ликвидацию последствий.

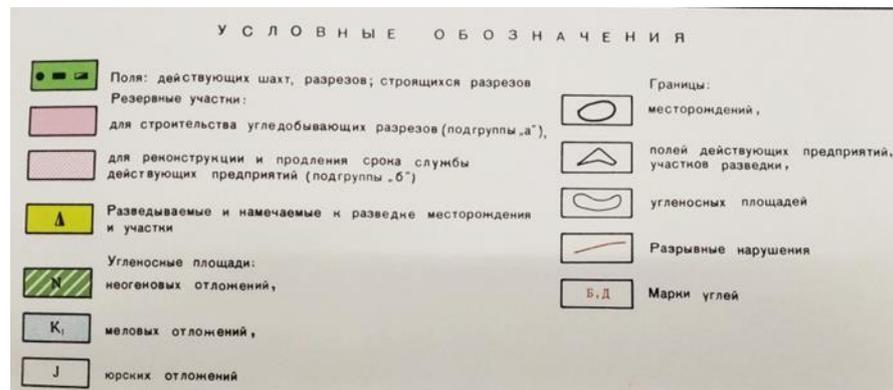
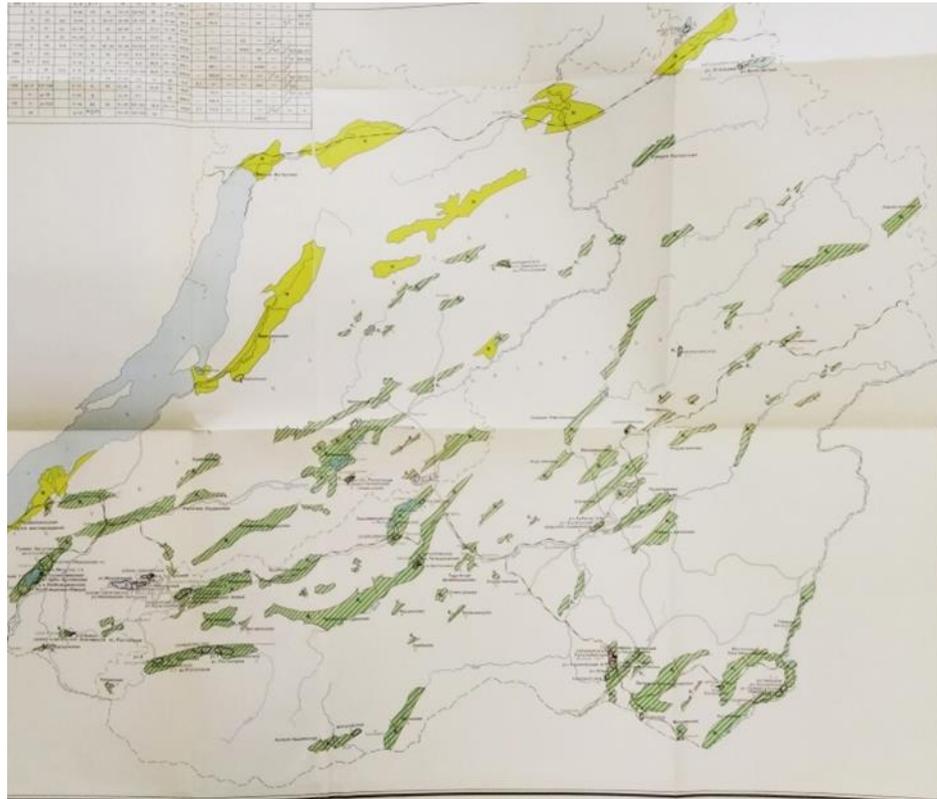


Рисунок 1.2 – Фрагмент обзорной геолого-промышленной карты Забайкалья и севера Монголии (гл. редактор Твердохлебов)

Таким образом, важной задачей является установление наличия сейсмичности и ее природы в районах разработки недр на территории Монголии.

1.1.2 Техногенная сейсмичность в соседних с Монголией странах

Широкое использование термина «техногенная сейсмичность» связывают с решением специальной комиссии ЮНЕСКО в 1970 г., которая рассматривала природу землетрясения на плотине Койна (1967) в Индии. Эта комиссия пришла к выводу, что землетрясения на этой плотине и ранее еще на нескольких других плотинах были связаны именно с созданием водохранилищ [14] (Гупта, Растоги, 1979). В то же время в работах горняков уже были описаны сильные горные удары, которые проявлялись как землетрясения и ощущались людьми за десятки километров от эпицентра и сейсмическими станциями за сотни и тысячи километров [15] (Батугин, 2008). На этом основании можно считать, что эра техногенных землетрясений началась в начале 20-го века и имеет уже более, чем 100-летнюю историю. Виды инженерной деятельности, приводящие к сейсмичности, неоднократно обсуждались в работах советских, российских и зарубежных авторов [16, 17, 18] (Никонов, 1980; Адушкин, Турунтаев, 2015; Foulger et al., 2018). Среди этих видов деятельности актуальными для Монголии являются: горное дело, добыча углеводородов, закачка жидкостей в недра.

Также в настоящем диссертационном исследовании следует коснуться темы классификации техногенной сейсмичности. Техногенные землетрясения разделяют на индуцированные и триггерную сейсмичность [19, 17] (McGarr, 2002, Адушкин и Турунтаев, 2015). К индуцированным землетрясениям относят такие, условия для которых полностью созданы в результате человеческой деятельности. Например, горные удары, происходящие в целиках по классификациям И.М. Петухова (1972) являются типичными индуцированными землетрясениями [20]. Триггерная техногенная сейсмичность проявляется с участием тектонических сил земной коры. Такие сейсмические события называют природно-техногенными [21, 22] (Адушкин, 2018, Белов и др., 2024) или техногенно-природными [23] (Яковлев и др., 2013). Отнесение землетрясения к индуцированному или триггерному может влиять на оценку ответственности предприятия, ведущего горные разработки.

Техногенная сейсмичность при отработке месторождений отмечается в соседних с Монголией странах – России, Китае, Казахстане. В России техногенная сейсмичность проявляется во многих горнопромышленных районах [22-27] (Белов и др., 2024, Яковлев и др., 2013, Еманов и др., 2009; Козырев и др., 2020; Рассказов и др., 2020; Дягилев, 2017). Отмечается, что в настоящее время в России возникло несколько горно-промышленных районов с техногенной сейсмичностью. Непрерывные горные работы, а также

увеличение объемов добычи ставят под угрозу не только безопасность горных работ, но и безопасность и целостность инженерных сооружений, а также такие компоненты экосистем, как биоразнообразие, почва, вода, воздух. Максимальная магнитуда 6,1 зарегистрирована при Бачатском техногенном землетрясении под одноименным угольным разрезом в 2013 году [28] (Еманов и др., 2020). Кроме этого, известны землетрясения с магнитудой более 4 в районе других угольных разрезов Кузбасса.

В Китае также имеется несколько горно-промышленных районов с техногенной сейсмичностью [29, 30] (Li, et al., 2007; Ren, et al., 2023). На рисунке 1.3 показана карта проявления опасных динамических явлений при ведении горных работ на территории Китая из работы [29] (Li et al., 2007).

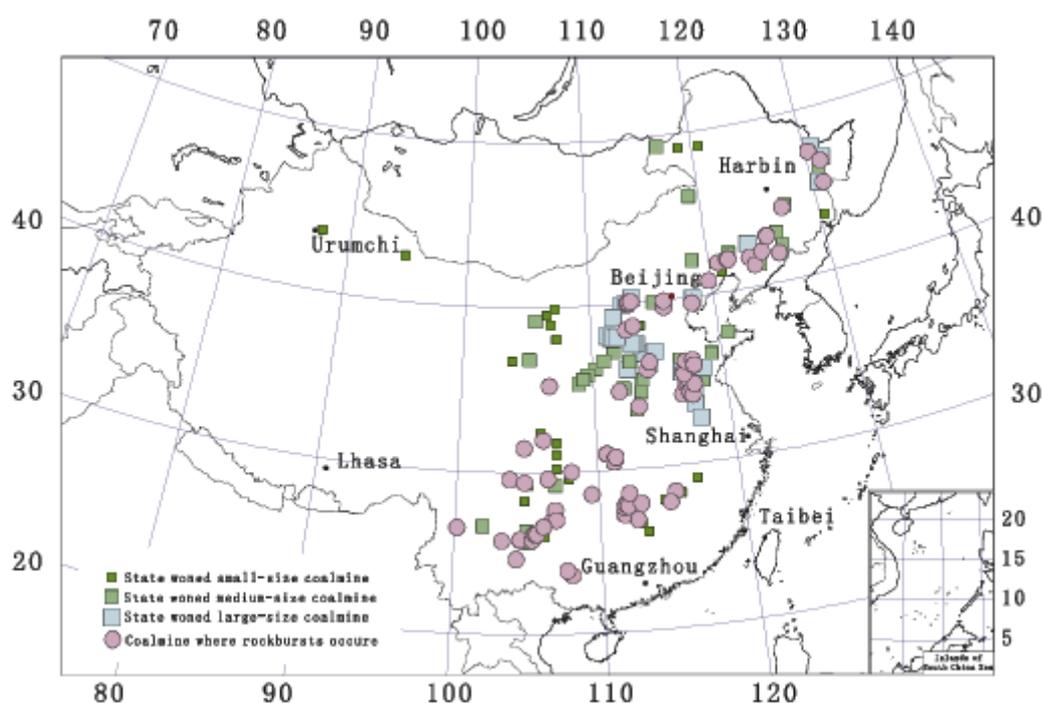
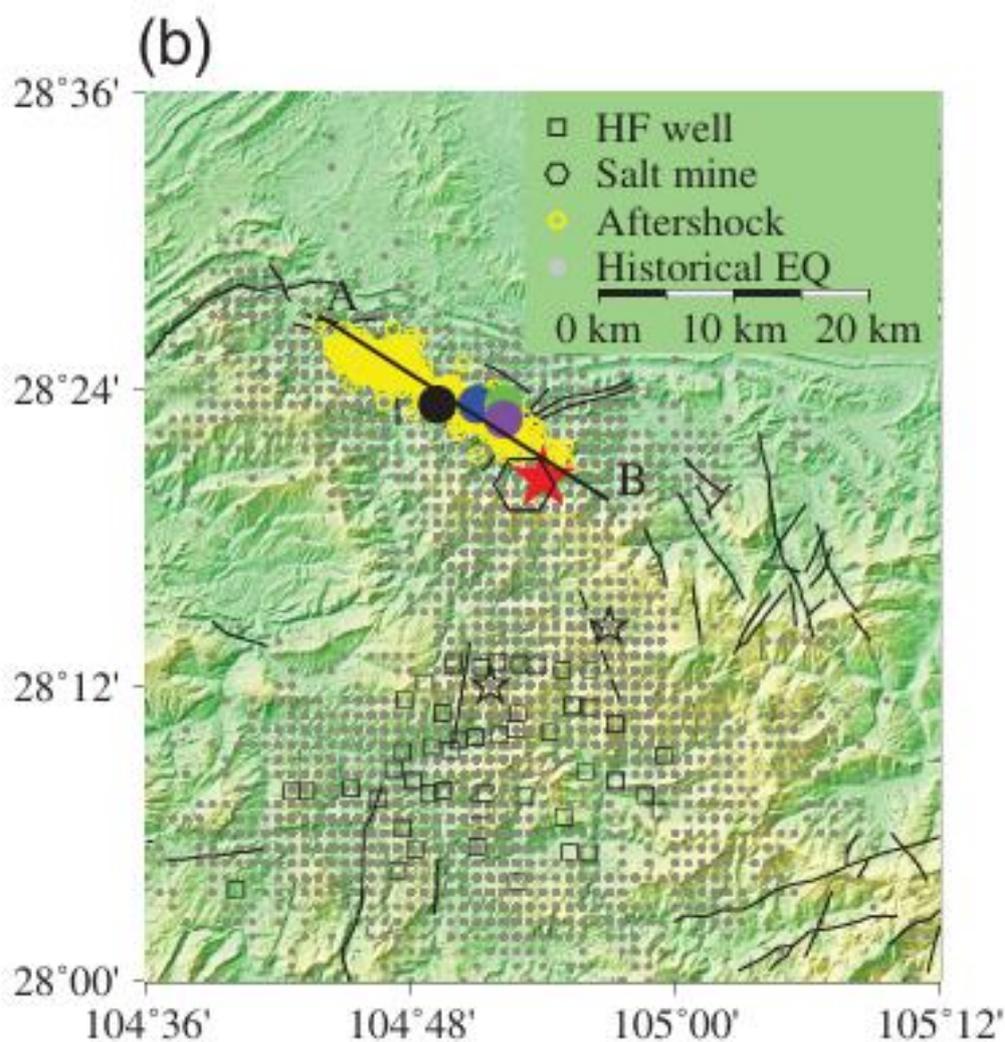


Рисунок 1.3 – Карта месторождений Китая с техногенной сейсмичностью (знаками показаны различные виды полезного ископаемого) [29] (Li et al., 2007).

К наиболее сильным техногенным землетрясениям относят землетрясение в Чанине, произошедшее 17 июня 2019 г. с гипоцентром на глубине 4 км и имевшего магнитуду M_L 6,0 (M_W 5,8) [31] (Li W. et al., 2020).

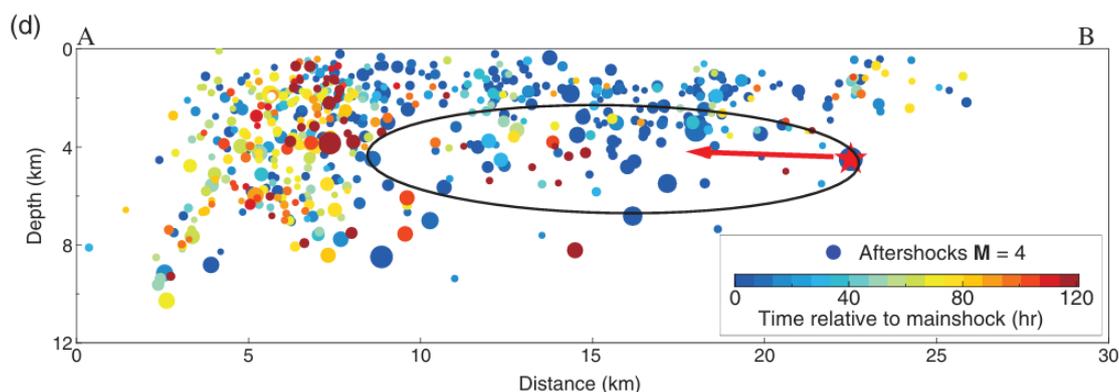
На рисунке 1.4 изображена схема расположения соляного промысла, главного толчка и зоны афтершоков.



Красная звезда – эпицентр; многоугольник – разрабатываемое месторождение соли; желтый сектор – зона развития афтершоков; цветные круги – альтернативные определения положения эпицентра

Рисунок 1.4 – Схема эпицентральной зоны землетрясения в Чанине 17.06.2019 г.[31] (Li W. et al., 2020)

В этой же работ приводится схема развития афтершокового процесса во времени, рисунок 1.5. Как видно из рисунка 1.5, после основного толчка начался процесс распространения афтершоков на глубину и в сторону по азимуту примерно 300 градусов. Из рисунка 1.5 можно приблизительно оценить скорость миграции сейсмического процесса: 0,15 - 0,2 км/час по латерали и 0,03 км/час в глубину.



Гипоцентр главного толчка изображен звездой. Цветовая гамма гипоцентров афтершоков соответствует временной шкале рисунка, часы. Вертикальная ось – глубина, км; горизонтальная – расстояние, км

Рисунок 1.5 – Схема миграции гипоцентров афтершоков Чанинского землетрясения из работы [31] (Li W. et al., 2020)

Возможно, одними из первых, кто обратил внимание этот феномен возникновения сейсмических явлений на глубинах, превышающих глубину ведения горных работ или другого вида деятельности в недрах и объяснил его с точки зрения развития предельно напряженного состояния земной коры на глубину были И.М. Петухов и И.М. Батугина [32] (Петухов и Батугина, 1999). Другие убедительные примеры возникновения сейсмичности на глубинах, превышающих глубину ведения горных работ, можно найти в работах А.Ф. Еманова с соавторами [27].

На рисунке 1.6 показано распределение сейсмических явлений в районе ведения горных работ на шахтах Октябрьская и Полысаевская в Кузбассе. Видно, что при глубине ведения горных работ около 500 м часть гипоцентров располагается на глубинах 1, 2 и даже 3 км. На рисунке 1.7 представлено распределение по глубинами гипоцентров сейсмических явлений в районе г. Осинники в Кузбассе. Также, при глубинах ведения горных работ около 500-600 м часть гипоцентров располагается на глубинах до 2-3 км.

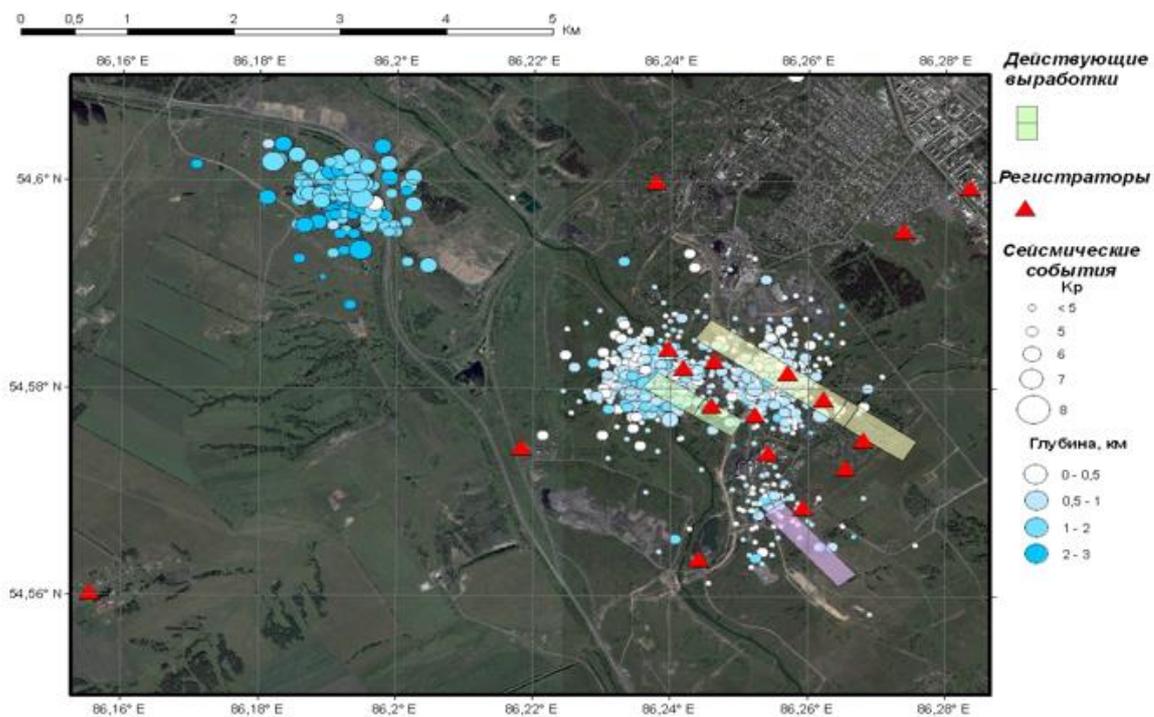


Рисунок 1.6 – Глубины гипоцентров сейсмических явлений (выделено цветом) в районе шахт Октябрьская (желтый прямоугольник) и Полысаевская (сиреневый прямоугольник), по материалам [23] (Еманов, и др.,2009)

г. Осинники

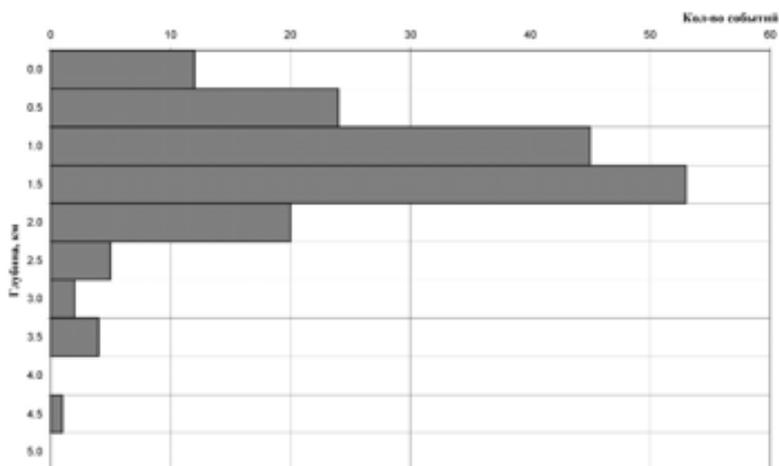


Рисунок 1.7 – Распределение глубин гипоцентров по глубине в районе г. Осинники, Кузбасс [33].

На рисунке 1.8 изображен глубинный разрез зоны афтершоков Бачатского землетрясения из работы [27] (Еманов и др., 2020). Из рисунка видно, что после главного толчка, произошедшего на глубине 4 км, зона афтершоков располагалась в диапазоне глубин от 0 до 6 км. Можно сделать вывод, что после главного толчка глубина зоны активизации сейсмичности увеличилась.

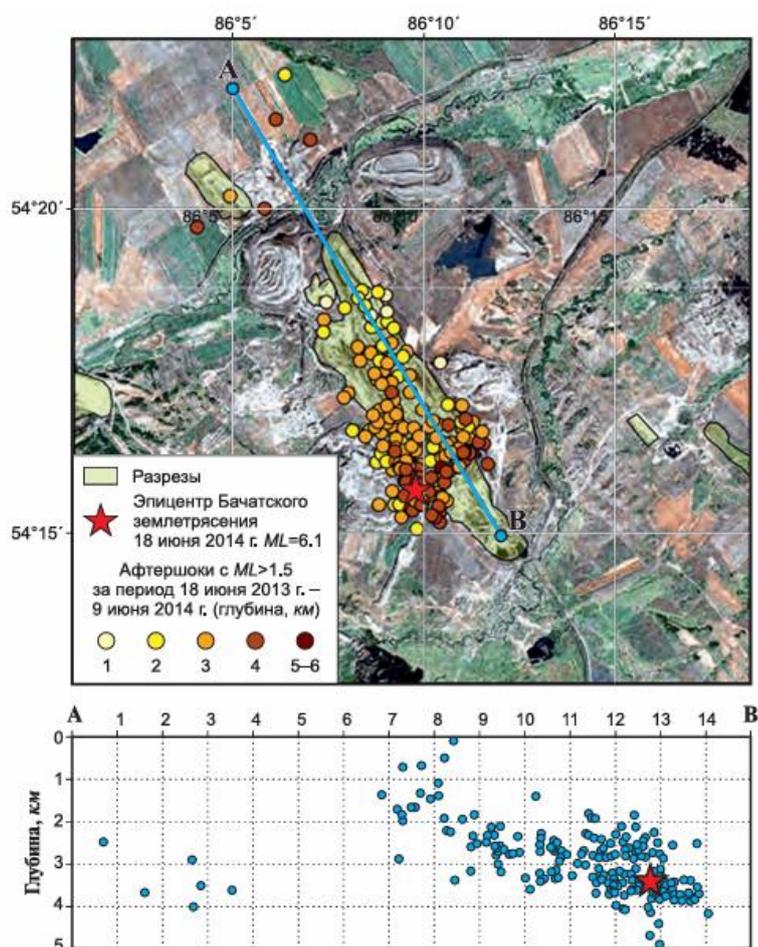
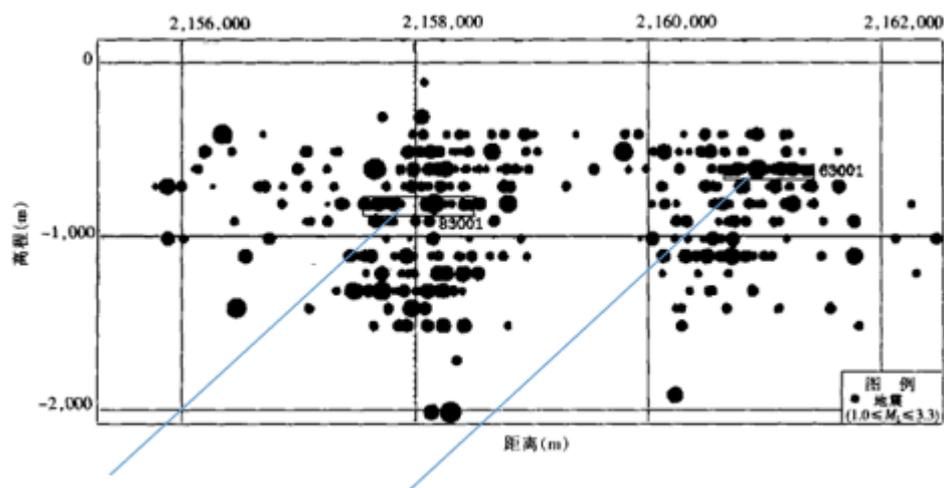


Рисунок 1.8 – Зона афтершоков Бачатского землетрясения в Кузбассе из работы [27] (Еманов, и др, 2020)

На рисунке 1.9 приведена схема расположения гипоцентров сейсмических явлений на шахте Лаохунтай в Китае из работы [34]. Видно, что зона развития сейсмичности расположена на глубинах больших, чем глубина ведения горных работ.



Зоны ведения горных работ

Рисунок 1.9 – Сейсмичность на шахте Лаохунтай на глубинном разрезе (вертикальная ось – глубина, черные значки - гипоцентры) [34].

Горные работы в блоках 89001 и 69001 велись на глубинах менее 1000м, тогда как сейсмичность проявлялась до глубин 2000 м.

Такое же явление проявления сейсмичности глубже зоны техногенного воздействия отмечается и при других видах инженерной деятельности. Такой вывод можно сделать из анализа случаев проявления техногенной сейсмичности (таблица 1.2), описанных в обзорной работе [18] (Foulger et al., 2018).

Таблица 1.2 – Глубины проявления сейсмичности при реализации проектов освоения недр

№	Проект	Глубина проекта, км	Глубина проявления сейсмичности, км
1	Асуанское водохранилище	0,2	25 ÷ 30
2	Водоохранилище Зипинпу (Веньчуаньское)	0,2	20
3	Лорка, Испания	0,3	3
4	Непальское землетрясение, 2015	0,3	18
5	Газли, Узбекистан	3	10 ÷ 15
6	Лак, месторождение газа, Франция		до 10

7	Рейкьянский геотермальный проект	4	6
8	Джелокья геотермальный проект, Австралия	4,5	5,2
9	Геотермальный проект Гейзер, США	3	до 6
10	Платформа Кастор, ПХГ	1,8	до 10

Как видно из таблицы 1.2, явление возникновения сейсмичности на глубинах больших, чем глубина воздействия на недра является типичным явлением на различных континентах и при различных видах инженерной деятельности.

Обычно подобная информация приводится без объяснения причин такой реакции массива. Возникновение сейсмических активизаций на больших глубинах или в стороне от мест ведения горных работ принимается как природное явление, свойство, присущее горному массиву в данном месте. Вместе с тем такой геодинамический эффект объясним с точки зрения концепции о предельно напряженном состоянии земной коры от поверхности до некоторой глубины [32], [35] ([Петухов И.М., Батугина И.М., 1999](#); [Батугин А.С., 2018](#)). Терминология о предельно напряженном состоянии земной коры (горного массива) постепенно находит все больший отклик в научных публикациях, а представления о разломах земной коры, находящихся в состоянии, близком к предельному, трактуется как само собой разумеющееся явление. Приведем только некоторые примеры.

В работе Х. Ченя о расчете сейсмоустойчивости плотин в Китае [36] ([Chen, 2022](#)) как постулат принимается, что для возникновения тектонического землетрясения, спровоцированного водохранилищем, необходимы определенные предпосылки, в том числе наличие сейсмогенных разломов, находящихся в состоянии, приближающимся к критическому состоянию подвижности. В этой посылке, как можно заметить, присутствует некоторое противоречие. Если разломы сейсмогенные, т.е. с ними связана сейсмичность, то они уже находятся в предельном состоянии, а не близким к нему, так как землетрясение так или иначе связывают со внезапным смещением по разлому. Аналогичные суждения встречаются во многих научных работах, посвященных механике землетрясений. Краткое перечисление таких работ, например, можно найти в работе А.С. Батугина (2023) [37]. Это показывает, что исследователями фактически принимается концепция предельно напряженного состояния земной коры, предложенная

русским профессором И.М. Петуховым в начале 1990-х годов, что более подробно обсуждается ниже.

При планировании промышленного освоения территории Монголии существует уникальная возможность учета возможных изменений геодинамического режима и его влияния на окружающую среду и инженерные сооружения с учетом международного опыта. Безоглядное освоение недр в геодинамически активных районах может приводить к экологически неблагоприятным последствиям, включая реактивацию разломов и техногенную сейсмичность. Для обоснования практических мер по защите окружающей среды необходимо исследовать природу сейсмических явлений в районах освоения недр на территории Монголии. Для обоснования необходимой основы, рассмотрим ниже тектонические и геодинамические характеристики территории.

1.2 Характеристики тектонического строения и геодинамического состояния территории Монголии

1.2.1 Геодинамическая позиция Монголо-Охотского орогенного пояса

К настоящему времени имеются довольно обширные материалы исследований по тектонике, сейсмологии, геодинамике Монголии. В тектоническом и геодинамическом плане территория Монголии приурочена к Монголо-Охотскому орогенному поясу (МООП), который как самостоятельная единица был выделен академиком А.Е. Ферсманом в 1926 году. Существует несколько тектонических схем этого пояса, разработанных разными учеными и в разное время, среди которых Тетяев М.М., Кузьмин М.И., Филиппова И.Б., Зоненшайн Л.П., Натапов Л.М., Sengör A.M.C., Natal'in В.А., Burtman V.S., Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртогоо О. Гордиенко И.В. [38 – 42].

Общим считается, что этот пояс протягивается на расстояние свыше 3000 км от Центральной Монголии через Забайкалье, Восточную Монголию и Приамурье до Охотского моря и представляет собой шовную зону, возникшую на месте столкновения крупных континентальных блоков. Как отмечается в работе, в составе МООП устанавливаются блоки различного типа и возраста. Отмечается, что западная его граница, где он сопрягается с разновозрастными с ним каледонскими и герцинскими структурами Западной Монголии, Алтае-

Саянской области и Казахстана, остается неясной. Так, на схеме распространения алтаид (рисунок 1.10) Монголо-Охотский пояс на западе захватывает часть Западной Сибири с Кузбассом и окружающими его сооружениями Салаира и Колывань-Томской складчатой области [40].



Рисунок 1.10 – Схема распространения алтаид (желтым), включающих Монголо-Охотский пояс, по [40]

Сложен Монголо-Охотский пояс разнообразными метаморфическими (гнейсы, слюдистые сланцы, кварциты, мраморы) и магматическими (граниты, порфириды, диабазы) породами. Толщи сильно дислоцированы и перемяты, их общая мощность более 10 км. Возраст образований – докембрий и палеозой. Разрез палеозоя заканчивается грубообломочной молассой пермского возраста, указывающей на завершение здесь геосинклинального режима развития в конце палеозойской эры [43]. Существуют различные точки зрения на тектоническую природу Монголо-Охотского пояса. М. М. Тетяев в 20-х годах высказал мысль о его мезозойском возрасте. В 1936 г. В. А. Обручев доказывал, что пояс образовался в результате герцинской складчатости, но был переработан более поздними мезозойскими движениями. Последующие исследователи подтвердили эту точку зрения, и в настоящее время большинство геологов рассматривают Монголо-Охотский пояс как область эпиплатформенной орогении. Вместе с тем можно видеть, что уточнение границ крупных тектонических сегментов земной коры на основе авторских гипотез и новых данных является характерным при изучении МООП [44].

Территория Монголии – один из примеров крупных тектонических элементов земной коры, где хорошо выражены современные геодинамические процессы. Ключевая роль в современной геодинамической эволюции отводится как внутренним механизмам [45, 46], связанным с существованием горячей астеносферы, своего рода «тепловой ловушкой», под тонкой корой, так и с процессами рифтогенеза [47] и взаимодействия литосферных плит [48].

В работе [49] выполнен анализ и составлены карты разломов, активных на плиоцен-четвертичном этапе развития земной коры. При составлении карт использованы цифровые модели рельефа SRTM 90 м, космические снимки со спутников серии «Landsat» (Google Earth), электронная батиметрия оз. Байкал, топографические основы масштаба 1:200000, региональный и мировые каталоги землетрясений, а также литературный и картографический материал по предшествующему изучению активной тектоники и следов землетрясений, представленный в информационной системе «ActiveTectonics», разработанной под руководством Луниной О.В. Карты составлены на основе ГИС MapInfo с географической привязкой разломов, проявляющихся, в том числе, в рельефе земной поверхности. Линеаменты, не подтвержденные другими данными показаны на карте как предполагаемые, рисунок 1.11.

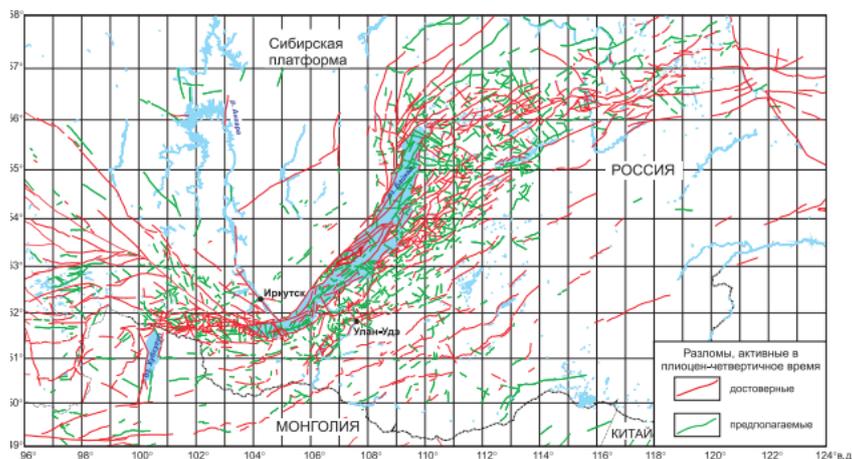


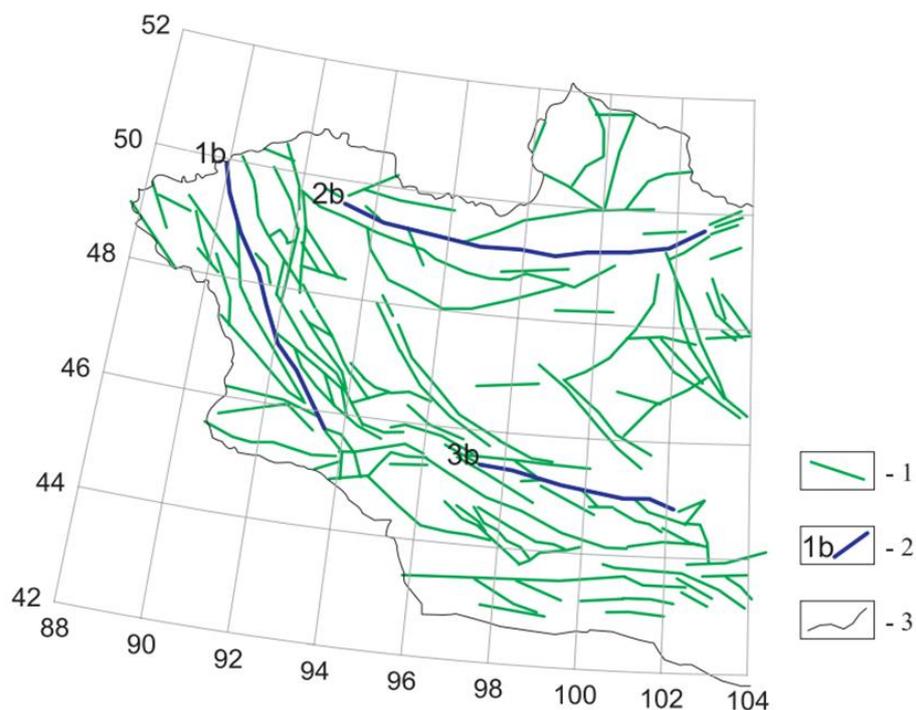
Рисунок 1.11 – Цифровая карта активных в плиоцен-четвертичное время разломов юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии [49]

В работе [50] авторы на основе анализа палеосейсмологических и морфотектонических данных делают вывод, что четыре крупнейших землетрясения Монголии прошлого века с магнитудой около 8 произошли в результате внутриплитных деформаций, которые являются следствием

взаимодействия Индийской и Евразийской плит. Тектонически активные районы гор Гоби-Алтай и Хангай разделены сейсмически спокойной долиной озер Гоби, по которой протекают крупные реки, впадающие в бессточные озера. Авторы работы [50] отмечают, что несмотря на небольшое количество зарегистрированных землетрясений, четвертичные отложения в долине озер Гоби пересекаются множеством уступов со значительными смещениями, изменяющими ландшафт. В работе оценена степень деформации, которую создают разломы в долине озер Гоби, и определено их влияние. Например, река Туйн-Гол пересекается четырьмя уступами разломов с простираем с востока на запад и к северо-востоку-юго-западу, которые демонстрируют переменную кинематику из-за различий в ориентации уступов по сравнению со стабильным направлением основного напряжения с северо-востока на юго-запад. Картирование разломов долины озера Гоби протяженностью более $40 \div 90$ км показало, что они способны генерировать землетрясения с магнитудой $M \sim 7$. По анализу размеров конуса выноса отложений Туйн-Гол оценена скорость вертикального сдвига от среднего плейстоцена до наших дней, которая составила от $(0,012 \pm 0,007)$ до $(0,13 \pm 0,07)$ мм/г. Кумулятивное вертикальное смещение по разломам составляет $(0,27 \pm 0,08)$ мм/г. По мнению авторов это означает, что общая активная деформация, вызванная разломами южной Монголии, может быть больше, чем предполагалось ранее, и распределена по большому количеству разломов между горными хребтами Хангай и Гоби-Алтай. На основе анализа геоморфологических данных сделан вывод, что дренажная система Туйн-Гол развивалась в течение четырех-пяти климатических циклов по 100 тыс. лет, во время которых активная деформация играла важную роль в реорганизации дренажа. Эти результаты демонстрируют постепенное нарастание интереса к геоморфологическим методам оценки современных движений земной коры, интенсивно разрабатывавшихся в Советском Союзе и сейчас используемых в методе геодинамического районирования для оценки сейсмического потенциала разломов, которые считались неактивными.

