

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачёва**

На правах рукописи



**РАЗУМОВ ЕГОР ЕВГЕНЬЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
УДАРООПАСНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЕЙСМИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ОТРАБОТКЕ  
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Специальность 2.8.6. – Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание учёной  
степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор С. М. Простов

Кемерово 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ	10
1.1. Проблема прогноза и предотвращения динамических явлений на угольных шахтах	10
1.2. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности	15
1.3. Математическое моделирование геомеханических процессов	18
1.4. Метод сейсмического мониторинга	26
1.5. Выводы, цель и задачи исследований	34
ГЛАВА 2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ	37
2.1. Аппаратурное обеспечение системы сейсмического мониторинга	37
2.2. Алгоритмы первичной обработки цифровых баз данных сейсмического мониторинга	47
2.3. Интегральные показатели сейсмической активности	50
Выводы	61
ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА	63
3.1. Методика экспериментально-аналитического исследования геомеханических процессов	63
3.2. Закономерности динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта в изменяющихся горно-геологических условиях	73
3.3. Критерии вероятности проявления удароопасности по данным сейсмического мониторинга	82
Выводы	88
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И КРИТЕРИЕВ КОМПЛЕКСНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УДАРООПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА	91
4.1. Алгоритмы регионального, локального и текущего прогноза при отработке угольного пласта на основе сейсмического мониторинга	91
4.2. Перспективные методы локального и текущего прогноза удароопасности (ЭМИ, естественного геоэлектрического поля, георадиолокации)	95
4.3. Внедрение результатов исследований при ведении горных работ на угольных шахтах и рудниках России и ближнего зарубежья	104
Выводы	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109

Список литературы	113
Приложения	
А. Фрагмент программы для ЭВМ «Метод определения координат очага динамического явления при сейсмическом мониторинге». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610907	124
Б. Фрагмент программы для ЭВМ «Расчёт интегрального показателя для параметров сейсмической активности». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681203	126
В. Акт внедрения результатов исследования	128
Г. Титульный лист «Методических указаний по сейсмическому геодинамическому мониторингу при отработке удароопасных угольных пластов»	130

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Разработка угольных месторождений подземным способом осложнена проявлением динамических явлений в результате действия основных влияющих факторов – увеличения глубины ведения очистных работ, повышения интенсивности отработки, сложных горно-геологических и горнотехнических условий.

Согласно «Инструкции по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» основные виды динамических явлений следующие: горные удары; внезапные выбросы угля (породы) и газа; внезапные выдавливания угля и внезапные динамические разрушения пород почвы. Установлены характерные события, предшествующие динамическим явлениям, и их основные визуальные признаки. По данным Сибирского отделения Ростехнадзора с 2015 по 2023 годы на шахтах Кузбасса произошло 25 случаев динамических явлений и обрушений пород.

Для осуществления безопасной выемки угля на пластах, склонных и опасных по горным ударам, разработаны и постоянно совершенствуются геологические, геомеханические и геофизические методы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, на основе которых реализуется региональный, локальный и текущий прогноз динамических явлений в угольных шахтах.

Несмотря на значительные успехи методов компьютерного моделирования в решении геомеханических задач, инструментальный геоконтроль является основным методом, обеспечивающим прогноз динамических явлений причём тенденция состоит не в локальном, а системном применении этих методов, реализующих дистанционный и автоматизированный режимы функционирования. Весьма перспективно в этом направлении развитие аппаратного и методического обеспечения систем сейсмического мониторинга и прогноза.

Разработанные и реализованные на данный момент системы активного и пассивного сейсмоакустического мониторинга массива горных пород обеспечивают непрерывный дистанционный и автоматизированный режимы прогноза удароопасности на основе цифровых информационных технологий.

Вместе с тем, точность геомеханического прогноза пассивных систем сейсмического мониторинга остаётся недостаточной по следующим причинам: сохраняется высокая погрешность расчёта координат очагов сейсмособытий из-за несовершенства конструкции приёмных устройств, алгоритмов первичной обработки сейсмической информации; отсутствуют информативные интегральные цифровые показатели сейсмической активности; прогноз удароопасности проводят по одному критерию – превышению критического уровня сейсмической энергии или количества (скорости) регистрируемых импульсов; не разработаны методы и количественные критерии, обеспечивающие эффективный переход от регионального прогноза на основе непрерывного сейсмического мониторинга к локальному и текущему.

На основе изложенного актуальным является совершенствование методического обеспечения системы пассивного сейсмического мониторинга с учётом взаимосвязи интегральных параметров сейсмической активности массива с геомеханическими критериями, определяющими вероятность разрушения приконтурной части выработки в динамической форме.

Работа выполнялась по плану НИР АО «ВНИМИ» на период с 2019 по 2024 годы.

**Цель работы:** обоснование и разработка технических решений для совершенствования метода прогнозирования удароопасности при интенсивной отработке угольных пластов на основе интегральных параметров сейсмического мониторинга, обеспечивающих повышение информативности прогноза и безопасное ведение горных работ.

**Идея работы** заключается в разработке интегральных показателей сейсмической активности массива горных пород, взаимосвязанных с основными геомеханическими параметрами, определяющими вероятность динамических проявлений горного давления, обосновании на этой основе количественных критериев регионального прогноза и детализирующих переход к локальному и текущему прогнозу.

**Задачи исследований:**

- усовершенствовать на основе цифровых информационных технологий методическое обеспечение сейсмического мониторинга и алгоритмы обработки информации;
- обосновать метод регионального прогноза удароопасности по интегральным параметрам сейсмического мониторинга;
- разработать метод и критерии комплексного прогнозирования удароопасности на основе сейсмического мониторинга.

**Объект исследований:** углепородный массив с аномальными зонами в форме тектонических нарушений и участков передовых выработок в процессе интенсивной отработки угольных пластов.

**Предмет исследований:** параметры сейсмической активности и геомеханического состояния массива горных пород, их взаимосвязи и диапазоны критических значений, определяющие вероятность разрушения приконтурной части выработки в динамической форме.

**Методы исследований:** анализ результатов исследований в областях геомониторинга и математического моделирования геомеханических процессов; разработка циклических алгоритмов при обработке цифровых баз данных и их реализации в программных продуктах; шахтные экспериментальные исследования методом сейсмического мониторинга; статистическая обработка экспериментальных данных и баз данных результатов расчётов, выполненных с помощью комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов при подземной разработке угольных пластов (свидетельство о регистрации электронного ресурса №17997).

**Научные положения, защищаемые в диссертационной работе:**

- повышение информативности сейсмического мониторинга обеспечивается использованием комплексного параметра  $F$ , включающего отношение энергий сейсмических событий к фоновому уровню и сейсмических активностей за расчётный интервал времени, а также интегрального показателя  $I_F$ , полученного суммированием средних значений  $F_i$ , и площадей зон, ограниченных изолиниями  $F_i$ , причём

информативность показателя  $I_F$  более чем в 1,4 раза выше;

- прогноз удароопасности с точностью более 80% обеспечивается по соотношению величин максимального уровня параметра  $F_{\max}$  (его интегрального показателя  $I_F$ ) и расстояния  $x_F$  от обнажения до точки со значением  $F_{\max}$ , при этом разграничительная линия номограммы «опасно-неопасно» имеет вид параболической функции;

- рациональный переход от регионального прогноза удароопасности к локальному (текущему) достигается установлением границ опасного участка по пересечению изолиний с уровнем, превышающем критический  $F_{\text{кр}} > 200$ , с линией обнажения, в пределах которого проводят прогноз методами выхода буровой мелочи или геофизическим (геоэлектрическим, георадиолокации или электромагнитным).

**Научная новизна работы заключается:**

- в обосновании информативности комплексного параметра  $F$  и интегрального показателя  $I_F$  и разработке алгоритмов для их вычисления;

- в совершенствовании метода регионального прогноза удароопасности по номограммам в координатах  $(F_{\max}; x_F)$  и  $(I_F; x_F)$ , взаимосвязанных с фундаментальными параметрами, определяющими вероятность разрушения приконтурной части выработки в динамической форме – выходом бурового штыба, концентрацией механических напряжений и расстоянием до точки их максимума;

- в обосновании количественного критерия перехода от регионального прогноза удароопасности к локальному (текущему) в виде границ опасного участка.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: корректным применением методов обработки баз данных сейсмического мониторинга; достаточными критериями корреляции и надёжности оценки в полученных регрессионных зависимостях; положительными результатами внедрения технических разработок и системы сейсмического мониторинга GITS на горнодобывающих предприятиях России и Казахстана.

**Личный вклад автора** заключается в технических разработках в областях сейсмического и локального геофизического мониторинга; планировании, организации, проведении шахтных сейсмических и локальных геофизических исследований, их обработке, анализе, и сопоставлении с базами данных, полученных методами выхода бурового штыба и геомеханического моделирования.

**Научное значение работы** состоит в обосновании, практической реализации технических решений по совершенствованию метода прогнозирования удароопасности при интенсивной отработке угольных пластов на основе системы сейсмического мониторинга, включающего использование интегральных параметров сейсмической активности массива, взаимосвязанных с основными геомеханическими параметрами, определяющими вероятность динамических проявлений горного давления, и тем самым повышающего точность прогноза.

**Отличие от ранее выполненных работ** заключается: в экспериментально-аналитическом обосновании информативности введённых интегральных параметров  $F$ ,  $I_F$  сейсмической активности и их взаимосвязи с геомеханическим состоянием углепородного массива в изменяющихся горнотехнических условиях; разработке на этой основе количественных критериев регионального сейсмического прогноза удароопасности и перехода к локальному (текущему) прогнозу буровым и геофизическими методами.

**Практическая ценность работы** состоит в разработке методик, алгоритмов и программ для ЭВМ, обеспечивающих расчёт координат очагов сейсмособытий и интегральных параметров сейсмоактивности массива; в обосновании рекомендаций по организации сейсмического мониторинга и прогноза на его основе на горнодобывающих предприятиях Кузбасса, Воркуты, Якутии и Казахстана.

**Реализация работы.** Основные положения, отражающие существо и методические аспекты разработанного метода, изложены в отраслевом методическом документе «Методические указания по сейсмическому геодинамическому мониторингу при отработке удароопасных угольных пластов». Документ согласован с АО «ВостНИИ» и принят к использованию АО «ВНИМИ» при организации сейсмического мониторинга на горнодобывающих предприятиях.

Полученные научно-практические результаты используются в учебном процессе КузГТУ при чтении курса «Физико-технический контроль и мониторинг процессов горного производства».

**Апробация работы.** Материалы диссертации рассмотрены на Международном инновационном симпозиуме (Кемерово, 2020), Международной научно-практической конференции в рамках выставки-ярмарки «Уголь России и Майнинг» «Наукоёмкие технологии разработки и исследования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2021), Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Россия молодая» (Кемерово, 2021).

**Публикации.** По теме работы опубликовано 17 научных работ, в том числе 8 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 12 в изданиях, индексируемых в международных базах данных, получен 1 патент на изобретение и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Объем работы.** Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, изложена на 130 страницах машинописного текста, включает 51 рисунок, 23 таблицы, список литературы из 136 наименований, 4 приложения.

Автор выражает искреннюю признательность директору по науке АО «ВНИМИ» Мулеву С. Н. за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований, сотрудникам СибГИУ за предоставленные базы данных геомеханических расчётов, научному руководителю проф. Простову С. М. за новые научные идеи, а также проф. Гоголину В. А. и проф. Ермаковой И. А. за глубокий анализ выполненной работы и ценные замечания.

# 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

## 1.1 Проблема прогноза и предотвращения динамических явлений на угольных шахтах

Повышение действующих напряжений в массиве горных пород с увеличением глубины, влияния полей геологических нарушений, повышение интенсивности отработки актуализируют вопрос прогноза динамических явлений на глубоких угольных пластах [1–6].

Изучение действующих сил в массиве горных пород, результатом которых являются деформационные процессы, происходит со второй половины XIX века. Ведутся исследования по определению механизма возникновения и фиксации действующих сил. Одним из решений по изучению геомеханических процессов является моделирование физических процессов, таких как разрушение, деформация, сдвигание, данными вопросами занимались в 1985–1986 гг. учёные Хэнкок и Нейлор [7–8].

В 1893 году Г. Беккер в своих трудах [9] выдвинул гипотезу обоснования развития деформаций под действием внешних сил, но в 1956 г. Г. Д. Ажгирей в виду отсутствия описания реального механизма и формального подхода к описанию принципов деформации опроверг её [10].

В ходе развития теории упругости и прочности, теоретической механики, изучения характеристик материалов, физики и математики, менялось и уточнялось представление о тектонических процессах, происходящих в недрах Земли.

Уже на рубеже XIX–XX вв. были поставлены эксперименты, позволяющие объяснить на модели натурные процессы. Интерпретация данных, полученных в ходе геолого-разведочных работ через основы геомеханики выполняется В. Мид, В. Берлер, Ч. Лизс и др. [11, 12].

Однако основополагающие принципы моделей были взяты из механики, что снижало их достоверность, и не учитывались физические свойства пород, что отмечал М. В. Гзовский [13].

В 1937 году Г. Н. Кузнецовым было выполнено моделирование процессов в

горных породах методом эквивалентных материалов [14]. В настоящее время данный метод не применяется в виду сложности учёта временного фактора (масштаба), так как построенная модель является уменьшенной копией натуральных условий, то и рассматриваемые процессы в ней, такие как обрушения, деформации и разрывы сплошности протекают быстрее.