Процессам изучения современного разломообразования посвящены также работы [51-53], в которых на основе анализа инструментальных наблюдений и комплексного геолого-геофизического картирования делается вывод об активности разломов, но не рассматриваются вопросы влияния разломов на условия освоения недр и земной поверхности. Карта активных разломов Монголии построена только до долготы 104° и не затрагивает территорию расположения крупных угольных разрезов Толгой и нефтяных промыслов Матад, рисунок 1.12. Что касается мощности земной коры, то она

варьирует от 40 км под долинами восточной Монголии до 55 км под хребтами [54].



- 1 – активные разломы Монголии; 2 – активные разломы, выбранные для анализа и их номера;
3 – государственная граница Монголии

Рисунок 1.12 – Активные разломы Монголии [53]

Среди крупных сейсмогенных разломов Монголии известны Хангайский, Восточно-Монгольский, Центрально-Монгольский разломы субширотного или северо-восточного простираний и множество более мелких разломов, разделяющих выделенные исследователями террейны. Наиболее высоким сейсмическим потенциалом обладают протяженные, обновившиеся при известных сильнейших землетрясениях разломы Монголии, формирующие системы крупнейших глубинных линеаментов: Монголо-Охотского – Болнайский разлом, Главного Монгольского – Богдинский разлом, Западного Монголоалтайского – Фуюньский разлом, Восточного Монголоалтайского – Кобдинская зона разломов. Протяженность этих структур может достигать тысяч километров, а длина вскрывшихся при землетрясениях отрезков достигает и превышает 300 км. Небольшие сейсмогенные разломы, такие как Ачит-Нурский, Урэг-Нурский, Бурынхярский и др. детерминируют домены и входят в зоны или системы

линеаментов. К вновь образованным современным фокальным структурам можно отнести Цэцэрлэгский, Тахийншарский, Могодский разломы, возникшие при землетрясениях 1905, 1970 и 1967 годов. Анализ материалов позволил охарактеризовать основные разломы Монголии как структуры, возникшие в результате преимущественного горизонтального сжатия литосферы – обобщение данных показало, что из 39 разломов пять разломов имеют сбросовую компоненту подвижки (Хубсугульская система грабенов), пятнадцать – сдвиговую и около двадцати – взбросовую [55]. Вероятность реализации землетрясений различной кинематики со сбросовым механизмом составляет $PN \approx 0.12$, сдвиговым – $PS \approx 0.38$ и взбросовым – $PR \approx 0.50$. Считается, что в эпицентральной зоне при равных магнитудах уровень ускорений при толчках-взбросах в 2.5 раза выше, чем при сбросах.

Как обычно, названия и местоположение тектонических элементов и разломов различаются у разных авторов в зависимости от масштаба исследований и временного интервала. Тем не менее сохраняется общая картина развития линейных разновозрастных тектонических образований по простиранию МООП и поперечных дислокаций. На карте разломов территории СССР и сопредельных стран можно видеть, что Хангайский, Баянгольский и Монголо-Охотский разломы являются фрагментами единой крупной тектонической зоны широтного и северо-восточного направления, проходящей с юга от оз. Байкал. Хангайский разлом является левым сдвигом. Южнее Улаанбаатара в такую же цепочку выстраиваются Их Богдинский (левый сдвиг), Ундуршилинский и Ульдзинский разломы, ограничивающие террейны МООП.

Повсеместно развиты разломы северо-западного простирания (крупные из них: Орхонский, Восточно-Хангайский, Хараайракский). Также развиты разломы с северо-восточного простирания. Имеются мелкие меридионально ориентированные разломы. На тектонической карте Китая и Монголии (главный редактор Терман М.) границы МООП также выражены в виде разломных зон и имеется крупная разломная зона северо-западного простирания, примерно совпадающее с вышеописанным Хараайракским разломом.

Таким образом, изучаемый район имеет сложнодислоцированную структуру, представленную разномасштабными разломными зонами разного возраста. Наиболее четко выражены разломы широтного и северо-восточного простираний, соответствующие простиранию МООП, а также секущие поперечные дислокации. Описание тектонических, геодинамических структур, активных разломов территории Монголии приводится без привязки

их влияния на условия освоения недр. Исключением являются указания на опасность сейсмического воздействия разломов разной кинематики на инженерные сооружения.

Таким образом, МООП считается одной из геодинамически активных зон земной коры Азии на протяжении длительной геологической истории и до нашего времени. Современные геодинамические процессы отражаются в строении рельефа земной поверхности и сейсмичности региона. На территории высокоактивные районы соседствуют с относительно спокойными районами. В регионе выделены многочисленные сейсмоактивные разломы, отмечен эффект миграции землетрясений. На этом фоне в современный период бурного развития горнодобывающей промышленности имеется высокая опасность реализации опасных геомеханических процессов при освоении недр, таких, как горные удары, внезапные выбросы, техногенная сейсмичность. Актуальной является задача создания научного задела по регулированию опасности воздействия на окружающую среду геодинамических процессов, возникающих как реакция земной коры на техногенное вмешательство при освоении недр и земной поверхности на территории Монголии.

1.2.2 Аналитический обзор результатов сейсмологических исследований на территории Монголии

Большая часть территории Монголии находится в пределах высокосейсмичных областей земной коры, где в 20 веке произошло более 60 событий с $M > 5,5$ (рисунок 1.13) [56]. Десятки землетрясений вызывали значительные подвижки грунта на поверхности. Поверхностные разрывы во время землетрясений $M > 8$ в Булнае (1905), Фуюнь (1931) и Гоби-Алтай (1957) достигали сотен километров. Отмечается зональность в проявлении сейсмичности. Сейсмичность высока в северной, центральной и западной части страны, но относительно низкая на юге и почти отсутствует на востоке [56, 57]. Плотность землетрясений особенно высока в нескольких районах, таких, например, как бассейн Бусынгол на севере Монголии, в пограничной с Россией территорией. Здесь произошли два землетрясения с $M_{LH} = 5,5$ (29.11.1974 и 01.04.1976) и одно землетрясение $M_{LH} = 6,5$ (27.12.1991), которые сопровождались длинными последовательностями афтершоков. Также выделяют область $M = 7,8$ Могодского землетрясения (05.01.1967); область $M = 7,0$ Урегнурского землетрясения (15.05.1970); область $M = 6,9$ Тахиншарского землетрясения (04.07.1974) и их афтершоков.

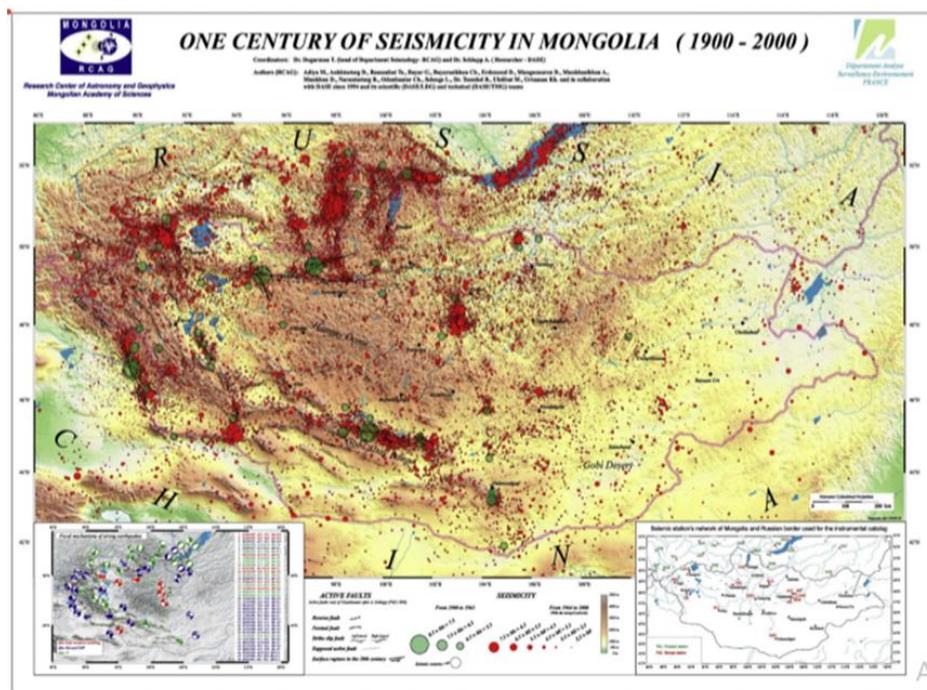


Рисунок 1.13 – Карта сейсмичности в Монголии (1900–2000 гг.) [58]

Анализ распределения сейсмических явлений выполнен также в работе [54]. На рисунке 1.14 представлена карта эпицентров землетрясений Монголии из этой работы. В этой же работе приводится карта плотности очагов землетрясений, рисунок 1.15.

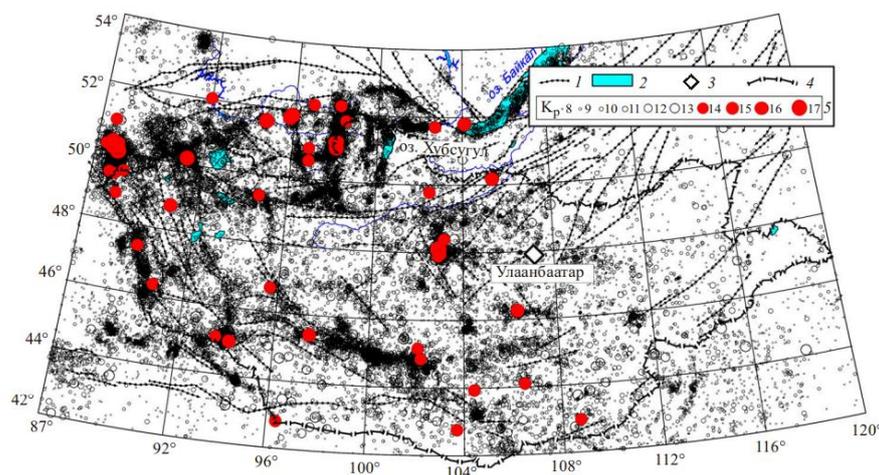


Рисунок 1.14 – Карта эпицентров землетрясений Монголии [54]

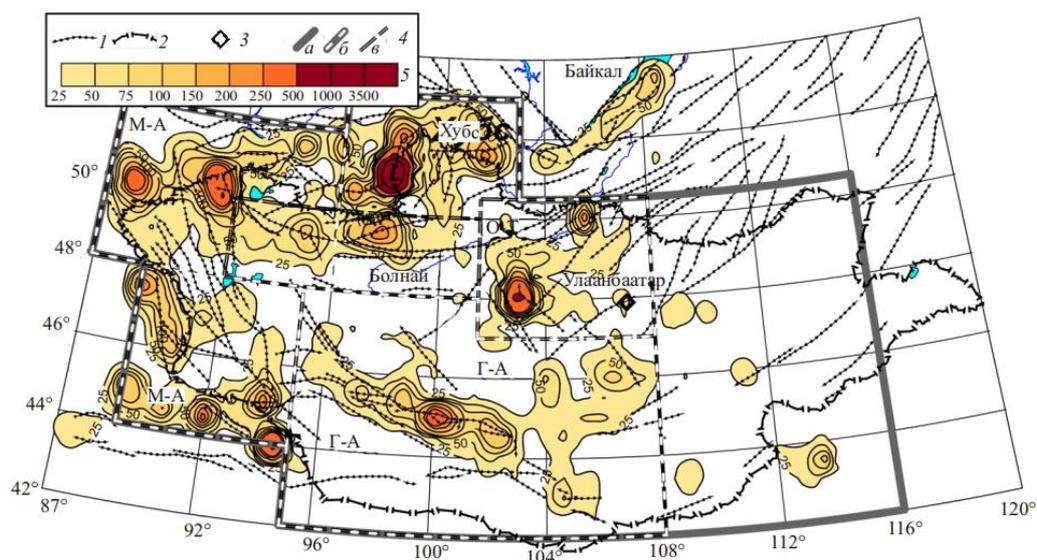


Рисунок 1.15 – Карта плотности эпицентров землетрясений Монголии [54]. 1 – основные разломы; 2 – государственная граница Монголии; 3 – столица Монголии г. Уланбаатор; 4 – границы территорий (а – Монголии, б – областей, в – районов); 5 – шкала изолиний плотности эпицентров землетрясений. Монголо-алтайский (М-А), Гоби-Алтайский (Г-А), Хубсугульский (Хубс), Болнайский (Болнай), Орхон-Тольский (О-Т), районы

Из рисунков 1.14 и 1.15 можно видеть пятнистое распределение очаговых зон землетрясений на территории, что является одним из свидетельств неоднородного напряженного состояния земной коры на территории Монголии. Данные о глубинах гипоцентров землетрясений отсутствуют ввиду редкой плотности сети сейсмостанций. Однако имеются исследования по расшифровке механизмов очагов землетрясений [59]. На рисунке 1.16 представлена карта решения фокальных механизмов землетрясений в широком диапазоне магнитуд, которая использована для оценки напряженного состояния земной коры региона в работе [60], а на рисунке 1.17 приведена карта фокальных механизмов района Байкальской рифтовой зоны из работы [59]. Из рисунка видно, что преобладают механизмы очагов взбросового и сдвигового типов, что можно истолковать в пользу гипотезы о превышении горизонтального сжатия над вертикальным практически на всей закартированной территории.

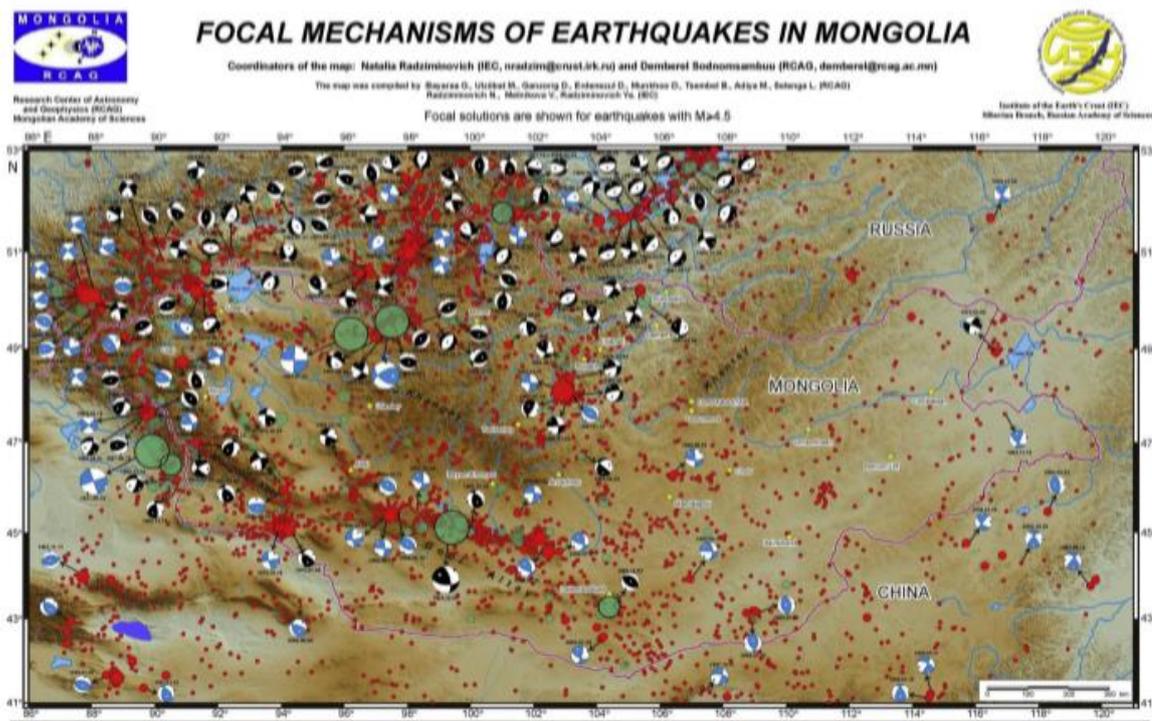


Рисунок 1.16 – Карта очаговых механизмов землетрясений в Монголии [59]

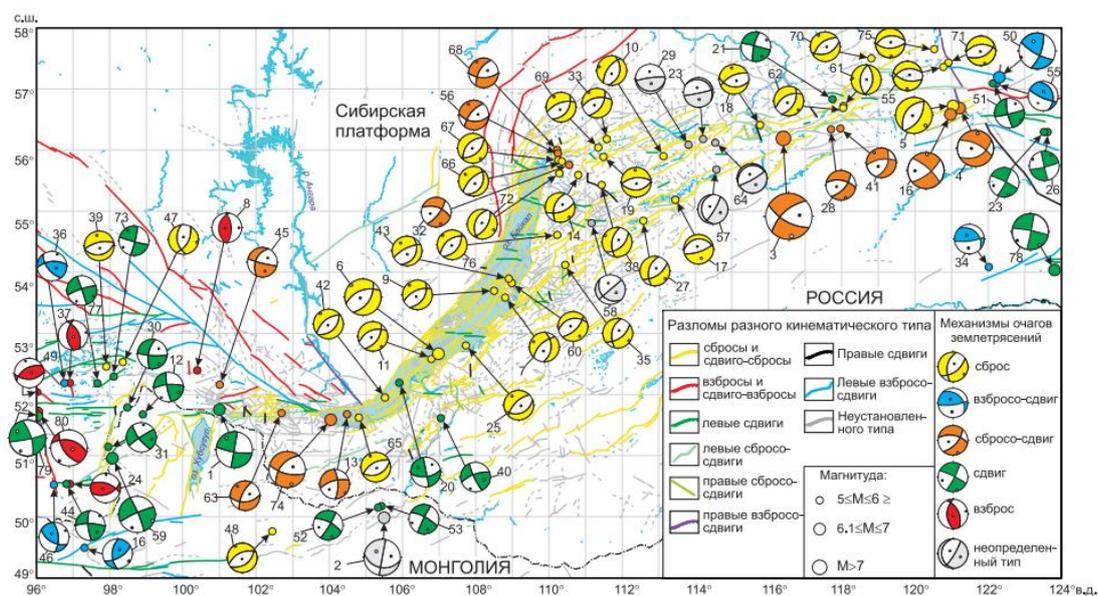


Рисунок 1.17 – Механизмы очагов землетрясений с $M > 5$ [53]

Научных работ по проявлению техногенной сейсмичности на территории Монголии не выявлено.

Вопросам динамики миграции землетрясений посвящена работа [53]. Здесь приведен анализ распространения деформационных волн на территории Монголии. В результате обработки базы данных по 21 разлому, с которыми связано около 2300 землетрясений с магнитудой от 3 до 8, получены данные по активизации разломов и векторной направленности деформационных волн, имеющих длины 100-200 км и распространяющихся со скоростями 1-8 км/год, рисунок 1.18. Автор статьи Мельников М.Г. считает эти волны триггером землетрясений, но не касается вопросов тектонофизического анализа полей напряжений и геомеханической интерпретации полученных результатов.

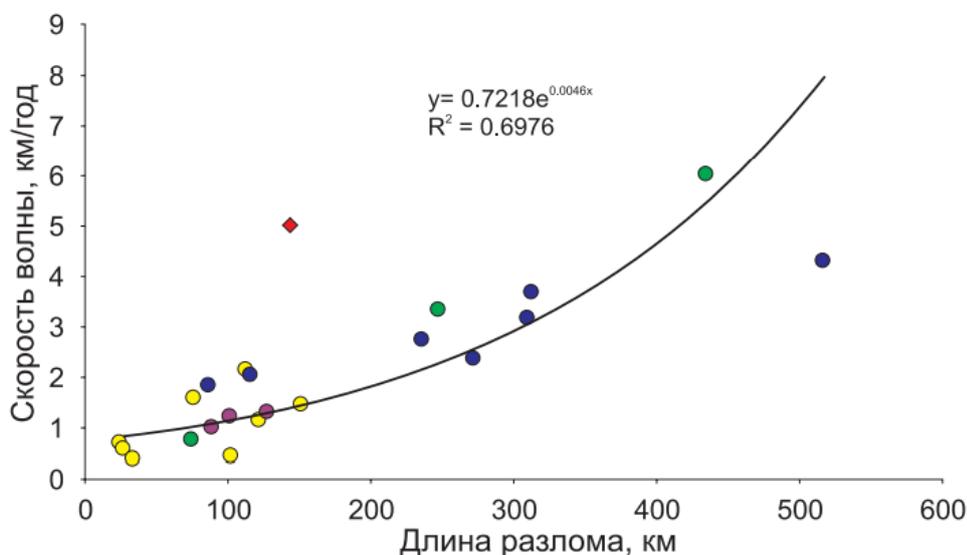


Рисунок 1.18 – График зависимости скорости волны от длины разлома [53]

Международной группой ученых на территории Монголии проводились экспериментальные работы по изучению проявления сейсмичности [60]. Была развернута временная широкополосная сеть из 112 сейсмостанций, объединенных в три группы, на территории центральной Монголии от озера Хевсгел до Горного Алтая. На этой территории размером 900 × 600 км регистрировалась сейсмичность в течение 21 месяца. Одним из результатов этих исследований является то, что массив Хангай, регион, ранее считавшейся относительно асейсмичным, «скорее деформируется, чем ведет себя как твердый блок», и что сейсмический потенциал разломов в пределах Хангая следует учитывать при анализе сейсмической опасности для Монголии.

Таким образом, территория Монголия относится к сейсмически высокоактивным регионам. Наблюдается зональное проявление

сейсмичности: высокоактивные районы соседствуют с относительно спокойными районами. При детальном исследовании сейсмичность обнаруживается и в районах, прежде считавшихся асейсмичными. В регионе выделены многочисленные сейсмоактивные разломы, отмечен эффект миграции землетрясений со скоростями 1-8 км/год. При этом не уделено внимание вопросам реакции земной коры на техногенное воздействие и геодинамической безопасности освоения недр.

1.2.3 Сейсмическое районирование территории

Сейсмическому районированию Монголии посвящен ряд работ, в основном, советских и российских авторов [61-65]. При сейсмическом районировании постулируется роль крупных разломов земной коры в формировании зон повышенной сейсмической активности. Принимается, что крупные разломы играют ключевую роль при сейсмическом районировании территории [65]. Например, при анализе сейсмичности Прихубсугульской зоны землетрясений установлено, что основная сейсмическая деятельность происходит в пределах зон Бусийгольского, Дархатского и Тункинского активных разломов. Анализ сейсмичности Северо-Хангайской зоны землетрясений показал, что основная сейсмическая деятельность происходит в пределах зон Болнайского и Цэцэрлэгского активных разломов. Сейсмическая активность оценена в шкале порядка: «полученные параметры характеризуют зону Болнайского разлома как слабоактивную, несколько выше активность в зоне Цэцэрлэгского разлома. Зона Болнайского разлома характеризуется как территория с повышенным уровнем группировки толчков, что отражает, возможно, релаксационные процессы катастрофических Болнайских землетрясений 1905 года, а в зоне Цэцэрлэгского разлома группировка землетрясений незначительна». Основным выводом этого исследования является то, что сейсмический процесс на территории Монголии и прилегающих районов связан с реализацией крупных землетрясений и последующим релаксационным процессом перехода массива в «метастабильное состояние».

В работе [66] рассматриваются проблемные этапы работ по районированию сейсмической опасности в приграничных сейсмоактивных районах Сибири и Монголии на примере г. Эрдэнэт. Авторы выделяют линейные зоны возникновения очагов землетрясений (рисунок 1.19).

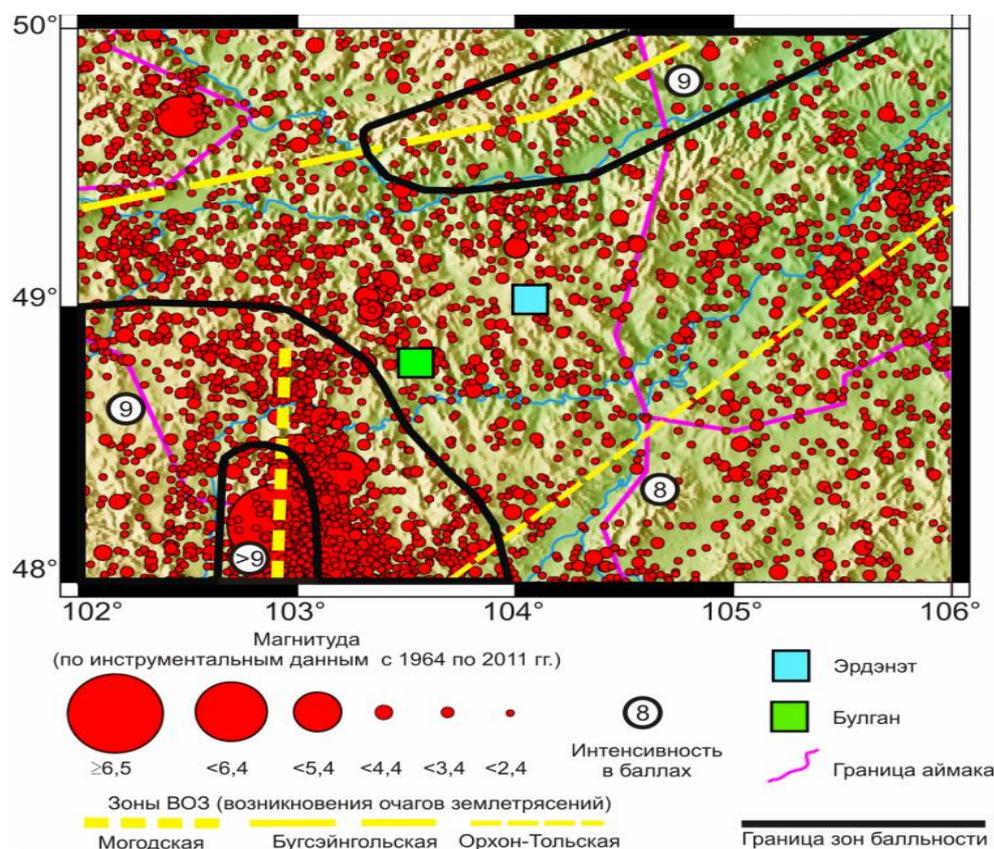


Рисунок 1.19 – Сейсмотектоника и сейсмичность района г. Эрдэнэт [66]

Характеристику сейсмического режима района г. Эрдэнэт авторы статьи представили в виде графиков повторяемости землетрясений для Орхон-Тольского участка северной Монголии (рисунок 1.20). График 2 построен по материалам сейсмических событий с 9-го по 16-й энергетический класс, 3 – по слабым землетрясениям ($K = 9 \div 13$). Как видно из рисунка, уровни графиков и их угловые коэффициенты практически совпадают. График 1 построен по данным сейсмических наблюдений более позднего периода. Здесь показатели близки к средним значениям для всей территории Монголии. Среднегодовая скорость (плотность) VM потока сейсмических событий разных магнитуд (MS) для Алтай-Саяно-Байкальского региона, куда полностью входит Орхон-Тольский район, показывает (см. рисунок 1.20, обозначение Б), что на этой территории возможны 10 землетрясений в год с $M = 4,5$ ($6 \div 7$ баллов), 1 землетрясение в год с $M = 5,5$ (8 баллов), 1 землетрясение с $M = 7$ ($9 \div 10$ баллов) в 10 лет и с $M = 8$ ($10 \div 11$ баллов) один раз в 100 лет.

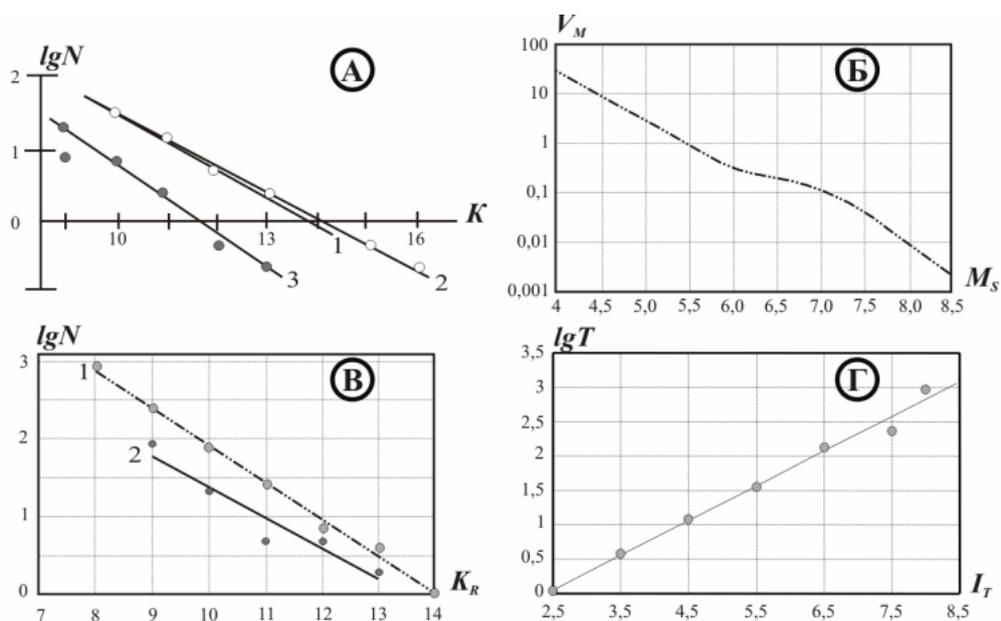


Рисунок 1.20 – Сейсмический режим района г. Эрдэнэт [66]

Авторы статьи [66] разработали карту сейсмического микрорайонирования (рисунок 1.21). При построении карты была реализована методика сейсмического микрорайонирования территории г. Эрдэнэт по сейсмогрунтовым моделям. Выбранный подход позволил получить полный набор необходимых параметров сейсмических воздействий для строительства сейсмостойких зданий и сооружений. При таком подходе обоснована и вероятность сейсмических воздействий согласно принятому уровню исходной сейсмичности.

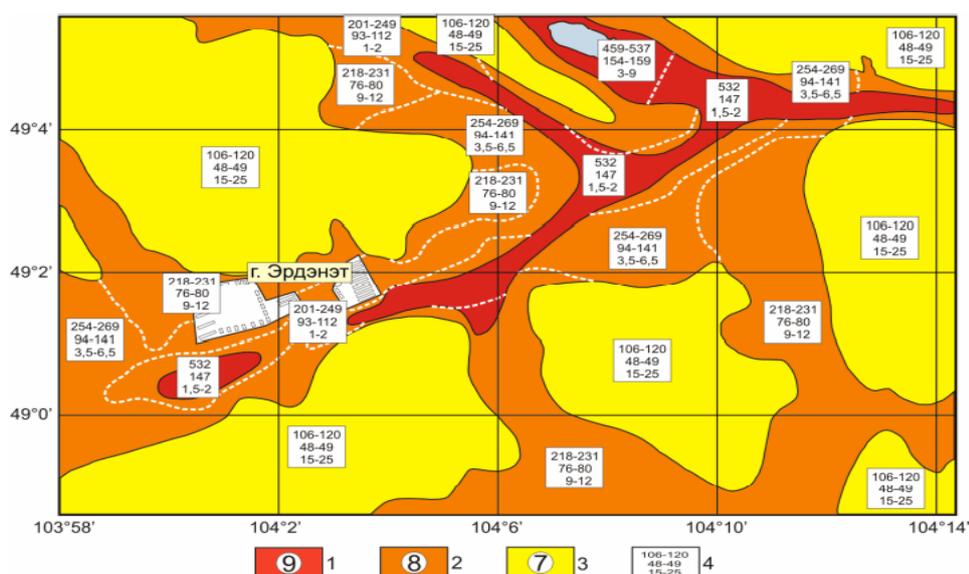


Рисунок 1.21 – Карта сейсмического микрорайонирования территории и района г. Эрдэнэт [66]

При районировании сейсмического риска к основным проблемам для территорий Монголо-Сибирского региона авторы отнесли уточнение сейсмического режима на более длительном интервале времени, накопление экспериментальных данных о поведении грунтов различного состава и состояния в пределах Монголо-Сибирского региона при сейсмических воздействиях различной интенсивности и частотного состава, исследование «региональной сейсмичности» – для построения обоснованных моделей сейсмической опасности исследуемых территорий, изучение сейсмических свойств наиболее распространенных типов грунтов по составу и состоянию.

Таким образом, вопрос изучения возможного проявления техногенной сейсмичности в районе одного из крупнейших горнодобывающих предприятий Монголии даже не ставится. В связи с этим возникает научно-практическая задача оценки и регулирования техногенной сейсмичности в районах интенсивного освоения недр на территории Монголии.

1.2.4 Аналитический обзор результатов геомеханических исследований в пределах МООП и влияния на окружающую среду наведенных геодинамических процессов

Геомеханические исследования проведены, главным образом, на горнодобывающих предприятиях России, находящихся в пределах МООП и анализ этих исследований дает информацию к оценке возможного развития опасных геомеханических явлений при разработке месторождений на территории Монголии. В пределах МООП ведется разработка удароопасных рудных и угольных месторождений, включая находящиеся на западной периферии пояса месторождения Кузбасса, входящего в состав Салаиро-Саянской эпикаледонской области, включенной, по Гаврилову В.П. (1981), в Монголо-Охотский пояс.

В работах [67, 68] отмечено, что на месторождении Антей первые проявления горного давления в динамической форме были зарегистрированы в 1976-1977 гг. на стадии строительства при проходке стволов и разведочно-подготовительных выработок. В последствии при ведении горноподготовительных и очистных работ на VII и нижележащих горизонтах наблюдались динамическое заколообразование и стреляние пород. По заключению ВНИМИ месторождение Антей с глубины 500 м было отнесено к опасным по горным ударам. С развитием очистных работ и их переходом на более глубокие горизонты интенсивность динамических проявлений горного

давления резко возросла. В последнее десятилетие в отдельные годы на месторождении Антей регистрировалось более 100 случаев динамических проявлений (рисунок 1.22), что ставит вопрос о проявлении техногенной сейсмичности и ее оценке.

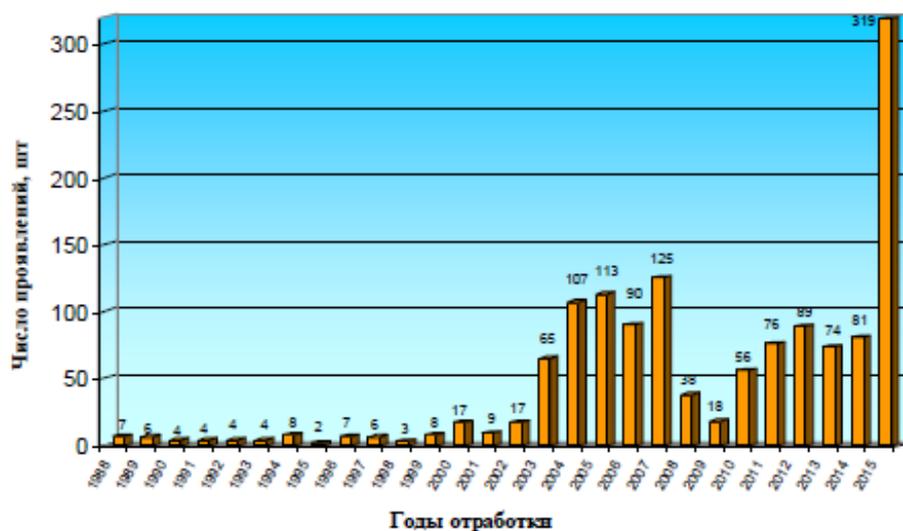


Рисунок 1.22 – Удароопасность месторождения Антей [67]

Сильный горный удар произошел также на Николаевском руднике 6 апреля 2016 г. в 06 ч 47 мин на гор. минус 420 м в штреке № 1, пройденном по контакту мраморизованных известняков и геденбергит-сульфидных скарнов в узле пересечения субмеридионального тектонического нарушения ТН-3 с северо-восточной и субширотной зонами интенсивной трещиноватости [69]. Эпицентр события находился под днищем блока 40 рудной зоны Восток-1 и сопровождался сильным звуковым эффектом, сотрясением массива по всему шахтному полю, запылением выработок. В результате горного удара из левого борта и кровли штрека было выброшено более 10 м³ породы, частично разрушены выработки на подэтажах гор. минус 375, 390, 406 м (рисунок 1.23).



Рисунок 1.23 – Последствия горного удара 06.04.2016 на месторождении «Николаевское» [69]

По результатам детального изучения условий и факторов серия сильных толчков в глубине массива Николаевского месторождения, вызвана активизацией геодинамических процессов вдоль границ подработанного горными работами тектонического блока объемом более 5 млн. м³. Геодинамические процессы протекали в форме перестройки и самоорганизации массива в природно-техногенном поле напряжений и сопровождались смещениями и подвижками вдоль тектонических нарушений различного масштабного уровня. В частности, наблюдаемые смещения составили 5 см в наклонных и вертикальных взрывных скважинах на расстоянии от 4 до 7 м от их устья.

Авторы работы [69] полагают, что имеется очевидное влияние тектонической структуры Николаевского месторождения на геомеханическое состояние массива горных пород. В результате эксплуатации рудных месторождений возникает новая техногенная пустотность, которая нередко формируется вдоль плоскостей контролирующей положение рудных тел, имеющих различную форму и ориентировку (геологические контакты, разломные зоны). По этой причине происходит нарушение важной в геодинамическом отношении соединительной функции метасоматитов. Авторы полагают, что изложенное выше служит обоснованием необходимости учета упомянутого нового фактора при геодинамическом районировании шахтного поля, поскольку на тех или других участках он может приводить к повышению опасности проявления горного давления в динамической форме, включая техногенные землетрясения с комплексным влиянием на окружающую среду.

Исследования напряженного состояния на месторождениях показали, что горизонтальные напряжения превышают вертикальные и их направления увязываются с глобальной и региональной геодинамической позицией месторождений [9]. На рисунке 1.24 представлена информация о напряженном состоянии горного массива на месторождениях.

Месторождение	Глубина горных работ, м	Величина максимального напряжения, МПа	Соотношение главных напряжений ($\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$)
Николаевское	860	70-100	2,5:1,5:1
Южное	500	95	1,8:1:1
Восток-2	500	50-70	2,5:1,3:1
Перевальное	600	50	2:1:1
Хинганское	550	50-70	3:1:1
Антей	700	50-100	2,5:1,4:1
Дарасунское	700	27	1,7:1,3:1
Ирокиндинское	200	11	1,3:1,2:1

Рисунок 1.24 – Напряженное состояние горного массива на месторождениях [9] (Рассказов, 2016).

Важность изучения напряженного состояния горного массива для обеспечения геодинамической безопасности показана и на примерах других удароопасных месторождений России, например в работах сотрудников Кольского НЦ РАН [70, 71]. На угольных месторождениях уменьшение количества разрабатываемых глубоких пластов снизило остроту проблемы горных ударов. Тем не менее, как отмечается в работе [72] (Шабаров, 2013), применяемые сейчас высокопроизводительные технологии многоштрековой подготовки ведут к оставлению мощных полос целиков и созданию зон повышенного горного давления (ПГД) на надрабатываемых пластах. На верхних пластах опасность зон ПГД относительно невелика. Но при переходе на более глубокие пласты, особенно с учетом множества дизъюнктивных нарушений, проблема удароопасности снова приобретает актуальность. Для контроля удароопасности необходимы системы сейсмического и деформационного мониторинга, а также адаптация разработанных региональных и локальных противоударных мероприятий к условиям интенсивной выемки. Для снижения риска, как показывают расчеты, перспективна раскройка шахтных полей таким образом, чтобы сформированные при ведении горных работ зоны ПГД и зоны разгрузки на

разных пластах частично компенсировали друг друга. Важнейшее значение имеет выбор порядка отработки пластов в свите [73] (Пальцев и др., 2010).

Другая геомеханическая проблема разработки угольных месторождений связана с высокой газообильностью. Из-за высокого риска газодинамических явлений и малой эффективности дегазации за последние годы снизилась средняя глубина отработки. Становится выгоднее строить новые шахты и разрабатывать верхние, менее метанообильные пласты, чем вскрывать глубокие пласты на действующих шахтах. Несмотря на это, метановые катастрофы происходят и на относительно небольших глубинах: «Юбилейная» (570 м), «Тайжина» (550 м), «Распадская» (490 м), «Есаульская» (400 м) «Ульяновская» (270 м). Поэтому без дегазации невозможно обойтись даже при выемке верхних пластов угля. Однако из-за очень высокой доли (от 80 до 90 % и более) связанного и адсорбированного метана все применяемые технологии предварительной дегазации, в том числе американские и австралийские, дают относительно небольшой эффект. Признается необходимость разработки новых и совершенствование существующих методик поиска предполагаемых скоплений метана на разных масштабных уровнях [72, 74]. При этом считается установленным роль тектонических нарушений как проводников шахтных газов на поверхность [75, 76] (Василенко и др., 2016; Качурин и др., 2017). Установлены факты реактивации нарушений при разработке месторождений [77-79]. (Donnelly, 2006; Guo et al., 2023, Panzhin, 2005). Однако эффектам внезапного поступления газов в окружающую среду при реактивации нарушений до сих пор не уделено внимания.

Техногенная сейсмичность отмечена при разработке рудных месторождений района МООП [9] и угольных месторождений [23]. Исследования показывают, что имеется связь между локальными геомеханическими и глобальными геодинамическими процессами при освоении недр. Так, проявление горных ударов на месторождении Таштагол связывают с взаимодействием Евроазиатской и Индийской плит и более мелких блоков земной коры [80]. Такие же взгляды высказываются относительно проявления техногенной сейсмичности Дальнего Востока в пределах МООП [9] и других территорий. К сильнейшим техногенным землетрясениям при добыче полезных ископаемых относят Бачатское землетрясение (2013). Воздействие на окружающую среду проявилось в виде тремора, изменения ландшафта, отмечен большой негативный социальный эффект. Отмечен также эффект постепенного нарастания магнитуды техногенной сейсмичности в районе Бачатского разреза. Важное значение для

раскрытия природы техногенной сейсмичности при дается фактам регистрации сейсмических активизаций за пределами шахтных полей и на глубинах больше, чем глубина ведения горных работ [81] (Батугин, 2023).

Таким образом, имеющиеся результаты исследований показывают, что геомеханическая опасность освоения недр и территорий связана с напряженным состоянием массива и региональными и глобальными геодинамическими процессами. Интенсивное воздействие на недра может вызывать техногенную сейсмичность и соответствующие прямые и косвенные экологические эффекты для окружающей среды: выход газов в атмосферу при активации нарушений, тремор территорий, воздействие на ландшафт, гидросферу, повышение опасности загрязнения окружающей среды при авариях на промышленных объектах, вызванных проявлением техногенной сейсмичности.

В настоящее время в Монголии планируется увеличить добычу угля до 80 миллионов тонн в год (только на угольном разрезе Эрдэнэс Таван Толгой - более 30 миллионов тонн угля в год), руды - до 5 миллионов тонн в год. Крупные угольные разрезы, такие как Эрдэнэс-Таван-Толгой, достигают 10 км 200 м в глубину. На шахте Ою-Толгой добыча ведется на глубине более 1 км с помощью технологии блоковой закладки. В этой ситуации Монголии на современном этапе бурного развития важно учитывать опыт других стран в области предупреждения и предотвращения геодинамической опасности.

В этой связи, актуальной научно-практической задачей является исследование природы сейсмичности (техногенная/естественная) районов освоения недр Монголии и разработка подхода к оценке ее потенциального воздействия на окружающую среду.

1.3 Основные задачи исследования

Таким образом, в диссертационном исследовании сформулированы следующие задачи исследования:

1. Выполнить аналитический обзор по вопросам влияния индуцированных геодинамических процессов на окружающую среду и безопасность.
2. Исследовать природу сейсмических явлений (техногенная/естественная) в районах освоения недр на территории Монголии.
3. Обосновать подход к оценке максимально возможной и максимально ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения для территории Монголии.
4. Оценить вклад процесса реактивации тектонических нарушений в загрязнение атмосферы горнопромышленных районов.
5. Обосновать подход и рекомендации к оценке влияния техногенной сейсмичности на окружающую среду в условиях Монголии.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В РАЙОНАХ ОСВОЕНИЯ НЕДР МОНГОЛИИ

2.1 Анализ применимости известных подходов по установлению природы сейсмических явлений для условий Монголии

Вопрос природы сейсмических явлений в индустриальных районах имеет несколько важных аспектов. С экономической точки зрения важно установить источник возмещения причиненного ущерба. Если землетрясение признается техногенным, то, значит, есть и виновник в лице компании, эксплуатирующей недра, к которой могут быть предъявлены претензии. Известной является ситуация с геотермальным проектом в Швейцарии, г. Базель [18] (Foulger et al., 2018). После возникновения сейсмичности к компании были предъявлены иски от домовладельцев. Компания компенсировала ущерб и закрыла проект. С экономическим аспектом тесно связан экологический, так как возникновение сейсмичности изменяет привычное состояние окружающей среды. В местах возникновения сейсмичности нарастает социальная напряженность. Наблюдается миграция населения из проблемных регионов, у населения возникают вопросы к органам власти по вопросам разрешения на проведение работ по освоению недр [82] (Bommer and, 2024). Характерной является ситуация с крупнейшим газовым месторождением Гронингем в Голландии, работы на котором были прекращены из-за техногенной сейсмичности в соответствии с «зеленой повесткой». Также вопрос установления природы сейсмичности имеет научное значение, так как методы оценки сейсмической опасности, а особенно, опасности техногенных землетрясений находятся в стадии развития и разработки [82-84]. (Petersen et al., 2016; Foulger et al., 2023; Bommer and Verdon, 2024)

Несмотря на низкую плотность населения Монголии, для нее также важны все перечисленные аспекты, поскольку причины возникновения землетрясений нужно пытаться учесть для предупреждения развития негативных последствий, в том числе экологических.

Как уже упоминалось в главе 1, в классификации техногенной сейсмичности по реакции массива на техновоздействие выделяют наведенную сейсмичность, которую разделяют на индуцированную и инициированную (триггерную) [17, 19] (Адушкин и Турунтаев, 2015; McGarr and Simpson, 1997), рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 -- Классификация техногенной сейсмичности [17] (Адушкин, Турунтаев, 2015)

Индукцированная сейсмичность возникает в ситуациях, когда изменение напряженного состояния массива вследствие антропогенного воздействия оказывается достаточным для возникновения в данном месте. Типичными примерами являются горные удары в шахтах, проявляющиеся в целиках и краевых частях массива [85-87], (He et al., 2022; Петухов, 2004; Kobylkin and Pugach, 2022). Примерами сильных горных ударов с разрушением целиков являются, например, горный удар на шахте соляном руднике Херинген в Германии 22 февраля 1958, при котором целики были разрушены на площади до 3500 тыс. квадратных метров. Сейсмическое воздействие этого горного удара было зафиксировано на расстоянии 1000 км.

Триггерная сейсмичность обусловлена высвобождением собственных энергетических запасов в геологической среде под воздействием внешних источников возмущений. В этом контексте также используются термины "природно-техногенная" [88] (Яковлев и др., 2016) и "техногенно-природная" [21] (Адушкин, 2018) сейсмичность. Некоторые сильные землетрясения, такие как Непальское землетрясение (2015) с магнитудой $M=7,8$ и глубиной гипоцентра 15-20 км, считаются техногенными. Также техногенная природа предполагается для Вэньчуаньского землетрясения (2008) с $M=8$ и глубиной гипоцентра около 20 км [18]. В горнодобывающей промышленности крупнейшим техногенным землетрясением считается Бачатское землетрясение (2013) с $M=6,1$, гипоцентр которого находился на глубине 4 км непосредственно под угольным разрезом [27].

Горно-тектонические горные удары, как сейсмические явления, занимают промежуточную позицию между индуцированными и триггерными

явлениями. Первоначально для месторождений Грузии предполагалось, что горно-тектонический удар происходит вследствие пригрузки от происходящих землетрясений. В дальнейшем их природу стали связывать с наличием тектонических полей напряжений и толчкообразным смещением крыльев тектонических нарушений [89] (Ловчиков, 1997). В зарубежной литературе такие горные удары называют ударами с механизмом fault-slip, т.е. удары со смещением. Известно, что сильные горно-тектонические удары имели гипоцентр глубже зоны ведения горных работ и сейсмическую энергию $10^6 \div 10^9$ Дж [2] (Прогноз, 1997). В любом случае горный удар сопровождается разрушением горных выработок или другим ущербом в шахте и на этом основании рассматривается как явление индуцированной сейсмичности, условия для которого созданы в результате человеческой деятельности. Поэтому, вопрос с установлением природы этих событий (техногенная/природная) обычно не стоит, за исключением специальных расследований сильных горно-тектонических ударов.

Триггерная техногенная сейсмичность проявляется с участием тектонических сил земной коры. Максимальная магнитуда триггерных техногенных землетрясений, по некоторым оценкам, может достигать максимально возможных магнитуд для данного района в связи с чем вопрос классификации таких землетрясений является очень важным. Также отнесение землетрясения к индуцированному или триггерному может влиять на оценку ответственности предприятия, ведущего горные разработки. Горные работы на территории Монголии, за исключением рудника Оюу-Толгой, еще не достигли глубин, на которых возникают горные удары. Информация по руднику Оюу-Толгой по проявлению динамических явлений закрыта. Имеются исследования геодинамического взаимодействия горных предприятий показывающие, что оно возможно на расстояниях в десятки и даже сотни километров [90].

Разделение землетрясений на естественные и техногенные рассматривается с нескольких точек зрения. Схемы, или подходы, используемые для определения того, является ли сейсмичность естественной или вызванной человеком, обычно делятся на три категории: подробные количественные физические модели, статистические и вероятностные модели, качественный подход в стиле анкеты для экспертов [91] (Dahm et al., 2012). Количественный физический анализ может дать детальную оценку, но его реализация сильно зависит от качества исходных данных, таких как детальная модель массива с разломами и физико-механическими свойствами, точная локация гипоцентров, данные о напряженном состоянии массива и др., что в

настоящий момент недоступно для условий Монголии и как показывает мировая практика, подвержены большой неопределенности [92] (Salvage et al., 2023).

Вероятностные методы основаны на анализе статистических данных, которых тоже пока недостаточно. Например, известен подход к установлению природы сейсмичности, основанный на изучении связи между интенсивностью воздействия на недра (например, закачка флюида) и сейсмичностью [93] (Keranen et al., 2013). Однако, как указано в этой работе, такая связь не всегда проявляется. К тому же для того, чтобы воспользоваться этим подходом, требуется статистически значимые выборки сейсмических событий и подробные данные об условиях эксплуатации, что на данном этапе невозможно использовать в Монголии по причинам закрытости информации и короткого периода сейсмического мониторинга в районах освоения недр.

Наиболее применимыми в текущей ситуации могут быть качественные схемы в виде вопросника (экспертный подход). Имеется мировой опыт применения этого подхода при реализации проектов, связанным с проведением работ по гидроразрыву пород (геотермальные проекты, добыча нефти, закачка отходов) [83, 92, 94, 106], но для горных предприятий его применение ограничено и данный подход нуждается в адаптации по изложенным ниже причинам.

Качественные схемы, представленные в стиле вопросника, позволяют использовать любые имеющиеся данные. Пионерной работой в области установления природы сейсмичности с использованием такого подхода, учитывающего комплекс признаков, называют работу С. Дэвиса и С. Фролиха [94] (Davis and Frohlich, 1993). В этой работе авторы для установления природы сейсмичности, связанной с добычей нефти, используют метод экспертных оценок, предлагая ответить на семь вопросов, рисунок 2.2.

Question	Earthquakes clearly not induced	Earthquakes clearly induced	I Denver, Colorado	II Painesville, Ohio
<i>Background seismicity</i>				
1 Are these events the first known earthquakes of this character in the region?	NO	YES	YES	NO
<i>Temporal correlation</i>				
2 Is there a clear correlation between injection and seismicity	NO	YES	YES	NO
<i>Spatial correlation</i>				
3a Are epicenters near wells (within 5 km)?	NO	YES	YES	YES?
3b Do some earthquakes occur at or near injection depths?	NO	YES	YES	YES?
3c If not, are there known geologic structures that may channel flow to sites of earthquakes?	NO	YES	NO?	NO?
<i>Injection practices</i>				
4a Are changes in fluid pressure at well bottoms sufficient to encourage seismicity?	NO	YES	YES	YES
4b Are changes in fluid pressure at hypocentral locations sufficient to encourage seismicity?	NO	YES	YES	NO?
Total "YES" answers	0	7	6	3

Рисунок 2.2 – Вопросник из работы Дэвиса и Фролиха [94].

Вопросы из изображенного на рисунке 2.2 Вопросника:

1. Сейсмические события такого характера впервые обнаружены в регионе?
2. Имеется ли четкая корреляция между режимом инъекции и сейсмичностью?
- 3а. Эпицентры расположены вблизи нагнетательных скважин?
- 3б. Появляются ли некоторые сейсмические события на глубинах инъекции?
- 3с. Если нет, то известны ли какие-либо геологические структуры, являющиеся каналами, связывающими скважину и места проявления сейсмичности?
- 4а. Изменение давления флюида в скважине достаточно, чтобы вызвать сейсмичность?
- 4б. Изменения давления флюида в гипоцентральной зоне достаточно, чтобы вызвать сейсмичность?

Как можно видеть, часть вопросов связана с локализацией и временем проявления сейсмичности. Пространственная и временная корреляция сейсмичности с инженерной деятельностью являются важными признаками техногенной природы сейсмичности. В некоторых работах именно эти два признака рассматриваются как достаточные для доказательства техногенной природы сейсмичности, например [21, 22, 95-97]. ([Адушкин, 2018](#), [Белов и др., 2024](#); [Opsal and Eisner, 2014](#); [Goebel et al., 2015](#); [Schoenball et al., 2015](#)).

Вопросы 3а и 3б касаются места расположения гипоцентров, а именно в районе инъекции, т.е. техногенного воздействия. Применительно к горным предприятиям это означает, что гипоцентры явлений расположены в области ведения горных работ. Уже отмечалось, что такая ситуация характерна для горных ударов. Но на этих же глубинах ведутся и взрывные работы, сейсмическое воздействие от которых может превышать магнитуду 3 и неотлично от воздействия естественного землетрясения. Поэтому вопрос о расположении гипоцентров сейсмических явлений в области техногенного воздействия теряет свою информативность, когда речь идет о горном предприятии.

Вопросы 4а и 4б касаются изменения напряженного состояния в гипоцентральной зоне. Представления о достаточно сильном (чтобы инициировать сейсмичность) изменении напряженного состояния в гипоцентральной зоне являются основным аргументом против техногенной природы сильных землетрясений с глубоким гипоцентром в промышленных

районах. Например, в работе [98] (Иващенко, 2015) прямо указывается на то, что изменения напряженного состояния на больших глубинах от инженерной деятельности слишком малы. Геомеханические модели для реализации такого подхода требуют качественных исходных данных, что невозможно пока получить для территории Монголии. К тому же такой взгляд предполагает, что земная кора находится в упругом состоянии и лишь при достаточно сильном воздействии некоторые ее части могут перейти в предельно напряженное состояние с эмиссией сейсмической энергии (возникновение сейсмичности). Многие авторы, выражая свою точку зрения пишут, что «разломы земной коры находятся в состоянии, близком к предельному» [99] (Elsworth, 2013), или «части земной коры находятся в состоянии, близком к пределу разрушения» [100] (Соболев, Пономарев, 2003). В этом случае, по мнению авторов, даже незначительные изменения напряжений могут привести к переходу разломов земной коры или ее частей в предельно напряженное состояние, что неизбежно вызовет землетрясение. Такая точка зрения должна учитывать только такие изменения напряженного состояния, которые превышают изменения от естественных источников. И.М. Петухов давал оценку изменений напряжений в результате лунно-солнечных приливов до 0,1 МПа [101] (Петухов, Батугина, 1999). Также оценку изменения напряженного состояния от естественных источников можно найти в работе Г. Фолжер с соавторами [18] (Foulger, 2018), таблица 2.1. Исходя из приводимых оценок (таблица 2.1), вывод о техногенной природе землетрясения отклоняется, если изменения напряжений в точке гипоцентра не превышают 50 КПа. В ряде случаев, чтобы обойти это ограничение, авторам приходится принимать дополнительные ограничения на используемую геодинамическую модель, в частности, о пологом падении сместителя возможного разлома, представляя его в виде плоскости [102] (Кочарян, и др., 2019).

Таблица 2.1 – Изменение напряжений под влиянием естественных источников [18] (Foulger et al., 2018)

Естественный источник	Изменение напряжений, (МПа)
Земные приливы	0,05
Статические изменения напряжений	0,03
Удаленные триггеры	0,5
Тайфуны	0,003

Вместе с тем, проявление сейсмичности, по мнению ряда ученых, указывает на то, что земная кора в этих районах находится в предельно напряженном состоянии [101, 103-105]. (Петухов, Батугина, 1991; Ломакин, 1984, Townend and Zoback, 2000). Предельно напряженное состояние, по замечанию И.М. Петухова, касается всей системы (блочная земная кора) в целом, тогда как ее отдельные участки могут находиться в упругом состоянии. Необходимо остановиться на этом вопросе немного подробнее.

Известно определение горного удара, данное проф. И.М. Петуховым: «горный удар есть хрупкое разрушение предельно напряженного участка угольного пласта, происходящее в условиях, когда скорость изменения напряженного состояния превышает скорость релаксации напряжений». Из этого определения видно, что достижение предельно напряженного состояния в некотором объеме горного массива или переход тектонического нарушения в предельно напряженное состояние (специальное предельно напряженное состояние, по терминологии Г.Л. Фисенко), является необходимым, но не достаточным условием возникновения динамического явления. Вторым условием является достижение неустойчивости за счет скорости нагружения находящегося в предельно напряженном состоянии массива.

В свете рассматриваемого вопроса важно, что в предельно напряженном состоянии находится система «слой земной коры от земной поверхности до некоторой глубины» [81] (Batugin, 2023). В этом случае создается среда для передачи воздействия, оказываемого на земную поверхность в недра, до глубины подошвы слоя предельно напряженного состояния. В этом случае, требование об изменении напряжений на глубине гипоцентра выше, чем естественные триггеры, представляется излишним для возникновения землетрясения с глубоким расположением гипоцентра. Иначе говоря, воздействия на земную поверхность может быть достаточно, чтобы произошло изменение напряженного состояния в зоне нуклеации землетрясения. Поэтому ниже условие изменения напряжений на глубинах гипоцентров не рассматривается при доказательстве техногенной природы землетрясений в районах Монголии Матад и Таван-Толгой.

Таким образом, для условий Монголии на современном этапе наибольший интерес представляют подходы, основанные на качественном анализе значимых признаков. Подход, предложенный С. Дэвисом и С. Фролихом хотя и касался только землетрясений, связанных с закачкой флюидов в недра, но остается не только популярным сам по себе, но и был расширен. Прежде всего, первоначально, в этом подходе все вопросы имели

равный вес, что очевидно, могло быть усовершенствовано. Также не было сделано различий в качестве информации по каждому из вопросов. На практике что-то известно более достоверно, а что-то менее. Также, первоначально указанный подход был ориентирован на сейсмичность, связанную с нефтедобычей, тогда как сейсмичность проявляется и для других видов инженерной деятельности, не связанных с гидроразрывом пластов. Наиболее полно эти дополнения отражены в публикациях [83, 92, 106]. (Verdon, et al., 2019; Foulger, et al., 2023; Salvage et al, 2023). В работах Д. Вердона, с соавторами [106], и Г. Фолжер, с соавторами [83], вопросам присваивается определенный вес, учитывается неопределенность информации и внимание больше уделяется корреляционным связям между сейсмичностью и инженерной деятельностью, а характеристики источников сейсмичности уходят на второй план.

В схеме [106] (Verdon et al, 2019) экспертам предлагается ответить на семь вопросов, вес которых изменяется в определенном диапазоне от отрицательных до положительных значений. Отрицательные значения присваиваются ответам при наличии мнения о естественной природе сейсмичности, положительные – при мнении о техногенной природе сейсмичности. Разброс весов достигает от -15 до +10 в зависимости от качества (степени определенности) информации. Качество информации оценивается по шкале порядка, т.е. оценочный балл каждого вопроса присваивается по качественным, предварительно заявленным, характеристикам информации как пояснено ниже. Итоговыми являются два показателя – коэффициент полноты доказательств (ESR) и коэффициент индуцированной природы землетрясения (IAR). Эти коэффициенты вычисляются по формулам:

$$ESR = (\text{общее количество баллов текущей оценки (+ и -)} / (\text{общее возможное количество баллов})) \times 100 \%$$

Общее возможное количество баллов в этом методе -- 96 (46 отрицательных и 50 положительных).

$$IAR = (\text{суммарный балл в текущей оценке}) / (\text{максимальное количество баллов с учетом имеющихся данных}) \times 100 \%$$

Коэффициент ESR характеризует полноту имеющейся информации, её определенность. Если имеется вся интересующая информация по сформулированным вопросам, $ESR = 100 \%$, что, по мнению авторов метода характеризует высокую степень доверия данным. Коэффициент IAR учитывает вес вопросов и чем он выше, тем надежнее вывод о природе землетрясения.

Авторы этой работы указывают, что представленные ими критерии и связанные с ними оценки являются их собственным мнением и выдвинуты лишь в качестве рекомендаций, чтобы проиллюстрировать практическое применение предложенного подхода. Авторы предполагают, что пользователи сами сделают выбор в отношении деталей, задаваемых вопросов, оценок, которые им присваиваются. Также авторы указывают, что возможна адаптация их предложений к другим видам промышленной деятельности, в том числе таким, как добыча полезных ископаемых. В связи с этим ниже рассмотрим предлагаемые в этой работе вопросы и рекомендуемые ответы на них применительно к условиям Монголии.

В первоначальном виде авторами работы [106] (Verdon et al., 2019) предлагалась следующая оценочная шкала:

1. Наблюдалась ли ранее (историческая или инструментальная) сейсмичность на том же участке или в том же региональном окружении?

а. В непосредственной близости от участка ранее происходили землетрясения с аналогичной интенсивностью и магнитудой: – 5.

б. Ранее землетрясения происходили в том же регионе, с аналогичной интенсивностью и магнитудой: – 2.

с. Землетрясения не происходили с подобной интенсивностью или магнитудой в пределах региона: + 5.

д. Прошлые землетрясения происходили на аналогичных глубинах пределах региона: – 3.

е. Землетрясения значительно мельче, чем все предыдущие события, которые наблюдались в регионе: + 3.

Из этого вопроса для условий Монголии не приемлемы варианты ответов d и e.

2. Есть ли совпадение по времени между возникновением сейсмических событий и промышленной деятельностью?

а. Последовательность землетрясений началась еще до начала промышленной деятельности: – 15.

б. Последовательность землетрясений началась только через значительный промежуток времени после прекращения промышленной деятельности: - 5.

с. Последовательность землетрясений началась во время промышленной деятельности: + 5.

Приемлемо для условий Монголии.

3. Коррелируют ли наблюдаемые сейсмические события по времени с деятельностью по закачке или добыче?

а. Землетрясения совпадают с промышленной деятельностью, но корреляция минимальна: – 4.

б. Существует определенная временная корреляция между сейсмичностью и промышленной активностью: + 4.

с. Существует сильная временная корреляция между сейсмичностью и промышленной активностью: + 15.

Приемлемо для условий Монголии.

4. Происходят ли события на той же глубине, что и промышленная деятельность?

а. Землетрясения не происходят на одной и той же глубине, и не существует правдоподобного механизма, с помощью которого напряжение или изменения давления могли бы передаваться на эти глубины: – 4.

б. Землетрясения не происходят на одной и той же глубине, но существуют возможные механизмы, с помощью которых напряжение или изменения давления могут передаваться на эти глубины: + 2.

с. Землетрясения происходят на той же глубине, что и промышленная деятельность: + 3.

Для условий Монголии, варианты ответов “б” и “с” с учетом представлений о существовании в земной коре слоя с предельно напряженным состоянием.

5. Существует ли пространственная привязка между сейсмическими событиями и промышленной деятельностью?

а. Локализация землетрясений имеет отдаленное отношение к промышленной деятельности, учитывая предполагаемый причинный механизм: – 10.

б. Локализация землетрясений достаточно близка к местам промышленной деятельности, учитывая предполагаемый механизм их возникновения: + 5.

с. Положение гипоцентров землетрясений меняется со временем, то эти изменения согласуются с промышленной деятельностью, например, растут радиально от скважины или смещаются в связи с началом работы новой скважины: + 10.

Приемлемо для условий Монголии.

6. Существует ли правдоподобный механизм, вызвавший эти события?

а. Не произошло значительного повышения или понижения порового давления, которое можно было правдоподобно связать с гипоцентральной позицией события: – 5.

б. Произошло некоторое изменение порового давления или пороупругого напряжения, которое можно связать с гипоцентральной позицией события: + 2.

с. Произошло значительное изменение порового давления или пороупругого напряжения, которое можно связать с гипоцентральной позицией события: + 5.

По-видимому, этот вопрос может быть трансформирован с учетом концепции предельно напряженного состояния земной коры.

7. Указывают ли исходные механизмы на механизм индуцированного события?

а. Механизмы источников соответствуют региональным стрессовым условиям: 0.

б. Механизмы источников не соответствуют региональным стрессовым условиям, но соответствуют предполагаемому причинному механизму (например, надвиговые разломы над проседающим коллектором): + 4. Можно использовать в Монголии при доступности информации.

Как видим, вопросы 6 и 7 касаются изменений напряжений на глубине гипоцентра, а вопрос 4 – относительной глубины гипоцентров. По этим вопросам, автор не может полностью согласиться с тем, что проявление сейсмичности на глубинах больших, чем ведение горных работ, является надежным свидетельством естественной тектонической природы землетрясений. Как обсуждалось в главе 1, если события происходят на той же глубине, где развивается инженерная деятельность, то это верный признак их техногенной природы. Для горных работ это, например, напрямую относится к горным ударам. Однако, во многих случаях, возникновение сейсмических событий зафиксировано глубже зоны ведения горных работ или другого вида инженерной деятельности и, по-видимому, является характерной чертой проявления триггерной сейсмичности при наличии тектонических полей напряжений. Поэтому, изменение напряжений в точке гипоцентра на величину, превышающую изменение напряжений под действием природных факторов может трактоваться как избыточное требование, если принимать во внимание упомянутую выше развивающуюся в России, США, других странах концепцию предельно напряженного состояния земной коры [101, 105, 81]. (Петухов, Батугина, 1996; Towlend and Zobak, 2000; Батугин, 2023).

В работе [83] (Foulger, 2023) экспертам предлагается ответить на девять вопросов с четырьмя возможными ответами на каждый вопрос: (а) недостаточно информации (оценка = 0), (б) информация подтверждает естественное происхождение (оценка = -1), (с) информация неоднозначна

(оценка = 0) или (d) информация подтверждает индуцированное происхождение (оценка = +1). Эксперты должны выбрать один ответ на каждый вопрос, затем вопросы взвешиваются от 10 до 100 баллов. Общая оценка может составить 360 баллов. Делается оговорка, что «неоднозначный» не следует понимать как то, что имеется частичная поддержка либо естественного, либо индуцированного происхождения, а предполагается, что данные не являются диагностическими. В отличие от схемы Д. Вердона [106] (Вердон др. (2019)), схема Г. Фолжер [83] (Фолджер др. (2023)) представляет результаты в виде цветной круговой диаграммы.

Ниже представлен вопросник из схемы [83] (Foulger, 2023), таблица 2.2.

Таблица 2.2 Вопросы для установления природы сейсмических явлений по методу из работы [83] (Foulger, 2023)

Вопрос	Весовой коэффициент
1. Началась ли последовательность СС до, во время или после промышленной деятельности?	10
2. Существует ли пространственная корреляция между СС и областями промышленной деятельности?	100
3. Существует ли пространственная корреляция между СС и вероятным объемом добычи?	100
4. Существует ли временная корреляция между СС и промышленной деятельностью?	100
5. Имеются ли свидетельства доиндустриальных землетрясений на месте возникновения СС или вблизи него?	10
6. Имеются ли свидетельства доиндустриальных землетрясений в том же объеме, что и в рассматриваемой ситуации?	10
7. Соответствуют ли механизмы очагов естественной и/или техногенной причине землетрясения?	10
8. Существуют ли другие сейсмические данные, подтверждающие естественную или техногенную причину землетрясения, например возникновение роев форшоков и афтершоков, радикальное изменение характера сейсмичности и снятие напряжения, соответствующее магнитуде землетрясения или сейсмичности?	10
9. Существуют ли другие несейсмические данные, подтверждающие естественную или вызванную причину, например, прямые эффекты зарождения землетрясения, предшествующая деформация поверхности?	10
Итого	360

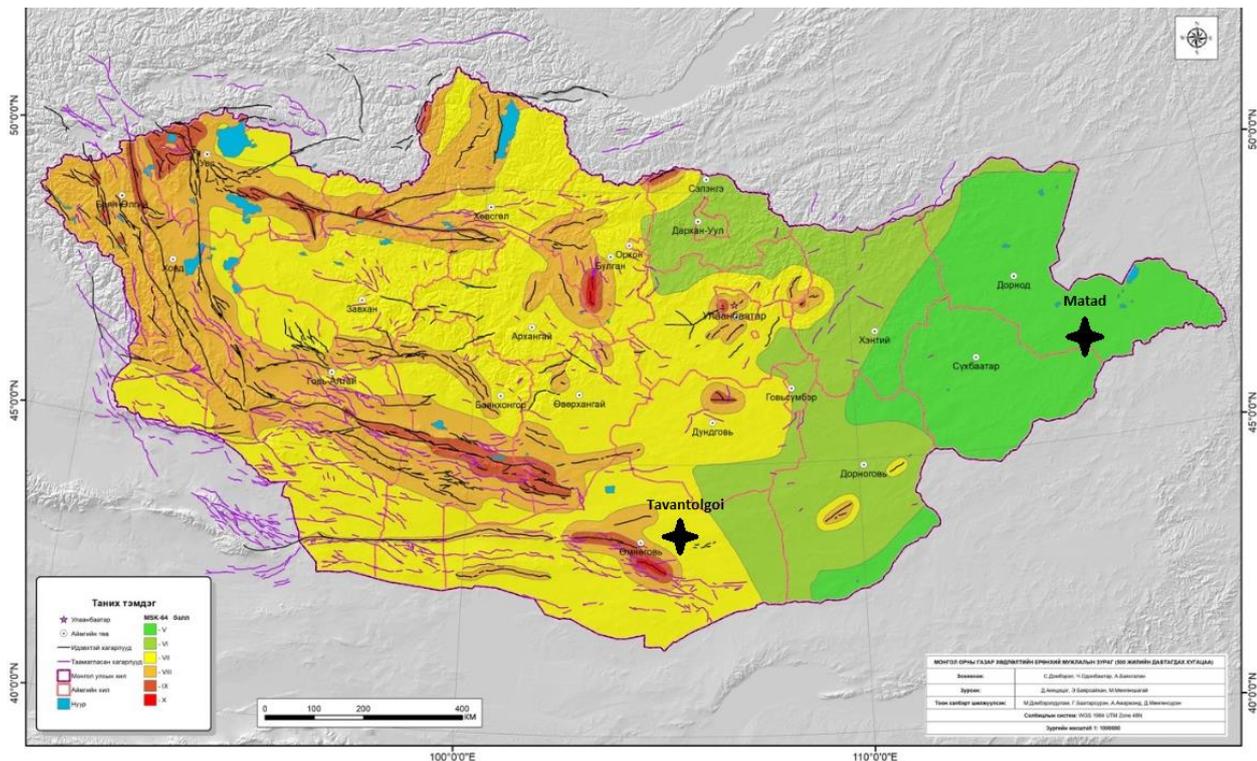
Из таблицы 2.2 видно, что суммарный вес вопросов 2, 3 и 4 (300 баллов) пятикратно превышает суммарный вес (60 баллов) остальных вопросов. На предпочтение этим вопросам о пространственной и временной корреляции сейсмичности с промышленной деятельностью указывают и сами авторы метода. Также, они указывают на хорошую сходимость результатов по всем показателям их метода и метода Д. Вердона с соавторами.

Таким образом, в настоящее время имеются разработанные схемы экспертных оценок по установлению природы сейсмичности в районах освоения недр, которые могут быть использованы для подобных ситуаций на территории Монголии.

2.2 Проявление сейсмичности в районах освоения недр на территории Монголии

Если естественная сейсмичность Монголии уже достаточно хорошо изучена [107, 108] то вопросам техногенной сейсмичности на этой территории не было уделено внимания. Ниже, на примерах горнорудного района Таван-Толгой и района нефтедобычи Матад покажем, что техногенная сейсмичность стала реальностью и новым видом геодинамической опасности для Монголии. Для доказательства техногенной природы сейсмичности в этих районах воспользуемся рассмотренным выше подходом, основанным на работах Дэвиса и Фролиха, Вердона с соавторами, Фолжер с соавторами [83, 94, 106]. Результаты нижеприведенных исследований опубликованы в работах [109,110].

Как показано на общей карте интенсивности землетрясений в Монголии (рисунок 2.3), регион Матад полностью расположен в зоне, классифицированной по интенсивности как 5 (зеленый), что указывает на умеренную сейсмическую активность. Напротив, регион Таван-Толгой расположен в зоне повышенной сейсмической активности, классифицируемой как 7 (желтый). Эти различия в интенсивности сейсмической активности в разных регионах служат важной основой для понимания основной тектонической динамики и потенциальных рисков, связанных с будущими сейсмическими событиями в Монголии.



Уровни интенсивности по шкале MSK-64: Зеленый - V, Светло-зеленый - VI, Желтый -VII, Оранжевый - VIII, Светло-красный - IX, Красный -X

Рисунок 2.3 -- Карта сейсмичности Монголии (месторождения Таван Толгой и Матад показаны черными звездами)

2.2.1 Угольное месторождение Таван-Толгой

В настоящее время угольные разрезы месторождения Таван-Толгой являются лидерами угольной промышленности Монголии. Всего на месторождении ведется добыча угля на 8 разрезах, 3 из которых крупные. На гистограмме рисунка 2.4 приведены данные о добыче угля на месторождении. Видна впечатляющая динамика – с 2,3 до 50 млн тонн.