В период 1940–1950 гг. развитие геомеханики обусловлено определением закономерностей и процессов образования тектонических структур, результаты исследований отражены в работах следующих авторов: С. А. Батугин, И. М. Батугина, В. В. Белоусов, А. В. Пейве, В. Е. Хаин, А. А. Сорский, М. В. Гзовский, В. В. Эз, Е. И. Паталаха, В. Н. Шолпо, Н. Б. Лебедева, А. М. Сычева-Михайлова, Д. А. Казимиров, А. В. Вихерт, М. А. Гончаров, М. К. Крейтер, Ф. И. Вольфсон и др. [15–17].

За последние 80 лет накоплен значительный опыт экспериментальных и теоретических исследований первопричин и необходимых условий реализации негативных геодинамических явлений в ходе ведения горных работ, обоснованы предвестники и способы прогнозирования мощных опасных событий.

В работах В. А. Смирнова, Б. Ш. Винокура, П. В. Егорова, Я. А. Бича, М. В. Курлени, И. Ю. Рассказова, В. Н. Опарина, А. А. Еременко, С. Г. Авершина, И. М. Петухова, Г. А. Соболева, А. Д. Завьялова, А. А. Козырева, К. Н. Трубецкого А. В. Ловчикова, В. В. Адушкина, В. С. Куксенко, В. Н. Фрянова, А. Мендецки, М. А. Садовского, А. А. Куксенко, А. А. Маловичко, и других изложены фундаментальные закономерности проявлений горного давления.

Динамические проявления горного давления фиксируются в шахтах и рудниках Канады, США, Швеции, Чехии, Германии, ЮАР, Англии, Франции, Китая, Индии и других стран. Одними из первых динамических явлений были зафиксированы в 1738 г. на рудниках Уайтхейвене в Англии. Первый горный удар в Индии был зафиксирован в 1898 г. на руднике Ургаум на глубине 320 м. Один из первых горных ударов в Канаде был зафиксирован в Онтарио на руднике Lake Shore в 1932 г., а в 1957 г. был зафиксирован горный удар с энергией  $5 \times 10^4$  МДж. Один из первых горных ударов, зарегистрированных в России, произошёл в 1944 г. в Кизеловском угольном бассейне [18–28].

Начиная с 1960-х годов динамические явления начинают проявляться при

разработке и других рудных месторождений (Североуральское, Таштагольское, Октябрьского и др.).

Нормативными актами в части обеспечения безопасности производства работ в условиях опасности возникновения динамических явлений выполняется мониторинг состояния краевых частей массива горных пород по прогнозированию и предотвращению следующих типов динамических явлений, указанных на рисунке 1.1.



Рис. 1.1 – Блок-схема динамических явлений [29]

Согласно действующей нормативной базе определены события, предшествующие различным видам динамических явлений (рисунок 1.2), а также признаки, характерные для каждого из видов динамических явлений (рисунок 1.3).

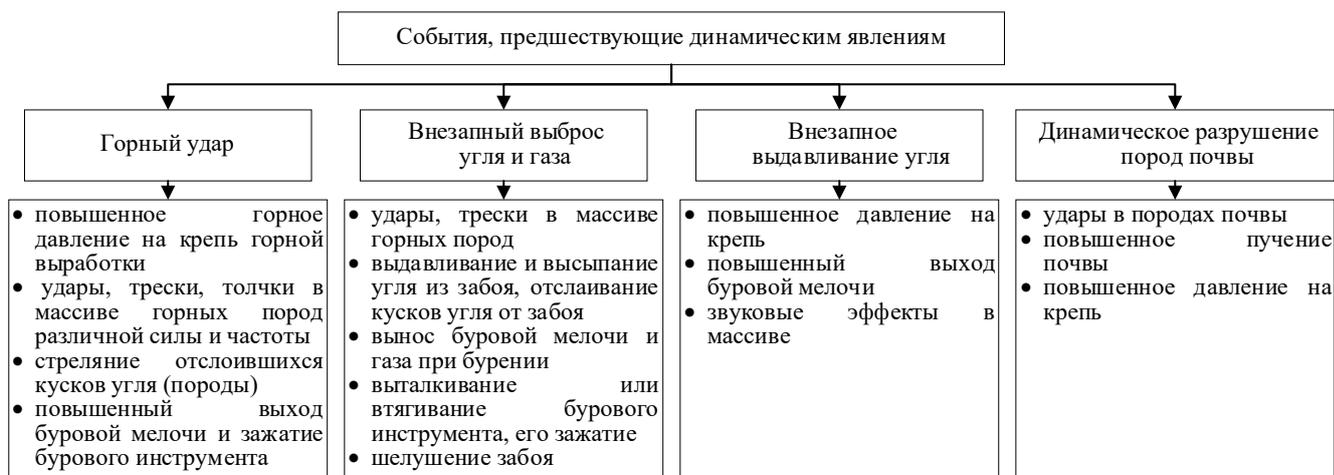


Рис. 1.2 – События, предшествующие динамическим явлениям [29]

Учитывая совокупное влияние факторов сложности отработки угольных месторождений подземным способом, задача своевременного прогнозирования динамических явлений остаётся актуальной.

В ходе отработки угольных месторождений России в период 1991 по 2015 год произошло 396 случаев обрушений горной массы [30].



Рис. 1.3 – Признаки динамических явлений [29]

Согласно информации Сибирского отделения Ростехнадзора с 2015 по 2023 год произошло 26 случаев динамических явлений, обрушений горной массы в горных выработках угольных шахт, указанных в таблице 1.1 [31].

Таблица 1.1

Статистика динамических явлений по угольным шахтам Кузбасса (по данным Ростехнадзора)

№	Дата	Место	Происшествие
1	05.08.2023	Шахта «Карагайлинская», Конвейерный наклонный ствол	Отслоение горной массы от груди забоя
2	05.07.2022	Шахта «Распадская-Коксовая», Вентиляционный штрек 3-2-1	Деформация пород кровли и бортов
3	24.03.2022	Шахта «Осинниковская», монтажная камера 4-1-5-8 (2)	Выдавливание угля с повышенным выделением метана из забойной части
4	26.12.2021	Шахта «Анжерская-Южная», лава 7-3-2	Падение куска породы с кровли выработки
5	25.11.2021	Шахта «Листвяжная», лава № 823	Взрыв метана
6	19.06.2021	Шахта «Анжерская-Южная», лава 7-1-5	Интенсивное газовыделение с высыпанием угля
7	13.02.2021	Шахта «Юбилейная», конвейерный штрек № 16-24бис	Высыпание горной массы с борта выработки
8	21.01.2021	«Шахта им. С. Д. Тихова», конвейерный штрек № 23-1-6	Внезапный выброс угля и газа
9	22.11.2020	Шахта «Есаульская», лава 29-37	Вывал груди забоя лавы
10	13.09.2020	шахта «Чертинская-Коксовая», осевой штреке № 553	Внезапный выброс угля и газа
11	15.08.2020	Шахта «Ерунаковская-VIII», вентиляционный штрек Лавы 48-7	Мгновенное пучение почвы на протяжении 80 метров
12	17.07.2019	Шахта «Анжерская-Южная», вентиляционный штрек 7-3-2 пласта XXVII	Отслоение горной массы с незакрепленного левого борта выработки

Таблица 1.1

Статистика динамических явлений по угольным шахтам Кузбасса (по данным Ростехнадзора)

№	Дата	Место	Происшествие
13	04.06.2019	Шахта «Распадская», лава 4-10-31, секции № 3,4	Обрушение породы
14	08.02.2019	«Шахта им. С. Д. Тихова», лава 23-1-4	Обрушение угля с груди забоя с повышенным выделением газа метана
15	12.02.2019	УК «Талдинская» АО «Талдинское-Кыргайское», монтажная камера № 38-4	Обрушение угля с груди забоя с повышенным выделением газа метана
16	07.02.2018	Шахта «Осинниковская», вентиляционный штрек 4-1-5-7	Отслоение от груди забоя плиты угля
17	20.12.2017	Шахта «Есаульская», вентиляционный штрек 26-54 бис	Обрушение пород кровли
18	24.07.2017	Шахта «Анжерская-Южная», конвейерный штрек 7-1-5 пласта XXVII	Внезапный выброс угля и газа
19	13.03.2017	Шахта «Увальная», западный вспомогательный ствол пласта 67	Вывал горной массы с борта
20	07.08.2016	Шахта «Юбилейная», путевой уклон пласта 16	Обрушение пород кровли в 15 м от забоя на протяжении 7 м
21	07.05.2016	АО «Разрез «Инской», лава № 602	Вывал горной массы
22	18.05.2016	Шахта «Южная»	Обрушение пород кровли в подготовительном забое
23	29.06.2016	Шахта «Карагайлинская», вентиляционный штрек 6-ОЗЮ	Обрушение борта и кровли
24	22.05.2015	Шахта «Осинниковская», демонтажный ходок 1-1-5-10	Обрушение пород кровли
25	06.04.2015	Шахтоуправление «Талдинское-Южное» ООО «Талдинская», лава 48-7	Вывал горной массы

На шахтах Кузбасса при использовании базового метода прогноза определения степени удароопасности участков угольных пластов в особосложных и удароопасных условиях выход буровой мелочи с одного метра прогнозного шпура, буримого только в пределах ширины защитной зоны, достигал значений от 20–40 (шахты «Юбилейная», «Алардинская», «Первомайская») до 120–130 литров (шахты «Березовская» и «Усинская»), при номинальных значениях выхода штыба 2,5–3,5 литра с одного метра. Полученные высокие значения выхода бурового штыба указывают на критические величины действующих в массиве напряжений, что стало причинами возникновения и неоднократного повторения горных ударов с катастрофическими последствиями (шахты «Алардинская» и «Усинская»).

В последние годы резко возросла актуальность использования геофизических методов прогноза, обеспечивающих высокую оперативность их выполнения.

Актуальность эта продиктована повсеместным переходом на современные скоростные и высокопроизводительные технологии добычи угля, при которых длина лав составляет 200–300 м, а темпы подвигания забоев достигают до 10–20 м в сутки.

## 1.2 Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности

Общая классификация методов оценки НДС массива горных пород представлена на рисунке 1.4 [32].

Для осуществления безопасной выемки запасов угля на шахтах, склонных и опасных по горным ударам, выполняют комплекс прогнозных мероприятий, который включает в себя региональный, локальный и текущий прогнозы [29].

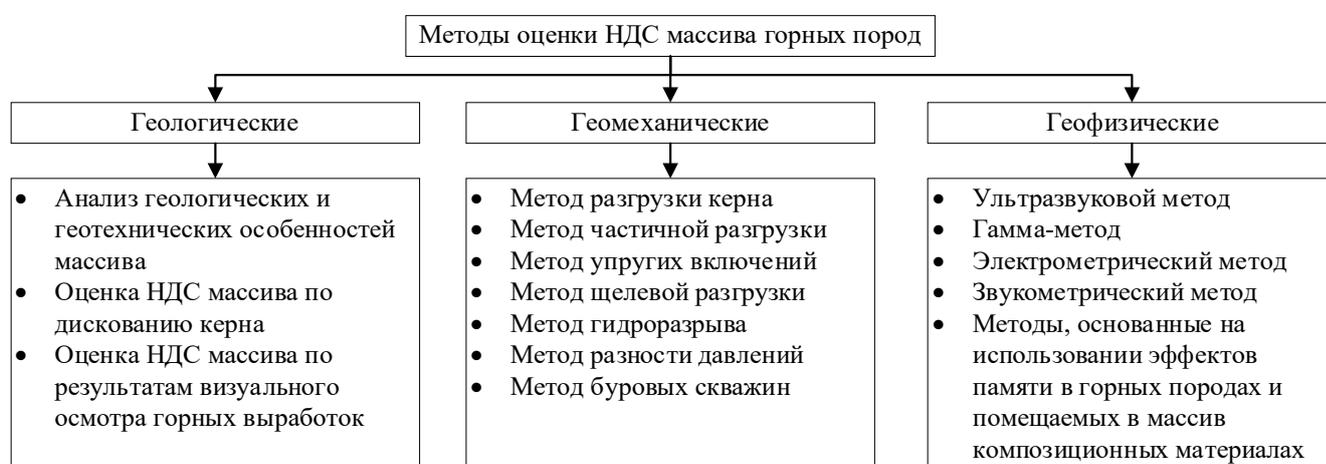


Рис. 1.4 – Классификация методов оценки НДС массива горных пород [29]

На рисунке 1.5 представлена схема методов и видов прогноза удароопасности.



Рис. 1.5 – Виды и методы прогноза удароопасности в угольных шахтах [29]

Региональный прогноз удароопасности проводится с целью выявления участков массива, наиболее подверженных развитию негативного сценария в части про-

явления повышенного горного давления в динамической форме. Локальный прогноз предназначен для оперативной оценки состояния массива для конкретного участка недр. Текущий прогноз удароопасности выполняется для оценки состояния краевой части в ходе ведения как проходческих, так и очистных горных работ.

Процесс подготовки горного удара сопровождается зарождением и образованием трещин различного масштаба. Наиболее универсальным методом их регистрации является сейсмический метод. Он основан на явлении излучения упругих волн при зарождении трещин. Одним из основных достоинств метода является его инвариантность к масштабу образующихся дефектов, поэтому он позволяет получать информацию о размерах трещин (ширина, длина) в широком диапазоне: от долей миллиметра до километров. С точки зрения прогноза горных ударов интересуют трещины, размеры которых лежат в пределах от сантиметров до сотен метров. Частотный диапазон сейсмических сигналов, генерируемых этими трещинами, составляет 0,1 Гц – 10 кГц. Для решения поставленных задач необходимо использовать несколько иерархических подсистем. Каждая такая подсистема работает в своём частотном диапазоне и осуществляет наблюдение за трещинами, размеры которых соответствуют этим частотным диапазонам. Важным условием, которое необходимо учитывать при проектировании всего комплекса, является перекрытие частотных диапазонов всех входящих в него иерархических подсистем. Это связано, по крайней мере, с двумя обстоятельствами. Во-первых, разрыв частотных диапазонов приведёт к потере самой информации о трещинах, соответствующих этим «пустым окнам». Во-вторых, отсутствие этих данных не позволит создавать полный каталог сейсмических событий, который используется для прогноза по месту и времени высокоэнергетических сейсмических событий, и для которых они будут играть роль предвестников. Наличие неполного каталога сейсмических событий значительно снизит эффективность прогноза горных ударов. Для получения полного каталога сейсмических событий весьма важным является непрерывный режим работы данных подсистем.