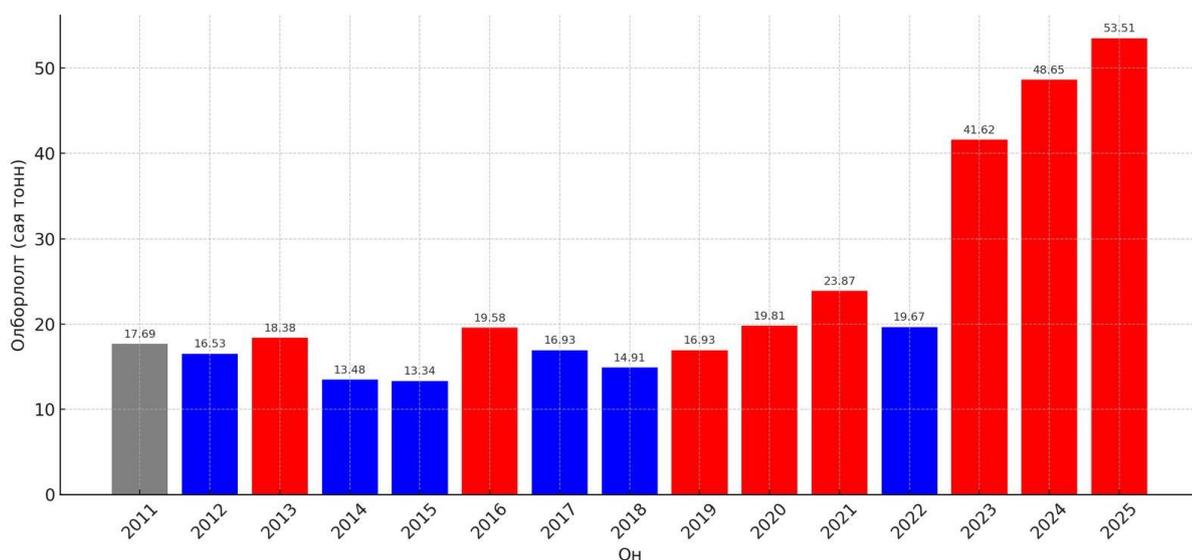


Рисунок 2.4 – Добыча угля на месторождении Таван-Толгой

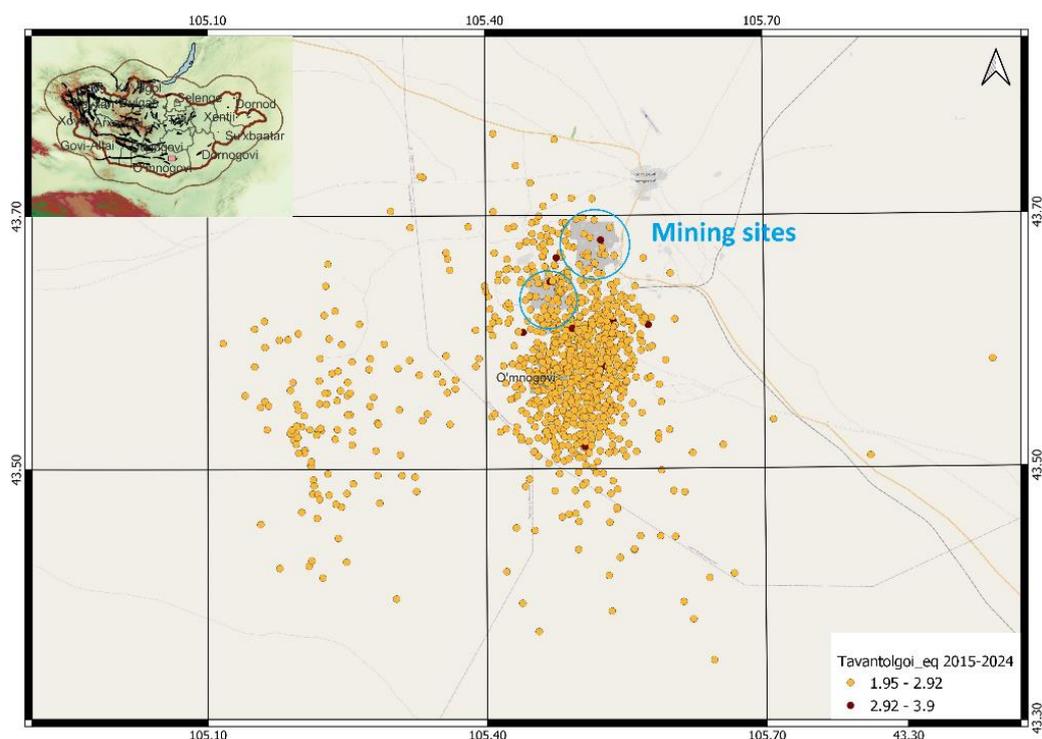
Сейсмическая активность в районе Таван-Толгой в Монголии изучалась с 1964 года по настоящее время. Исторически, в районе Таван-Толгой не было зарегистрировано значительных землетрясений. Ближайшим заметным сейсмическим событием было землетрясение магнитудой 6,0, произошедшее 27 августа 2011 года в Ханхонгор-Сум, примерно в 90 км от разреза Таван-Толгой.

Данные, представленные на рисунке 2.5, охватывают 70-километровый радиус вокруг Таван-Толгой и, по времени сейсмические события с 2015 по 2024 год. За этот период было зарегистрировано около 5 400 землетрясений, причем 9 из них превысили локальную магнитуду 3. Примечательно, что три из этих землетрясений произошли в 2024 году, хотя два были исключены из рисунка 2.5 из-за их удаленности от активной зоны [109].

Сейсмическая активность в районе угольных разрезов распространяется преимущественно с севера на юг, при этом наиболее значительные землетрясения - магнитудой 3,7 и 3,8, происходят в центральной части бассейна. Рисунок 2.5 иллюстрирует распределение этих землетрясений. Точность определения местоположения центральных эпицентров имеет погрешность от 2 до 5 километров, что объясняется ограниченным количеством близлежащих сейсмических станций. Однако очевидно, что в большинстве своем эти события не являются технологическими взрывами, иначе бы они тяготели бы к местам разработки (показано на рис. 2.5 кружками). Что касается глубины гипоцентров, то по данным Института Асторонии и Геофизики Монгольской АН она не превышает, предположительно 2-3 км. Можно сделать вывод все же из этих данных, что

глубина гипоцентров превышает глубины ведения горных работ. Для определения магнитуд использовались данные со станции, расположенной в Кханхонгор Сум, в 85 километрах от зоны активизации. Из зарегистрированных сейсмических событий 60 % были низкой интенсивности, при этом 9 землетрясений зарегистрировали магнитуду 3 или выше, рисунки 2.6 и 2.7.

Ранее, в районе Таван-Толгой, не было зафиксировано активных разломов, вызвавших сильные землетрясения. Однако геологи, составляющие карту района шахты, сообщили, хотя и неофициально, о возможном наличии двух активных разломов. Бассейн угольного разреза имеет блоковое строение, а многочисленные тектонические разломы были выявлены в ходе буровых работ. На территории угольного разреза было проведено несколько детальных исследований с целью повышения эффективности определения запасов. В настоящее время эти результаты находятся на рассмотрении в геологическом фонде и соответствующих учреждениях.



Землетрясения магнитудой 2-3 отмечены желтым цветом, а землетрясения магнитудой 3,1-3,9 - красным

Рисунок 2.5 – Сейсмичность в районе угольного разреза Таван-Толгой, представленная в виде двух серых кругов

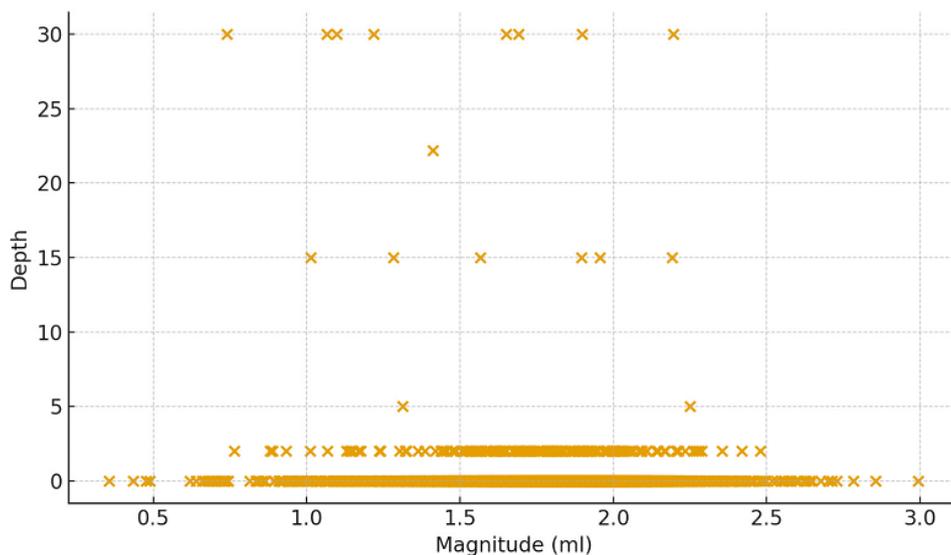


Рисунок 2.6 – Распределение магнитуд и глубин гипоцентров землетрясений в районе Таван-Толгой с 2015 по 2024 гг.

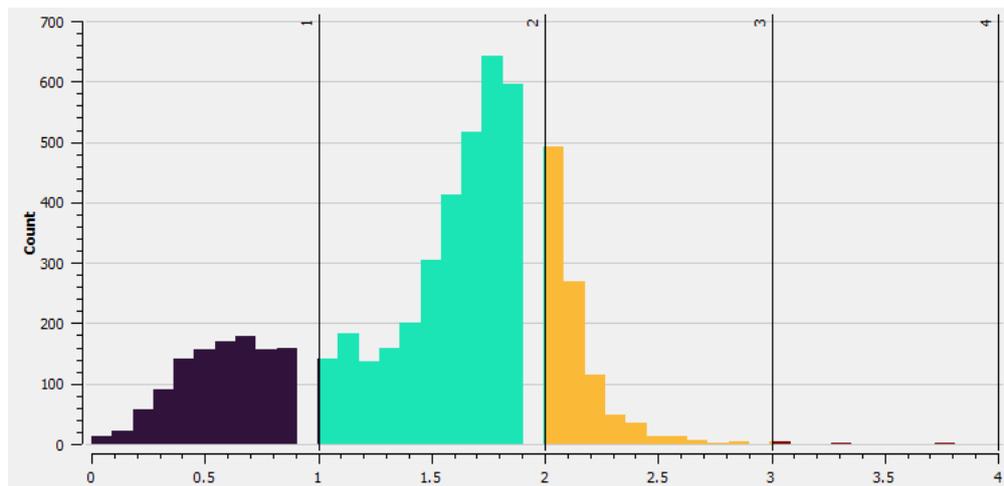


Рисунок 2.7 – Гистограмма распределения землетрясений Таван-Толгой по магнитуде от 0 до 4

На разрезах Таван-Толгой взрывные работы проводятся один раз в неделю, но более подробные данные недоступны. С учетом того, что работы ведутся на 8 разрезах, общее количество взрывов в год не превышает 500, тогда как сейсмических явлений зафиксировано в 10 раз больше. Разрешенная масса взрывчатого вещества при ведении горных работ на разрезах составляет 240 тонн. Взрывы такого количества взрывчатки могут фиксироваться как землетрясения с магнитудой до 2,5 как это видно из рис. 2.6. На рис. 2.7 показано, что в районе зафиксированы землетрясения с магнитудой до 4.

Добавим, что на рисунке 2.6 отчетливо выделяются два уровня глубин гипоцентров сейсмических событий с магнитудами до 3. Первый уровень с условно нулевой отметкой соответствует промышленным взрывам. Второй уровень находится на глубине 1,5 -1,8 км, т.е. значительно превышает глубины разработки.

2.2.2 Нефтяное месторождение Матад

Исторически сложилось так, что Восточная Монголия, особенно районы Матад и Дорнод, считались асейсмичными, без известных активных разломов. Однако недавняя сейсмическая активность в этом районе указывает на заметные изменения в его сейсмическом поведении. В период с 2019 по 2021 год было зарегистрировано 11 землетрясений с локальной магнитудой 4 или выше ($M_L \geq 4$), причем два из них превысили магнитуду 5, рисунки 2.8 и 2.9. Этот рост сейсмичности совпадает с началом активной стимуляции скважин при нефтедобывающей деятельности в регионе, что позволяет предположить потенциальную связь между этими двумя явлениями.

Предварительные данные показывают, что эти землетрясения сосредоточены в определенных зонах на территории нефтедобычи, что указывает на возможную взаимосвязь между сейсмической активностью и промышленными операциями, такими как гидроразрыв пласта или закачка вод, связанных с добычей нефти. Данные, представленные на рисунке 2.10, охватывают 200-километровый радиус от эпицентра крупнейшего землетрясения, произошедшего 4 июля 2020 года, и охватывают сейсмические события с 2015 по 2024 год, всего включая около 3 500 землетрясений.

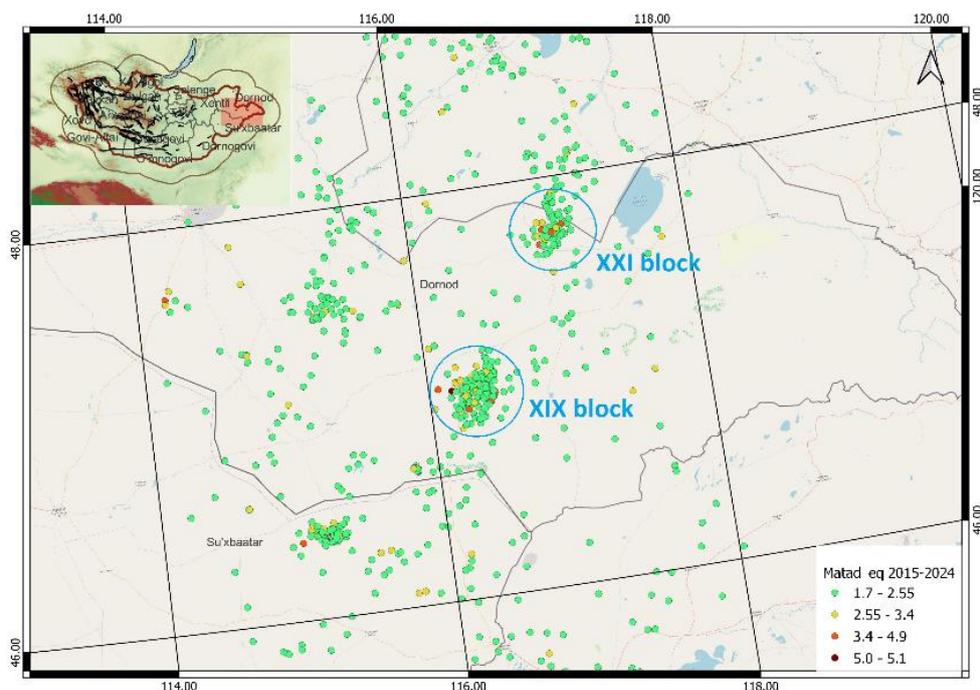


Рисунок 2.8 – Сейсмичность в районе месторождения Матад (блок XXI и блок XIX)

Землетрясения магнитудой $2,1 \div 3$ выделены зеленым цветом, $3,1 \div 4$ - оранжевым, $4,1 \div 5,1$ - темно-красным.

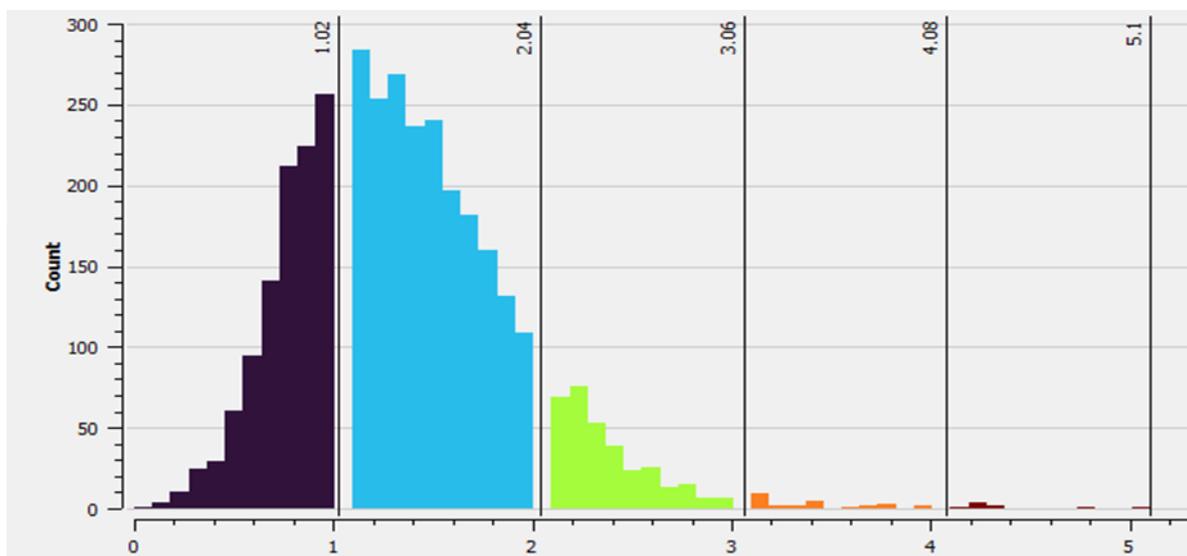


Рисунок 2.9 – Гистограмма землетрясений на месторождении Матад по магнитуде



Рисунок 2.10 – Магнитуда землетрясений в период с 2015 по 2024 гг. в районе Матад

Два землетрясения с локальными магнитудами более 5 были расположены в XIX и XX эксплуатационных блоках, как показано на рисунке 2.11. Механизм очага землетрясения в блоке XIX был рассчитан в рамках проекта Global Centroid Moment Tensor (GCMT) и показан на рисунке 2.12.

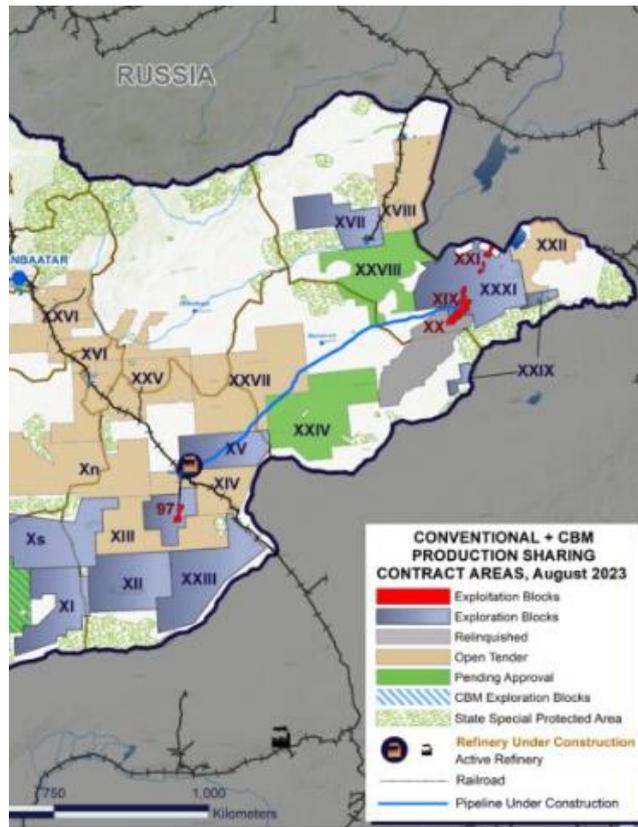


Рисунок 2.11 – Районы действия контрактов о разделе продукции по традиционному и МД вокруг Матада, где расположены эксплуатационные блоки XIX, XX, XXI (красные)

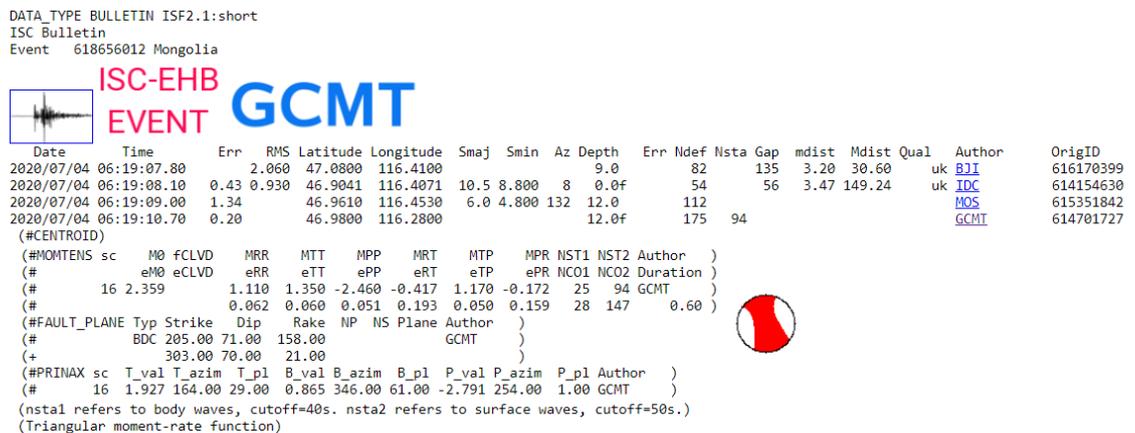


Рисунок 2.12 – Механизм очага сильнейшего землетрясения в Матаде

Из рисунка 2.12 видно, что это взбросовый механизм под действием горизонтального сжатия. Аналогичные механизмы имеют и техногенные землетрясения смешанной природно-техногенной природы (триггеры). Предполагается, что горные или нефтедобывающие работы локально изменяют условия напряженного состояния плоскостей разлома, что вызывает

смещение вдоль него под действием региональных тектонических сил [111] (Батугин, 2021).

2.3 Доказательства возникновения техногенной сейсмичности на территории Монголии

2.3.1 Оценка природы (техногенная / естественная) сейсмичности района Таван-Толгой

Используем упомянутые выше подходы к оценке природы сейсмичности в районе Таван-Толгой.

В таблице 2.3 приведены оценки для района Таван-Толгой согласно вопроснику из работы [94].

Таблица 2.3 – Оценка природы сейсмических событий в районах Таван-Тогой и Матад на основе вопросника из работы [94] (Devis and Frohlich, 1993)

Вопросы	Оценка для условий разреза Таван-Тогой
1. Сейсмические события такого характера впервые обнаружены в регионе?	Да
2. Имеется ли четкая корреляция между режимом воздействия на недра и сейсмичностью?	Да, события возникли после начала горных работ
3. Эпицентры расположены вблизи мест воздействия?	Да
4. Появляются ли некоторые сейсмические события на глубинах ведения работ?	Нет данных
5. Если нет, то известны ли какие-либо геологические структуры, являющиеся каналами, связывающими скважину и места проявления сейсмичности?	Не известно
6. Изменение давления флюида в скважине достаточно, чтобы вызвать сейсмичность?	Не рассматривается

7. Изменения давления флюида в гипоцентральной зоне достаточно, чтобы вызвать сейсмичность	Не рассматривается
--	--------------------

Как видим, набирается только 3-4 ответа в пользу техногенной природы сейсмичности. Формально, в соответствии с используемым методом, этого недостаточно, чтобы сделать однозначный вывод, но, очевидно, значимость ответов не одинакова. Здравый смысл все же подталкивает к тому, что основными вопросами являются вопросы о временной и пространственной корреляции сейсмических событий с промышленной деятельностью, что хорошо выражено для условий Таван-Толгой. Как уже указывалось, по мнению многих авторов, сильная временная корреляция между сейсмичностью и промышленной деятельностью представляет собой убедительное доказательство того, что эти события индуцированы.

Дадим также оценку природе сейсмичности с учетом веса вопросов по методу из работы [106] (Verdon at al., 2019). Результаты представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Оценка природы сейсмических событий в районах Таван-Тогой на основе вопросника из работы [106] (Verdon at al., 2019)

Вопрос	Оценка веса	Оценка для условий Таван-Тогой
Имела ли место (историческая или инструментальная) сейсмичность в том же месте или в тех же региональных условиях?	от -5 до +5	+2
2. Есть ли временное совпадение между началом событий и промышленной деятельностью?	от -15 до +5	+5
3. Связаны ли наблюдаемые сейсмические события по времени с	от -4 до +15	+10

деятельностью по закачке и/или добыче?		
4. Происходят ли события на той же глубине, что и действия?	от -4 до +3	0
5. Существует ли пространственное соседство между событиями и видами деятельности?	от -10 до +10	+10
6. Существует ли вероятный механизм, который мог стать причиной событий?	от -5 до +5	+5
7. Указывают ли исходные механизмы на механизм индуцированного события?	от 0 до +4	0
Общая оценка	96, (46 (-) и 50 (+))	32

На вопрос 1 дается ответ +2, так как сведений об исторической или инструментально зарегистрированной сейсмичности в районе угольного разреза не имеется. Но все же, поскольку наблюдения за сейсмичностью в этом районе начались только в 1964 г. и точность определения координат эпицентров была не высокая, в ответе выбрано значение, меньше максимального. Оценка достоверности выбрана 50%, т.е. максимально количество баллов, которое можно принять для оценки ESR составляет -2,5 и +2,5.

На вопрос 2 ответ «да» весьма убедительный, так как сейсмичность в этом районе была зафиксирована в связи с добычей угля на разрезах. Оценка для ESR составляет -15 и +5.

То же относится и к вопросу 3. Горные работы ведутся непрерывно, также непрерывно происходят сейсмические события в районе угольного разреза. Значение выбрано несколько ниже максимального, так как установить все же связь между каждым отдельным событием и ведением горных операций не представляется возможным. Оценка для ESR (75%) составляет -3 и +11,25

Вопрос 4 о соответствии глубин гипоцентров глубине ведения горных работ не рассматривается, так как практикой установлено, что гипоцентры сейсмических явлений на горных предприятиях часто располагаются глубже зоны ведения горных работ и имеются теоретические объяснения этого явления. ESR не оценивается.

По вопросу 5 выбрана максимальная оценка +10, так как сейсмические события происходят непосредственно на участках ведения горных работ. ESR -10 и +10

Вопрос 6, возможно, предполагает некоторые расчеты и анализ механизма сейсмических событий, но с учетом представлений о предельно напряженном состоянии верхней части земной коры на него дан положительный ответ +5. ESR -5 и +5.

По вопросу 7 информация отсутствует. ESR не оценивается.

Таким образом, общий итог оценки составляет +31 из 45 возможных при достоверности оценки -35,5 и 33,75. Оценим значения коэффициента ESR.

Получим:

$$ESR = (35,5+33,75) / 96 \times 100 \% = 70 \%$$

Т.е. получаем по методу Д.Вердона, что полнота данных 70%.

Оценим теперь значение коэффициента IAR (коэффициент индуцированной природы землетрясения):

$$IAR = (\text{суммарный балл в текущей оценке}) / (\text{максимальное количество баллов с учетом имеющихся данных}) \times 100 \% = 32 / 33,75 \times 100 \% = 95\%$$

Итого, при полноте данных 70% получаем, что вывод о техногенной природе землетрясения в районе месторождения Таван-Тогой верен на 95%.

Дадим также оценку на основе подхода, предложенного в [83] (Foulger et al., 2023), таблица 2.5.

Таблица 2.5 – Оценка природы сейсмических событий (СС) в районе угольного разреза Таван-Толгой на основе вопросника из работы [83] (Foulger et al., 2023)

Вопрос	Весовой коэффициент	Оценка для района Таван-Тогой

1. Началась ли последовательность СС до, во время или после промышленной деятельности?	10	5
2. Существует ли пространственная корреляция между СС и областями промышленной деятельности?	100	100
3. Существует ли пространственная корреляция между СС и вероятным объемом добычи?	100	100
4. Существует ли временная корреляция между СС и промышленной деятельностью?	100	100
5. Имеются ли свидетельства доиндустриальных землетрясений на месте возникновения СС или вблизи него?	10	5
6. Имеются ли свидетельства доиндустриальных землетрясений в том же объеме, что и в рассматриваемой ситуации?	10	0
7. Соответствуют ли механизмы очагов естественной и/ или техногенной причине землетрясения?	10	0
8. Существуют ли другие сейсмические данные, подтверждающие естественную или техногенную причину землетрясения, например, возникновение роев форшоков и афтершоков, радикальное изменение характера сейсмичности и снятие напряжения, соответствующее магнитуде землетрясения или сейсмичности?	10	10

9. Существуют ли другие несейсмические данные, подтверждающие естественную или вызванную причину, например, прямые эффекты зарождения землетрясения, предшествующая деформация поверхности?	10	5
Итого	360	325

По первому вопросу имеется некоторая неопределенность, но все же сейсмичность в районе была отмечена в период разработки месторождения. Выбрано среднее значение с учетом неопределенности.

По второму вопросу существует полная определенность и высокая надежность данных с учетом отбраковки промышленных взрывов. Выбрано максимальное значение.

По третьему вопросу также существует определенность, как это видно из рисунка 2.5.

По четвертому вопросу дана максимальная оценка, так как процесс добычи постоянно сопровождается развитием сейсмичности, рисунок 2.6.

Как уже указывалось, исторически в районе Таван-Толгой не было зарегистрировано значительных землетрясений и единственным ближайшим заметным сейсмическим событием было землетрясение магнитудой 6,0, произошедшее 27 августа 2011 года в Ханхонгор-Сум, примерно в 90 км от рудника Таван-Толгой. Поэтому, по вопросу 5 выбрана середина интервала.

По вопросу 6 данные отсутствуют, выбрана нижняя граница интервала.

По механизму очагов информация ограничена, имеется только одно определение для района Матад, был взбросовый механизм очага землетрясения. По опыту других регионов мира, в частности, Кузбасса, триггерные землетрясения тоже имеют взбросовый механизм, но только одной аналогии здесь недостаточно, т.к. естественные землетрясения могут иметь любой механизм. Поэтому, по вопросу 7 автор считает, что информации недостаточно и выбрана нижняя граница диапазона (0).

Существуют рои сейсмической активности на некотором удалении от места ведения горных работ, что является важным признаком природно-техногенной сейсмичности, отмечаемой в других горнопромышленных районах, например, в Кузбассе. Можно также сказать, что произошло радикальное изменение характера сейсмичности в районе, возникло несколько

мест ее активизации, рисунок 2.5. Поэтому, по вопросу 8 дана максимальная оценка.

По вопросу 9 автор выбрал середину интервала, так как, как показывают исследования, на любом месторождении выделяются несколько границ тектонических блоков, выраженных в современном рельефе земной поверхности.

По данным таблицы 2.5 построена круговая диаграмма, отражающая решение о природе сейсмичности в районе разреза Таван-Толгой, рисунок 2.13. Из рисунка видно, что вывод о техногенной природе сейсмичности здесь еще более определенный.

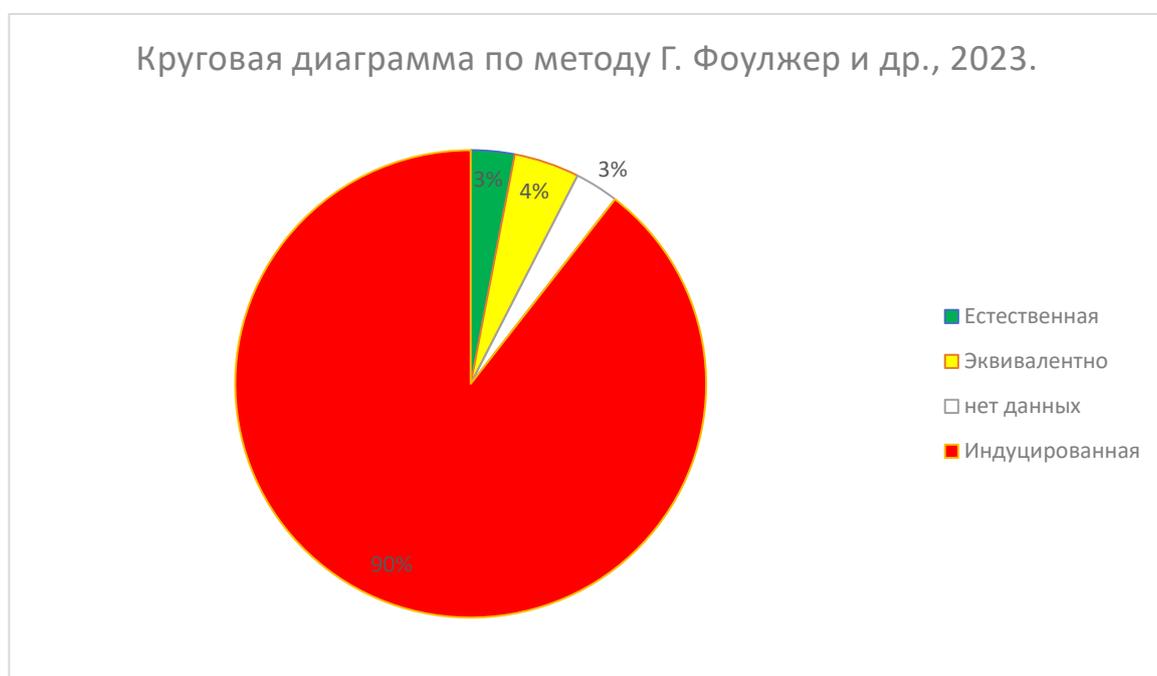


Рисунок 2.13 – Круговая диаграмма, отражающая решение о природе сейсмичности по методу Г. Фулжер в районе угольного разреза Таван-Толгой

Известно, что одной из трудностей анализа сейсмичности вблизи угольных разрезов является необходимость различения промышленных взрывов и других сейсмических событий. Исследователи используют, например, для анализа только сейсмические события, произошедшие в ночное время. В случае для разреза Таван-Толгой отчетливо выделяются два максимума глубин сейсмических событий – условно на отметке «0», т.е. в области ведения горных работ (промышленные взрывы) и на отметках -1,5-1,8 км., рис. 2.6, что автор интерпретирует как индуцированную или триггерную сейсмичность (по классификации В.В. Адушкина - С.Б. Турунтаева).

Небольшое количество экстремальных значений глубин гипоцентров (5-30 км) автор рассматривает как явные ошибки, поскольку при существующей системе сейсмологического мониторинга глубина гипоцентра в 30 км сейсмического события с магнитудой менее 1 не может быть столь достоверно определена.

2.3.2 Оценка природы (техногенная/ естественная) сейсмичности района Матад

Как указывалось в подразделе 2.2.2, имеется пространственная и временная корреляция проявления сейсмичности с добычей нефти в районе месторождения Матад. На рис. 2.14 представлена гистограмма распределения сейсмических явлений в районе месторождения и динамики добычи нефти. Как можно видеть, до 2018 г. наблюдается хорошая корреляция между объемом добычи нефти и сейсмичностью: до 2015 г. рост нефтедобычи сопровождается ростом сейсмической активности. Добыча начинает снижаться с 2016 г. и сейсмическая активность идет на снижение с 2015 г. Точными данными мы не располагаем, но предположительно с 2019-2020 гг. на месторождении активно начинают использовать методы стимуляции скважин (гидроразрыв) на фоне падения нефтедобычи. С этого времени сейсмическая активность вновь возрастает и затем идет на снижение вместе с объемами добычи.

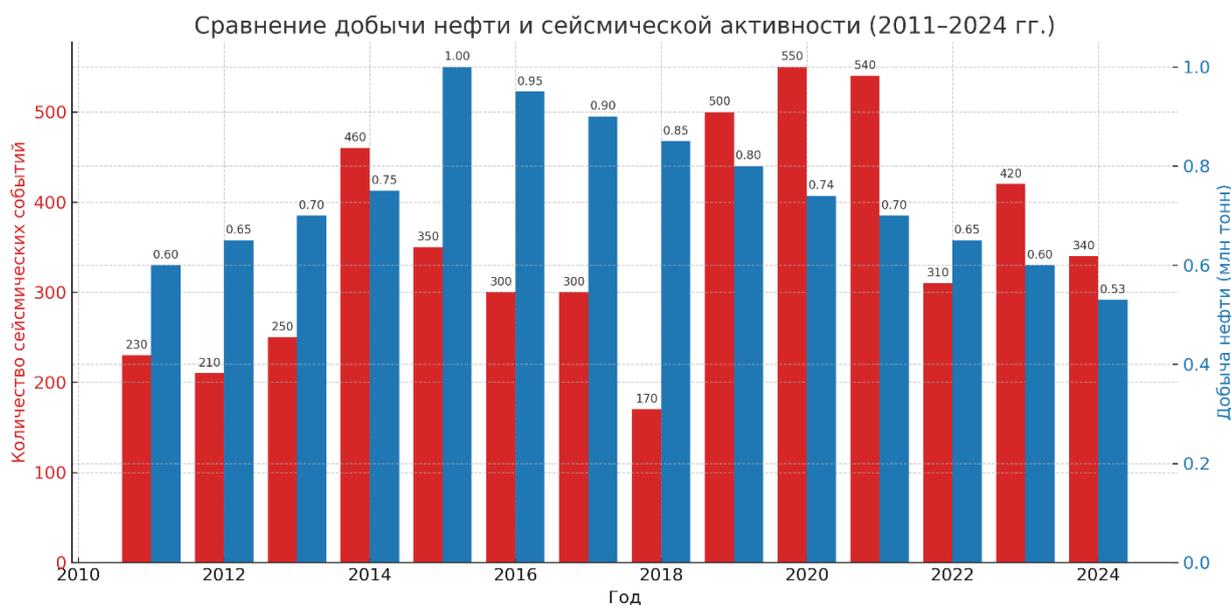


Рисунок 2.14 – Добыча нефти и сейсмичность на месторождении Матад
Формально, такая корреляция уже может быть принята как доказательство техногенной природы сейсмичности, однако, рассмотрим более полную процедуру такой оценки.

В таблице 2.6 представлены оценки согласно методу из работы [94] (Devis and Frohlich, 1993).

Таблица 2.6 – Оценка природы сейсмических событий в районах месторождения Матад на основе вопросника из работы [94] (Devis and Frohlich 1993)

Вопросы	Оценка для условий нефтяного месторождения Матад
1. Сейсмические события такого характера впервые обнаружены в регионе?	Да
2. Имеется ли четкая корреляция между режимом воздействия на недра и сейсмичностью?	Да, события возникли после начала нефтедобычи
3. Эпицентры расположены вблизи мест воздействия?	Да
4. Появляются ли некоторые сейсмические события на глубинах ведения работ?	Нет данных
5. Если нет, то известны ли какие-либо геологические структуры, являющиеся каналами, связывающими скважину и места проявления сейсмичности?	Предположительно, имеются два разлома
6. Изменение давления флюида в скважине достаточно, чтобы вызвать сейсмичность?	Не рассматривается
7. Изменения давления флюида в гипоцентральной зоне достаточно, чтобы вызвать сейсмичность	Не рассматривается

Здесь, как и в случае с месторождением Таван-Толгой, набирается только 3 ÷ 4 ответа в пользу техногенной природы сейсмичности. Формально, в соответствии с используемым методом, этого недостаточно, чтобы сделать однозначный вывод, но, очевидно, здесь не учитывается значимость ответов и представительность информации.

Дадим оценку с учетом веса вопросов по методу из работы [106] (Verdon at al., 2019). Результаты представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Оценка природы сейсмических событий в районе Матад на основе вопросника из работы [106] (Verdon at al., 2019)

Вопрос	Оценка веса	Оценка для условий Матад
1. Имела ли место (историческая или инструментальная) сейсмичность в том же месте или в тех же региональных условиях?	от -5 до +5	+1
2. Есть ли временное совпадение между началом событий и промышленной деятельностью?	от -15 до +5	+5
3. Связаны ли наблюдаемые сейсмические события по времени с деятельностью по закачке и/или добыче?	от -4 до +15	+10
4. Происходят ли события на той же глубине, что и действия?	от -4 до +3	0
5. Существует ли пространственное соседство между событиями и видами деятельности?	от -10 до +10	+10
6. Существует ли вероятный механизм, который мог стать причиной событий?	от -5 до +5	+5
7. Указывают ли исходные механизмы на	от 0 до +4	+2

механизм индуцированного события?		
Общая оценка	от - до +45	+32

На вопрос 1 дается ответ +2, так как сведений об исторической или инструментально зарегистрированной сейсмичности в районе угольного разреза не достаточно. Но все же, в отличие от района Таван-Голгой, детальные наблюдения за сейсмичностью в этом районе начались намного позже, в 2019 году, оценка достоверности выбрана 25%, т.е. максимально количество баллов, которое можно принять для оценки ESR составляет -1,25 и +1,25.

На вопрос 2 ответ «да» весьма убедительный, так как сейсмичность в этом районе была зафиксирована в связи с добычей нефти на месторождении. Оценка для ESR составляет -15 и +5.

На вопрос 3 значение ответа выбрано несколько ниже максимального, так как установить все же связь между каждым отдельным событием и ведением горных операций не представляется возможным. Оценка для ESR (75%) составляет -3 и +11,25

Вопрос 4 о глубине гипоцентров не рассматривается, так как данные отсутствуют. ESR не оценивается.

По вопросу 5 выбрана максимальная оценка +10, так как сейсмические события происходят непосредственно на участках ведения горных работ. ESR -10 и +10

Вопрос 6, возможно, предполагает некоторые расчеты и анализ механизма сейсмических событий, но с учетом представлений о предельно напряженном состоянии верхней части земной коры на него дан положительный ответ +5; ESR -5 и +5.

По вопросу 7 – пока есть данные только по одному из событий. По механизму, это взброс с горизонтально ориентированной осью максимального сжатия по направлению ЮЗ-СВ. Такой механизм характерен как для природных (тектонических) землетрясений, так и триггерных, включая даже сильные горные удары. Выбрана достоверность 50%; ESR 0 и +2,5.

Таким образом, общий итог оценки составляет +33 из 45 возможных при достоверности оценки -34,25 и +35. Оценим значения коэффициента ESR

Получим:

$$ESR = (34,25+35) / 96 \times 100 \% = 72 \%$$

Т.е. получаем по методу Д.Вердона, что полнота данных 72%.

Оценим теперь значения коэффициента IAR (коэффициент индуцированной природы землетрясения).

$IAR = (\text{суммарный балл в текущей оценке}) / (\text{максимальное количество баллов с учетом имеющихся данных}) \times 100 \% = 33 / 35 \times 100 \% = 94 \%.$

Итого, при полноте данных 72% получаем, что вывод о техногенной природе землетрясения в районе месторождения Матад верен на 94%.

Как видим, и для района Матад с учетом веса вопросов ответ о техногенной природе сейсмичности получается положительный. Такой же результат получаем и по методу из работы [83] (Foulger et al., 2023), таблица 2.8 и рисунок 2.15.

Таблица 2.8 – Оценка природы сейсмических событий (СС) в районе Матад на основе вопросника из работы [83] (Foulger et al., 2023)

Вопрос	Весовой коэффициент	Оценка для района Матад
1. Началась ли последовательность СС до, во время или после промышленной деятельности?	10	10
2. Существует ли пространственная корреляция между СС и областями промышленной деятельности?	100	100
3. Существует ли пространственная корреляция между СС и вероятным объемом добычи?	100	100
4. Существует ли временная корреляция между СС и промышленной деятельностью?	100	100
5. Имеются ли свидетельства доиндустриальных землетрясений на	10	5

месте возникновения СС или вблизи него?		
6. Имеются ли свидетельства доиндустриальных землетрясений в том же объеме, что и в рассматриваемой ситуации?	10	0
7. Соответствуют ли механизмы очагов естественной и/ или техногенной причине землетрясения?	10	5
8. Существуют ли другие сейсмические данные, подтверждающие естественную или техногенную причину землетрясения, например, возникновение роев форшоков и афтершоков, радикальное изменение характера сейсмичности и снятие напряжения, соответствующее магнитуде землетрясения или сейсмичности?	10	10
9. Существуют ли другие несейсмические данные, подтверждающие естественную или вызванную причину, например, прямые эффекты зарождения землетрясения, предшествующая деформация поверхности?	10	5
Итого	360	335

По первому вопросу имеется некоторая неопределенность, но все же сейсмичность в районе была отмечена в период разработки месторождения. Выбрано среднее значение с учетом неопределенности.

По второму вопросу существует полная определенность и высокая надежность данных. Выбрано максимальное значение.

По третьему вопросу также существует определенность, как это видно из рисунка 2.8.

По четвертому вопросу дана максимальная оценка, так как процесс добычи постоянно сопровождается развитием сейсмичности, рисунок 2.9.

Как уже указывалось, исторически в районе Таван-Толгой не было зарегистрировано значительных землетрясений, и единственным ближайшим заметным сейсмическим событием было землетрясение магнитудой 6,0, произошедшее 27 августа 2011 года в Ханхонгор-Сум, примерно в 90 км от рудника Таван-Толгой. Поэтому, по вопросу 5 выбрана середина интервала.

По вопросу 6 данные отсутствуют, выбрана нижняя граница интервала.

По механизму очагов информация ограничена, имеется только одно определение для района Матад, был взбросовый механизм очага землетрясения. По опыту других регионов мира, в частности, Кузбасса, триггерные землетрясения тоже имеют взбросовый механизм, но только одной аналогии здесь недостаточно, т.к. естественные землетрясения могут иметь любой механизм. Поэтому по вопросу 7 автор считает, что информации недостаточно и выбрана нижняя граница диапазона (0).

Существуют рои сейсмической активности на некотором удалении от места ведения горных работ, что является важным признаком природно-техногенной сейсмичности, отмечаемой в других горнопромышленных районах, например, в Кузбассе. Можно также сказать, что произошло радикальное изменение характера сейсмичности в районе, возникло несколько мест ее активизации, рисунок 2.5. Поэтому, по вопросу 8 дана максимальная оценка.

По вопросу 9 автор выбрал середину интервала, так как, как показывают исследования, на любом месторождении выделяются несколько границ тектонических блоков, выраженных в современном рельефе земной поверхности.

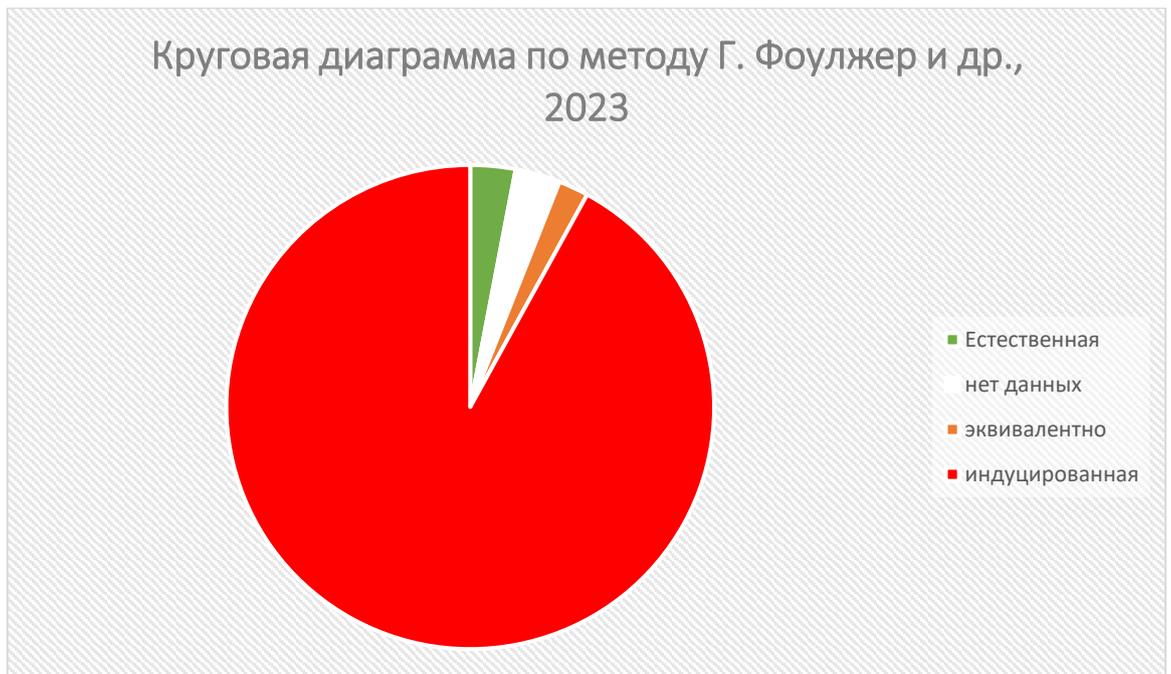


Рисунок 2.15 – Круговая диаграмма, отражающая решение о природе сейсмичности по методу Г. Фоулжер в районе Матад

Таким образом, имеются убедительные доказательства того, что техногенная сейсмичность стала реальностью для Монголии. С учетом опыта других стран следует рассматривать развитие техногенной сейсмичности при освоении недр как новый для Монголии вид геодинамической и экологической опасности. В связи с этим встает задача оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения для регулирования возможного воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду.

Вывод по главе 2

Исследована природа сейсмических явлений в районах освоения недр на территории Монголии. На примерах районов Таван-Толгой и Матад доказано, что возникновение сейсмических явлений в районах этих месторождений связано с процессом их эксплуатации, т.е техногенная сейсмичность стала реальностью для Монголии. На современной этапе развития промышленности Монголии следует рассматривать техногенную сейсмичность как новый для Монголии вид геодинамической опасности, оказывающий влияние на окружающую среду.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЙ И МАКСИМАЛЬНО ОЖИДАЕМОЙ МАГНИТУДЫ ТЕХНОГЕННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ

В области сейсмологии достаточно глубоко разработаны подходы к оценке максимально возможной магнитуды (M_{max}) для природных (тектонических) землетрясений, тогда как оценка M_{max} техногенных землетрясений долгое время оставалась в тени. Методы оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения получили развитие в мире лишь в последние полтора десятилетия, чему способствовало развитие так называемой зеленой повестки и стремление компаний к повышению своего имиджа в области безопасности и экологии. Иначе говоря, вопрос о полноценной оценке опасности наведенной сейсмичности вышел на повестку дня лишь в связи с повышением внимания общественности к вопросам сохранения благоприятной окружающей среды и снижения социальной напряженности, что еще раз указывает на то, что геодинамическая опасность признается в обществе как часть экологической опасности. В этой главе изложен подход к оценке максимально возможной и ожидаемой магнитуд техногенного землетрясения на основе концепции предельно напряженного состояния земной коры и показана возможность применения этого подхода для современных условий Монголии. Автор отдает себе отчет, что оценки M_{max} для техногенной сейсмичности могут иметь далеко идущие последствия не только с экологической точки зрения, но и с точки зрения восприятия общественностью и регулирующими органами. Поэтому, учитывая сложность проблемы, даваемые ниже оценки носят пока предварительный характер, выполнены для территории Монголии впервые и преследуют цель создания научного задела по этому вопросу и привлечения к нему более широкого внимания.

3.1 Анализ подходов к оценке максимально возможной магнитуды тектонического землетрясения

Оценка максимально возможной магнитуды землетрясения M_{max} является важной задачей сейсмологии [112-114]. Для оценки M_{max} используют статистические данные по проявлению сейсмичности в регионе (графики повторяемости), метод сеймотектонических аналогий, методы,

основанные на установленной статистической связи размеров очага землетрясения и магнитуды, например, [114]. Как известно, на территории Монголии происходили землетрясения с магнитудой $M \geq 8$. Исходя из методологии ОСР-97, при недостатке статистических данных по отдельным районам принимается, что проявление максимального землетрясения равновероятно в любой точке рассматриваемой территории, что актуально для Монголии, так как территория изучена с различной степенью детальности. Одновременно такой подход обладает определенным недостатком из-за возможности переоценки опасности.

По методу сеймотектонических аналогий выделяют однотипные геодинамические структуры и по известным статистическим данным оценивают M_{max} для новых участков.

Наиболее развиты методы оценки M_{max} на основе корреляционных зависимостей M_{max} от протяженности L (км, см) сейсмогенерирующих разломов (зон ВОЗ), длины активного участка разлома L (км, см), мощности сейсмоактивного слоя H (км):

$$M = a + b \lg(L; H). \quad (3.1)$$

Имеется ввиду, что коэффициенты a и b в зависимостях типа (3.1) установлены эмпирическим путем или такая возможность имеется.

Как известно, под сейсмоактивным слоем понимают некий слой в земной коре, в пределах которого в основном фиксируется сейсмичность, рисунок 3.1 [115]. (McGarr, 1991).

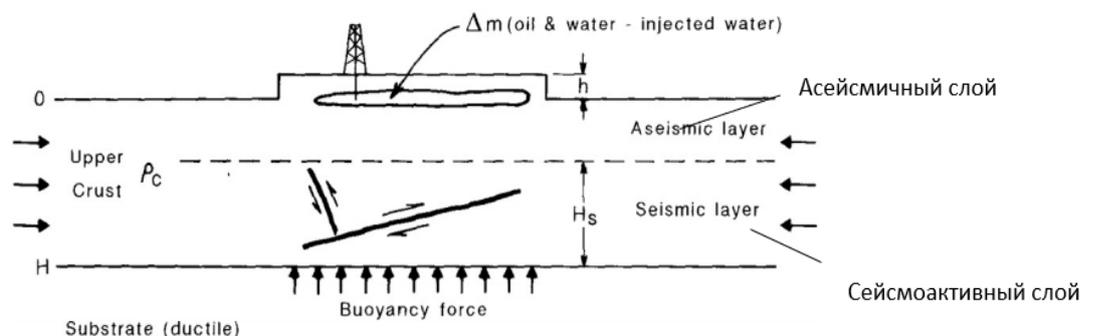


Рисунок 3.1 – Схема расположения сейсмоактивного слоя в земной коре по материалам работы [115]. (McGarr, 1991)

В основе предположения о существовании сейсмоактивного слоя лежит распределение гипоцентров землетрясений по глубинам, качественно совпадающее по многим сейсмоактивным районам мира, рисунок 3.2.

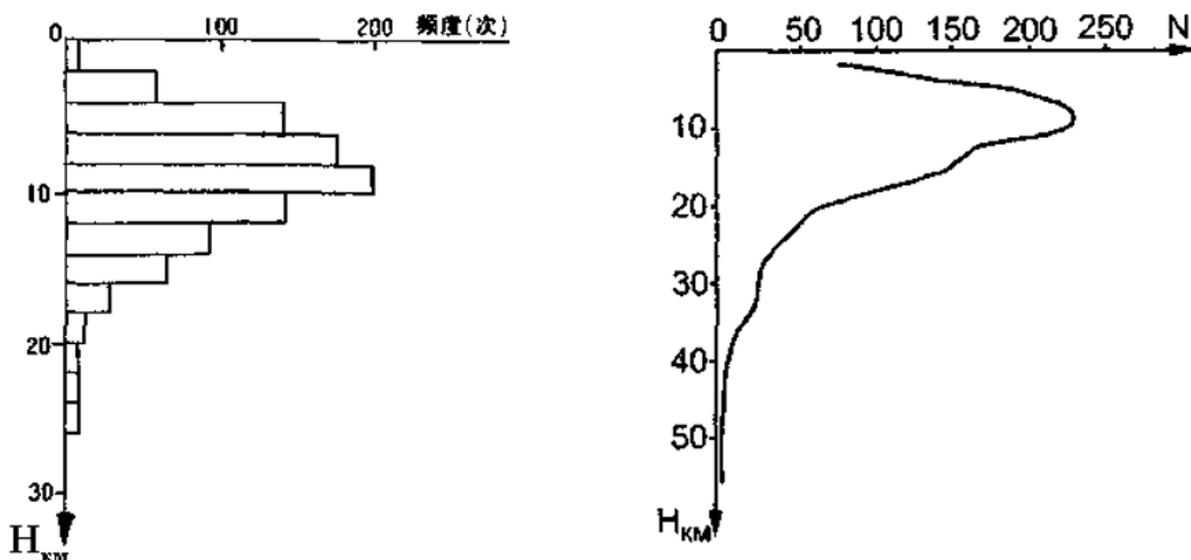


Рисунок 3.2 – Распределение гипоцентров землетрясений по глубинам двух сейсмоактивных районов мира [35] (Батугин, 2021)

Предполагается, что этот слой, называемый также сейсмогенерирующим, залегает на средней глубине 10 км. Относительно природы этого слоя высказаны предположения, что его мощность тесно связана с прочностью земной коры и фазово-физическими переходами свойств пород на таких глубинах [116] (Ito, 1999). Согласно концепции предельно напряженного состояния земной коры, сейсмичность – основной признак достижения массивом предельно напряженного состояния, поэтому в работе [35] (Батугин, 2021) принято, что мощность слоя предельно напряженного состояния земной коры измеряется от земной поверхности до глубин проявления сейсмичности. Максимальная глубина проявления сейсмичности соответствует нижней границе (подошве) сейсмоактивного слоя. В связи с этим сейсмоактивный слой является лишь нижней частью слоя предельно напряженного состояния. Мощность этого слоя может быть индикатором напряженного состояния и служить для оценки максимально возможной магнитуды как естественных, так и техногенных землетрясений, что и использовано в работе с участием автора [117] (Батугин и др., патент, 2024).

3.2 Анализ подходов к оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения и их применимости для условий Монголии

Методы оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения условно можно разделить на две группы. Методы первой группы, условно «статистические», основаны на имеющейся статистике по масштабам промышленной деятельности и проявлению сейсмичности. Вторая группа методов использует физические модели, заимствованные из сейсмологии и учитывающие параметры (размеры) потенциальных очагов сейсмических событий. По своей сути эти методы второй группы близки к используемым в сейсмологии для оценки M_{max} тектонического землетрясения. Ниже вкратце приводится критический анализ этих методов для применения на территории Монголии.

3.2.1 Статистические методы оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения

Первым из подходов, основанных на имеющейся статистике сейсмических данных, можно назвать подход, согласно которому максимальная магнитуда техногенного землетрясения может равняться максимально возможной магнитуде природного (тектонического) землетрясения в данном районе. В основе такого подхода лежат уже упомянутые ранее представления об «индуцированных» и «триггерных» землетрясениях [17, 19]. По сути, термин «триггерные» землетрясения относится к ситуации, когда подземные работы изменяют напряженное состояние массива, но основная часть высвобождаемой энергии – это тектоническая энергия, которая накапливалась в недрах протяжении геологического времени. Иначе, триггерное землетрясение происходит с участием тектонических сил земной коры, инженерная деятельность человека является «спусковым крючком» для его возникновения. В качестве примера можно привести землетрясения с магнитудой 7 и выше, включенных в базу техногенных землетрясений H-Quake [18] (Foulger et al., 2018), таблица 3.1.

Таблица 3.1 – Данные о землетрясениях с магнитудой 7 и более, для которых предполагается техногенная природа (по данным из [18] (Foulger et al., 2018))

№ п.п	Страна	Вид деятельности	Название проекта освоения недр	Магнитуда
-------	--------	------------------	--------------------------------	-----------

1	Узбекистан (СССР)	Добыча газа	Газли	7,3
2	Непал, 2015	Откачка подземных вод	Земледелие на Индо-Гангской равнине	7,8
3	Китай	Создание водохранилища	Веньчуаньское	7,9
4	Индия	Создание водохранилища	Койна	6,3
5	Ботсвана	Добыча метана	Капсулы Selemo и Lesedi	6,3
6	ЮАР	Подземная разработка	Шахта «Президент Брэнд»	5,6
7	Россия	Открытая разработка	Разрез Бачатский	6,1

Почти все из перечисленных в таблице землетрясений имели максимально возможную магнитуду для районов, в которых они произошли. Можно добавить, что в работе [118] ([Bommer et al., 2024](#)) упоминается, что на семинаре, проведенном Геологической службой США (USGS) по вопросу включения наведенной сейсмичности в национальные карты опасности участники семинара высказали мнение, что модели наведенной сейсмичности должны учитывать такое же значение максимальной магнитуды, как и для тектонических землетрясений. В Монголии в 20-м веке по меньшей мере три землетрясения имели магнитуду М 8. Согласно описываемому подходу, такую же магнитуду могут иметь и техногенные землетрясения триггерного характера. Однако очевидно, что такая оценка является слишком консервативной, так как налагает практически запрет на любые виды освоения недр.

Также максимально возможная магнитуда оценивается на основе мониторинга и анализа сейсмологических данных. Предполагается, что сила (энергия) техногенных сейсмических явлений нарастает постепенно в зависимости от нарастания техногенного воздействия. Так, А.А. Козыревым с соавторами выделено три этапа развития техногенной сейсмичности на Кольском полуострове. Каждый следующий этап отличался увеличением сейсмической активности территории по мере развития горных работ [8] ([Козырев и др., 1997](#)). Этапность нарастания сейсмической активности со

временем (по мере развития горной промышленности) отмечена также и для Кузбасса [22] (Яковлев, Лазаревич). Отмечается также корреляция между сейсмичностью и темпами воздействия на недра в других странах (например, [118-120]). (Langenbruch et al., 2024; Hallo et al. 2014; Verdon et al. 2024). Поскольку существуют такие зависимости, ученые пытаются связать объем добычи или закачки флюидов в недра с сейсмичностью, т.е. с энергией и количеством сейсмических событий, которые могут генерироваться для использования в вопросах управления техногенной сейсмичностью [121-123]. Такой подход, при котором ведется непрерывный мониторинг сейсмичности для предсказания ее развития со временем, используется для обоснования граничных значений TLS (трехуровневая система оценки опасности техногенной сейсмичности, «система светофора») [124] (Baesh et al., 2019) и может быть использован на предприятиях Монголии, о чем идет речь в главе 4..

С таким подходом, тесно связан подход, опирающийся на геодинамические аналогии. Имеющиеся данные наблюдений на уже эксплуатируемых объектах могут быть использованы для получения априорных оценок M_{\max} на других, новых объектах. Например, Д. Вердон и Г. Родригес считают, что такие аналогии допустимо проводить только в отношении схожих видов деятельности по освоению недр [125]. Так, на многих сланцевых месторождениях в США, уже пробурены тысячи скважин с десятками или даже сотнями тысяч отдельных этапов гидроразрыва пласта. Имеется хорошая статистика, на основании которой предлагается определять изменения сейсмической активности и максимальной магнитуды техногенной сейсмичности.

Для объектов освоения недр на территории Монголии напрямую метод аналогий пока не может быть использован из-за ограниченного времени изучения техногенной сейсмичности и отсутствия соответствующей статистики. Один из возможных путей использования имеющихся подходов, рассмотрен в главе 4 при обосновании TLS.

3.2.2 Анализ применимости имеющихся физических моделей и подходов к оценке M_{\max} для объектов на территории Монголии

Для оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения M проводят оценку размеров разломов земной коры и рассчитывают M_{\max} по эмпирическим формулам, как для случая тектонических землетрясений. Это считается основной практикой [118]

(Bomer, 2024). Поскольку может быть выделено множество разломов земной коры на участке освоения недр, то возникает большая степень неопределенности при проведении таких оценок. Для ограничения неопределенности предлагается, например, учитывать только те разломы, которые благоприятно расположены в тектоническом поле напряжений и выбирать для оценки максимальный по размеру [118]. Такой подход, по-видимому, оправдан только в каких-то конкретных ситуациях. Известно, например, что на шахтах СУБРа самым крупным нарушением был Восточный сброс, но сильнейшие горно-тектонические удары были приурочены к более мелким нарушениям [2] (Прогноз, 1997). Такой же эффект активизации более мелких нарушений отмечен и в работе [126] (Nantanoi et al., 2022). К тому же на каждом месторождении могут быть выделены геодинамические зоны разных рангов, крупные из которых имеют в длину сотни километров. Для примера, на рисунке 3.3 приведена авторская схема блочного строения месторождения Оую-Толгой из отчета о результатах российско-монгольского проекта [127] (Отчет, 2021), к котором автор принимал непосредственное участие. Из рисунка видно, что некоторые разломы (границы блоков) в районе месторождения имеют длину более 100 км, что соответствует возможной магнитуде 7-8. В таком случае, следовало бы запретить ведение горных работ из-за высокого уровня геодинамической опасности. Иначе говоря, подобная оценка слишком консервативна, лишена необходимой гибкости, учитывающей развитие ситуации на конкретных участках освоения недр.

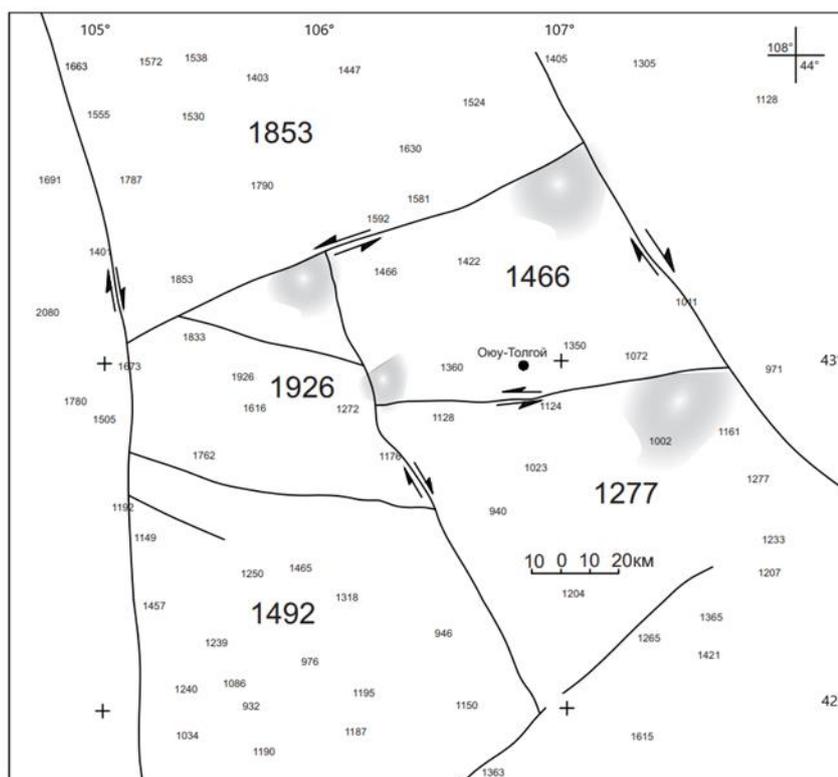


Рисунок 3.3 – Схема блочного строения района месторождения Оюу-Толгой [127] (Отчет, 2021)

Максимальную магнитуду техногенного землетрясения предлагается устанавливать в зависимости от размера сейсмически активированного блока земной коры [128] (Тряпицын и Шабаров, 2007). Для оценки магнитуды M техногенного землетрясения проводят площадные наблюдения, выполняют регистрацию сейсмической активности, находят размеры области сейсмической активизации L , находят соответствующий по размерам активизированный блок площадью S , и по полученным значениям S на основе эмпирической зависимости

$$M_{\max} = \lg(S) + 4,1,$$

определяют максимально возможную магнитуду M_{\max} техногенного землетрясения. Недостаток способа заключается в трудности выбора геодинамического блока, который потенциально в будущем был бы активизирован в результате инженерной деятельности, однако этот подход заслуживает внимания, так как опирается на фундаментальные представления о дискретном проявлении свойств геологической среды и возможно, в будущем будет использован для Монголии. На сегодняшний день для его использования недостаточно исследований.

Также предлагается использовать в расчетах более короткую ось эллипсоида эпицентров микроземлетрясений вокруг объекта, поскольку ее размер связан с самым большим разломом, который может быть стимулирован [129] (Shapiro et al., 2011).

Для оценки M_{max} техногенного землетрясения также используются компьютерные геомеханические модели, в которых определяют величину возможного смещения на конкретном разломе при изменении напряжений при реализации проекта по освоению недр (например, [130, 131]). (van Wees et al. 2017; Buijze et al. 2017). Наиболее приемлема такая оценка может быть для условий, когда принимается, что размеры потенциального очага имеют какие-либо естественные ограничения, как, например, мощность газового коллектора на месторождении [132] (Boitz et al., 2024) уплотнение пласта над резервуарами углеводородов, например, [133] (Bourne and Oates 2017). Предлагаются подходы к оценке максимальной магнитуды в зависимости от объема перекачиваемой жидкости [134] (Galís et al., 2017) . По-видимому, реализация таких моделей для условий Монголии еще более ограничена, так как в моделях нужно задавать большое количество трудно определяемых параметров.

Еще более формализованный подход к оценке M_{max} основан на методе оценок экстремальных значений [135, 136] (Cooke, 1979; Mendecki, 2016). В этом случае среда рассматривается как некий «черный ящик», живущий по своим внутренним правилам. Представляется, что для современной ситуации в Монголии можно было бы опираться в решении такого вопроса на более современные разработки в науках о Земле.

Таким образом, использование имеющихся подходов к оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения на территории Монголии затруднено в связи дефицитом необходимых данных. Во многом это связано с тем, что в Монголии только начинается изучение этого сложного вопроса и статистические данные отсутствуют. Ниже рассматривается новый подход, разработанный с участием автора, основанный на представлениях о предельно напряженном состоянии земной коры его изменении под влиянием инженерной деятельности [117]. (Батугин, 2024).

3.3 Концепция предельно напряженного состояния земной коры и возможная природа техногенного землетрясения с большой магнитудой и глубоким гипоцентром

Концепция профессора Петухова И.М. о предельно напряженном состоянии земной коры постепенно обретает все больше сторонников, как уже упоминалось в главе 2. И.М. Петухов одним из первых выдвинул гипотезу о предельно напряженном состоянии земной коры, которое формируется в слое некоторой мощности от поверхности Земли до определенной глубины под действием тектонических сил горизонтального сжатия. Гипотеза существования слоя предельно напряженного состояния от земной поверхности до некоторой глубины позволяет объяснить возникновение сильных техногенных землетрясений с большой глубинной гипоцентра при воздействии на земную кору с поверхности [35] и предложить рассматриваемый здесь способ оценки максимально возможной и максимально ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения.

Подробное рассмотрение концепции предельно напряженного состояния земной коры выходит за рамки данной диссертации, но здесь автору хочется отметить мысль проф. Петухова И.М., что предельно напряженное состояние земной коры – это один из способов ее существования. Участки с предельно напряженным состоянием существуют постоянно, и это не означает немедленного разрушения геоматериала в динамической форме. Для возникновения динамического события (землетрясения) необходимо выполнение условия неустойчивости, которое связано со скоростью приложения нагрузки к предельно напряженному геоматериалу. Если условие неустойчивости не выполняется, то массив оказывается предельно напряженным в течение достаточно длительного времени, измеряемого в геологическом масштабе времени. Дополнительное приложение нагрузки к такому участку земной коры вызывает переход в предельно напряженное состояние соседних, периферийных его частей. Поэтому нижняя граница распространения предельно напряженного слоя от земной поверхности является максимальной глубиной сейсмической активности в этом районе.

В статье [35] (Батугин, 2021) рассматривается ситуация с Бачатским землетрясением в Кузбассе, рисунок 3.4. Магнитуда сейсмического события составила $M 6.1$, что дает оценку размера очаговой зоны не менее 10 км. Поскольку гипоцентр землетрясения находился на глубине 4 км, это означает, что очаговая зона землетрясения располагалась в земной коре от поверхности Земли до некоторой глубины $H > 4$ км. Но, очаговая зона – это область

предельно напряженного состояния земной коры, сформировавшаяся в ней к моменту землетрясения, в которой произошли разрушения в виде сдвигов по трещинам и разломам. Поэтому, даже при относительно небольшой глубине угольного разреза (300 м) его обработка являлась непосредственным воздействием на зону предельно напряженного состояния, что могло привести к нарушению ее стабильности и возникновению землетрясения с большой глубиной гипоцентра.

Рассмотрим ниже подход к оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения с учетом описанной выше концепции.

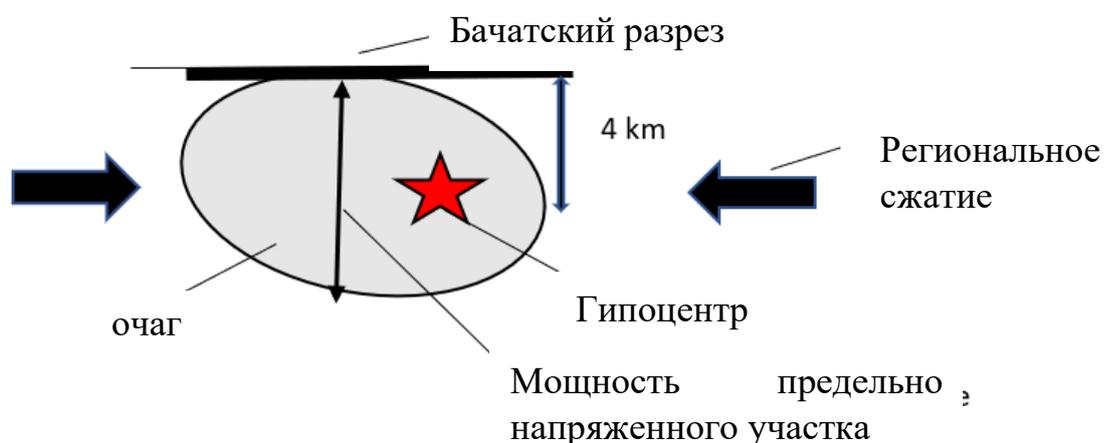


Рисунок 3.4 – Тектонофизическая схема Бачатского землетрясения 2013 года по материалам из работы Батугина А.С. [35].

3.4 Подход к оценке максимально возможной магнитуды техногенных землетрясений для территории Монголии

Как указывалось в подразделе 3.2, подходы, разработанные для оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения M_{\max} , имеют ограничения по применению в Монголии из-за низкой плотности сети расположения сейсмических станций и отсутствия соответствующей статистики. Предлагаемый нами на данном этапе способ основан на предположении, что земная кора в Монголии находится в предельно напряженном состоянии от поверхности до определенной глубины H . Из рассмотренной модели следует важное следствие: размер очага потенциального техногенного землетрясения может быть оценен по толщине (мощности) слоя с предельно напряженным состоянием земной коры H . Мы принимаем H за половину размера зоны очага L возможного техногенного землетрясения и используем эмпирические зависимости между магнитудой M и L для определения M_{\max} [117].

Как ранее упоминалось, исследования в области сейсмологии позволили получить ряд эмпирических зависимостей магнитуды **M** сейсмического события от размера его очага вида

$$\lg L = a \cdot M + b , \quad (3.2)$$

где *a* и *b* - эмпирические коэффициенты.

Например, известна формула М.А. Садовского [137] (Садовский и др., 1983) :

$$\lg(L) = 0,57 \cdot M + 2,64 , \quad (3.3)$$

где размерность *L* - см.

Суть предлагаемого авторского метода заключается в следующем. В районах эксплуатации недр устанавливаются сейсмические станции, регистрирующие локальную сейсмичность с определением глубины залегания гипоцентров *h* происходящих сейсмических событий. Мощность слоя с предельно напряженным состоянием принимается равной **H = h_{max}** и используется в дальнейшем при оценке максимально возможной магнитуды **M_{max}** для выбранного района по эмпирической зависимости магнитуды *M* от размера очаговой зоны *L*.

Например, из формулы М.А. Садовского [134]:

$$M = (\lg(L) - 2,64) / 0,57 , \quad (3.4)$$

Принимая **L=2H_{max}**, максимальную магнитуду возможного техногенного землетрясения можно оценить по формуле:

$$M_{\max} = (\lg (2 H_{\max}) - 2,64) / 0,57 . \quad (3.5)$$

На территории Монголии известны очень сильные землетрясения, но глубины их гипоцентров определяются с большой погрешностью. Так, глубина гипоцентра Тангуальского землетрясения в Монголии (1905 г., *M*=7,8) оценивается в 20 км, но с учетом погрешности можно принять 20÷40 км и получить по формуле (3.5) оценку **M_{max}=7÷8**. Конечно, это очень большое значение, но такая оценка коррелирует с мнением о возможном равенстве магнитуд техногенного и тектонического землетрясения. Также, как уже упоминалось, имеются сообщения о сильных техногенных

землетрясениях с $M 7 \div 8$ [18], произошедших в других странах мира. То есть, оценка максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения на территории Монголии в $M 7 \div M 8$ находится в рамках используемых в настоящее время научных парадигм.