Аппаратура системы должна обеспечивать регистрацию сейсмические сигналы с диапазоном энергетического спектра от  $10^{-2}$  Дж до  $10^8$  Дж. Вместе с тем,

необходимо, чтобы отдельная, иерархическая подсистема имела чувствительность, позволяющую перекрыть 4–5 порядков по энергиям регистрируемых событий. Это условие необходимо для того, чтобы в рамках отдельной подсистемы имелась возможность осуществлять прогноз наиболее сильных сейсмических событий из данного энергетического диапазона, а для этого нужно иметь полный каталог сейсмических событий, которые на 3–4 порядка ниже по энергии, чем прогнозируемые.

Региональная система должна представлять собой аппаратный комплекс, работающий в низкочастотном диапазоне. Она должна охватывать наблюдением весь контролируемый горный массив и регистрировать наиболее сильные сейсмические события. Энергетический диапазон регистрируемых событий, как указывалось выше, должен составлять не менее 5 порядков.

В некоторых случаях может сложиться ситуация (например, отработка целика), при которой будет необходимо прогнозировать горные удары, начиная с меньших значений энергии сейсмических событий. Тогда энергетического диапазона одной подсистемы может не хватить. В этом случае возникает необходимость в использовании дополнительной, следующей иерархической локальной подсистемы.

Система должна вести непрерывную регистрацию сейсмических явлений и производить измерение различных параметров этих сигналов. Наиболее важными параметрами являются следующие: координаты источника, энергия, время возникновения и амплитудно-частотный спектр сигнала. Все эти данные должны заноситься в каталог в формализованном виде для анализа на ЭВМ. Наличие такого, все время пополняющегося каталога позволит следить за тенденцией развития процесса разрушения горного массива. С помощью методик, которые будут описаны ниже, на базе каталога сейсмических событий осуществляется перспективный прогноз по времени, месту и энергии горных ударов, энергия которых на 3–4 порядка выше  $E_{\min}$  для этой подсистемы.

Для оценки эффективности сейсмического мониторинга и прогноза на основе выделяемых сейсмоактивных зон, дополнительно необходимо анализировать данные горно-технической обстановки на шахте, которые включают планы горных выработок, физико-механические свойства горных пород, места и время проведения

буро-взрывных работ, выполнения профилактических мероприятий и результаты контроля их эффективности и т.п.

Наиболее полно описанные выше подходы к созданию прогностических систем воплощены в аппаратуре GITS, разработанной ВНИМИ. Система позволяет регистрировать сейсмические события в широком частотном диапазоне от 0,2 Гц до 800 Гц. Специально разработанные датчики (ДРЦ-11) регистрируют события – от акустических импульсов с энергией от 0,1 Дж до мощных землетрясений с энергией  $10^8$  Дж. Аппаратура имеет цифровые линии связи и снабжается мощным программным пакетом графической обработки сигналов, включая спектральный анализ, имеет встроенный алгоритм расчёта удароопасных зон, позволяет подключить практически любые алгоритмы прогноза, автоматически формирует базу сейсмических сигналов под управлением SQL-сервера.

Путём сгущения сейсмической сети возможно проектирование многоуровневой системы регистрации, тем самым обеспечивая решения задач прогноза в реальном времени.

Следует отметить, что при проектировании многоуровневого комплекса для конкретной шахты необходимо учитывать её специфические особенности. При этом может оказаться, что для реализации прогноза достаточно использовать всего две иерархические подсистемы.

### **1.3 Математическое моделирование геомеханических процессов**

Успешно развиваются численные методы моделирования НДС неоднородных сред [33–36], одним из реальных путей совершенствования подходов к интерпретации данных геодинамического мониторинга и прогноза является совместное использование в исследованиях математического моделирования и шахтной геофизики.

Результаты анализа предметов и методов исследований НДС массива горных пород при решении задач геомеханики различными организациями и авторами представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

## Предметы и методы исследований НДС массива горных пород при решении задач геомеханики

Организация	Авторы	Предмет исследований	Методы исследования
ИПКОН РАН	Трофимов В. А.	Теоретические исследования и разработка моделей изменения НДС массива горных пород при техногенном воздействии и развития геодинамических, газодинамических и термодинамических процессов в нем	Решение геомеханических задач в рамках разработанной методологии на основе различных конечно-элементных модулей, входящих в комплекс ANSYS, включая решение задач нелинейного деформирования пород массива, динамических задач деформирования и разрушения
СибГИУ	Фрянов В. Н. Разумова Л. В.	Напряжения и деформации в углепородном массиве с учётом пространственного расположения, формы и размеров неоднородностей для прогноза параметров очистных и подготовительных выработок.	Лабораторные испытания, численное моделирование процессов деформирования и разрушения неоднородных породных образцов, слоёв и угольных пластов с применением комплекса компьютерных программ
	Фрянов В. Н. Златицкая Ю. А.	Закономерности техногенной дезинтеграции горных пород и формировании опасных зон для направленного упрочнения пород в окрестности подземных горных выработок и обеспечения их устойчивости	Метод конечных элементов (МКЭ) для расчёта параметров НДС и опасных зон массива горных пород, лабораторные испытания, статические методы обработки данных, визуализация и оценка с использованием компьютерных программ SURFER, EXCEL и FORTRAN
	Павлова Л. Д. Корнеев Е. С.	Массив горных пород и его математическая модель для обоснования параметров короткозабойной технологии угледобычи по результатам численного моделирования геомеханических процессов в окрестности системы взаимовлияющих выработок камерального типа	Механика сплошной среды, теория упругости, математическое и численное моделирование с применением МКЭ, объектно-ориентированное программирование (программа «MGP program complex»)
НИТУ МИСиС	Еременко В. А.	исследования влияния отработки блоков и участков месторождений на НДС массива горных пород, структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов	Численное математическое моделирование НДС горно-технических систем и их конструктивных элементов (выработок, камер)
ИГД СО РАН	Курленя М. В. Серяков В. М. Еременко А. А.	Техногенные геомеханические поля напряжений горных пород, модели деформирования горных пород, модели блочных структур массива при подземной разработке рудных месторождений	Методы численного и математического моделирования с использованием лабораторных испытаний и измерений
	Сердюков С. В. Павлов В. А.	Компоненты НДС массива проницаемых горных пород и их оценка по деформационному поведению системы «скважина-трещина гидроразрыва» при различных типах нагружения стенок скважины	Физическое и математическое моделирование, метод интегральных сингулярных уравнений, лабораторные эксперименты на масштабных моделях
	Сердюков С. В. Патутин А. В.	Параметры процесса газоотдачи углепородного массива, обусловленного трещиной гидроразрыва	Математическое моделирование массива и процессов развития трещин гид-

Таблица 1.2

## Предметы и методы исследований НДС массива горных пород при решении задач геомеханики

Организация	Авторы	Предмет исследований	Методы исследования
			роразрыва с использованием программного обеспечения FLAC 6.0, экспериментальные исследования
	Опарин В. Н. Лобанова Т. В.	Закономерности деформирования подрабатываемых скальных массивов для обоснования безопасной эксплуатации охраняемых объектов	Инструментальные измерения сдвижения земной поверхности, горных пород и охраняемых объектов, методы анализа и обобщения данных геодинимического и морфоструктурного картирования; машинное картирование полей сдвижений, деформаций и напряжений
ИУУХ СО РАН	Черданцев Н. В.	Техногенные поля напряжений и условия разрушения пород в окрестностях комплексов подземных горных выработок, сооружаемых в массивах с регулярными поверхностями ослабления	Метод граничных интегральных уравнений, методы механики разрушения горных пород, методы физического моделирования массива горных пород, методы строительной механики для расчёта анкерной крепи, методы вычислительной математики
КузГТУ	Бахаева С. П. Гоголин В. А. Ермакова И. А. Гурьев Д. В.	Прогноз устойчивости насыпных предохранительных дамб горно-промышленных предприятий с учётом пространственной изменчивости физико-механических свойств суглинистых грунтов	Инженерно-геологические изыскания, методы статистики и корреляции, аналитическое и численное моделирование геометрии дамбы и её напряженно-состояния, объектно-ориентированное программирование (программа «Устойчивая насыпь»)
	Ермакова И. А. Пириева Н. Н.	Напряженное состояние угольных предохранительных целиков при их запредельном деформировании	Численные МКЭ при решении задач геомеханики, метод буровой мелочи для натуральных исследований, методы обработки экспериментальных и теоретических исследований
МГСУ	Тер-Мартиросян З. Г. Тер-Мартиросян А. З.	Грунтовые основания, их свойства, в т. ч. реологические, и описания НДС оснований во времени	Численные методы моделирования НДС естественных (непреобразованных) грунтов основания, теоретические и экспериментальные исследования
ВолгГАСУ	Богомолов А. Н.	Несущая способность оснований сооружений, устойчивости грунтовых массивов, взаимодействия элементов систем «здание – основание» и «противооползневое сооружение – грунтовый массив», определение рациональных параметров грунтовых сооружений	Теоретические и экспериментальные исследования, лабораторные испытания грунтов, численные и аналитические методы моделирования напряжённо-деформированного состояния квазиоднородных грунтов основания, в т.ч. с применением программных комплексов
НИИОСП им. Н. М. Герсеванова	Петрухин В. П. Шулятьев О. А. Мозгачева О. А.	Способы регулирования НДС грунтового массива, путём создания инъекционного давления	Лабораторные испытания, натурные испытания, промышленные эксперименты, методы численного и математического моделирования для обоснования инъекционного давления
ООО «Полигор»	Сидоров Д. В.	Прогноз развития напряженных участков массива горных пород при подземной добыче полезных ископаемых на весь срок эксплуатации опасного производственного объекта	Численное математическое моделирование НДС массива

Цикл экспериментально-теоретических исследований геомеханического состояния целиков проведён в КузГТУ под руководством проф. Гоголина В. А. и Ермаковой И. А. Фундаментальной основой этих исследований является определение прочностных и деформационных характеристик горных пород при объёмном и запредельном сжатии. Основные теоретические положения состоят в следующем [37]. Критерием прочности горных пород при объёмном сжатии служит величина поперечных деформаций при достижении одноосной нагрузкой предела прочности. Прочность горных пород при сжатии в состояниях объёмного и плоско деформированного сжатия определяется прочностью образца при одноосном сжатии, его коэффициентом поперечных деформаций и величиной боковой нагрузки. Максимум опорного давления постоянен и равен значению прочности пласта, что позволяет трактовать пласт, как своего рода образец в массиве горных пород. Модуль спада хрупких горных пород равен модулю линейных деформаций в допредельном состоянии.

Разработана двухэтапная методика численного моделирования геомеханического состояния целиков с учётом запредельного деформирования. На первом этапе напряженно-деформированное состояние рассчитывается по линейной зависимости МКЭ в программной среде ELKUT. На втором этапе краевая часть целика моделировалась двумя областями: ненарушенной частью с прежним модулем линейной деформации  $E$  и ослабленной зоной с пониженным модулем  $E$ .

Другое направление исследований под руководством проф. Л. Д. Павловой и В. Н. Фрянова основано на использовании при геомеханическом моделировании углепородного массива нелинейных математических моделей. Идея разработанной методики состоит в итерационном последовательном решении линейных задач с заменой в каждом цикле постоянных деформационных параметров  $E$  и  $\nu$  на переменные, рассчитываемые в соответствии с функцией разупрочнения горных пород. Сопоставление расчётных данных с экспериментальными показало снижение погрешности прогноза по сравнению с линейной моделью на 43,9% [38].

Получены конкретные результаты по прогнозу геомеханического состояния

массива при разработке свиты сближенных угольных пластов. Так, на шахте «Алардинская» расчётный коэффициент концентрации напряжений в пласте в районе конвейерного штрека, расположенного под охранным целиком отработанного выше пласта, в 1,5–2 раза превышает предел прочности, что является причиной динамических явлений и пучения почвы. Рекомендовано увеличение податливости этого целика бурением разгрузочных скважин. Аналогичные результаты получены для шахт Ерунаковского района с учётом геотектонических полей напряжений. На результаты геомеханического моделирования существенное влияние оказывает пространственно-временное изменение физико-механических свойств углепородного массива, которое в наибольшей мере зависит от изменения мощности и газоносности пласта, мощности пород между сближенными пластами. На шахте «Есаульская» спрогнозировано образование зоны нелинейного деформирования при отходе очистного забоя от монтажной камеры, что привело к разуплотнению пород кровли пласта и увеличению водопритока из вышележащего затопленного пласта.

Решение поставленных задач в части численного математического моделирования НДС угольного пласта и вмещающих пород реализовано на основе авторского комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов СибГИУ, который обеспечивает расчёт НДС неоднородного углепородного массива в объёмной нелинейной постановке. Теоретические и методические основы программного комплекса изложены в работах авторов [39–43].

Пакет программ обеспечивает численное решение систем классических дифференциальных уравнений геосреды (уравнений равновесия, условий совместности, уравнений закона упругости Гука) методом конечных элементов.