Проведем проверку рассматриваемого подхода для некоторых горнопромышленных районов, входящих, по предположению ученых, в Монголо-Охотский орогенный пояс. Мощность слоя предельно напряженного состояния для районов Кузбасса оценена, например, в работе автора [138] (Шерматова и др., 2022). Для района Бачатского землетрясения

$$H_{\max} = 4 \div 6 \text{ км } (4 \div 6 \times 10^5 \text{ см}).$$

По формуле (3.5) получаем:

$$\lg(2H_{\max}) - 2,64)/0,57 = (\lg(2 \cdot 500000) - 2,64)/0,57 = (6 - 2,64)/0,57 = 5,9.$$

Поскольку магнитуда Бачатского землетрясения оценивается как $M = 6,1$ (2013 г), то делаем вывод, что произошедшее событие было максимально возможным в данном районе.

В южной части Кузбасса, в районе г. Осинники в 2005 г. были установлены сейсмоприемники, зарегистрированы десятки сейсмических событий и получены их записи в виде сейсмограмм. По анализу сейсмограмм оценена максимальная глубина гипоцентров $H_{\max} = 5 \text{ км } (5 \times 10^5 \text{ см})$ и максимальная магнитуда 2,7 (рисунок 3.5).

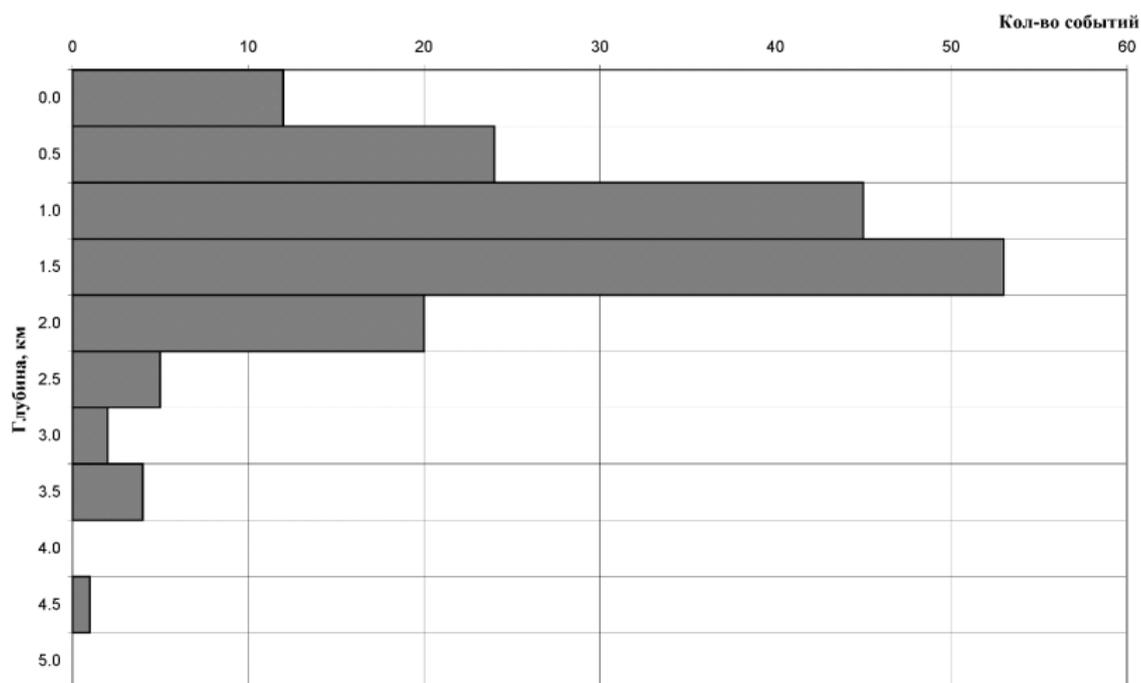


Рисунок 3.5 – Глубины гипоцентров техногенных сейсмических событий в районе г. Осинники, Кузбасс [33] (из [Фатеев и др., 2012](#))

По формуле 3.5 максимально возможная магнитуда техногенного землетрясения в этом районе составит:

$$\lg(2 * 500000) - 2,64) / 0,57 = (6 - 2,64) / 0,57 = 5,9.$$

Можно сделать вывод, что опасность техногенных землетрясений в данном районе недооценена: максимально зарегистрированная магнитуда составляет 2,7, а в соответствие с предложенным способом максимально возможная магнитуда составляет 5,9, что необходимо учитывать при техногенном воздействии на недра или земную поверхность.

3.5 Закономерность увеличения глубин гипоцентров локальной сейсмичности в районах освоения недр и подход к оценке максимально ожидаемой магнитуды землетрясения

Покажем, что с развитием горных работ, формированием все более значительных по размерам отработанных пространств и отвалов увеличивается (может увеличиваться) глубина техногенных сейсмических явлений. Экспериментально такое явление обнаружено при добыче бокситов на Североуральском бокситовом руднике и описано в работе И.М. Петухова и И.М. Батугиной [101]. Также из работ А.Ф. Еманова с соавторами по

сейсмичности района Бачатского угольного разреза следует, что глубина их гипоцентров со временем увеличивалась. Так, если в 2012 году глубина гипоцентров составляла 1-3 км, то в 2013 году гипоцентр основного толчка Бачатского землетрясения находился на глубине 4 км, а глубины более поздних афтершоков уже были зафиксированы на глубинах 5 км [27].

В работе [139] приводится решение задачи изменения напряжений на глубине в зависимости от размера области нагрузки, расположенной на поверхности. На основе решения задачи Буссинеска рассматривается задача определения изменения напряжений на глубине Z , если на поверхности действует распределенная по круговой зоне радиусом a нагрузка P_0 , рис. 3.6.

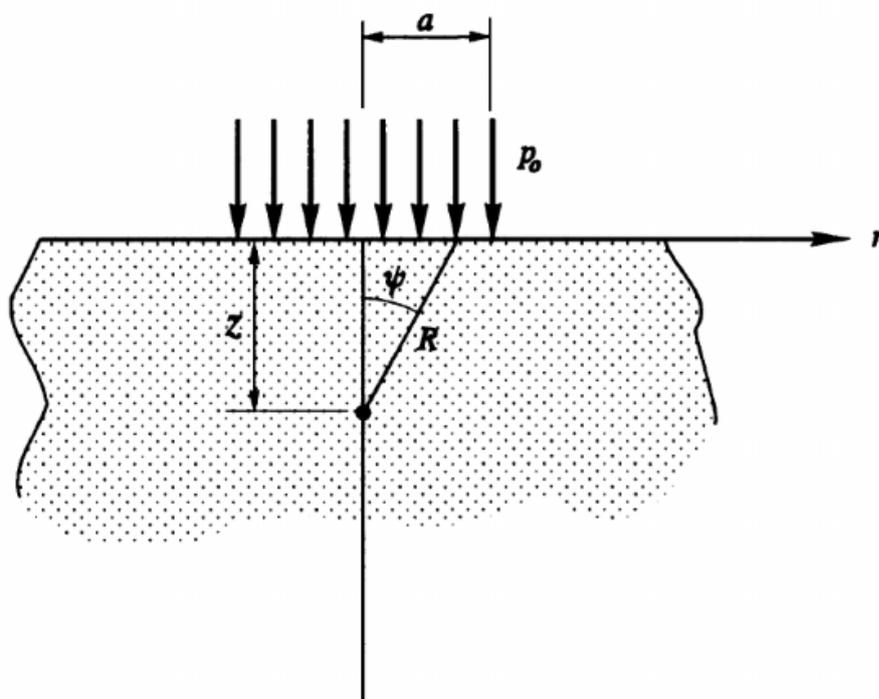


Рисунок 3.6 – Схема к определению вертикального напряжения на глубине Z в условиях распределения на поверхности по круговой зоне нагрузки P_0 [139] (Davis and Selvadurai, 1996)

Из полученного решения

$$\sigma_{zz} = p_0 \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (3.6)$$

следует, что с ростом a (размера зоны воздействия) растет и глубина воздействия Z . Это также видно из графика на рис. 3.7: примерно 10% прирост

нагрузки сохраняется до глубин Z , в три раза превышающих размер зоны воздействия. Т.е. с увеличением a (зоны воздействия) растет и глубина влияния этого воздействия на напряженное состояние.

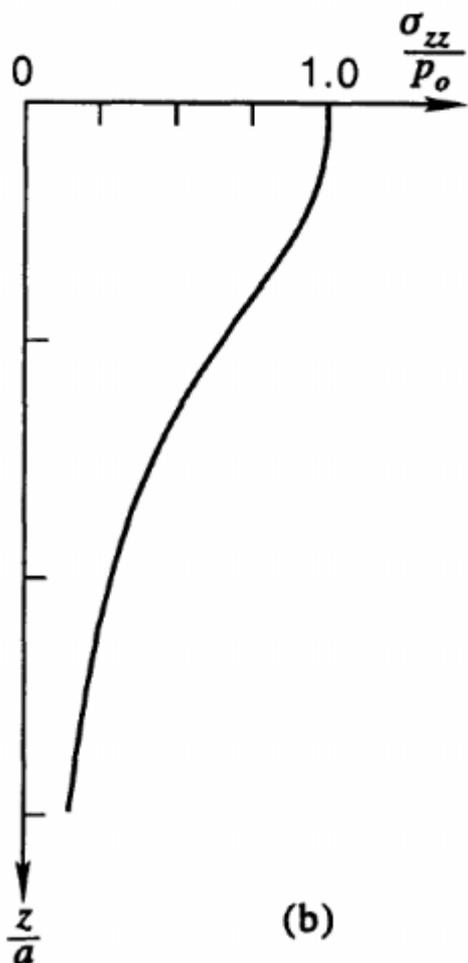


Рисунок 3.7 – Изменение с глубиной воздействия распределенной на поверхности нагрузки по кольцевой зоне радиуса a , [139] (Devis and Selvadurai, 1996)

Таким образом, на основании имеющихся теоретических и экспериментальных данных можем принять, что имеется закономерность, согласно которой глубина гипоцентров техногенных сейсмических явлений увеличиваться со временем по мере развития горных работ. Наличие такой закономерности создает предпосылки для оценки максимально ожидаемой магнитуды техногенного сейсмического явления с использованием эмпирических зависимостей связи магнитуды, глубины гипоцентра, интенсивности, полученных, например, К. Джанузаковым для соседнего с Монголией региона в работе [140].

Оценим, например, максимально ожидаемую магнитуду землетрясения в районе месторождения Таван-Толгой. По данным Института астрономии и геофизики Монгольской АН, рис. 2.6 ориентировочно глубина гипоцентров локальных сейсмических явлений составляет 1,5-1,8 км. Для глубин $H=1,8$, км по формуле 3.5 получим:

$$(\lg(2*180000)-2,64)/0,57 = 5,0$$

Оценка максимально ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения по глубине гипоцентров локальных сейсмических явлений создает возможность контролировать геодинамическую опасность в районе освоения недр.

3.6 Вклад процесса реактивации тектонических нарушений при техногенной сейсмической активизации в загрязнение атмосферы горнопромышленных районов

3.6.1 Проблема загрязнения атмосферы газами земных недр

Известно, что опасным явлением в районах добычи угля, наносящим ущерб окружающей среде и обществу, является внезапный выход шахтных газов на земную поверхность через зоны тектонических разломов [141]. Несмотря на дегазацию угольных пластов в процессе добычи, метан и другие шахтные газы неизбежно мигрируют на поверхность даже после закрытия шахты [142]. Выбросы газа в атмосферу способствуют усилению парникового эффекта и, наряду с другими опасностями, связанными с горными работами, создают опасные ситуации в районах добычи. В ряде исследований приводится многолетняя история случаев, связанных с выделением шахтных газов на поверхность [75-76, 142]. Важными особенностями этого процесса являются его спонтанность и неравномерность по времени, что затрудняет прогнозирование. Выброс газа может происходить на поверхность через много лет после закрытия шахты или в период между проведением работ по мониторингу. Например, по данным работы [75], метан взорвался в подвале жилого дома, расположенного на окраине закрытой шахты имени Орджоникидзе, через три года после отключения вентиляционной системы шахты. На заброшенной шахте 7/8 имени Калинина в Донецке выделившийся газ взорвался через 23 года после засыпки шахтных стволов. Известно, что проницаемые зоны тектонических разломов представляют собой естественный путь для миграции газа. Наличие высокопроницаемых зон, в свою очередь, создает условия для активизации одного из механизмов миграции газа – гидравлического потока [142]. В горнодобывающих районах

регулярно проводятся работы по мониторингу газовой опасности на поверхности, однако всегда существует риск внезапного выхода газов на поверхность в период между регулярными наблюдениями, что указывает на необходимость дальнейшего изучения механизмов, контролирующих миграцию шахтных газов на поверхность и их учета в практике разработки угольных месторождений в Монголии. В целом считается, что тектонические процессы и наличие тектонических разломов являются важными факторами, влияющими на миграцию подземных газов к поверхности земли, проницаемость горных пород увеличивается при их деформации. В то же время внезапность газовых проявлений не объясняется. Поэтому одной из задач диссертационного исследования было подтверждение гипотезы о поршневом эффекте, возникающем при техногенной сейсмической активизации тектонических нарушений.

3.6.2 Реактивация нарушений в горнопромышленных районах

Реактивация тектонических нарушений под влиянием горных работ является хорошо известным явлением [143, 144]. Существуют не только теоретические обзоры этой проблемы, но и результаты многих экспериментальных и теоретических исследований, например, [145-148]. Исследования на угольных месторождениях показали, что вблизи плоскости разлома наблюдается более интенсивное смещение кровли и подошвы угольного пласта [145]. Исследования на Высокогорском рудном месторождении показали, что основные деформации совпадают с тектоническими разломами [146]. С помощью компьютерного моделирования было показано, как разломы влияют на неравномерность смещений в зависимости от расстояния до зоны разработки и ее глубины [147]. А.Г. Акимов считал, что сдвигение по тектоническим разломам (реактивация разлома) возможно в следующих случаях: плоскость разлома наклонена в сторону отработанного пространства; угол падения больше угла внутреннего трения по плоскостям сместителей; азимут направления падения отличается от направления плоскости разреза не более чем на 30 градусов.

Активизация процессов сдвижения и реактивация разломов наблюдаются и после закрытия шахты и проявляются в образовании бугров на поверхности, линейных оседаниях, динамических движениях вдоль разломов [149-150]. Реактивация разломов отмечалась также при добыче углеводородов и других видах антропогенного воздействия в местах активизации тектонических движений [151]. Из имеющихся открытых данных известно,

что смещения вдоль реактивированных разломов могут составлять десятки сантиметров, например, при горно-тектоническом ударе, и достигать нескольких метров при активизации сдвижения [143]. Описаны случаи реактивации разломов на участках протяженностью 15 км и более. Образование уступов и оседание земной поверхности в зонах реактивации разломов наблюдается даже при расположении горных выработок на больших глубинах. Дж. Доннели описывает случай реактивации круто наклоненной плоскости разлома при отработке угольного пласта на глубине 600 м [[143]. Последующее общее оседание поверхности составило почти 4 м. За период с ноября 1978 г. по сентябрь 1979 г. (10 месяцев) амплитуда смещения составила более 2 м.

В среднем процесс смещения длится от 2 до 5 лет в зависимости от условий добычи, а остаточные оседания оцениваются до 10% от максимального оседания, иногда больше [151]. Процесс смещения развивается неравномерно во времени, периоды активизации могут наступать через много лет после прекращения горных работ. Реактивация разлома в эти периоды может проявляться в динамическом режиме в виде горных ударов [152], или сейсмических событий, в виде кратковременных деформаций горных пород или как процесс, длящийся от 1 часа до нескольких недель и даже нескольких лет. В последнем случае длительный процесс деформирования массива может быть представлен и как пульсирующий, состоящий из множества толчкообразных смещений. Следовательно, реактивация разломов рассматривается как общий процесс, связанный с добычей полезных ископаемых и который тем более может быть реализован при развитии техногенной сейсмичности.

Известно, что с магнитудой землетрясения M связана величина смещения (амплитуда A) по разлому соотношением

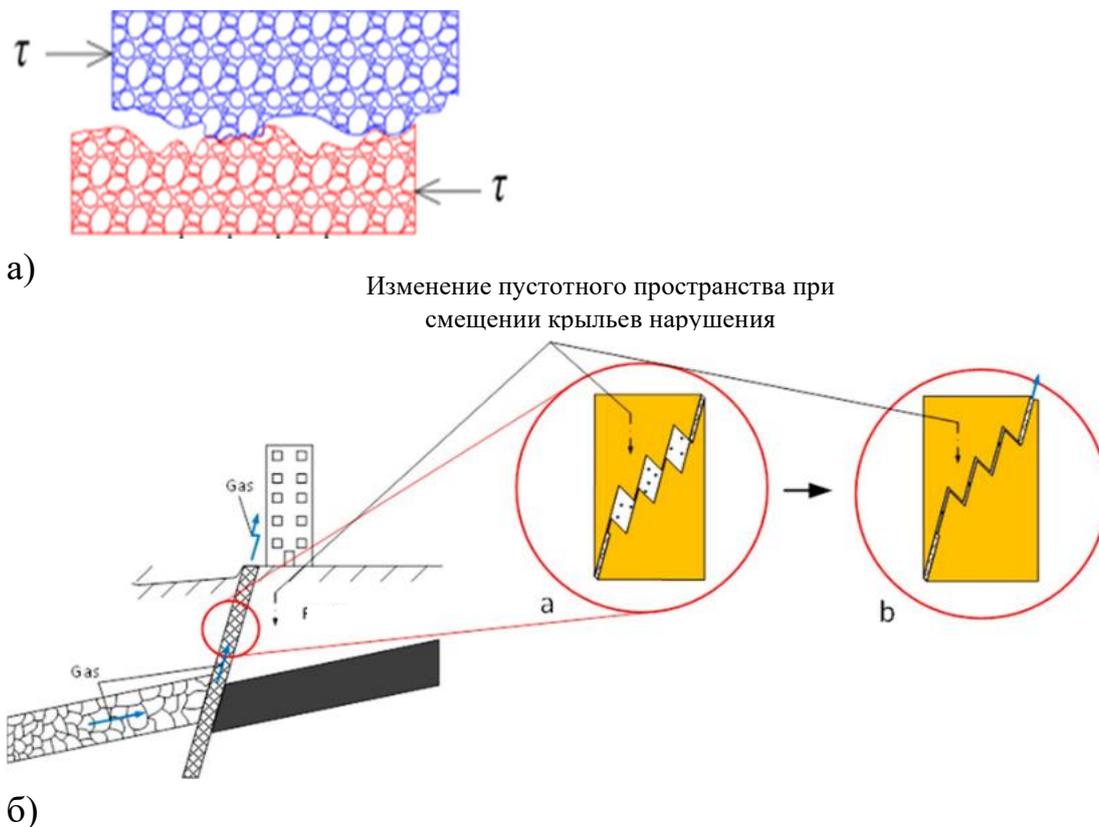
$$\lg(A) = aM + b, \quad 3.7$$

где a и b – эмпирические коэффициенты.

Из выражения 3.7 можно видеть, что амплитуда смещения по разлому при сейсмических активациях с магнитудой 3-5 может достигать десятков сантиметров, что создаст поршневой эффект выдавливания газов из зон сместителей нарушений по ниже описанной схеме.

Контакт крыльев нарушения схематически изображен на рисунке 3.8. При относительном смещении крыльев разлома контакт типа «выступ-выступ» меняется на контакт типа «выступ-впадина» и газ, заключенный в

пустотном пространстве сместителя, выдавливается под действием возникающего поршневого эффекта.



а – схематическое изображение контакта крыльев нарушения;
 б – схема смены контактов крыльев нарушения с «выступ-выступ» (а) на «выступ-впадина» (б)

Рисунок 3.8 – Схема возникновения поршневого эффекта движения газа к поверхности при реактивации нарушения

Для обоснования этого эффекта разработана компьютерная модель и произведена оценка негативного влияния на окружающую среду. Исследования проведены с участием автора [6] (Batugin et al., 2023).

3.6.3 Обоснование параметров компьютерной модели

Поверхности сместителей разломов имеют неоднородности разного порядка, от микроскопических шероховатостей до крупных уступов. Из-за этого крылья разлома контактируют только частью их поверхности. Удельная площадь пятна контакта крыльев разлома оценивается в несколько процентов от общей площади сместителя. В работе А. Сади [153] эмпирически исследованы амплитуда и длина волны уступов на сместителях ряда разломов.

Амплитуда уступов варьирует от 3,5 мм до 6,5 мм для сместителей длиной 1 м, параллельных скольжению (вдоль оси полос), и до 2 м на профиле длиной 35 м. В работе [154] был представлен краткий обзор основных результатов, полученных в последнее время при изучении геометрии поверхностей сместителей разломов. Как следует из исследования, для трещин в диапазоне длин от 1 до 1500 м амплитуда шероховатости адекватно описываются уравнением:

$$A_{av} = 7.5 \times 10^{-3} \times L^{0.8} \quad (3.8)$$

где A_{av} - средняя амплитуда отклонения профиля от прямой линии (м);
 L - длина блока (м).

Согласно формуле (3.8), для разлома длиной 10 м $A_{av} = 4,72$ см, тогда как для разлома длиной 100 м $A_{av} = 29$ см. Также было замечено, что существует определенный критический угол $\theta_{кр}$ ($7 \div 20^\circ$ для крепких пород) локального наклона шероховатости, такой, что выступы с $\theta < \theta_{кр}$ не разрушаются при сдвиге, а деформируются упруго.

В простых моделях выделяются два крайних состояния контактов неоднородностей сместителя: состояние "выступ-выступ" и "выступ-впадина" (рисунок 3.9). Контакт типа "выступ-выступ" обеспечивает максимальную проницаемость плоскости разлома и максимальный объем пустотного пространства, прилегающего к плоскости разлома, а контакт типа "выступ-прогиб" – наоборот. В настоящей работе предполагается, что на первом этапе реактивации пустотное пространство увеличивается за счет раскрытия сместителя при контакте типа "выступ-выступ". При последующем относительном смещении стенок разлома, т.е. во второй фазе реактивации, контакт переходит в тип "выступ-впадина" и происходит резкое сокращение объема пустотного пространства. Таким образом, при реактивации разлома и изменении типа контактов изменяется и объем пустотного пространства, и возникает эффект поршневой экструзии газа в направлении градиента давления, т.е. к поверхности земли. Ниже рассматривается компьютерная модель и результаты моделирования.

смещения крыльев разлома. Величина толчкообразного смещения крыльев разлома может быть оценена по количеству сейсмической энергии. К. Цубои обнаружил, что существует связь между энергией землетрясения E и объемом очаговой зоны V_{sz} [155]:

$$E(\text{эрг}) = 1000 V_{sz}, (\text{см}^3) \quad (3.10)$$

Из этого и аналогичных эмпирических уравнений (типа 3.7) можно рассчитать, что размер очаговой зоны разлома при землетрясении с энергетическим классом до $K = 5$ не превышает 10 м. Нижний предел амплитуды смещений A (м) для хрупко-пластических деформаций при трехосном сжатии в очаговой зоне L_{sz} (км) предлагается оценивать по следующей формуле [156]:

$$\lg A = 0.5 \lg L - 1.5, \quad (3.11)$$

где A измеряется в метрах, а L – в километрах.

Исходя из уравнения (3.11), можно сделать вывод, что амплитуда смещений при землетрясении энергетического класса $K = 5$ составляет всего несколько миллиметров. Натурные наблюдения за проявлениями горно-тектонических ударов также показывают, что амплитуда смещений вдоль плоскостей разломов при сейсмических событиях класса $K < 5$ не превышает 1 см.

Далее, для оценки объема пустотного пространства V_{vs} и его изменения ΔV в процессе реактивации разлома используется простейшая модель контакта крыльев разлома, представленную на рисунке 3.9. Фигура ABCD с указанными параметрами h , θ изображает здесь пустотное пространство (полость), а отрезок $DE = S_c$ - пятно контакта крыльев разлома, $A_{av} = EF$. Из геометрических соображений можно заключить, что объем пустот V_{vs} , показанный на рис. 3.9, в плоском сечении разлома длиной L и шириной W составит:

$$V_{vs} = A_{av} * L * W * (1 - n), \quad (3.12)$$

где n - параметр, характеризующий общую площадь контакта крыльев разлома, $n = DE/AE$.

При смещении крыльев по стрелке (рисунок 3.9) объем пустотного пространства уменьшается на ΔV , а параметр n меняется с n_1 на n_2 .

$$\Delta V/V = (n_2 - n_1)/(1 - n_1) \quad (3.13)$$

Если предположим, что $A_{av} = 4$ см и $\theta = 10 \div 15^\circ$, то получим, что при смещении крыльев разлома на 1 см ΔV равняется лишь долям процента. Это, конечно, очень грубая оценка. Объем между неровностями может быть заполнен продуктами дезинтеграции (обломками) контакта плоскости разлома или вторичными минералами, а амплитуда однократного смещения может быть на порядок меньше. Тем не менее, сделанные оценки позволяют предположить, что при однократном смещении крыльев разлома объем свободного пространства вдоль сместителя уменьшится на сотые или десятые доли процента. С учетом уравнения (3.9) приращение давления при смещении вдоль разлома можем оценить в 250 Па и более.

3.6.4 Компьютерное моделирование

Модель течения газа, мигрирующего под действием поршневого эффекта, решена с помощью программы CFD ANSYS 16-CFX. Моделирование проводилось в переходном режиме. В качестве флюида используются идеальный газ воздух и метан CH_4 . Модель турбулентности - k-Epsilon. Гравитационная сила g направлена вдоль оси y . "Горная порода" и "Зона избыточного трещинообразования" представлены в виде пористых областей. "Полость" и "Воздух" представлены в виде доменов жидкости. Некоторые параметры моделирования приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры моделирования

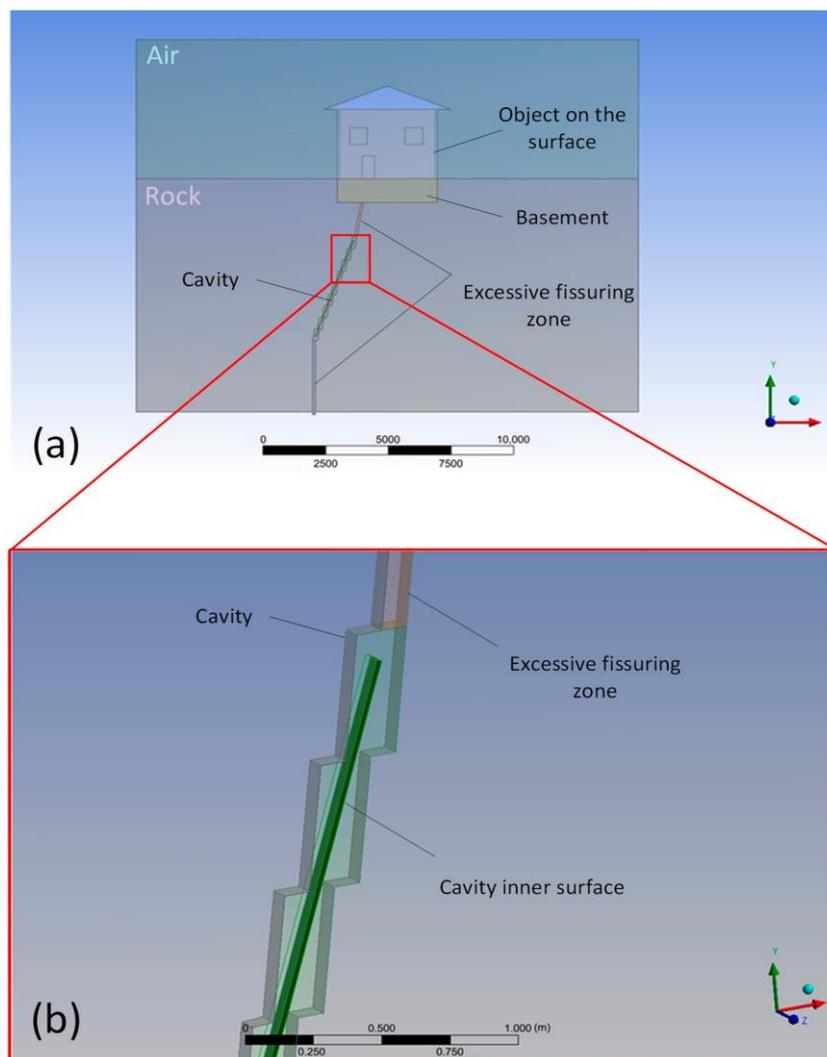
Параметры	Значение	Примечания
Тип анализа	Быстропротекающий процесс	
Общее время моделирования	3 с	
Временной интервал между шагами	0.01 (s)	

Среда	Идеальный газ, CH ₄	Библиотека свойств материалов
Гравитация	-g	
Модель турбулентности	k-Epsilon	
Турбулентность	Интенсивность 5%	
Неоднородность модели	Однородная модель	
Модель движения флюида	Разница в плотности	
"Интенсивно нарушенная зона», проницаемость	1×10^{-5} , $1 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$	
Проницаемость "массива"	$1 \times 10^{-14} \text{ (m}^2\text{)}$	
"Воздух" объемная доля	100 %	Воздух - идеальный газ
"Полость", объемная доля	100 %	CH ₄
Повышенное давление	250, 1000 (Па)	Внутренняя поверхность полости

Моделировался процесс выхода газа в полость (пустое пространство), расположенную в горном массиве (рисунок 3.10). Полость представляет собой область, заполненную рудничным газом. Эта полость имеет внутреннюю и внешнюю поверхности. Внутренняя поверхность используется как зона, в которой устанавливается скачок давления. Внешние поверхности граничат с горным массивом и зоной избыточной трещиноватости. Моделируемый процесс предлагается как аналог процесса резкого смещения горных пород и нарастающего колебания давления. Поверхность зоны повышенной трещиноватости примыкает к объекту на поверхности, представленному доменом "воздух". Параметры моделирования (построение расчетной сетки, выбор начальных и граничных условий, модели турбулентности и т.д.) были выбраны на основе ранее проведенного исследования.

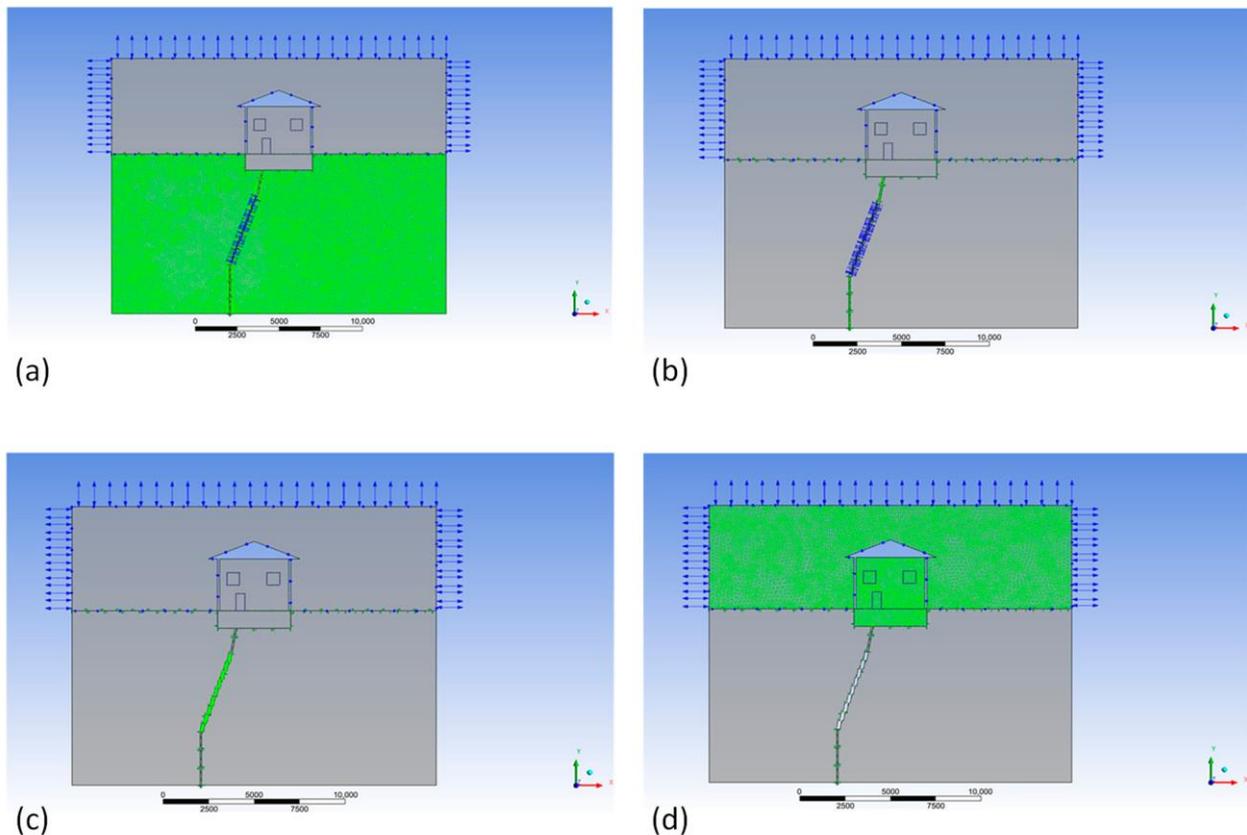
При компьютерном моделировании нарастание давления в результате смещения породы задавалось как скачок давления на внутренней поверхности

полости (рисунок 3.10, б). Свойства породы задавались как пористая среда с проницаемостью $1 \times 10^{-14} \text{ м}^2$ (рисунок 3.11, а). Проницаемость зоны разлома (рисунок 3.11, б) принималась равной $1 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ и $1 \times 10^{-7} \text{ м}^2$. Скачки давления на внутренних поверхностях пустот приняты равными 250 Па и 1000 Па. Моделировались три стадии процесса, каждая длительностью 1 с. В период от 0 до 1 с (стадия 1) давление в зоне разлома не изменялось; в период от 1 до 2 с (стадия 2) давление ступенчато возрастало до 250 Па или 1000 Па; в период от 2 до 3 с (стадия 3) давление снижалось (отток газа из области высокого давления).



(а)- общий вид, (б)- крупный план области с полостью

Рисунок 3.10 – Компьютерная модель объекта исследования



(a)-выделен участок массива, (b)-выделен фрагмент трещины, (c)-
выделен участок полости (пустое пространство),
(d)-выделен участок поверхности

Рисунок 3.11 – Начальные условия

Результаты моделирования представлены на рисунках 3.12 – 3.14. Из рисунка 3.12 видно, что в начальный момент времени ($0 \div 1$ с, стадия 1) процесс миграции газа через проницаемую зону выражен слабо. При повышении давления ($1 \div 2$ с, стадия 2) начинается интенсивная миграция газа к поверхности, на третьей стадии ($2 \div 3$ с) процесс миграции газа продолжается. Таким образом, даже однократное повышение давления до 250 Па способно за короткий промежуток времени вызвать массовый перенос газов вдоль плоскости тектонического разлома к поверхности.

При повышении давления до 1000 Па (рисунок 3.14) поршневой эффект проявляется еще более отчетливо, даже при меньшей проницаемости зоны сместителя (1×10^{-7} , м²). Из рисунка видно, что в период постоянного давления (стадия 1, $0 \div 1$ с) миграция газа проницаемой зоне незначительна. После повышения давления (стадия

2, 1÷2 с) до 1000 Па процесс миграции усиливается и развивается на стадии 3 (2÷3 с) даже при снижении давления до исходного значения.

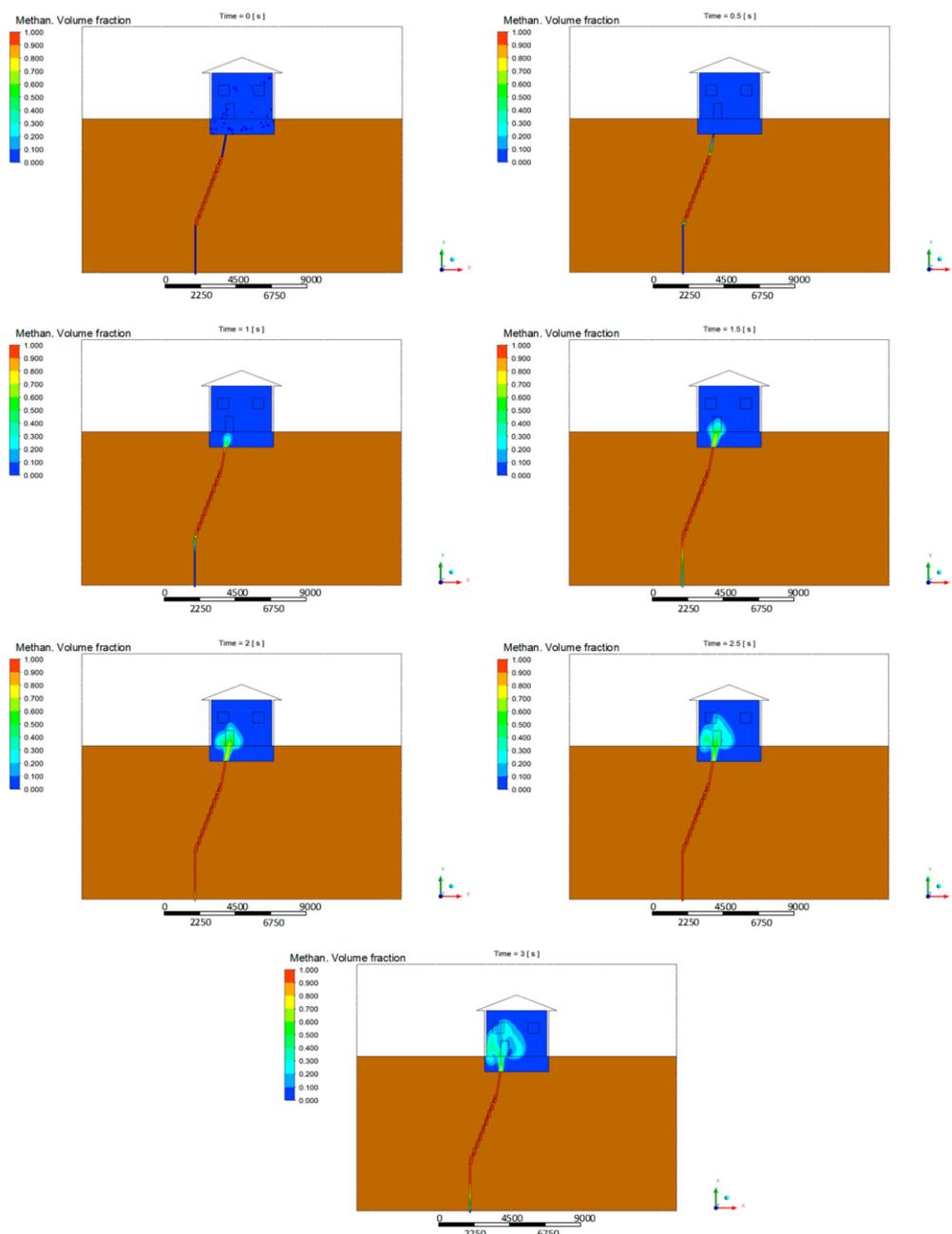


Рисунок 3.12 – Результат моделирования: миграция шахтных газов к объекту на поверхности во временном интервале (0÷3 с) при проницаемости зоны разлома 1×10^{-5} , м² и скачке давления до 250 Па

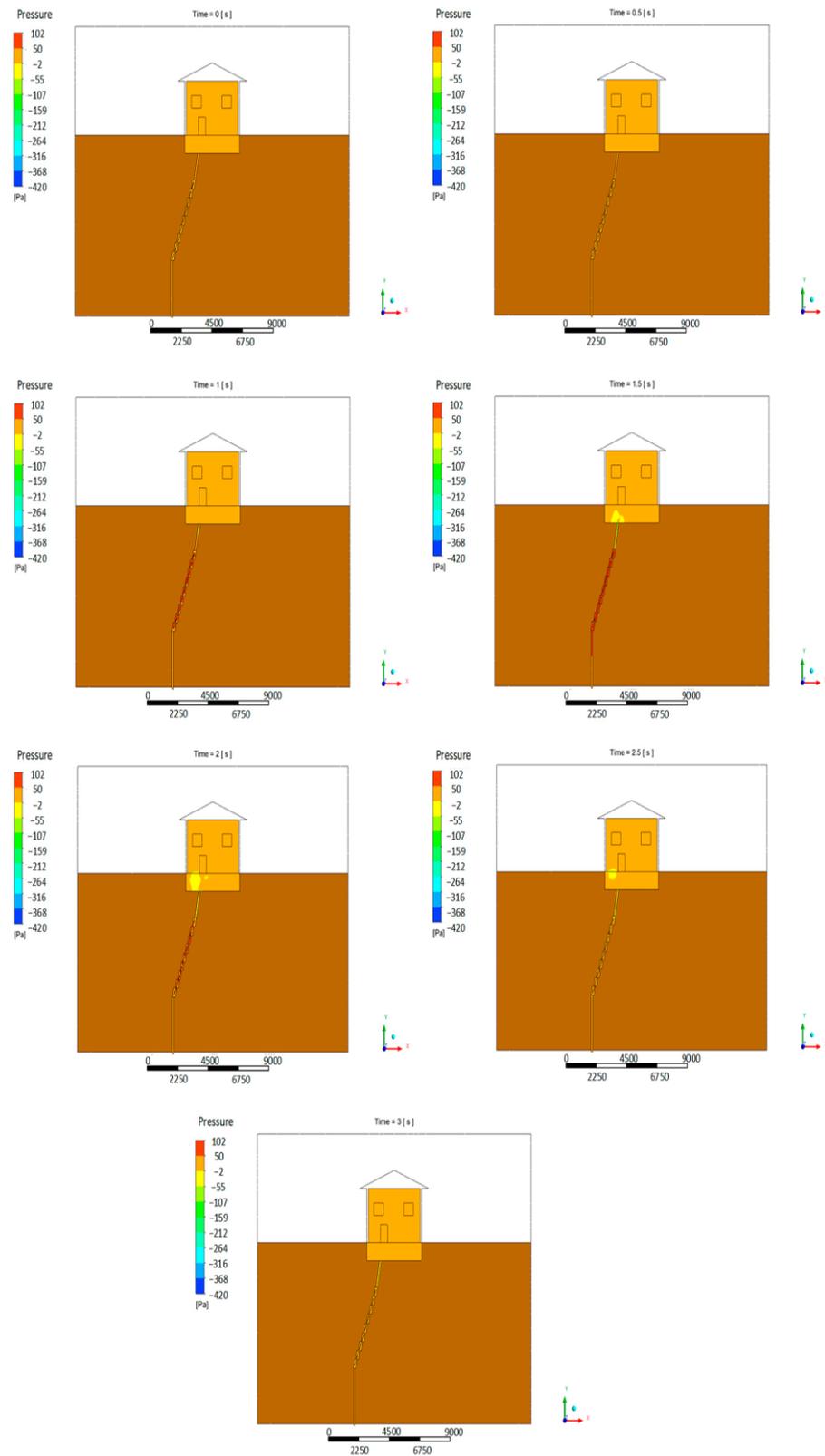


Рисунок 3.13 – Результат моделирования: изменение давления с течением времени: от 0 (схема вверху слева) до 3 секунд (последняя схема). Схемы расположены с интервалом 0,5 секунды.

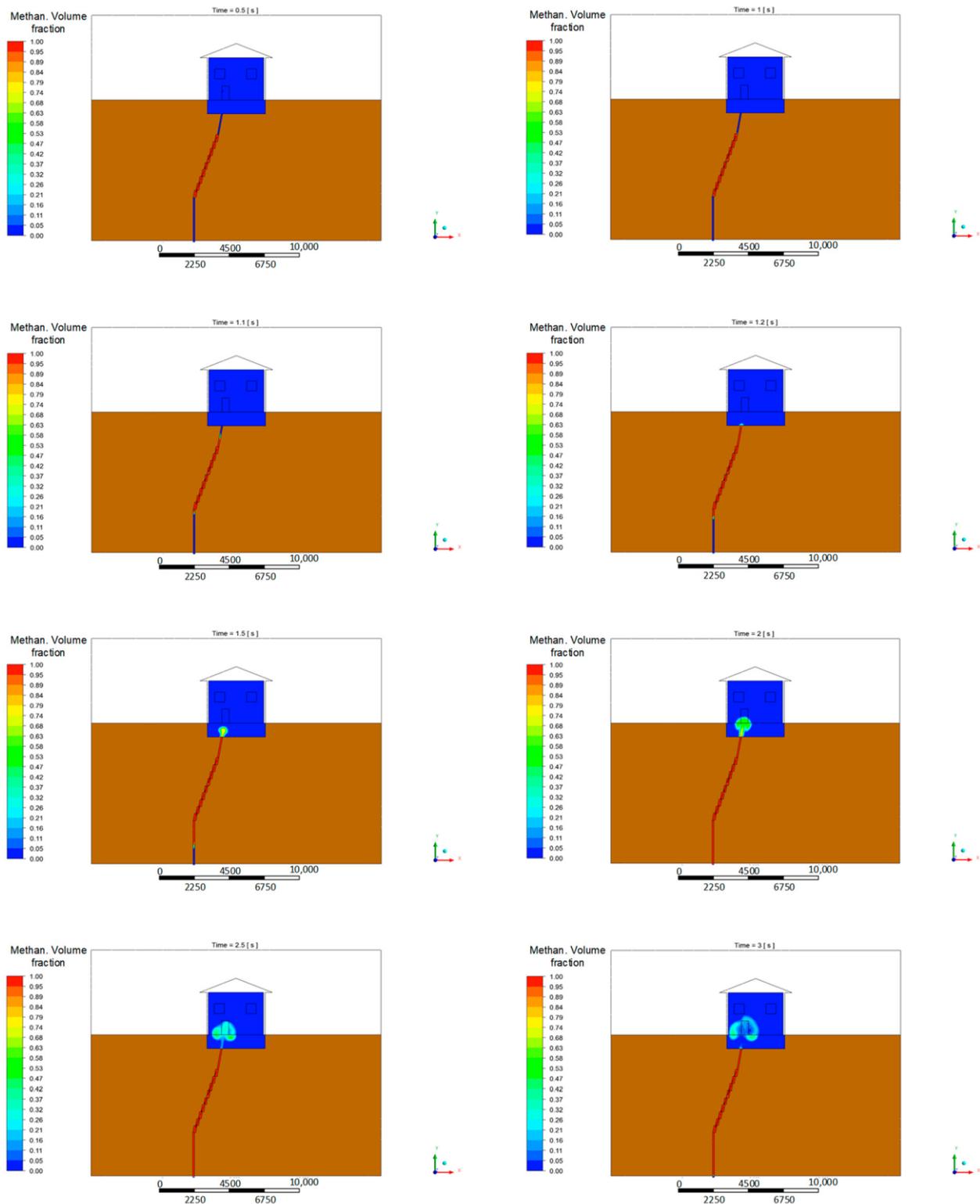


Рисунок 3.14 – Моделирование миграции газа по зоне разлома при скачке давления до 1000 Па

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования установлена закономерность миграции шахтных газов к земной поверхности за счет поршневого эффекта, возникающего при реактивации нарушения с неровным сместителем, заключающаяся в том, что процесс миграции газа развивается в 2 основные фазы: активизируется при скачкообразном повышении давления газа в пустотном пространстве (1-я фаза) и продолжает развиваться уже после прекращения импульса и снижении давления до первоначального (2-я фаза).

3.6.5 Оценка результатов моделирования и область практического использования результатов

Признано, что одним из основных естественных путей миграции газов из недр на поверхность являются тектонические разломы. В исследовании С. Шольца и др. возникновение газовых аномалий в зоне подготовки землетрясения объясняется процессами дилатансии [158]. Неотектонические активизации в районах локализации месторождений приводят к высокой проницаемости разломов земной коры и ее дегазации [159]. Процессы оседания, сопровождающие горные и работы и нефтедобычу, поддерживают высокую проницаемость существующих разломов и формируют новые высокопроницаемые зоны [160]. Однако спонтанность или внезапное появление газа на поверхности также может быть объяснено поршневым эффектом, возникающим при реактивации нарушений. Результаты моделирования показывают реальность явления внезапного выхода газа на поверхность при реактивации разлома.

Конечно, используемая модель имеет высокий уровень предположений. В настоящем исследовании использована плоская модель, но ее выбор основан на результатах исследований, которые показывают, что площадь контакта крыльев разлома не превышает 10 %. Во-вторых, основываясь на результатах натуральных наблюдений [161], предполагается, что размер впадин на сместителе вдоль линии, перпендикулярной вектору смещения, значительно больше, чем вдоль линии смещения. В этом случае выбор плоской модели вполне оправдан.

В шахтных условиях из-за постоянного дренажа шахтных вод плоскости разломов часто хорошо промыты и имеют видимое зияние

[162]. В таких условиях весь объем пустот вдоль сметителя заполнен шахтным газом, и модель не требует дополнительных предположений в этой части. Другой крайностью является ситуация, когда неровности сметителя заполнены перетертым обломочным материалом. В этом случае при смещении крыльев разлома и изменении типа контактов с "выступ-выступ" на "выступ-впадина" заполнитель будет уплотняться под действием давления, что при его значениях до 30 МПа может привести к уменьшению объема заполнителя до 10 % и более [162]. В этом случае тоже может возникнуть эффект выдавливания газа из зоны разлома, хотя и менее выраженный.

В качестве примера рассмотрим случай активизации процессов сдвижения на севере Кузбасса. Здесь шахты "Судженская" и "Анжерская" отрабатывали Десятый, Андреевский и Коксовый пласты. Доля песчаников в угленосных пластах достигает в регионе 70-80 %. На шахтном поле имеются крупные дизъюнктивы, прослеживаемые от земной поверхности до глубины разработки, рисунок 3.15, по данным Р.Г. Коломина [163]. Газовый мониторинг на этих шахтных полях в 2012 ÷ 2013 годах выявил нестабильность газодинамических процессов. Концентрации углекислого газа были зафиксированы до 5,3 %, что превышает ПДК [164].

Сейсмические станции зарегистрировали сейсмические события $K=3\div4$ энергетических классов на этих шахтных полях в период активизации просядочных процессов в 1999÷2000 годах, что свидетельствует о том, что амплитуды одноактных динамических смещений в разломах достигали 1 см. Согласно исследованиям А.Н. Лежневой, плоскости дизъюнктивов имеют впадины, выступы, а на некоторых участках - зоны осыпания, рисунок 3.16 [165].

Глубина горных работ достигала 600÷700 м, что позволяет предположить, что размеры реактивированных участков плоскостей разломов достигали нескольких сотен метров. С учетом предположений о морфологии плоскости разлома, описанных выше, уменьшение объема пустотного пространства на участке $L=W=10$ м при смещении вдоль плоскости разлома на 1 см составит менее 1 м^3 , тогда как при смещении на 20 см (полное закрытие пустотного пространства) при реактивации плоскости разлома 200×200 м V может составить почти 1500 м^3 , что вполне достаточно для создания опасной ситуации на поверхности. Поскольку процесс оседания развивается неравномерно во времени и может активизироваться в результате

затопления шахты или развития сейсмического процесса в регионе, исследуемое явление может проявляться на шахтных полях в течение длительного периода времени.

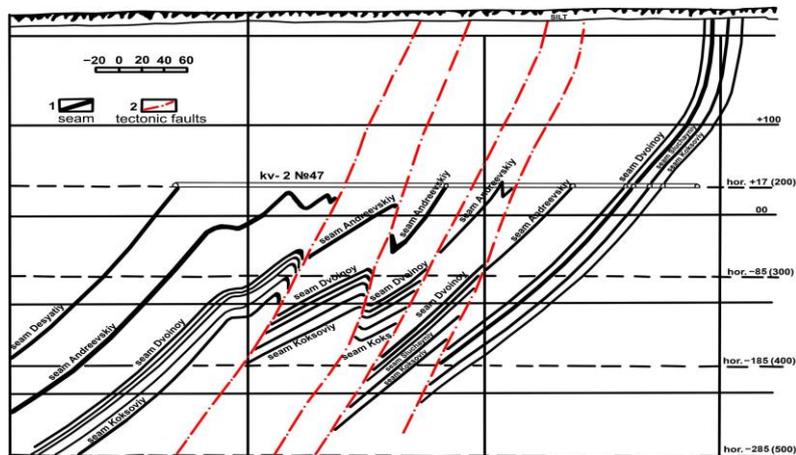
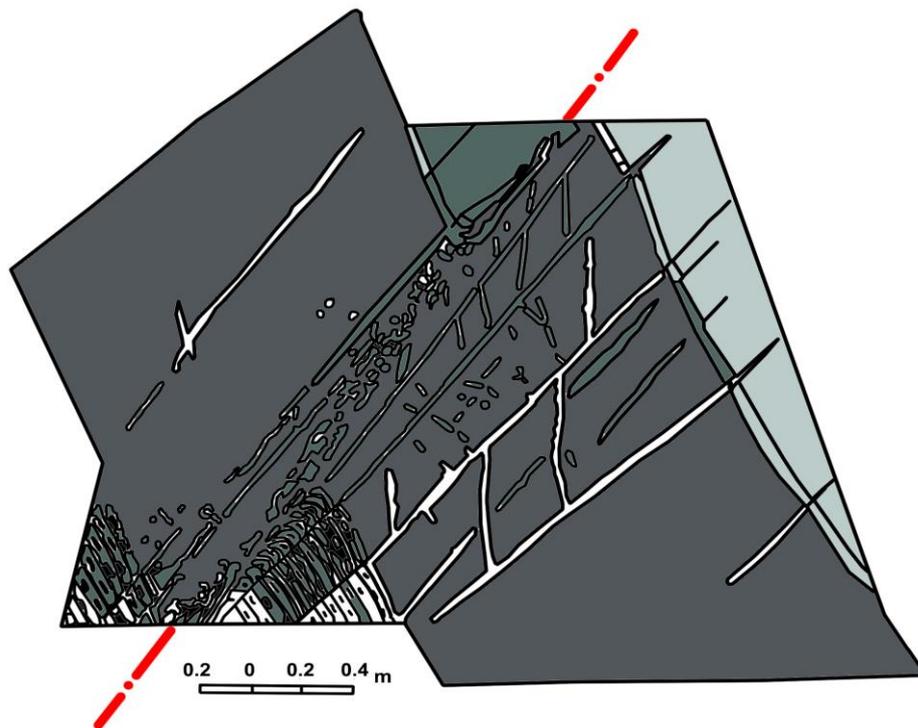


Рисунок 3.15 – Геологический разрез района шахт "Анжерская" и "Судженская" (по [163])



Красная линия - плоскость разлома, серый цвет – угольный пласт, зеленый, светло-зеленый цвет- породы, белый - трещины

Рисунок 3.16 – Зарисовка дизъюнктива на шахте "Анжерская" по [165]

Проведенные исследования показывают, что спонтанность выходов газа из недр по возможным путям миграции может быть связана с резким повышением давления газового флюида в трещинном пространстве породы вследствие развития геодинамических процессов. Полученные результаты коррелируют с известными исследованиями, изучающими влияние геодинамических процессов на увеличение проницаемости тектонических разломов, и дегазацию земных недр [166-168]. Однако в диссертационном исследовании показано, что одним из механизмов дегазации земных недр может быть поршневой эффект, возникающий при реактивации разломов за счет техногенной сейсмичности.

На основании полученных данных планируется развивать подход к оценке воздействия техногенной сейсмичности на атмосферу горнопромышленных районов.

Выводы по главе 3

1. Имеются разработанные подходы к оценке максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения, основанные на анализе статистических данных по проявлению сейсмичности в регионе (графики повторяемости), на методе сеймотектонических аналогий, на учете размеров активизированного блока земной коры. Используются методы, основанные на установленной статистической связи размеров очага землетрясения и магнитуды, основанные на учете мощности сейсмоактивного слоя земной коры. Основной недостаток известных методов – опора на выявленные статистические закономерности, что на данном этапе невозможно использовать для условий Монголии из-за отсутствия статистических данных.

Рассмотрен новый подход к оценке максимально возможной и максимальной ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения в районах эксплуатации недр, в котором размеры очага возможного землетрясения (а значит и его магнитуды) определяются мощностью слоя земной коры от поверхности земли до максимальной глубины возникновения локальных сейсмических явлений. Предлагаемый подход базируется на современных представлениях о возникновении участков предельно напряженного состояния в земной коре, приведенные оценки известных техногенных событий показывают его адекватность, что является доказательством второго научного положения.

Обосновано существование ранее не изученного фактора (явления) внезапного увеличения давления газа в зоне сместителя тектонического нарушения при его реактивации, способствующего миграции газов из недр на поверхность. На основании результатов компьютерного моделирования установлена закономерность миграции шахтных газов к земной поверхности за счет поршневого эффекта, возникающего при реактивации нарушения с неровным сместителем, заключающаяся в том, что процесс миграции газа развивается в 2 основные фазы: активизируется при пульсационном повышении давления газа в пустотном пространстве (1-я фаза) и продолжает развиваться уже после прекращения импульса и снижении давления до первоначального (2-я фаза).

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В УСЛОВИЯХ МОНГОЛИИ

В настоящее время максимальные магнитуды техногенных сейсмических явлений в районе месторождений Таван-Толгой и Матад не превышают 3, что практически не оказывает воздействия на окружающую среду. Однако, как было показано выше, в развитии техногенной сейсмичности в разных странах выделяются этапы ее усиления. Поэтому важным является оценивание не только происходящих событий, но и потенциально возможных. Максимальная магнитуда техногенного землетрясения $M_{\text{махт}}$ может достигать максимальной магнитуды естественного землетрясения $M_{\text{мах}}$, но основным недостатком использования оценок $M_{\text{мах}}$ для техногенных землетрясений является то, что они воспринимаются в обществе как прогноз, хотя речь идет о верхней границе силы возможных событий. Например, если принять, что $M_{\text{махт}}$ для Монголии составляет 8, то очевидно, что такая оценка очень консервативна и сковывает возможности освоения территорий. Поэтому наряду с оценкой максимально возможной магнитуды используют оценки максимально ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения $M_{\text{махот}}$ [121, 122]. (Holschneider et al. 2011; Zöller et al. 2013). $M_{\text{махот}}$ это такая магнитуда, которую потенциально может иметь следующее сильное техногенное землетрясение в районе освоения недр. Поэтому в диссертации идет речь о потенциальном влиянии техногенной сейсмичности на окружающую среду, которое будет оказано, если все же произойдет землетрясение с максимально ожидаемой магнитудой.

С учетом максимально ожидаемой магнитуды разработаны трехуровневые системы оценки опасности техногенной сейсмичности и регулирования ее воздействия на окружающую среду (TLS или TLP) [124] (Baisch et al., 2019). Использование TLP направлено на предотвращение землетрясений в промышленных районах с магнитудой, превышающей заранее установленный порог. Основным регулятором является запрет деятельности при опасности возникновения землетрясения с магнитудой, превышающей допустимую в данных условиях. Основными допущениями при использовании подхода TLS являются следующие [92] (Сальфадж):

1. Максимальная сила (магнитуда) техногенных землетрясений постепенно увеличивается с продолжительностью работы. Это позволяет

определить момент, когда сила землетрясения приближается к критическому пределу (красная зона).

2. При остановке или окончании инженерных работ техногенная сейсмичность также затухает и прекращается.

Такие положения вполне согласуются с практикой изучения техногенной сейсмичности в горнодобывающих регионах соседних с Монголией стран. Этапы проявления техногенной сейсмичности выделяются при разработке апатитовых месторождений на Кольском полуострове, в Кузбассе.

При разработке схем TLS учитывается возможный ущерб, который может быть нанесен землетрясением заданной магнитуды конкретному району. Поэтому граничные оценки зеленой, желтой и красной зон так сильно различаются в разных странах и промышленных районах, рисунок 4.1.

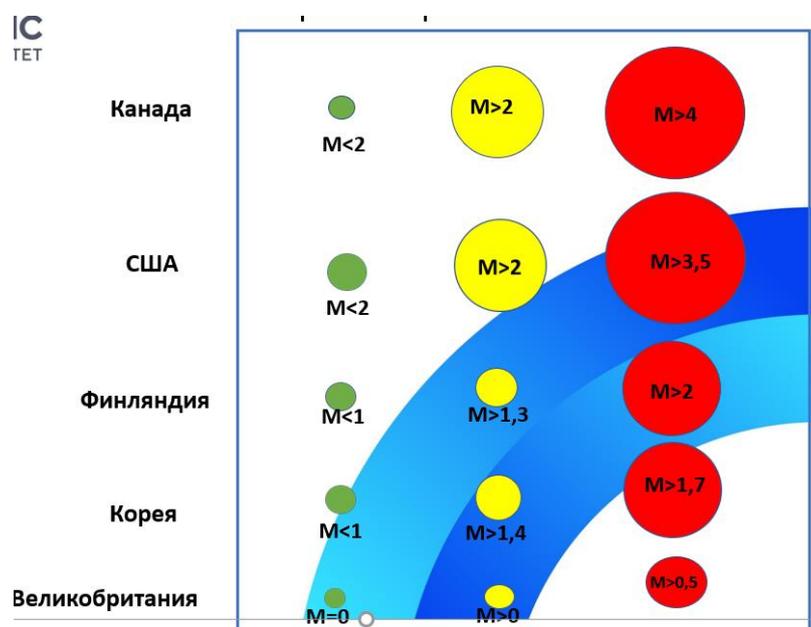


Рисунок 4.1 – Примеры реализации проектов TLS в разных странах (по материалам из [123]).

4.1 Подход к оценке потенциального влияния техногенной сейсмичности на окружающую среду горнопромышленных регионов Монголии.

Несмотря на привлекательность подхода, основанного на учете социального и материального ущерба, он имеет ряд ограничений, которые

затрудняют его применение в Монголии. Население Монголии, объекты инфраструктуры, сосредоточены в крупных городах (почти половина населения страны сосредоточена в Улан-Баторе), а остальная территория (более 99 %) используется для животноводства. Поскольку вопрос о возникновении техногенной сейсмичности не поднимался, существующие объекты освоения недр не имеют собственных сейсмических станций, а данные о возникновении локальной сейсмичности ограничены. В этой ситуации задача состоит в том, чтобы адаптировать подход TLS к условиям Монголии для оценки потенциального воздействия на окружающую среду и планирования системы управления геодинамической опасностью.

В главе 3 обосновывается способ оценки максимально возможной и максимально ожидаемой магнитуды землетрясения по мощности слоя земной коры с предельно напряженным состоянием. Мощность этого слоя можно отслеживать по глубинам гипоцентров локальных сейсмических явлений в изучаемом районе. Показано, что с развитием горных работ, формированием все более значительных по размерам отработанных пространств и отвалов увеличивается (может увеличиваться) глубина техногенных сейсмических явлений. В этом случае увеличивается и магнитуда максимального ожидаемого землетрясения. Предельно допустимым воздействием на окружающую среду можем принять предельно допустимую интенсивность сейсмического воздействия I , например, $I_{пред} = 5$ за пределами горного отвода или некоторой санитарно-защитной зоны, размеры которой могут устанавливаться для каждой конкретной ситуации.

Как правило, в сейсмоактивных районах устанавливаются эмпирические зависимости, связывающие магнитуду M , интенсивность I , глубину залегания гипоцентра h , площадь S_I , ограниченную I -изосейстой. Например, К.Я. Джанузаков нашел [140] (Джанузаков, 2013):

$$\lg S_I = 1,1M - 0,5I - 0,4 \lg h , \quad (4.1)$$

где h и S_I измеряются соответственно в км и км². Отсюда

$$M = (0,4 \lg h + 0,5I + \lg S_I) / 1,1 . \quad (4.2)$$

Таким образом, имеются установленные эмпирические зависимости, используемые в сейсмологии [140, 134], обнаружены закономерности в проявлении техногенной сейсмичности [111, 138], имеются теоретические обоснования концепции предельно напряженного состояния земной коры

[101, 103-105]. Эти научные достижения положены в основу предлагаемого подхода к оценке воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду. Допущения, лежащие в основе предлагаемого подхода:

1. Максимальная глубина гипоцентров сейсмических явлений (сейсмической активизации) в районе освоения недр постепенно увеличивается с развитием горных работ.

2. Размер очага землетрясения с максимально ожидаемой магнитудой равен максимальной глубине проявления сейсмической активизации.

3. В контролируемом районе освоения недр установлена сейсмостанция, которая ведет непрерывный контроль глубин гипоцентров возникающих сейсмических событий.

4. Для региона имеется установленная или принятая эмпирическая зависимость, связывающая магнитуду M , интенсивность I , глубину залегания гипоцентра h , площадь S_i , ограниченную i -той изосейстой.

5. Для региона установлена или принята эмпирическая зависимость, связывающая магнитуду землетрясения с размером его очага.

6. При остановке инженерных работ (добычи) техногенная сейсмичность затухает.

Поскольку глубина h развития сейсмического процесса контролируется с помощью локальных сейсмостанций (допущение 3), это позволяет вести текущий контроль максимально ожидаемой магнитуды согласно допущениям 2 и 5. Предельно допустимой магнитудой техногенного землетрясения (границей красной зоны) предлагается считать такую, при которой на заданном расстоянии R от места добычи интенсивность сейсмического воздействия достигнет заданного значения I_s .

Для демонстрации подхода в качестве допущения 4 принята эмпирическая зависимость соседнего с Монголией региона, установленная К.Я. Джанузаковым (4.2). В качестве примера зависимости, связывающей магнитуду землетрясения с размером его очага (допущение 5) принята формула М.А Садовского (3.3).

На рис. 4.2 иллюстрируется предлагаемый подход к оценке воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду с использованием номограммы. За допустимое воздействие на окружающую среду принята интенсивность сейсмического воздействия $I=5$ на границе защитной зоны радиусом R (на номограмме взято $R = 15, 30$ или 45 км). Данную номограмму автор рассматривает только как путь (подход) решения такой задачи. Если по

мере развития сейсмологических исследований в Монголии появятся новые зависимости типа (3.3) и (4.2), то откроется возможность уточнить предлагаемую номограмму применительно к конкретной ситуации.

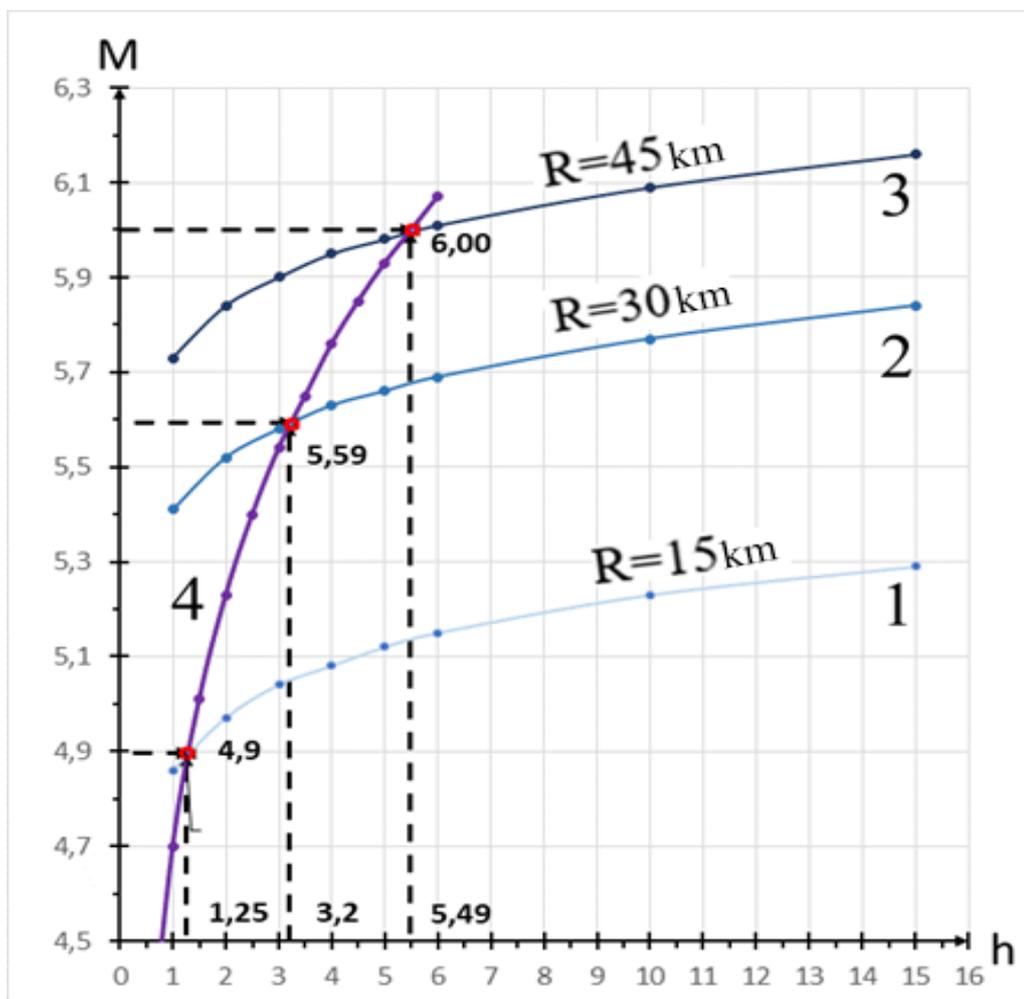


Рисунок 4.2 – Иллюстрация подхода к оценке воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду для территории Монголии

Предполагается следующий порядок использования номограммы. По точкам пересечения кривых 1, 2 или 3 с кривой 4 определяем величину M , при которой на расстояниях, соответственно, 15, 30 или 45 км будет располагаться граница области с интенсивностью $I = 5$. Абсциссы точек пересечения кривой 4 с кривыми 1, 2, 3 соответствуют «критической» глубине залегания локальных сейсмических событий $H_{кр}$, т.е. согласно допущению 1 характеризуют размер очага землетрясения с максимально возможной в этой ситуации магнитудой. При сейсмическом мониторинге определяется глубина расположения гипоцентров возникающих сейсмических событий h . Если

сейсмические события происходят на глубинах разработки и меньше, такая ситуация в данном случае рассматривается как допустимая («зеленая зона»), поскольку она регулируется разработанными инструкциями по безопасности. Возникновение сейсмических явлений на глубинах, превышающих глубину ведения горных работ $H_{г.р.}$, является маркером развития зоны предельно напряженного состояния массива вокруг объекта на глубину и соответственно увеличения опасности («желтая зона»). Возникновение сейсмических активизаций на глубинах, определенных как «критические» $H_{кр}$ (на рис. 5: $h = H_{кр} = 1,25$ км при радиусе защитной зоны $R=15$ км и $h = H_{кр} = 5,5$ км при радиусе $R=45$ км) является сигналом о достижении потенциально опасного уровня сейсмического воздействия на окружающую среду («красная зона»), рисунок 4.3.

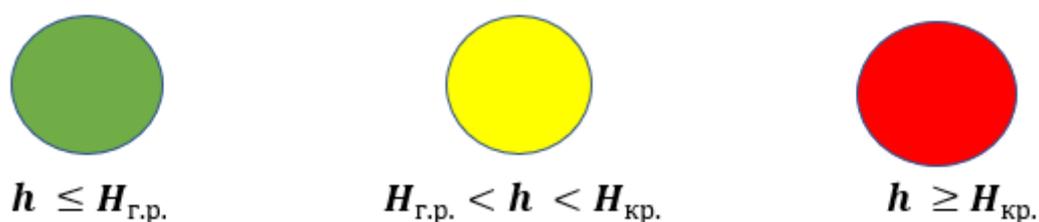


Рисунок 4.3 – К оценке потенциального воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду в районе работы предприятия по освоению недр по значениям глубин гипоцентров локальных сейсмических событий h : зеленый цвет – низкий уровень воздействия, работа предприятия в обычном режиме; желтый – уровень повышенной опасности, необходимо оповестить специализированный государственный орган и принять меры; красный - опасный уровень, работы прекратить до выяснения обстоятельств.

Например, для условия угольного разреза Таван-Толгой в настоящее время сейсмичность регистрируется на глубинах 1,5-1,8 км), что превышает глубины разработки $H_{г.р.}$ и в соответствии с предлагаемым подходом это «желтая зона», ситуация требует внимания и разработки специального регламента, регулирующего работу предприятия.

Исходя из того, что глубина гипоцентров локальных сейсмических явлений находятся уже в «желтой» зоне, рекомендуется разработать регламент ведения горных работ для случая нарастания этих глубин, т.е. усиления геодинамической опасности. То же относится и к другим месторождениям

Монголии, на которых глубины техногенных сейсмических явлений превышают глубину ведения горных работ.

Задачей дальнейших исследований видится обоснование регламентов для предприятий, ведущих интенсивное освоение недр Монголии. Согласно разработанному подходу для каждого конкретного района устанавливается размер санитарно-защитной зоны предприятия, за пределами которой интенсивность сейсмического воздействия от землетрясения с максимальной ожидаемой магнитудой не должна превышать заданного значения. Государственная сейсмологическая сеть используется для мониторинга ситуации в районах освоения недр и в случае возникновения сейсмичности на предприятии устанавливается контролируемая государством сейсмостанция. С помощью сейсмостанции на предприятии ведется постоянный сейсмологический мониторинг с определением глубин гипоцентров локальной сейсмичности. Максимальная глубина этих гипоцентров является исходным параметром для расчета максимально ожидаемой магнитуды землетрясения. Увеличение глубин гипоцентров локальной сейсмичности в процессе освоения недр рассматривается как признак нарастания геодинамической и экологической опасности и при необходимости государственные органы участвуют в регулировании ситуации.

Выводы по главе 4

1. Применяемые в зарубежной практике технологии трехуровневой оценки и контроля техногенной сейсмичности (TLS) для территории Монголии имеют ограничения, связанные с низкой плотностью населения и неразвитостью инфраструктуры. В то же время, максимально возможная магнитуда техногенных землетрясений в Монголии может достигать значительных величин (до $M 7\div 8$), что требует уже сейчас, на начальном этапе развития добывающей промышленности, разработки предложений по оценке и регулированию воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду.

2. Обоснован подход к оценке воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду горнопромышленных регионов Монголии и предложен соответствующий метод. Согласно разработанному подходу для данного конкретного района устанавливается размер санитарно-защитной зоны предприятия, за пределами которой интенсивность сейсмического воздействия от землетрясения с максимальной ожидаемой магнитудой не должна превышать заданного значения. На предприятии ведется постоянный

сейсмологический мониторинг с определением глубин гипоцентров локальной сейсмичности. Максимальная глубина этих гипоцентров является исходным параметром для расчета максимально ожидаемой магнитуды землетрясения. Таким образом, увеличение глубин гипоцентров локальной сейсмичности в процессе освоения недр рассматривается как признак нарастания геодинамической и экологической опасности.