Применение МКЭ обеспечивает в полной мере учёт неоднородности моделируемого массива: слоистости, наличия ослабленных трещиноватых зон, геологических нарушений, выработанного пространства.

Структура комплекса программ СибГИУ приведена на рисунке 1.6.

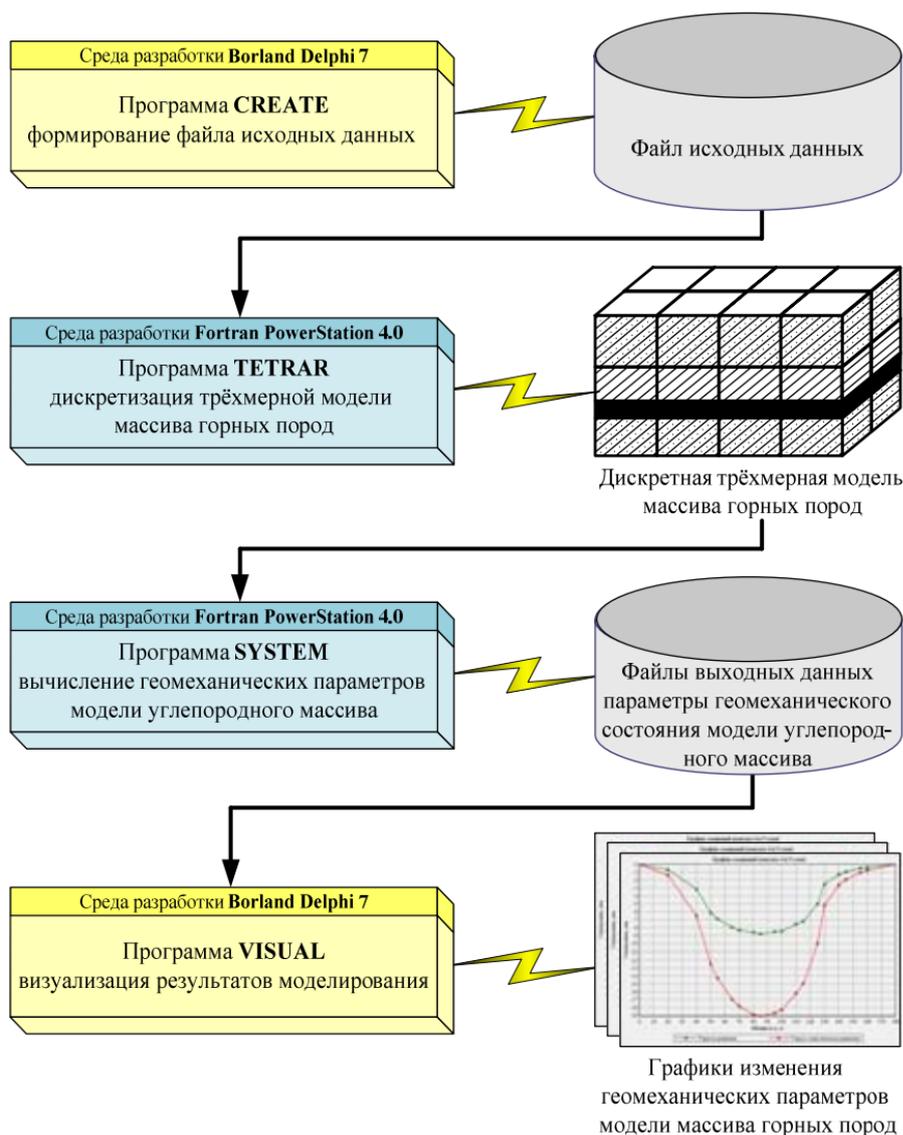


Рис. 1.6 – Структура комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов СибГИУ [40]

Основные функции программ комплекса СибГИУ представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Основные функции программ комплекса СибГИУ

Программа	Функция
Create	формирует файл исходных данных путём записи в файл значений величин, введённых в форму
Tetrar	осуществляет трёхмерную дискретизацию геомеханической модели массива горных пород на конечные элементы
System	реализует необходимые вычисления с использованием стандартных процедур МКЭ
Visual	строит графики вертикальных смещений, деформаций и напряжений в угольном пласте, породах кровли и почвы, а так же остаточной прочности горных пород для упругого и упругопластического решения по любому из слоёв углепородной толщи

Основные технические характеристики программного комплекса СибГИУ в зависимости от требуемой точности вычислений приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Технические характеристики программного комплекса СибГИУ

Количество узлов сетки МКЭ	Число решаемых уравнений	Объем требуемой оперативной памяти, Мб
1056	3168	1,99
3672	11016	15,44
8448	25344	60,33
16800	50400	188,90
29376	88128	477,55
47040	141120	1044,90
67584	202752	1881,77

Для повышения точности расчёта в СибГИУ предложена оригинальная цилиндрическая 3D-модель породных слоёв или угольных пластов (рисунок 1.7).

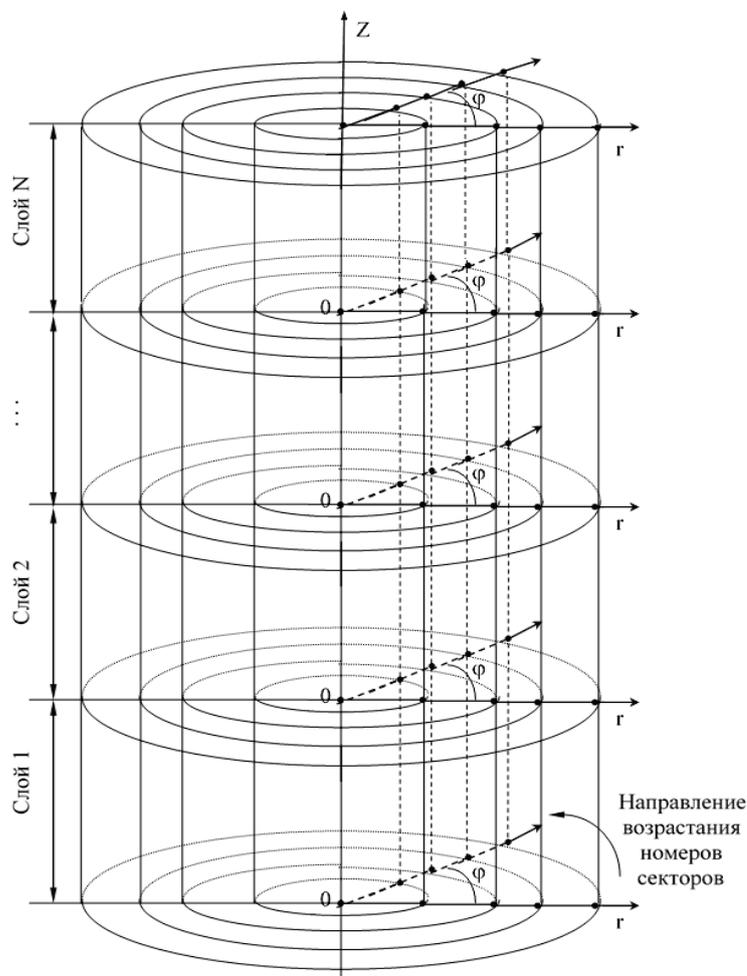


Рис. 1.7 – Цилиндрическая 3D модель массива горных пород

Каждый породный слой или угольный пласт рассматривается в виде диска, который делится на сектора и конечные элементы в форме тетраэдров. В пределах

отдельного породного слоя или угольного пласта сетка конечных элементов задаётся нерегулярной, что позволяет в середине цилиндра получать результаты расчёта с большей точностью по сравнению с результатами на периферии диска.

Научные, методические основы и программные разработки «Комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов» в объёмной постановке изложены и защищены в диссертациях Фрянова В. Н. (1988), Павловой Л. П. (2002, 2007), Корнева Е. С. (2013), Поздеева П. А. (2018), Васильева П. В. (2014), Басова В. В. (2021), Разумова Е. А. (2023).

За последние три года с использованием «Комплекса проблемно-ориентированных программ» выполнены и внедрены в производство 11 проектов по заказам угольных компаний Кузбасса на шахтах Ерунаковская VIII, Осинниковская, Увальная, Распадская, Распадская-Коксовая.

Верификация «Комплекса проблемно-ориентированных программ» выполнена в различных горно-геологических и горнотехнических условиях. В таблице 1.5 представлены результаты сопоставления расчётных значений вертикальных деформаций (смещений) пород кровли выработок с результатами инструментальных измерений на шахтах «Большевик» и «Юбилейная» [41, 42].

Таблица 1.5

Результаты сопоставления расчётных и экспериментальных параметров

Шахта (количество экспериментальных точек измерений)	Участок	Результат сопоставления
Большевик (7) [41]	Сопряжение конвейерного штрека 29-58 с диагональной сбойкой 29-58-2	Отклонение расчётных значений от экспериментальных не более 10%
Юбилейная (11) [42]	Междукамерный целик между камерами №№ 4 и 5 блока №2 пласта 30	Коэффициент корреляции между расчётными и экспериментальными значениями 0,955

По результатам исследований А. А. Черепова [43] сопоставление вычисленных с помощью комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов СибГИУ и измеренных размеров ширины зоны предразрушения

и смещения контура выработок в условиях шахты «Распадская-Коксовая» показало следующие результаты, представленные в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Вычисленные и измеренные размеры зон предразрушения и смещения контура выработок [43]

Наименование параметра, размерность	Участок наблюдений	Диапазон изменения параметров		Методика шахтных измерений
		вычисленных	измеренных	
Ширина зоны предразрушения, м	Магистральный штрек пласта III	3–6	3–7	ВНИМИ
Ширина зоны предразрушения, м	Выемочная камера №2	3–7	3–4	ВНИМИ
Конвергенция кровля-почва, мм	Целик между камерами	60–85	48–78	ВостНИИ
Конвергенция бок-бок, мм	Целик между камерами	100–190	126–210	ВостНИИ

Среднее отклонение составило 12%.

#### 1.4 Метод сейсмического мониторинга

Сейсмоакустические методы контроля состояния и свойств породного массива предусматривают измерение акустических параметров массива (скорость распространения продольной  $V_P$  и поперечной  $V_S$  волны, коэффициент затухания  $\alpha(P)$  и  $\alpha(S)$  в диапазоне частот  $f = 0–2000$  Гц) [44].

В зависимости от используемого источника поля различают (рисунок 1.8):

- пассивные методы, основанные на использовании естественных физических полей (акустических, тепловых, радиоактивных, электрических);
- активные методы, использующие искусственный источник поля.

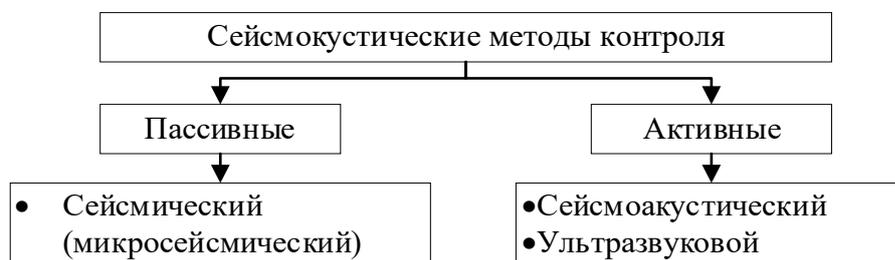


Рис. 1.8 – Сейсмоакустические методы контроля состояния и свойств породного массива

Принципиально различают три основных метода акустического геоконтроля:

- *сейсмоакустический*, активный, с возбуждением сейсмического сигнала с диапазоном гармонических составляющих  $f = 0–20$  кГц;

– *ультразвуковой*, активный, с возбуждением акустического сигнала на фиксированной частоте  $f > 16$  кГц, наиболее распространёнными являются измерения в диапазоне  $f = 16–20$  кГц;

– *микросейсмический (сейсмический)*, пассивный, предусматривающий только регистрацию естественных сейсмических импульсов.

*Сейсмоакустические и ультразвуковые измерения* реализуют с помощью аналогичных технических средств, которые отличаются только частотным диапазоном. Сейсмоакустический метод имеет рабочий диапазон  $f = 0,3–20$  кГц, ультразвуковой  $f > 16$  кГц (для исследования горных пород могут применяться ультразвуковые дефектоскопы серии УД с частотой  $f < 10$  МГц).

Конструкции датчиков для лабораторных акустических исследований различают следующих типов:

– пьезоэлектрические, основанные на эффекте возникновения разности потенциалов при деформировании пьезоэлемента;

– электромагнитные, при работе которых за счёт перемещения мембраны, связанной с магнитным сердечником катушки, изменяется её индуктивность.

Основными схемами сейсмоакустического и ультразвукового геоконтроля являются профилирование на земной поверхности (обнажении выработки) скважинный каротаж и межскважинное прозвучивание.

При *профилировании* источник колебаний И и приёмник П перемещают по поверхности (обнажению) аналогично схемам испытаний образцов горных пород (рисунок 1.9 а).

При *скважинном каротаже* источник И и приёмник П конструктивно объединены в скважинное устройство (зонд) и перемещаются синхронно (рисунок 1.9 б).

При *межскважинном прозвучивании* источник И и приёмник П перемещают в двух или нескольких параллельных скважинах (рисунок 1.10).

Основные задачи, решаемые при акустическом геоконтроле, состоят в определении механических параметров горных пород, изучении напряженного состояния и трещиноватости массива.

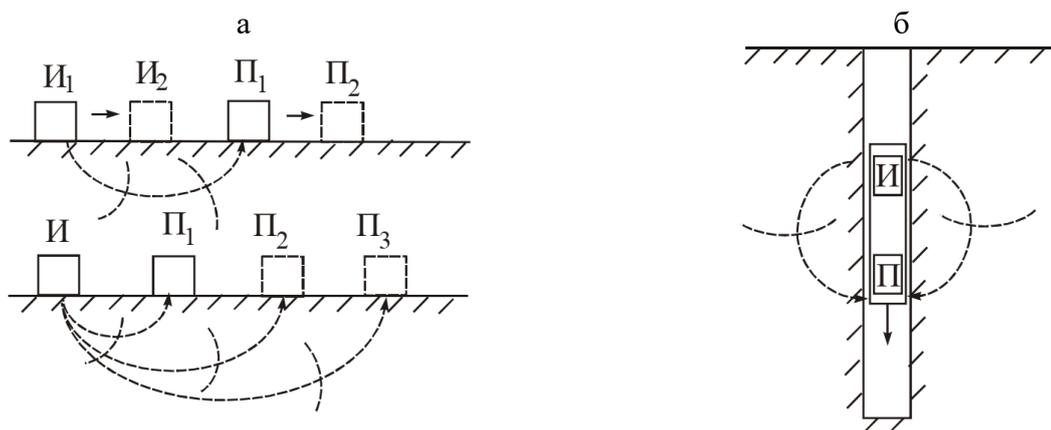


Рис. 1.9 – Схемы профилирования (а) и скважинного акустического каротажа (б)

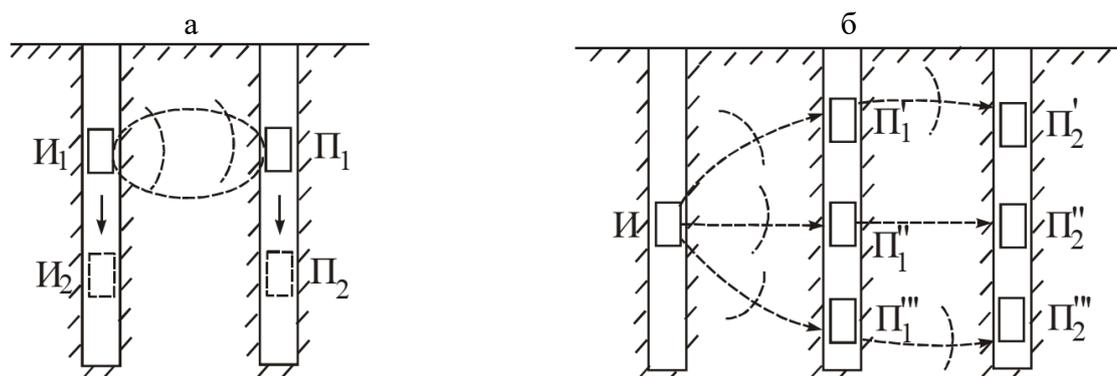


Рис. 1.10 – Схемы межскважинного прозвучивания при параллельном синхронном перемещении источника И и приёмника П (а), при постоянном положении источника И (б)

*Микросейсмический геоконтроль* состоит в регистрации естественной сейсмической активности исследуемого массива с помощью системы сеймопунктов, оснащённых приёмно-регистрирующей аппаратурой и вычислительной техникой.

Одной из первых в России подобная система построена в Кузбассе на Таштагольском руднике. Система сеймостанции «Таштагол» включает 18 подземных и 1 наземный сеймопункты, оснащённых сеймоприемниками различных типов, телеметрической аппаратурой, магнитографами, самописцами, аппаратурой радиосвязи. Обработка информации ведётся компьютерной техникой.

Подобная система обеспечивает получение следующей геомеханической информации:

- уровень сейсмической активности (число динамических событий определенного энергетического уровня за установленный интервал времени);
- уровень сейсмической энергии;

- координаты очагов сейсмических событий, определяемые по базовым расстояниям и разности времени прихода  $t$  сигнала на сеймостанции;
- построение карт сейсмической активности массива на плане горных работ с изменениями во времени и в привязке к моментам массовых взрывов;
- скорость сейсмической волны в различных зонах массива.

*Сейсмоприёмники* для микросейсмического геоконтроля имеют широкий частотный диапазон – от 20–50 Гц до 1–6 кГц.

Различают конструкции широкополосных сейсмоприёмников (геофонов) электродинамического, электромагнитного и пьезоэлектрического типа.

Одной из основных задач систем мониторинга массива горных пород является прогнозирование газодинамических и геодинамических явлений, таких как вывалы горной массы, внезапные выбросы породы и газа, горных ударов, а также геологических нарушений массива горных пород, зон трещиноватости [45]. Геодинамические явления относятся к быстропротекающим процессам, поэтому осуществление прогноза таких типов явлений относится к разряду сложнопрогнозируемых.

При ведении горных работ одной из актуальных задач является изучение опасных геологических явлений, которые возникают под влиянием различных природных, геологических и техногенных факторов. Обеспечение безопасных условий ведения подземных горных работ является одной из приоритетных задач для работы угольной шахты. Применение геофизических методов позволяет достаточно быстро оценивать потенциальную опасность геологической среды для горных выработок. Среди геофизических методов, применяемых для исследования проявлений опасных геологических процессов, выделяются сейсмоакустические исследования, сейсморазведка на поверхностных волнах Рэлея, скважинная, межскважинная и наземная сейсмотомография, скважинная, межскважинная и наземная электротомография и др. [46, 47].

Различным аспектам развития методов сейсмического мониторинга для решения задач подземной геотехнологии посвящены работы целого ряда исследователей [48–55].

Создание многоуровневых систем комплексного геодинамического мониторинга и организация наблюдений позволит выделять региональные и локальные предвестники динамических явлений разного энергетического уровня в горных массивах [56–59].

При разработке автоматизированных систем сейсмического мониторинга целесообразно использовать пассивный метод измерений (регистрацию естественной сейсмической активности) с полустационарной установкой датчиков. Активные методы сейсмомониторинга (томография, межскважинное просвечивание, использование в качестве излучателя рабочего инструмента горного оборудования и др.) перспективны, но более сложны в технической реализации. При обработке и интерпретации баз данных сейсмомониторинга в перспективе целесообразно наряду с хорошо апробированными методами геолокации использовать нейросетевые технологии, регистрацию как продольных, так и поперечных волн, корректировку скоростей сейсмических волн, методы кластерного анализа и численного моделирования НДС углепородного массива.

В таблице 1.7 представлен перечень систем сейсмоакустического мониторинга, изготавливаемых в России.

В качестве представителя многоуровневых систем можно выделить разработанную в ИГД ДВО РАН цифровую геоакустическую систему контроля горного давления («Prognoz ADS»), а также автоматизированную систему акустического контроля состояния массива горных пород САКСМ.

Таблица 1.7

Системы сейсмоакустического мониторинга массива горных пород

Наименование	Разработчик	Отличительная особенность
«Prognoz ADS» [60–63]	ИГД ДВО РАН (Хабаровск)	Цифровые способы обработки и передачи информации, развитые средства повышения надёжности и отказоустойчивости, наличие собственных алгоритмов защиты от техногенных помех
САКСМ [64, 65]	Межотраслевой научно-технической лабораторией по разработке, изготовлению и внедрению автоматизированных систем в горной промышленности (МНТЛ РИВАС)	Сопоставления текущих значений параметров спектра ИАС с соответствующими пороговыми значениями, определяемыми на безопасном участке рассматриваемой горной выработки или соседних выработок обрабатываемого пласта
МГСК	ФГБУН Институт проблем	Система МГСК включает функциональные

Системы сейсмоакустического мониторинга массива горных пород

Наименование	Разработчик	Отличительная особенность
[66]	комплексного освоения недр РАН	подсистемы: сейсмического мониторинга; сейсмоакустического мониторинга; прогноза состояния массива горных пород
«Микон-ГЕО» [67, 68]	ООО «ИНГОРТЕХ»	Система построена на принципах интегрированного анализа параметров сигналов поля эмиссионных волн (пассивный режим) и поля сигналов отражённых волн, наведённых работающими механизмами в очистном или проходческом забоях
АС «Релос» [69, 70]	ООО «Научно-технический центр Автоматика» (Красноярск)	АС «Релос» обеспечивает регистрацию сейсмосигналов от внешних сейсмических воздействий, микросейсмических и сейсмоакустических сигналов, возникающих при динамических проявлениях горного давления в контролируемых массивах горных пород, а также в напряжённых элементах сооружений
ЕРМАК-5 [71]	Сектор сейсмического мониторинга Уральского региона, Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»	Регистратор «Ермак-5» позволяет выполнять регистрацию сигналов с частотой дискретизации от 1 до 2000 Гц без потери эффективности разрядов дискретизации, автоматическую привязку времени при помощи GPS или NTP с постоянной коррекцией, запись данных на съёмный носитель в формате miniSEED
GITS [72]	АО «ВНИМИ»	Геофизическая информационно-передающая система, представляющая собой программно-технический комплекс для непрерывного регионального контроля за шахтным полем с выявлением зон активации геомеханических процессов в массиве горных пород с помощью системы микросейсмических датчиков.

Важным элементом системы «Prognoz ADS» является автоматизированный микросейсмический измерительный комплекс «Prognoz S», позволяющий регистрировать сейсмоакустические события с энергией до  $10^5$  Дж и более в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц. Отличительной особенностью данной системы являются цифровые способы обработки и передачи информации, усовершенствованные средства повышения надёжности и отказоустойчивости, наличие собственных алгоритмов защиты от техногенных помех [73]. Принцип работы системы САКСМ заключается в регистрации акустических сигналов, вызванных внедрением испол-

нительного органа проходческого или очистного комбайна в пласт угля, и сопоставлении данных сигналов с установленными ранее эталонными записями акустических импульсов, полученных на неопасных участках при ведении работ по пласту. Программное обеспечение системы выполняет обработку акустических импульсов за цикл выемки угля и вычисляет прогностические параметры [74–77].

В ходе успешной апробации и адаптации системы на угольных шахтах Кузбасса системой САКСМ были оснащены «Шахта им. С. М. Кирова» и «Шахта им. В. Д. Ялевского» для осуществления текущего прогноза динамических явлений при ведении проходческих и очистных работ [75–77].

Основным недостатком системы является зависимость от необходимости воздействия на массив для создания акустических импульсов (т.е. разрушения угля исполнительным органом или буровой коронкой).

Функциональные возможности системы САКСМ состоят в следующем [74]:

- прогноз потенциально опасных участков по выбросам угля и газа, горным ударам, динамическим разрушениям пород почвы выработки с интенсивным газовыделением при наличии газоносного пласта-спутника, внезапным выдавливаниям угля;
- прогноз геологических нарушений, представляющих опасность по динамическим явлениям, впереди движущегося забоя;
- оперативное управление процессом гидрорыхления угольного пласта;
- контроль безопасности и эффективности бурения опережающих разгрузочных скважин;
- сообщение об ухудшении состояния по динамическим явлениям в забое, о повышенном горном давлении;

Система выполнена по двухуровневой схеме, включающей подземную часть (геофон, переговорное устройство), и наземную часть, преобразующей, усиливающей акустический сигнал и передающей его в компьютер для обработки. Наземное устройство осуществляет искробезопасное электропитание подземной части аппаратуры, обеспечивая её независимость от шахтного энергоснабжения.

Разработанная во ВНИМИ система сейсмического мониторинга GITS

(geoinformation transmission system) обеспечивает регистрацию сейсмических событий в пределах контура сети сейсмических павильонов. Минимальная энергия регистрируемых сейсмических событий зависит от плотности сети датчиков, частотный диапазон регистрации составляет 0,2–800 Гц.

Основными функциональными возможностями системы GITS являются: своевременное выявление опасных зон на контролируемых участках; прогнозирование горных и горнотектонических ударов; регистрация случаев динамических проявлений горного давления в толще отрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород горного массива; выявление провоцирующего влияния природных факторов в их проявлении (например, предшествующих им сейсмических или геодинамических явлений) при расследовании ранее произошедших аварий геодинамической природы; автоматическое оповещение персонала шахт и рудников о зарегистрированных сильных сейсмических событиях [78–80].

Базовый комплект телеметрии поддерживает 6 датчиков; данное количество регистрирующих устройств достаточно для мониторинга зоны отработки выемочного столба. Программное обеспечение системы позволяет сконфигурировать до шести базовых комплектов и обеспечить 36 трёхкомпонентных каналов регистрации при необходимости расширения сейсмической локальной сети. Выходной информацией системы локального контроля на базе GITS являются карты сейсмической активности с указанием удароопасных зон (критерии удароопасности устанавливаются конкретно для каждой шахты). Записи сейсмических событий сохраняются в базе данных и по мере накопления архивируются.

В состав сейсмического комплекса GITS входят следующие блоки и модули: трёхкомпонентные датчики с предусилителями; выносные модули телеметрии; базовый модуль телеметрии; регистрирующий компьютер; компьютер обработки данных и удалённого управления оборудованием с подключением по сети.

Подземная платформа может быть реализована с установкой датчиков в скважинах и на постаментах. Прогноз удароопасности выполняется отрисовкой на планах горных работ изолиний параметров сейсмической активности.

Программно-технический комплекс GITS производит выделение из непре-

рывной сейсмограммы полезных импульсов согласно заданным пороговым уровням, с последующей записью установленных превышений в базу данных.

После сохранения исходной записи оператор сейсмопрогноза выполняет её обработку путём определения времени прихода сейсмической волны для не менее 4-х датчиков для определения гипоцентра источника сейсмического события.

Критерием точного расчёта считается небольшое отклонение расчётной скорости продольной волны до каждого расчётного сеймопункта от заданной средней скорости, характерной для месторождения, на котором ведутся наблюдения. Далее строятся карты регионального прогноза удароопасности участков шахтного поля.

### **1.5 Выводы, цель и задачи исследований**

1. Согласно «Инструкции по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» основные виды динамических явлений следующие: горные удары; внезапные выбросы угля (породы) и газа; внезапные выдавливания угля и внезапные динамические разрушения пород почвы. Установлены характерные события, предшествующие динамическим явлениям, и их основные визуальные признаки. По данным Сибирского отделения Ростехнадзора с 2015 по 2023 годы на шахтах Кузбасса произошло 25 случаев динамических явлений и обрушений пород.

2. Для осуществления безопасной выемки угля на шахтах, склонных и опасных по горным ударам, разработаны и постоянно совершенствуются геологические, геомеханические и геофизические методы оценки НДС массива горных пород, на основе которых реализуется региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности в угольных шахтах.

3. Поскольку инструментальные методы геоконтроля трудоёмки и требуют значительных материальных затрат, совершенствование программных и технических возможностей вычислительной техники способствовало интенсивному развитию математического численного моделирования геомеханических процессов. Исследования в данном направлении проводятся в различных организациях, при этом основным инструментом является МКЭ, включающий решение системы уравнений равновесия, совместимости деформаций и закона упругости в матричной форме. В частности, в СибГИУ разработан комплекс проблемно-ориентированных программ

для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов, возможности которого позволяют исследовать влияние на НДС аномальных зон разупрочнения, дизъюнктивных нарушений и нелинейности геомеханических процессов путём корректирования модулей деформации пород.

4. Несмотря на значительные успехи методов компьютерного моделирования в решении геомеханических задач, инструментальный геоконтроль является основным методом, обеспечивающим прогноз удароопасности; причём тенденция состоит не в локальном, а системном применении этих методов, реализующих дистанционный и автоматизированный режимы функционирования. Весьма перспективно в этом направлении развитие аппаратного и методического обеспечения систем сейсмического мониторинга и прогноза.

Сейсмоакустические методы разделяют на активные (собственно сейсмоакустические и ультразвуковые, основанные на возбуждении искусственных колебаний) и микросейсмические (сейсмические), использующие регистрацию параметров естественных акустических полей. Активные методы по схемам профилирования, каротажа и прозвучивания более сложны в реализации, перспективно при этом в качестве зондирующего устройства использовать исполнительный орган выемочного или бурового оборудования.

Разработанные и реализованные на данный момент системы активного и пассивного сейсмоакустического мониторинга массива горных пород обеспечивают непрерывный дистанционный и автоматизированный режимы прогноза удароопасности на основе цифровых информационных технологий.

Вместе с тем точность геомеханического прогноза пассивных систем сейсмического мониторинга остаётся недостаточной по следующим причинам: сохраняется высокая погрешность расчёта координат очагов сейсмособытий из-за несовершенства конструкции приёмных устройств, алгоритмов первичной обработки сейсмической информации; отсутствуют информативные интегральные цифровые показатели сейсмической активности; прогноз удароопасности проводят по одному критерию – превышению критического уровня сейсмической энергии или количе-

ства (скорости) регистрируемых импульсов; не разработаны методы и количественные критерии, обеспечивающие эффективный переход от регионального прогноза на основе непрерывного сейсмического мониторинга к локальному и текущему.

На основе изложенного актуальным является совершенствование методического обеспечения системы пассивного сейсмического мониторинга с учётом взаимосвязи интегральных параметров сейсмической активности массива с геомеханическими критериями, определяющими вероятность разрушения приконтурной части выработки в динамической форме.

Работа выполнялась по плану НИР АО «ВНИМИ» на период с 2019 по 2024 годы.

**Цель работы:** обоснование и разработка технических решений по совершенствованию метода прогнозирования удароопасности при интенсивной отработке угольных пластов на основе интегральных параметров сейсмического мониторинга, обеспечивающих повышение информативности прогноза для безопасного ведения горных работ.

**Идея работы** заключается в разработке интегральных показателей сейсмической активности массива горных пород, взаимосвязанных с основными геомеханическими параметрами, определяющими вероятность динамических проявлений горного давления, обосновании на этой основе количественных критериев регионального прогноза и детализирующих переход к локальному и текущему прогнозу.

**Задачи исследований:**

- усовершенствовать на основе цифровых информационных технологий методическое обеспечение сейсмического мониторинга и алгоритмы обработки информации;
- обосновать метод регионального прогноза удароопасности по интегральным параметрам сейсмического мониторинга;
- разработать метод и критерии комплексного прогнозирования удароопасности на основе сейсмического мониторинга.

## 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

### 2.1 Аппаратурное обеспечение системы сейсмического мониторинга

В качестве базовой системы сейсмического мониторинга для проведения исследований принята разработанная во ВНИМИ система GITS.

На рисунке 2.1 показана конфигурация платформы системы GITS, включающей 12 трёхкомпонентных сейсмодатчиков, устанавливаемых стационарно в скважинах или на постаментах.

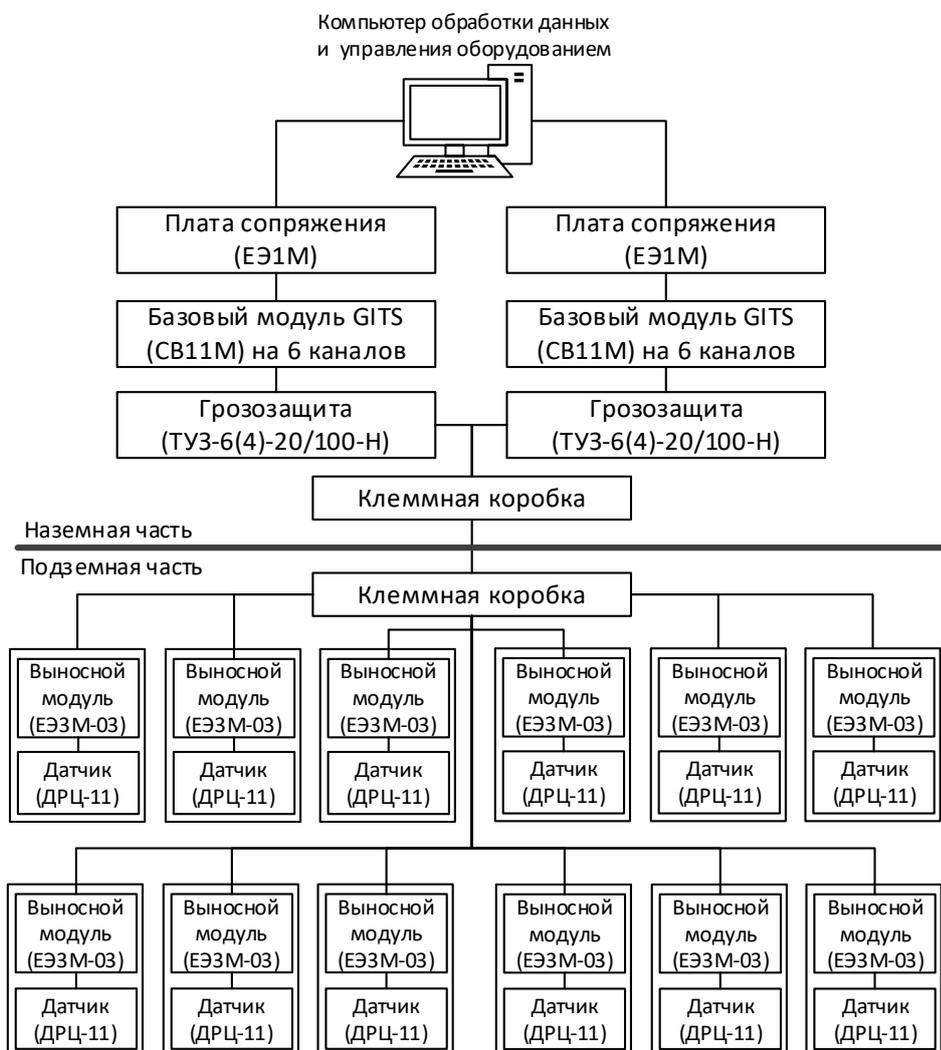


Рис. 2.1 – Структурная схема системы сейсмического мониторинга GITS

Принцип работы системы сейсмического мониторинга GITS основан на регистрации и обработке сейсмических сигналов определенной энергии, возникаю-

щих в результате сейсмической активности массива горных пород в районах проведения горных работ. Результаты интерпретации полученных данных позволяют определять зоны сейсмической активности и оценивать возможности динамических проявлений, происходящих в горном массиве.

Модульный принцип построения системы позволяет подбирать индивидуальный набор оборудования для решения конкретной задачи. Для проведения сейсмического мониторинга в конкретном регионе разворачивается сеть сейсмопавильонов. В качестве датчиков могут быть использованы различные измерительные преобразователи физических величин в электрический сигнал. В конкретном случае, в системе GITS использованы высокочувствительные вибропреобразователи ДРЦ–11, воспринимающие колебания по трём направлениям в декартовой системе координат. По каналам телеметрии сигналы поступают на поверхностный базовый модуль GITS (СВ11М), а затем через модуль сопряжения (ЕЭ1М) на компьютер регистрации и накопления информации.

В связи с удалённым расположением и с целью повышения надёжности передачи информации датчики подключают к выносному блоку телеметрии (ЕЭ3М), который расположен в непосредственной близости от вибропреобразователя ДРЦ-11.

По каналам телеметрии сигналы с выносного блока телеметрии (ЕЭ3М) поступают на базовый модуль (СВ11М). Базовый модуль (СВ11М) осуществляет демодуляцию сеймосигналов и их передачу для накопления и обработки на компьютер оперативного накопления (регистрации).

Система GITS представляет собой сетевую структуру, связанную общим протоколом обмена информацией средствами SQL-сервера. Увязка по времени – по сигналам GPS. Поверхностный базовый модуль телеметрии содержит 3 платы интерфейса линии, каждая из которых работает с двумя каналами телеметрии, обеспечивая работу двух сейсмопавильонов.

В состав сейсмического комплекса GITS входят (см. рисунок 2.1):

- трёхкомпонентные датчики с предусилителями (ДРЦ–11);
- выносные модули телеметрии (ЕЭ3М-03);

- базовый модуль телеметрии (СВ11М);
- плата сопряжения (ЕЭ1М);
- блок грозозащиты (ТУЗ-6(4)-20/100-Н);
- серверная станция для обработки данных.

Система GITS включает наземные блоки (базовый модуль (СВ11М) и модуль сопряжения (ЕЭ1М), эксплуатируемые в помещениях в нормальных климатических условиях У4 по ГОСТ 15150-69), и блоки, предназначенные для эксплуатации в подземных выработках, опасных в отношении взрыва газа и пыли, и выполнена в рудничном особо взрывобезопасном исполнении РО по ГОСТ 30852.0 с видом взрывозащиты Ex ia I по ГОСТ Р 30852.10, а именно выносной блок телеметрии (ЕЭЗМ-03) и вибропреобразователь ДРЦ-11 (сейсмоприёмник).

Климатическое исполнение подземных блоков – У5 по ГОСТ 15150, для температур окружающего воздуха от минус 5°С до плюс 50°С и относительной влажности до 100% при температуре плюс 35°С.

Технические характеристики системы представлены в таблице 2.1

На рисунке 2.2 приведена схема размещения подземного датчика (вибропреобразователя ДРЦ-11) и выносного модуля в скважине. При установке вибропреобразователя ДРЦ-11 в скважине необходимо, чтобы ось датчика *У* была направлена вертикально.

Таблица 2.1

Технические характеристики системы GITS

Параметр	Ед. изм.	Значение
Частотный диапазон процессов, воспринимаемых системой GITS	Гц	0,2–800
Диапазон входных сигналов	В	0,00001–2
Динамический диапазон регистрации	дБ	не менее 140
Длина отдельной телеметрической линии связи	км	до 8
наработка на отказ	час	не менее 4000
средний срок службы	год	не менее 10

Скважины предназначены для установки сейсмических датчиков и выносных модулей GITS. При бурении скважин необходимо выполнение следующих требований:

- скважины бурятся в борт выработки на высоте, позволяющей обеспечить оптимальную работу бурового станка;

– скважины бурятся с уклоном не более 3 градусов, причём забой скважины должен располагаться выше её устья, уклон обеспечит стекание рудничных вод, попадающих в скважину;

– скважины бурятся на глубину 5,0 м, диаметром режущего органа не менее 159 мм;

– скважины армируются обсадной трубой, внутренний диаметр обсадной трубы не менее 146 мм, длина обсадной трубы 5,1 м;

– на выступающей части трубы из стенки горной выработки в 5 см от кольца оголовка высверливается отверстие диаметром 2–3 см для заводки кабеля с скважины.

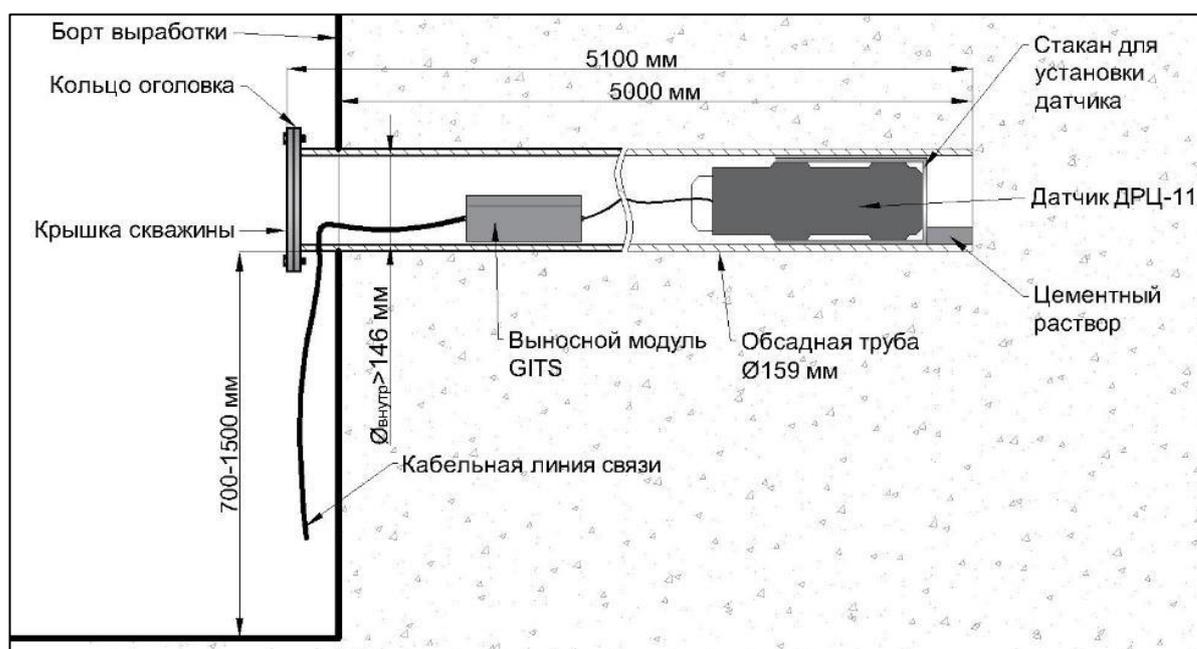


Рис. 2.2. – Схема размещения подземного датчика и выносного модуля в скважине

В ситуациях, при которых в предлагаемых местах устройства сейсмопавильонов отсутствует возможность отбурить скважину, предложена конструкция сейсмопавильона в виде бетонного постамент на породах почвы выработки (рисунок 2.3). Данная конструкция опробована на угольных шахтах Воркуты, Якутии и Казахстана, и обеспечивает регистрацию сейсмоприёмником сейсмических волн в заявленном диапазоне частот.

При устройстве постамент необходимо выполнение следующих условий:

– возведение постамент должно выполняться в местах, не препятствующих проходу людей и движению техники, оптимальными вариантами предлагаются сбойки между выработками, оконтуривающими выемочные столбы;

- исходные места установки сеймопавильонов не должны отклоняться от первоначально заданных точек более чем на 150 м, но при этом должна быть обеспечена возможность определения маркшейдерской службой координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  местоположения датчика;
- бетонный постамент должен соответствовать минимальным линейным размерам 50×50×50 см;
- в центре постамента вмуровывается металлическая обсадная труба диаметром 159 мм высотой не менее 80 см.

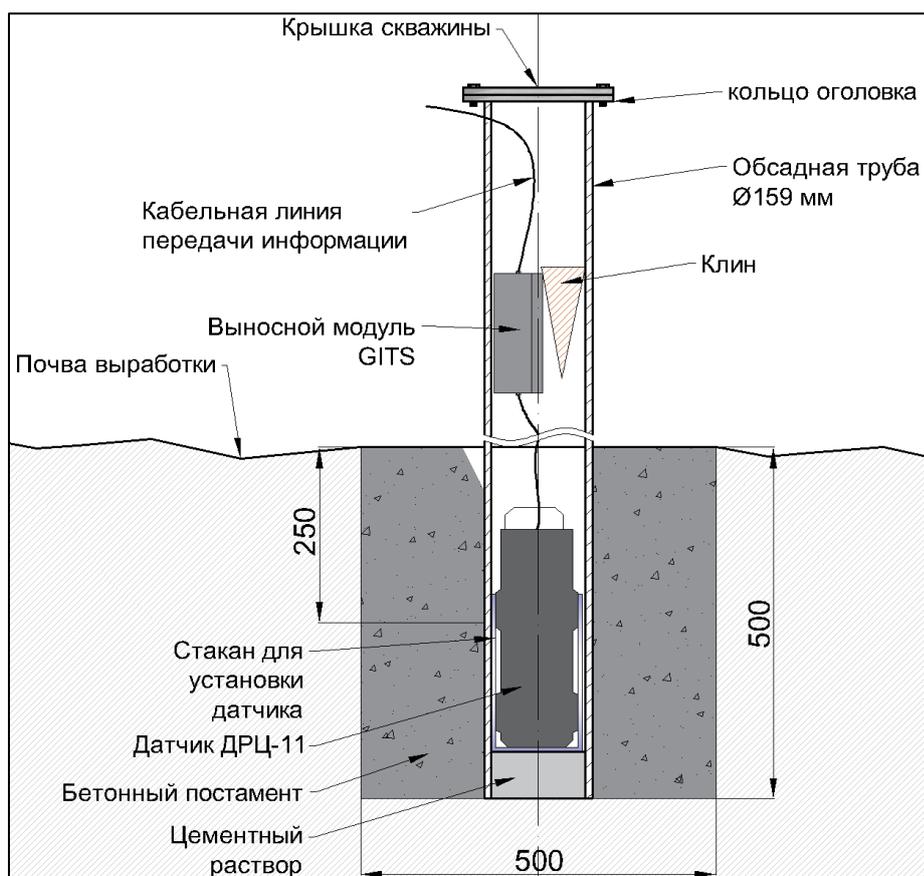


Рис. 2.3. – Схема размещения подземного датчика и выносного модуля на бетонном постаменте

Основные результаты применения системы сейсмического мониторинга GITS на угольных шахтах России представлены ниже.

Система сейсмического мониторинга GITS испытана в условиях СП «Шахта Комсомольская» АО «Воркутауголь» (г. Воркута). Многолетняя эксплуатация региональной системы GITS показала, что регистрация событий с малой энергией в районе отработки выемочных столбов требует более густой сети сейсмических дат-

чиков. Для этих целей была построена система из 6 сейсмопавильонов, монтаж которых осуществлялся в районе ведения очистных работ одной лавы с выполнением технических требований, предъявляемых к оборудованию сейсмопавильонов и бурению контрольных скважин [81].

Основной функциональной характеристикой системы является реальная чувствительность  $R$ , представляющая собой радиус сферы, в пределах которой данный сейсмический пункт может уверенно зарегистрировать сейсмическое событие определенного энергетического уровня. В общем виде  $R$  зависит от спектрального состава колебаний в очаге сейсмического события –  $\Phi(\omega)$  в регистрируемой полосе частот, коэффициента усиления регистрирующей аппаратуры  $U$ , амплитуды помех  $A_{\text{пом}}$ , затухания в среде  $n$ , а также от минимальной энергии сейсмического события  $E_{\text{min}}$ , которое необходимо зарегистрировать [78]:

$$R = F [\Phi(\omega), U, A_{\text{пом}}, n, E_{\text{min}}]. \quad (2.1)$$

Энергетической характеристикой события является сейсмическая энергия или та часть полной энергии очага, которая приходится на образование упругих колебаний и их распространение в массиве горных пород. Для шахтных условий она не превышает первых процентов от полной энергии, чем больше энергия, тем выше доля сейсмической энергии. Для вычисления сейсмической энергии  $E_c$  (Дж) используют формулу [82]

$$E_c = \pi R_s^2 \rho (V_p A_p^2 \tau_p + V_s A_s^2 \tau_s), \quad (2.2)$$

где  $R_s$  – гипоцентрально расстояние, м;  $\rho$  – средняя плотность горных пород, кг/м<sup>3</sup>;  $V_p, V_s$  – скорости продольной и поперечной волн, м/с;  $A_p, A_s$  – амплитуды скорости колебаний в продольной и поперечной волнах, м/с;  $\tau_p, \tau_s$  – длительность цуга колебаний в продольной и поперечной волнах, с.

По оценкам, приведённым в работах по сейсмологии землетрясений и взрывов [83–85], без учёта влияния затухания сейсмического сигнала и геометрических особенностей среды распространения упругих колебаний величина  $E_c$  зависит от следующих компонент (Дж):

$$E_c = \pi R_s^2 V_p \rho A_p^2 \tau_p. \quad (2.3)$$

В 1984 г. Ломакин В. С. выполнил анализ большого количества сейсмозаписей и расчёта сейсмической энергии по формулам (2.2, 2.3), в результате чего была получена корреляционная зависимость, которая и используется при определении сейсмической энергии явлений [86]:

$$\lg E = 2,24 + 2,76 \lg \tau, \quad (2.4)$$

где  $\tau$  полная длительность записи по сейсмограмме.

Разброс отдельных измерений от данной зависимости не превышает 0,5 порядка, что вполне допустимо при сейсмических измерениях.

Для регионального прогноза удароопасности выполняют построение карт сейсмической активности:

- задаются линейные размеры единичного блока в виде параллелепипеда, для которого подсчитывают параметры сейсмической активности, значение параметров относят к геометрическому центру блока, либо к центру плоскости блока;
- выполняют перемещение расчётного блока внутри границ расчётной области на половину линейных размеров блока;
- полученные значения параметра проецируют на горизонтальную плоскость  $XU$ , а также в плоскости  $YZ$  и  $XZ$ , с заданным шагом производят отрисовку изолиний.

Например, для СП «Шахта Комсомольская», в качестве основного параметра сейсмической активности принят безразмерный параметр  $F$ , комплексно учитывающий сейсмическую энергию событий, а также их количество. Для ведения прогноза удароопасности по параметру  $F$ , выполнена наработка критериальных значений. Дополнительно сейсмическую активность оценивают по количеству зарегистрированных сейсмособытий в границах конкретного участка за выделенных интервал времени.

Для условий СП «Шахта Комсомольская» было выполнено определение средней скорости распространения упругих волн, равной 4700 м/с. Скорость определена статистически, в процессе обработки событий с известными координатами в течение первого года эксплуатации сейсмостанции. Погрешность определения

координат при использовании средней скорости во внутренних точках сети составляет порядка  $\pm 15$ – $20$  м. При знании точных скоростей точность определения координат при имеющейся плотности сейсмической сети увеличивается в 2–3 раза.

Ниже приведены некоторые результаты мониторинга сейсмической активности в целом по шахте и её отдельному участку (лаве).

В таблице 2.2 приведены данные об изменении среднемесячной сейсмической активности, энергии событий по шахтному полю СП «Шахта Комсомольская» в период 2014–2019 гг. В таблице 2.3 – сопоставление результатов наблюдений за 2017 и 2019 гг.

Таблица 2.2

Среднемесячная сейсмическая активность и энергия событий по годам (2014 – 2019 гг.)

Год	Всего событий, шт.	Число событий, шт.			Сейсмическая энергия событий, Дж		
		min	среднее	max	min	среднее	max
2014	7125	30	610	1376	21	773,7	12861
2015	4236	13	429	918	30	1103	24815
2016	2853	3	237	536	51	1150	9308
2017	3357	59	290	810	26	721,4	13369
2018	4997	54	415	891	8	546	16652
2019	3922	71	314	801	10	810	14639

Таблица 2.3

Статистические данные (сейсмические события с декабря 2016 г. по декабрь 2019 г.)

Диапазон энергий, Дж		Число событий, шт.			Процентное соотношение		
min	max	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
50	500	1650	3915	2450	49,15%	78,35%	62,47%
500	2000	1543	831	1125	45,96%	16,62%	28,68%
2000	4500	142	169	197	4,23%	3,38%	5,02%
4500	10000	21	71	130	0,63%	1,43%	3,31%
Больше 10 000		1	11	3	0,02%	0,22%	0,08%
Всего:		3357	4997	3922	100%		

В 2019 г. в сравнении с 2018 г. снизилась доля слабых (до 500 Дж) событий с 78 до 62%, но увеличилась доля средних по энергетике (500–2000 Дж) событий (с 16 до 28%). При этом доля крупных событий с энергией в 2000–4500 Дж возросла до 5%, с энергией 4500–10000 Дж – до 3,3%. В 2018 г. было зарегистрировано три мощных события с энергией свыше 10 кДж, что составило 0,08% от всего числа событий.

В июле 2019 года выполнен монтаж датчиков системы сейсмического мониторинга в подготовительных выработках лавы 211-ю пл. Четвёртый. После настройки параметров регистрации система сейсмического мониторинга GITS переведена в опытно-промышленную эксплуатацию.

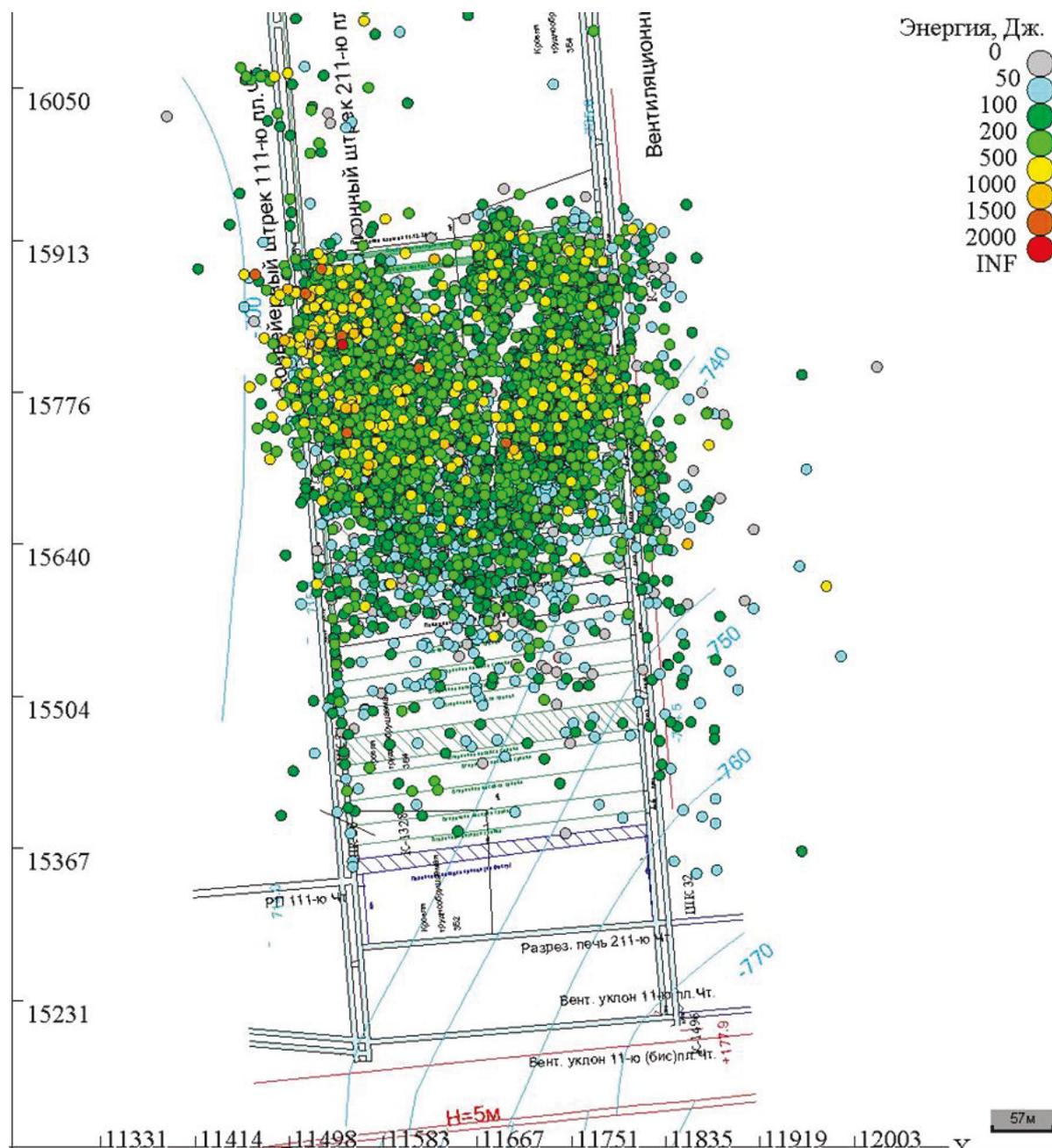


Рис. 2.4. – Карта расположения гипоцентров сейсмических событий впереди забоя лавы 211-ю пл. Четвёртый [81]

На рисунке 2.4 приведены результаты мониторинга за 2019 г. в форме карты гипоцентров сейсмических событий по лаве 211-ю пл. Четвёртый. При отработке лавы с июля по ноябрь 2019 г. было зарегистрировано 5220 событий, в основном с энергией  $E_c < 500$  Дж, также было зафиксировано 27 событий с энергией

$E_c > 1000$  Дж (таблица 2.4). За рассматриваемый период подвигание забоя лавы 211-ю пл. Четвёртый составило 340 м.

Таблица 2.4

Число событий с различной энергией на участке Лава 211-ю пл. Четвёртый за 2019 г.

Диапазон энергий, Дж		Число событий	Распределение событий по энергии, %
min	max		
0	50	645	12,4
50	100	1670	32
100	200	1522	29,2
200	500	1140	21,8
500	1000	216	4,1
1000	2000	26	0,5
Более 2000		1	0,02
Всего:		5220	100

В плане гипоцентры событий распределены равномерно, что свидетельствует о непрерывности процессов релаксации напряжений в зоне опорного давления впереди очистного забоя.

На рисунке 2.5 представлен график изменения максимального значения энергии единичного события за сутки совместно с моментами вторичной посадки кровли обрабатываемой лавы 211-ю пл. Четвёртый.

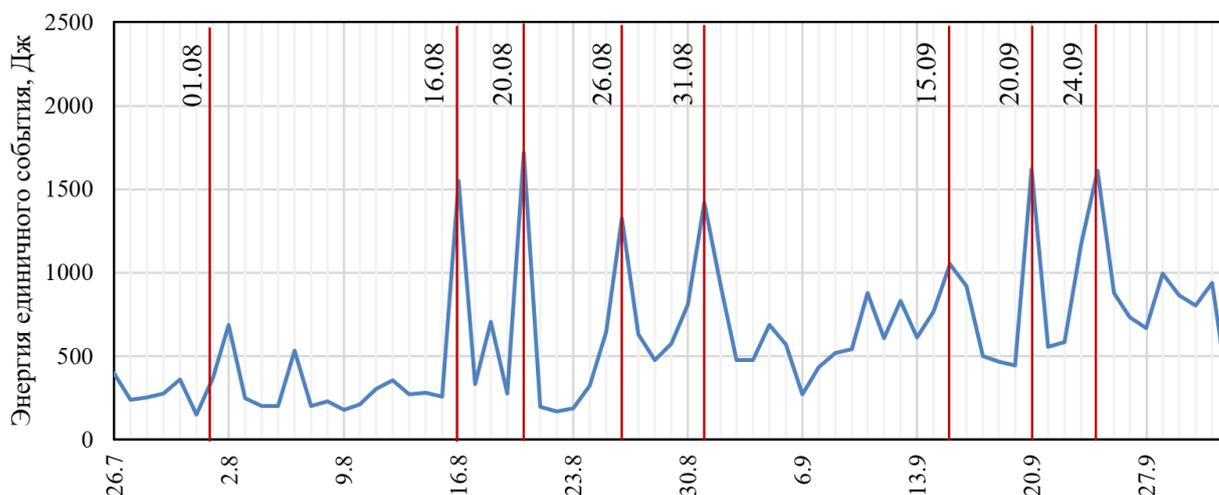


Рис.2.5. – График максимальной энергии единичного события за сутки (вертикальные линии – даты вторичной посадки кровли) [81]

Отмечена корреляция процесса посадки кровли с регистрацией относительно крупных сейсмических событий.

## 2.2 Алгоритмы первичной обработки цифровых баз данных сейсмического мониторинга

Важной составляющей любой системы сейсмического мониторинга являются алгоритмы локации очагов сейсмособытий, а также обоснование информативного энергетического критерия сейсмической активности потенциально удароопасного массива горных пород в зависимости от режимов обработки сейсмосигнала.

Программное обеспечение системы GITS обеспечивает: определение гипоцентров сейсмических событий в координатах  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и их сейсмической энергии; пополнение базы данных зарегистрированных событий; построение карт сейсмической активности с отображением гипоцентров событий и карты изолиний параметров сейсмической активности.

Алгоритмы обработки сейсмической информации разработаны с использованием методов геолокации и опыта прогноза геодинамических явлений в шахтах.

Алгоритмы определения координат сейсмических событий реализуются с помощью двух методов: точечной локации для 6 датчиков (SPAM) и наименьших квадратов.

Алгоритм SPAM реализует циклический подбор координат расчётной (опытной) точки – источника сейсмосигнала с наименьшей величиной невязки  $Q$  между фактическими и расчётными задержками прихода сейсмоволны.

Алгоритм расчёта методом SPAM представлен на рисунке 2.6.

Основные этапы расчёта состоят в следующем: задание координат базового сейсмоприёмника, ближайшего к гипоцентру; вычисление координат пробных точек относительно базовой; вычисление  $Q$  для всех пробных точек; циклический выбор пробной точки с минимальной величиной  $Q$  с заданным минимальным шагом приращения координат.

Алгоритм метода наименьших квадратов основан на предположении, что скорость сейсмосигнала постоянна в различных направлениях. Алгоритм этого метода расчёта приведён на рисунке 2.7.

Алгоритм включает два основных этапа:

- формирование системы нелинейных расчётных уравнений;
- определение координат точки сейсмосигнала  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  методом наименьших

### квадратов путём минимизации функции $\Phi$ .

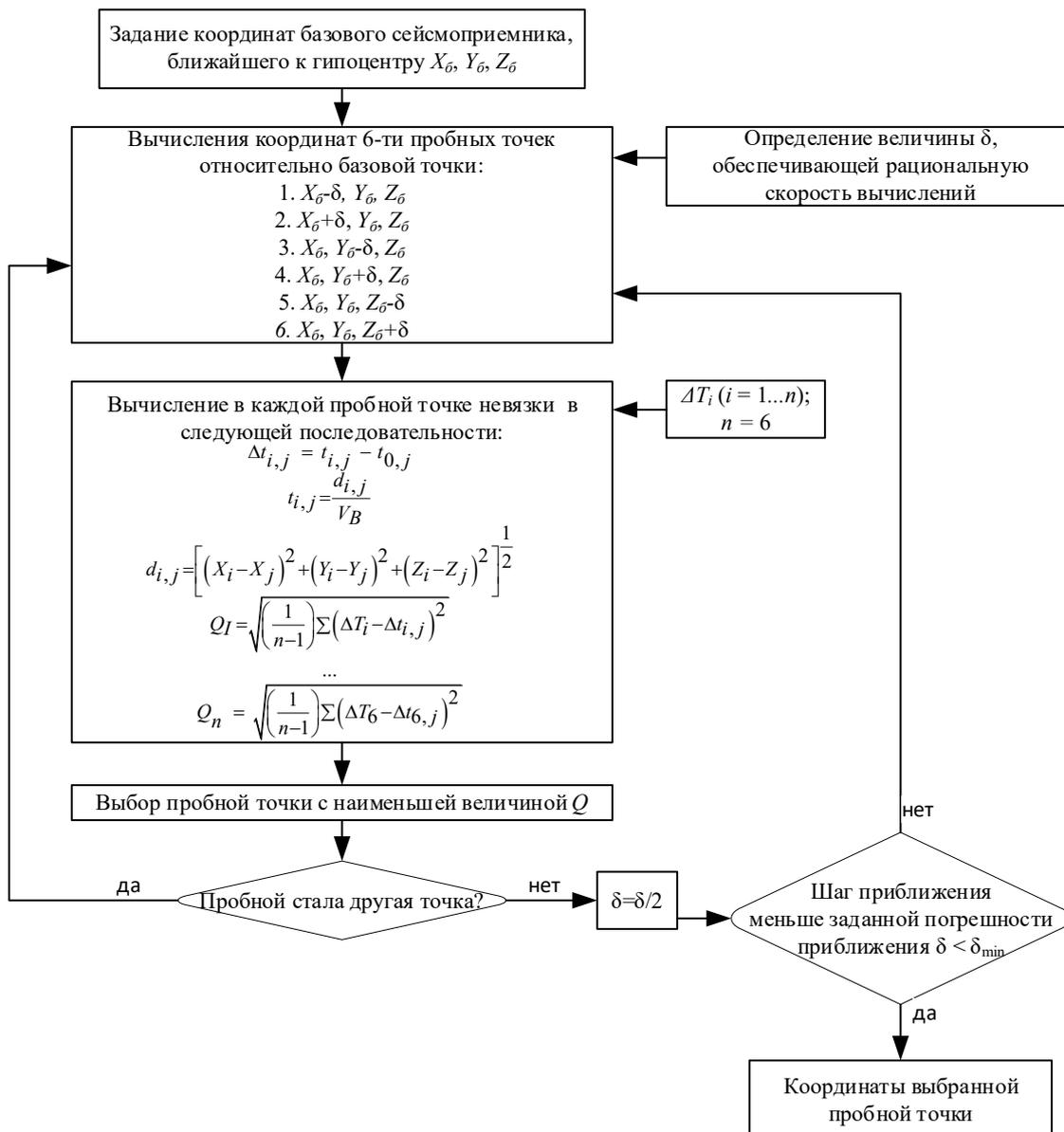


Рис. 2.6. – Алгоритм расчёта координат источника сейсмособытия методом SPAM:

$\delta$  – приращение координаты, рациональное по критерию времени счёта;  $\Delta t_{i,j}$  – задержка прихода сейсмодолны от  $j$ -го вычисленного источника до  $i$ -го приёмника относительно прихода сейсмодолны от того же источника до ближайшего к нему сейсмоприёмника;  $t_{i,j}$  – время прихода сейсмодолны от  $j$ -го вычисленного источника до  $i$ -го приёмника;  $t_{0,j}$  – рассчитанное время прихода сейсмодолны от  $j$ -го вычисленного источника до ближайшему к нему приёмника;  $d_{i,j}$  – рассчитанное расстояние между  $j$ -тым вычисленным источником и  $i$ -тым приёмником;  $X_i, Y_i, Z_i$  – координаты  $i$ -го приёмника;  $X_j, Y_j, Z_j$  – координаты  $j$ -го вычисленного источника;  $\Delta T_i$  – фактическая задержка прихода сейсмодолны от источника до  $i$ -го приёмника относительно прихода сейсмодолны от источника до ближайшего к нему сейсмоприёмника;  $n$  – количество сейсмоприёмников,  $n=6$ ;  $Q_j$  – невязка для  $j$ -го вычисленного источника

Поиск минимума функции  $\Phi$  (расчётная формула показана на рисунке 2.7) реализуется методом адаптивного случайного поиска (имитации отжига [87, 88]) с использованием генератора случайных чисел  $rand[-1;1]$ , при этом приемлемая по-

грешность расчёта  $\Delta$  обеспечивается при числе циклов более 27. Первый цикл минимизации позволяет приближено определить минимум функции  $\Phi$  при коэффициенте расширения  $\alpha = (\sqrt{5}+1)/2$ , во втором цикле минимум функции вычисляется с заданной точностью при коэффициенте сжатия  $\beta = (\sqrt{5}-1)/2$ .