3. В качестве примера для месторождения Таван-Толгой принят размер санитарно-защитной зоны 45 км и максимально допустимая интенсивность сейсмического воздействия на окружающую среду $I=5$ баллов. Предложена следующая порядковая шкала потенциального воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду:

слабое, допустимое (зеленый уровень геодинамической опасности) - глубина гипоцентров локальных сейсмических явлений находится в области ведения горных работ;

среднее, допустимое (желтый уровень геодинамической опасности) - глубина гипоцентров локальных сейсмических явлений находится в диапазоне от глубин разработки до 5,5 км;

сильное, недопустимое (красный уровень геодинамической) - глубина гипоцентров локальных сейсмических явлений равна или превышает 5,5 км.

В настоящее время глубины гипоцентров локальных сейсмических явлений на месторождении составляют 1,5-1,8 км, т.е. уровень геодинамической опасности и потенциального влияния техногенной сейсмичности на окружающую среду средний.

4. Для мониторинга геодинамической опасности и управления техногенной сейсмичностью на всех крупных горнодобывающих предприятиях Монголии предлагается установить системы сейсмического мониторинга, позволяющие отслеживать развитие сейсмического процесса по глубине и времени для оценки потенциального воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача исследования природы сейсмичности (техногенная/естественная) районов освоения недр Монголии и разработка подхода к оценке ее потенциального воздействия на окружающую среду.

Основные результаты исследования заключаются в следующем:

1. В условиях Монголии, одним из сейсмоактивных районов Азии, где начался процесс бурного развития горной промышленности, важно учитывать, что техногенная сейсмичность при освоении недр является значимым фактором воздействия на окружающую среду и безопасность.

2. Впервые доказано, что возникновение сейсмических явлений в районах месторождений Таван-Толгой и Мадад связано с процессом их разработки и является новым для Монголии видом геодинамической опасности (техногенная сейсмичность), оказывающим влияние на окружающую среду.

3. Обоснован подход к оценке максимально ожидаемой магнитуды техногенного землетрясения по значениям глубин гипоцентров сейсмических явлений, возникающих при воздействии на недра или земную поверхность, основанный на представлениях о предельно напряженном состоянии земной коры.

4. На основании результатов компьютерного моделирования установлена закономерность миграции шахтных газов к земной поверхности за счет поршневого эффекта, возникающего при сейсмической реактивации нарушения с неровным сместителем, заключающаяся в том, что процесс миграции газа развивается в 2 основные фазы: активизируется при скачкообразном повышении давления газа в пустотном пространстве (1-я фаза) и продолжает развиваться уже после прекращения импульса и снижении давления до первоначального (2-я фаза).

5. Обоснован подход к оценке потенциального воздействия техногенной сейсмичности на окружающую среду для условий Монголии, согласно которому она дается с учетом глубины расположения гипоцентров

сейсмической активизации в районах освоения недр и качественно может быть выражена с помощью трехцветовой шкалы (зеленый-желтый-красный).

б. Рекомендовано разрабатывать регламент ведения горных работ для месторождений Монголии, на которых глубины гипоцентров техногенных сейсмических явлений превышают глубину ведения горных работ для профилактики геодинамической безопасности.

б. Задачей дальнейших исследований является обоснование рекомендаций по государственному регулированию экологической опасности, связанной с техногенной сейсмичностью при освоении недр Монголии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Временные указания по выявлению и контролю зон риска возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций при освоении недр и земной поверхности на основе результатов геодинамического районирования. — С-Пб., ВНИМИ, 1997, 12 с.
2. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / Коллектив авторов; Отв. ред. И. М. Петухов, А. М. Ильин, К. Н. Трубецкой. — М., Изд. АГН, 1997. — С.174-252.
3. Kozyrev, A., Batugin, A., Zuo, J., Zhukova, S. The Impact of Surface Water Seepage on Seismicity and Rockbursting in Mines // Sustainability (Switzerland), 2022, 14(22), 15414
4. Батугин А.С., Алферова А.С. Геодинамическая опасность как разновидность экологической опасности //Горный информационно-аналитический бюллетень, Отдельный выпуск 8 «Экология и метанобезопасность» -2011.— С. 297—304.
5. Li, T., Cai, M.F., Cai, M., 2007. A review of mining-induced seismicity in China. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44, 1149–1171. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.06.00>
6. Batugin A, Kobylkin A, Kolikov K, Ivannikov A, Musina V, Khotchenkov E, Zunduijamts B, Ertuganova E, Krasnoshtanov D. Study of the Migrating Mine Gas Piston Effect during Reactivation of Tectonic Faults. *Applied Sciences*. 2023; 13(21):12041. <https://doi.org/10.3390/app132112041>.
7. Batugin A., Musina V., Golovko I. Analysis of geodynamical conditions of region of burning coal dump's location. In: *Proceedings of World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS-2017)*, Praga, on September 11—15, 2017 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 95 (2017) 42023 doi :10.1088/1755-1315/95/4/042023.
8. Козырев А.А., Папанин В.И., Мальцев В.А., Аккуратов М.В., Кожин В.С. Изменение геодинамического режима и проявление техногенной сейсмичности при ведении крупномасштабных горных работ на апатитовых рудниках в Хибинском массиве / Проблемы геодинамической безопасности. II Международное рабочее совещание. Санкт-Петербург, 24-27 июня 1997 г. СПб: ВНИМИ, 1997.- С. 66-71.

9. Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Усиков В.И., Потапчук М.И. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении // Горный журнал. — 2016 № 12 — С. 13—19. DOI 10.17580/gzh.2016.12.03.
- 10.Цяо Цзяньюн, А. С. Батугин, И. М. Батугина, И.М. Петухов и др. Условия проявления геодинамических явлений на шахте Хуафэн в Китае. — Москва : Спутник+, 2016. — 143 с. ISBN 978-5-9973-3964-7.
- 11.Батугин А.С., Климанова В.Г. Затопление ликвидируемых шахт как возможная причина техногенных землетрясений в горнопромышленных районах //ГИАБ, 2002, с. 181-184.
- 12.Goldbach O. D. Recent research in seismology in South Africa. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Hard Rock Safe Safety Conference. 2009. Pp. 149-174.
- 13.Godano, M., Larroque, C., Delouis, B., Ampuero, J.-P., Arzu, F., Courboulex, F., et al. (2025). Back to the source: Connecting the seismological observations of Le Teil earthquake (Mw 4.9, 2019/11/ 11, France) to the local geology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2025JB031133. <https://doi.org/10.1029/2025JB031133>
- 14.Гупта Х. К., Растоги Б.К. Плотины и землетрясения / Х.К. Гупта, Б.К. Растоги ; Пер. с англ. О.А. Корчагиной, М.М. Мешкова. // М. : Мир, 1979.
- 15.Батугин А. С. Совершенствование методов оценки геодинамического состояния блочного массива горных пород в целях повышения экологической безопасности освоения недр и земной поверхности: автореферат дис. ... доктора технических наук: 25.00.36/ Батугин Андриан Сергеевич; [Место защиты: Моск. гос. гор. ун-т]. - Москва, 2008. - 39 с.
- 16.Никонов А.А. Человек воздействует на земную кору — М.: Знание, 1980. — 48 с. ил.; 20.
- 17.Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная - М.: ИДГ РАН, 2015. — 364 с. — ISBN 978-5-91682-032-4.
- 18.Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes // *Earth-Science Reviews*. - 2018. - Vol. 178. - P. 438–514.

19. McGarr A., Simpson D. Keynote lecture: a broad look at induced and triggered seismicity, "Rockbursts and seismicity in mines". In: Gibowicz SJ, Lasocki S (eds) Proceeding of 4th international symposium on rockbursts and 4 J Seismol (2013) 17:1–4 seismicity in mines, Poland, 11–14 August 1997. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 385–396.
20. Петухов, И. М Горные удары на угольных шахтах. — М. : Недра, 1972. - 221 с.
21. Адушкин В.В. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе. // Геология и геофизика. 2018;59(5):709–724. <https://doi.org/10.15372/GiG20180510>.
22. Белов В.С., Нестеренко М.Ю., Галеева Э.Р., Капустина О.А. Техногенно-тектоническая сейсмическая активность восточного Оренбуржья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. -№7-1. – С. 93-104.
23. Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Цирель С.В. Природно-техногенная сейсмичность Кузбасса // ФТПРПИ. – 2013. - N 6. - С. 20–34.
24. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе. // Физическая мезомеханика. Т.12.- 2009. - N 1 - С. 37-43.
25. Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018;(12):74–83. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>.
26. Rasskazov I.Y., Fedotova Y.V., Sydlyar A.V., Potapchuk M.I. Analysis of induced seismic events in rockburst-hazardous Nikolaevsk deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. - 2020. – N 11. – P. 46-56. DOI:10.25018/0236-1493-2020-11-0-46-56.
27. Дягилев Р.А. Макросейсмика техногенных землетрясений Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. -№ 3. -С. 292–304.
28. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс). // Российский сейсмологический журнал. 2020;2(1):48–61. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>.

29. Li, T., Cai, M.F., Cai, M., 2007. A review of mining-induced seismicity in China. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44, 1149–1171. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.06.00>.
30. Ren, F. Q., Zhu, C., Yuan, Z. H., Karakus, M., Tang, S. B., and He, M. (2023). Recognition of shear and tension signals based on acoustic emission parameters and waveform using machine learning methods. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 171, 105578. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105578>.
31. Wei Li, Sidao Ni, Chong Zang, Risheng Chu; Rupture Directivity of the 2019 5.8 Changning, Sichuan, China, Earthquake and Implication for Induced Seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2020; 110 (5): 2138–2153. doi: <https://doi.org/10.1785/0120200013>.
32. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. М.: Недра коммуникейшэнз. 1999. – 256 с.
33. Фатеев А. В., Еманов А. Ф., Подкорытова В. Г., Лескова Е. В. Землетрясения России в 2010 году // Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук". – Обнинск, 2012. – 208 с.
34. Zhang Hongwei, Li Sheng. Pattern recognition and possibility prediction of coal and gas outburst [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24 (19): 3577-3581.
35. Batugin, A. (2021) A proposed classification of the Earth's crustal areas by the level of geodynamic threat, *Geodesy and Geodynamics*, 12 (1) pp. 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.10.002>.
36. Chen, H.Q., 2022. Overview of the seismic input at dam sites in China. *Earthquake Science*, 35(5): 410-425 35. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2022.05.006>.
37. Chen RX, ZHU JJ, Li SZ, Zhang SY, Chen XQ, Li QQ, Wang PC, Zhang JL, Dai LM, Jia YG. Characteristics and mechanisms of human-induced earthquakes in China from the QuakeQuake database. *Geological Journal*. 2023;58: 2099-2131.
38. Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртогоо О. Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. – 1999. - Т. 18, N 5. - С. 24–43.

39. Батугин А.С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры. // Горная промышленность. - 2023; (S1): С. 14-21. - <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>.
40. Кузьмин М.И., Филиппова И.Б. История развития Монголо-Охотского пояса в среднем-позднем палеозое и мезозое / Строение литосферных плит. - М.: Инст. океанологии АН СССР, 1979. - С. 189–226.
41. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Т.2. - М.: Недра, 1990. - 327 с.
42. Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia // Nature. – 1993. - Vol. 364. - P. 299–307.
43. Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртоого О. Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. – 1999. - Т. 18, N 5. - С. 24–43.
44. Гордиенко И.В., Кузьмин М.И. Геодинамика и металлогения Монголо-Забайкальского региона // Геология и геофизика. – 1999. - Т. 40 (11). – С. 1545–1562.
45. Гаврилов В.П. Как устроены и чем богаты наши недра. - М.: Недра, 1981. – 191 с.
46. Шевченко Б.Ф., Попеко Л.И., Диденко А.Н. Тектоника и эволюция литосферы восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – N 5(3). - С. 667–682.
47. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и Геофизика. - 2003. – N 44(5). - С. 91-106.
48. Klyuchevskii A.V. Nonlinear geodynamics of the Baikal rift system: an evolution scenario with triple equilibrium bifurcation // Journal of Geodynamics. - 2010. – N 49. - P. 19-23. DOI.org/10.1016/j.jog.2009.08.001.
49. Klyuchevskii A.V. Rifting attractor structures in the Baikal rift system: location and effects // Journal of Asian Earth Sciences. - 2014. - N 88. - P. 246-256.
50. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of continental collision // Science. – 1975.- Vol. 189, N 4201. – P. 419-425.
51. Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной

- территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. - 2016. - Т. 7, N 3. - С. 407–434.
52. Van der Wal J.L.N., Nottebaum V.C., Stauch G., Binnie S.A., Batkhishig O., Lehmkuhl F., Reicherter K. Geomorphological evidence of active faulting in low seismicity Regions—Examples from the valley of Gobi lakes, southern Mongolia // *Frontiers in Earth Science*. - 2021. - N 8. DOI:10.3389/feart.2020.589814.
53. Леви К.Г., Мирошниченко А.И., Ружич В.В. и др. Современное разломообразование и сейсмичность в Байкальском рифте // *Физическая мезомеханика*. – 1999. - N 2(1-2). – С. 171-180.
54. Леви К.Г., Шерман С.И., Саньков В.И. и др. Карта современной геодинамики Азии. - Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007.
55. Мельников М.Г. О волновом механизме активизации разломов в сейсмических зонах литосферы Монголии // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2013. – N 4(1). - С. 69–81.
56. Ключевский А.В. Особенности сейсмогеодинамики литосферы Монголии // *Физическая мезомеханика*. - 2018 – N 21(2). - С. 118-131.
57. Dzhurik V.I., Klyuchevskii A.V., Serebrennikov S.P., Dem'yanovich V.M., Batsaihan Ts, Bayaraa G. Seismicity and Seismic Risk Mapping in Mongolia. - Irkutsk: IZK., 2009. - 420 p.
58. Sodnomsambuu D., Klyuchevskii A.V. Lithospheric stress in Mongolia, from earthquake source data // *Geoscience Frontiers*. – 2017. – N 8(6). – P. 1323-1337. DOI:10.1016/j.gsf.2017.01.003.
59. Baljinyam I. (ed.). Ruptures of major earthquakes and active deformation in Mongolia and its surroundings // *Geological Society of America*. - 1993. – Vol. 181.
60. Dugarmaa T., Schlupp A., Adija M., Ankhtsetseg D., Bayaraa G., Munkhuu D., Selenge L., Tsembel B., Ulziibat M., Odonbaatar C., Mungunsuren D., Munkhsaihan A., Narantsetseg R., Urtnasan K., Bayarsaikhan C., Baasanbat T. Seismic Map of Mongolia and Site Effect Microzoning at the Capital, Ulaanbaatar / *American Geophysical Union, Fall Meeting*. - 2002. - Abstract S71B-1100.
61. Demberel S., Radziminovich N., Bayaraa G., Munkhuu U., Davaasuren G., Danzansan E., Radziminovich Ya., Mordvinova V.M., Battsetseg B. / *Focal Mechanisms of Earthquakes in Mongolia. American Geophysical Union, Fall Meeting*. - 2011.- Abstract S11B-2206.

62. Meltzer, A., Stachnik, J.C., Sodnomsambuu, D., Munkhuu, U., Tsagaan, B., Dashdondog, M., & Russo, R.M. (2019). The Central Mongolia Seismic Experiment: Multiple Applications of Temporary Broadband Seismic Arrays. *Seismological Research Letters*.
63. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / под ред. В. П. Солоненко. – Новосибирск: Наука, 1977. – 303 с.
64. Сейсмическое районирование Северной Монголии. – М.: Наука, 1980. – 179 с.
65. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. – М.: Наука, 1985. – 224 с.
66. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – 420 с.
67. Демьянович М.Г., Ключевский А.В., Демьянович В.М. Основные разломы Монголии и их роль при сейсмическом районировании территории // Литосфера. — 2008. — N 3. — С. 3 – 13.
68. Джурик В.И, Серебренников С.П., Батсайхан Ц., Дреннов А.Ф., Брыжак Е.В., Усынин Л.А., Ескин А.Ю. Методика районирования сейсмической опасности приграничных территорий Монголо-Сибирского региона (на примере района г. Эрдэнэт) / Серия «Науки о Земле», 2012. - Т. 5. - N 1. - С. 118–142.
69. Рассказов И.Ю. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – N 3. – С. 3-13.
70. Рассказов И.Ю. Контроль динамических проявлений горного давления при разработке месторождения «Антей» // Горный журнал. – 2009. – N 12. – С. 11-14.
71. Rasskazov I.Y., Fedotova Y.V., Sydlyar A.V., Potapchuk M.I. Analysis of induced seismic events in rockburst-hazardous Nikolaevsk deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin. - 2020. – N 11. – P. 46-56. DOI:10.25018/0236-1493-2020-11-0-46-56.
72. Шабаров А.Н., Цирель С.В., Ютяев Е.П., Пальцев А.И. Пути обеспечения безопасности при проектировании интенсивной угледобычи в Кузбассе // Записки Горного института. - 2013. – Т. 205. – С. 103-107.

73. Пальцев А.И., Зубков В.В., Кротов Н.В. Особенности формирования зон повышенного горного давления при интенсивной разработке сближенных пластов на шахтах ОАО «СУЭК- Кузбасс» // Записки Горного института. - 2010. - Т. 188. – С. 54-57.
74. Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П., Позизов А.В. Обеспечение метанобезопасности шахт на основе глубокой дегазации угольных пластов при их подготовке к интенсивной подготовке // Уголь. – 2019. – N 7. - С. 42-47. DOI:10.18796/0041-5790-2019-7-42-47.
75. Василенко Т.А., Волошина Н.И., Кольчик И.Е., Молодецкий А.В., Подрухин А.А. Исследование содержания метана в почвенном воздухе в области выхода под наносы геологических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 159–166. © 2016. (ISSN 0236–1493).
76. Качурин и др., 2017] Грязев М. В., Качурин Н. М., Воробьев С. А. Методика оценки воздействий породных отвалов шахт на окружающую среду и мероприятия по их локализации // Журнал «Записки Горного института» / Геоэкология и безопасность жизнедеятельности. - 2017. Т. 223. С. 99-108.
77. Donnelly, L.J. A review of coal mining-induced fault reactivation in Great Britain. // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 2006, 39, 5–50.
78. Guo, Luo, Wang, 2023;] Guo, Y.; Luo, L.; Wang, C. Research on Fault Activation and Its Influencing Factors on the Barrier Effect of Rock Mass Movement Induced by Mining. Appl. Sci. 2023, 13, 651.
79. Panzhin, A.A. The role of tectonic faults in the process of displacement at the mines of Vysokogorsk. Min. Inf. Anal. Bull. 2005, 4, 131–136.
80. Батугина И.М., Петухов И.М. Геодинамическое районирование при проектировании и эксплуатации рудников. М.: Недра, 1988.
81. Батугин А.С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры // Горная промышленность. – 2023. - №S1. – С. 14-21. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21
82. Bommer, J.J., Verdon, J.P. The maximum magnitude of natural and induced earthquakes. Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour. 10, 172 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00895-2>.
83. Foulger, G., M. Wilkinson, M. Wilson, N. Mhana, T. Tezel, and J. Gluyas (2023). Human-induced earthquakes: E-PIE—A generic tool for evaluating

- proposals of induced earthquakes, *J. Seismol.* 27, 21–44, doi: 10.1007/s10950-022-10122-8.
84. Petersen, M. D., Mueller, C. S., Moschetti, M. P., Hoover, S. M., Llenos, A. L., Ellsworth, W. L., ... Rukstales, K. S. (2016). Seismic-Hazard Forecast for 2016 Including Induced and Natural Earthquakes in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*, 87(6), 1327–1341. <https://doi.org/10.1785/0220160072>.
85. He, M., Cheng, T., Qiao, Y., Li, H., 2022. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014>.
86. Kobylkin S.S. Pugach, A. S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022; 7 (2): 126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>.
87. Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах. С-Пб: ВНИМИ. 2004.
88. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016; (2): 34–47.
89. Ловчиков А.В. Горно-тектонические удары на российских рудниках: статистика и некоторые закономерности // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1997. - №2. – С. 22-32.
90. Батугин А.С., Шевчук С.В., Шерматова С.С., Головки И.В., Зундуйжамц В. К вопросу мониторинга геоэкологической опасности при геодинамическом взаимодействии объектов освоения недр // *ГИАБ.* – 2021. - №10-1. – С. 63-73. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_63. Личный вклад: оценка размеров зоны геодинамического взаимодействия горных предприятий.
91. Dahm T, Becker D, Bischoff M, Cesca S, Dost B, Fritschen R, Hainzl S, Klose CD, Kühn D, Lasocki S, Meier T, Ohrnberger M, Rivalta E, Wegler U, Husen S (2012) Recommendations on the discrimination between human-related and natural seismicity. *J Seismol.* doi:10.1007/s10950-012-9295-6.
92. Salvage, R. O., D. W. Eaton, C. M. Furlong, J. Dettmer, and P. K. Pedersen (2023). Induced or Natural? Toward Rapid Expert Assessment, with Application to the Mw 5.2 Peace River Earthquake Sequence, *Seismol. Res. Lett.* XX,1–15, doi: 10.1785/0220230289.

93. Keranen, K. M., H. M. Savage, G. A. Abers, and E. S. Cochran (2013). Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence, *Geology* 41, no. 6, 699–702, doi: 10.1130/G34045.1.
94. Davis SD, Frohlich C (1993) Did (or will) fluid injection cause earthquakes? - criteria for a rational assessment. *Seismol Res Lett* 64:207–224.
95. Oprsal, I., and L. Eisner (2014). Cross-correlation—An objective tool to indicate induced seismicity, *Geophys. J. Int.* 196, 1536–1543.
96. Goebel, T. H. W., and E. E. Brodsky (2018). The spatial footprint of injection wells in a global compilation of induced earthquake sequences, *Science* 361, 899–904.
97. Schoenball, M., N. C. Davatzes, and J. M. G. Glen (2015). Differentiating induced and natural seismicity using space–time–magnitude statistics applied to the Coso Geothermal field, *Geophys. Res. Lett.* 42, 6221–6228.
98. Иващенко А.И. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 года и его значение в сейсмической истории Сахалина. В кн.: Левин Б.В., Лихачева О.Н. (ред.) Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: материалы Всерос. науч. конф. с международным участием, г. Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г. Владивосток: Дальнаука; 2015. Т. 1. С. 20–23.
99. Ellsworth W.L. Injection-induced earthquakes. *Science*. 2013;341(6142):1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>.
100. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука; 2003. 270 с.
101. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. М.: Недра коммуникэйшенз; 1999. 288 с.
102. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Будков А.М., Иванченко Г.Н. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года. *Геодинамика и тектонофизика*. 2019;10(3):741–759. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>.
103. Петухов И.М. О природе горизонтальных сил в земной коре. В кн.: Норватов Ю. А. (ред.) Изучение и прогноз сдвижений и деформаций массива горных пород, гидрогеомеханических процессов при отработке месторождений подземным и открытым способами. СПб.: ВНИМИ; 1991.

104. Ломакин В.С. Региональный прогноз удароопасности шахтных полей на основе сейсмологических наблюдений. Дисс. канд. техн. наук. Свердловск. – 1984. – 179 с.
105. Townend, J., Zoback, M.D., 2000. How faulting keeps the crust strong. *Geology* 28.
106. Verdon JP, Baptie BJ, Bommer JJ (2019) An improved frame work for discriminating seismicity induced by industrial activities from natural earthquakes. *Seismol Res Lett* 90:1592–1611. <https://doi.org/10.1785/0220190030>.
107. Radziminovich N.A., Bayar G., Miroshnichenko A.I., Demberel S., Ulziibat M., Ganzorig D., Likhnev A.V. 2016. Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (1), 23–38. doi:10.5800/GT-2016-7-1-0195.
108. Ключевский А. В., Дугармаа Т., Демьянович В. М., Баярт Г. Основные параметры и характеристики сейсмичности в Монголии. Материалы конференции, посвященной 50-летию Гоби-Алтайского землетрясения 1957 года, Улан-Батор, 2007.
109. Andrian, Batugin and Ulziibat, Munkhuu and Zunduijamts, Byambasuren and Mihail, Shengery and Khishigdelger, Ulziisaikhan and Elmira, Ertuganova, Man-Made Seismicity in Mongolia and Problem of its Management. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5071295> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5071295>.
110. Бямбасурэн З., Мунхуу У., Батугин А.С., Улзийсайхан Х. Техногенная сейсмичность районов Таван-Толгой и Матад в Монголии // Актуальные проблемы современной науки. – 2025. - №3.- С. 10-15.
111. Батугин А.С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках земной коры с предельно напряженным состоянием // Горный журнал, 2021, №1. С. 22-27. Doi 10.17580/gzh.2021.01.04
112. Kijko A. Estimation of the Maximum Earthquake Magnitude, M_{max} // Published 1 August 2004. *Geology pure and applied geophysics*. DOI:10.1007/S00024-004-2531-4.
113. Тараканов Р. З., Бобков А. О. Оценка предельных магнитуд землетрясений с помощью метода Гумбеля - Региональные проблемы. 2012. Том 15, № 1. С. 41-47.

114. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях» РБ-019-18 (в редакции приказа Ростехнадзора от 11 мая 2018 г. № 208).
115. McGarr, A., 1991. On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, 948-970.
116. Ito K., Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes, *Tectonophysics* 306 (3e4) (1999) 423e433, [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00069-4).
117. Батугин А.С., Содномсамбуу Дэмбэрэл (MN), Шерматова С.С., Бямбасурэн Зуйндуйжамц (MN), Мунхуу Олзийбат (MN). Способ оценки максимально возможной магнитуды техногенного землетрясения в районах освоения недр и земной поверхности. Патент РФ 2818 493(13) С2, опубл. 02.05.2024, бюлл. №13 (МПК G01V 1/00; G01V 9/00).
118. Bommer J., Verdon J. The maximum magnitude of natural and induced earthquakes. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* (2024) 10:172, <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00895-2>.
119. Langenbruch, C., Moein, M.J., Shapiro, S.A., 2024. Are maximum magnitudes of induced earthquakes controlled by pressure diffusion?. *Phil. Trans. R. Soc. A* 382(2276), 20230184. <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0184>
120. Hallo, M., Oprsal, I., Eisner, L., Ali, M.Y., 2014. Prediction of magnitude of the largest potentially induced seismic event. *J. Seismol.* 18, 421–431.
121. Baisch, S., Koch, C., Muntendam-Bos, A., 2019. Traffic light systems: to what extent can induced seismicity be controlled? *Seismol. Res. Lett.* 90, 1145–1154.
122. Verdon J.P., Rodríguez-Pradilla G. (2023) Assessing the variability in hydraulic fracturing-induced seismicity occurrence between North American shale plays. *Tectonophysics* 859:229898.
123. Nantanoi S., Rodríguez-Pradilla G., Verdon J.P. (2022) 3D-Sei's mic interpretation and fault slip potential analysis from hydraulic fracturing in the Bowland Shale, UK. *Pet Geo sci* 28: petgeo2021–petgeo2057.

124. Геодинамическое районирование приграничной (Россия-Монголия) территорий в пределах Монголо-Охотского орогенного пояса. - Отчет по гранту № 075-15-2021-969 от 23 сентября 2021 г.. Рег. № НИОКТР 121122300087-7ю Москва, НИТУ МИСИС, 2021, 145 с.
125. Тряпицын В.М., Шабаров А.Н. Современная тектоника и геодинамика Хибин // Авантитул. – Кострома. 2007. – 146 с.].
126. Shapiro S.A., Krüger O.S., Dinske C., Langenbruch C. (2011) Magnitudes of induced earthquakes and geometric scales of fluid-stimulated rock volumes. *Geophysics* 76(6):WC55–WC63.
127. Van Wees J.-D., Osinga S., van Thienen-Visser K., Fokker P.A. (2017) Reservoir creep and induced seismicity: inferences from geomechanical modeling of gas depletion in the Groningen field. *Geophys J Int* 212:1487–1497.
128. Buijze L., van den Bogert P.A.J., Wassing B.B.T., Orlic B., ten Veen J. (2017) Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-induced seismic events in a Rotliegend gas reservoir. *Neth J Geosci* 96:131–148.
129. Boitz N., Langenbruch C., Shapiro S.A. (2024) Production induced seismicity indicates a low risk of strong earth quake in the Groningen gas field. *Nat Commun* 15(1):329.
130. Bourne S.J., Oates S.J. (2017) Development of statistical geomechanical models for forecasting seismicity induced by gas production from the Groningen field. *Neth J Geosci* 96:175–182.
131. Galis M., Ampuero J.P., Martin Mai P., Cappa F. (2017) Induced seismicity provides insight into why earth quake ruptures stop. *Sci Adv*. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap7528>.
132. Cooke P. (1979) Statistical Inference for Bounds of Random Variables. *Biometrika* 66:367–374.
133. Mendecki AJ (2016) Mine seismology reference book. Institute of mine seismology, Somerset West, South Africa.
134. Sadovsky, M.A. Selected Works: Geophysics and Physics of Explosion; Nauka: Moscow, Russia, 2004.
135. Шерматова С. С., Бамбясурэн З., Шевчук С. В., Ромеро М., Доскалов А. И. К оценке степени геодинамической опасности в

горнопромышленном районе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12. – С. 175–184. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_175.

136. Holschneider M., Zöller G., Hainzl S. (2011) Estimation of the maximum possible magnitude in the framework of a doubly truncated Gutenberg-Richter model. *Bull Seismol Soc Am* 101(4):1649–1659.
137. Zöller G., Holschneider M., Hainzl S. (2013) The maximum earthquake magnitude in a time horizon: theory and case studies. *Bull Seismol Soc Am* 103(2A):860–875.
138. Atkinson G.M., Eaton D.W., Igonin N. Developments in understanding seismicity triggered by hydraulic fracturing. *Nature Reviews Earth & Environment*, volume 1, pages 264–277 (2020) Cite this article <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0049-7>.
139. Davis R.O. and Selvadurai A.P.S. (1996) *Elasticity and geomechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996, 201 pp., ISBN 0-521-49827-9
140. Dzhanuzakov, K.J., 2013. Regional features of attenuation of intensity of concussions of strong earthquakes in Kyrgyzstan and adjacent areas Republic. *Bulletin of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyzstan* 2, 13–18.
141. Gavrilenko, Y.N.; Ermakov, V.N.; Krenida, Y.F.; Uglitskiy, O.A.; Driban, V.A. Technogenic Consequences of the Closure of Coal Mines in Ukraine; Gavrilenko, Y.A., investigations on Methane Emission from Flooded Workings of Closed Coal Mines. *J. Sustain. Min.* 2013, 12, 40–45.
142. Chećko, J.; Howaniec, N.; Paradowski, K.; Smolinski, A. Gas Migration in the Aspect of Safety in the Areas of Mines Selected for Closure. *Resources* 2021, 10, 73.
143. Donnelly, L.J. A review of coal mining-induced fault reactivation in Great Britain. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 2006, 39, 5–50.
144. Cui, H.; Xue, Z.; Jia, X. Reactivated Faults in Mining Area. *Mem. Muroran Inst. Technol.* 2010, 59, 101–106.
145. Qin, Z.; Agarwal, V.; Gee, D.; Marsh, S.; Grebby, S.; Chen, Y.; Meng, N. Study of Ground Movement in a Mining Area with Geological Faults Using FDM Analysis and a Stacking InSAR Method. *Front. Environ. Sci.* 2021, 9, 787053.

146. Panzhin, A.A. The role of tectonic faults in the process of displacement at the mines of Vysokogorsk. *Min. Inf. Anal. Bull.* 2005, 4, 131–136.
147. Guo, Y.; Luo, L.; Wang, C. Research on Fault Activation and Its Influencing Factors on the Barrier Effect of Rock Mass Movement Induced by Mining. *Appl. Sci.* 2023, 13, 651.
148. Sosnovsky, L.I.; Sosnovskaya, E.L. Justification of subsidence parameters in view of tectonic faults when mining gold from Berezovsky deposit. *J. Irkutsk. State Univ. Technol.* 2010, 4, 69–74.
149. Krasavin, P.; Navitny, A.M.; Capons, Y. Environmental monitoring at the liquidation of mines and quarries—Perm, JSC “MNIIEKO Energy”, 2010.
150. Namjesnik, D.; Kinscher, J.; Contrucci, I.; Klein, E. Impact of past mining on public safety: Seismicity in area of flooded abandoned coal Gardanne mine, France. *Int. J. Coal Sci. Technol.* 2022, 9, 90.
151. Bell, F.G. *Geological Hazards: Their Assessment, Avoidance and Mitigation*; CRC Press: London, UK, 1999.
152. Batugin, A.S. Reactivation of major faults during strong rock bursts as realization of tectonic process. In *Proceedings of the Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development—Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, Foz do Iguassu, Brazil, 13–18 September 2019*; pp. 1261–1268.
153. Sagy, A.; Brodsky, E.E.; Axen, G.J. Evolution of fault-surface roughness with slip. *Geology* 2007, 35, 283–286.
154. Kocharyan, G.G.; Kishkina, S.B. The physical mesomechanics of the earthquake source. *Phys. Mesomech.* 2020, 23, 9–24.
155. Tsuboi, C. Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock Area, and Strength of the Earth’s Crust. *J. Phys. Earth* 1956, 4, 63–66.
156. Bugaev, E.G. On structured and diffuse seismicity, stiffness of earthquake foci, and nonlinearity of magnitude recurrence graphs. *Geodyn. Tectonophys.* 2011, 2, 244–265.
157. Scholz, C.H.; Lynn, S.; Yash, A. Earthquake Prediction: A Physical Basis. *Science* 1973, 181, 803–810.
158. Gresov, A.I.; Yatsuk, A.V. Gas zoning and gas presence of permafrost in the coal-bearing basins of eastern arctic and adjacent regions. *Geoecology Eng. Geol. Hydrogeol. Geocryol.* 2013, 5, 387–398.

159. Cai, Y.; Li, S.; Kong, X.; Wang, X.; Ji, P.; Yang, S.; Lin, X.; He, D.; Zhou, Y. Fracture Evolution of Overburden Strata and Determination of Gas Drainage Area Induced by Mining Disturbance. *Sustainability* 2023, 15, 2152.
160. Ruzhich, V.V.; Psakhie, S.G.; Chernykh, E.N.; Shilko, E.V.; Levina, E.A.; Ponomareva, E.I. Physical simulation of seismic vibration sources on fault zone irregularities. *Phys. Mesomech.* 2014, 17, 43–52.
161. Garber, I.S.; Grigoriev, V.E.; Dupak, Y.N.; Lyubich, G.A.; Mishin, N.A. *Faults in Coal Seams: Based on Materials from Mines Geology*; Nedra: Leningrad, Russia, 1979.
162. Tiab, D.; Donaldson, E. *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, 3rd ed.; Gulf Professional Publishing: Houston, TX, USA, 2011.
163. Kolomin, R.G. Tectonic structure of the mine field 5/7 of the Anzhero-Sudzhensk coal Kuzbass region. *Probl. Geol. Kuzbass.* 1959, 2, 252–266.
164. Barannik, L.P.; Schastlivtsev, E.L.; Sidorova, E.L.; Chumachenko, F.A.; Lazarevich, T.I.; Vlasenko, B.V.; Porfilkin, E.G.; Taratuta, G.A.; Yazvenko, V.E.; Aluker, N.L.; et al. *Ecological Problems of Coal-Mining Areas during the Closure of Mines*; Gritsko, G.I., Ed.; ID ‘Asia’: Kemerovo, Russia, 2001.
165. Leshcheva, A.N. Tectonics of the field of mine No. 9-15 of the Anzhero-Sudzhensk district of Kuzbass. *Probl. Geol. Kuzbass.* 1959, 2, 267–279.
166. Kiryaeva, T.A.; Oparin, V. The Influence of Nonlinear Deformation-Wave Processes Induced by Seismic Effects on the Gas- Dynamic Activity of Coal Mines. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021, 666, 022013.
167. Kuzin, A.M. Degassing of the Earth: From earthquakes to the formation of deposits of mineral fluid genesis. *Actual. Probl. Oil Gas* 2018, 4, 1–16.
168. Stefánsson, R.; Bonafede, M.; Gunnar, B.M. Gudmundsson Earthquake-Prediction Research and the Earthquakes of 2000 in the South Iceland Seismic Zone. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2011, 101, 1590–1617.

Приложение 1

Справка о внедрении результатов исследования



INSITUTE OF ASTRONOMY AND GEOPHYSICS

MONGOLIAN ACADEMY OF SCIENCES

Lkhagvasuren street 42, Bayanzurkh District,
Ulaanbaatar 13343, MONGOLIA
Tel: (976-11) 45 88 49, Fax: (976-11) 45 52 04,
E-mail: iag@iag.ac.mn, http://www.iag.ac.mn

Date 05 Март, 2026 года
Ref. 63

Настоящая рекомендация выдана Бямбасурэну Зундуйжамцу в том, что результаты его диссертационного исследования, посвящённого оценке влияния техногенной сейсмичности на окружающую среду, отражённые в опубликованных научных работах, представляют научный и практический интерес и рекомендованы к использованию в научно-исследовательской деятельности Института астрономии и геофизики Академии наук Монголии.

С уважением,

Директор
Ч.ОДОНБААТАР
Института астрономии и геофизики
Академии наук Монголии

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2818493

**Способ оценки максимально возможной магнитуды
техногенного землетрясения в районах освоения недр и
земной поверхности**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский технологический
университет "МИСИС" (RU)*

Авторы: *Батугин Андриан Сергеевич (RU), Содномсамбуу
Дэмбэрэл (MN), Шерматова Сайёра Сидиковна (RU),
Бямбасурэн Зуйндуйжамац (MN), Мунхуу Олзийбат (MN)*

Заявка № 2022117739

Приоритет изобретения 30 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 02 мая 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 30 июня 2042 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов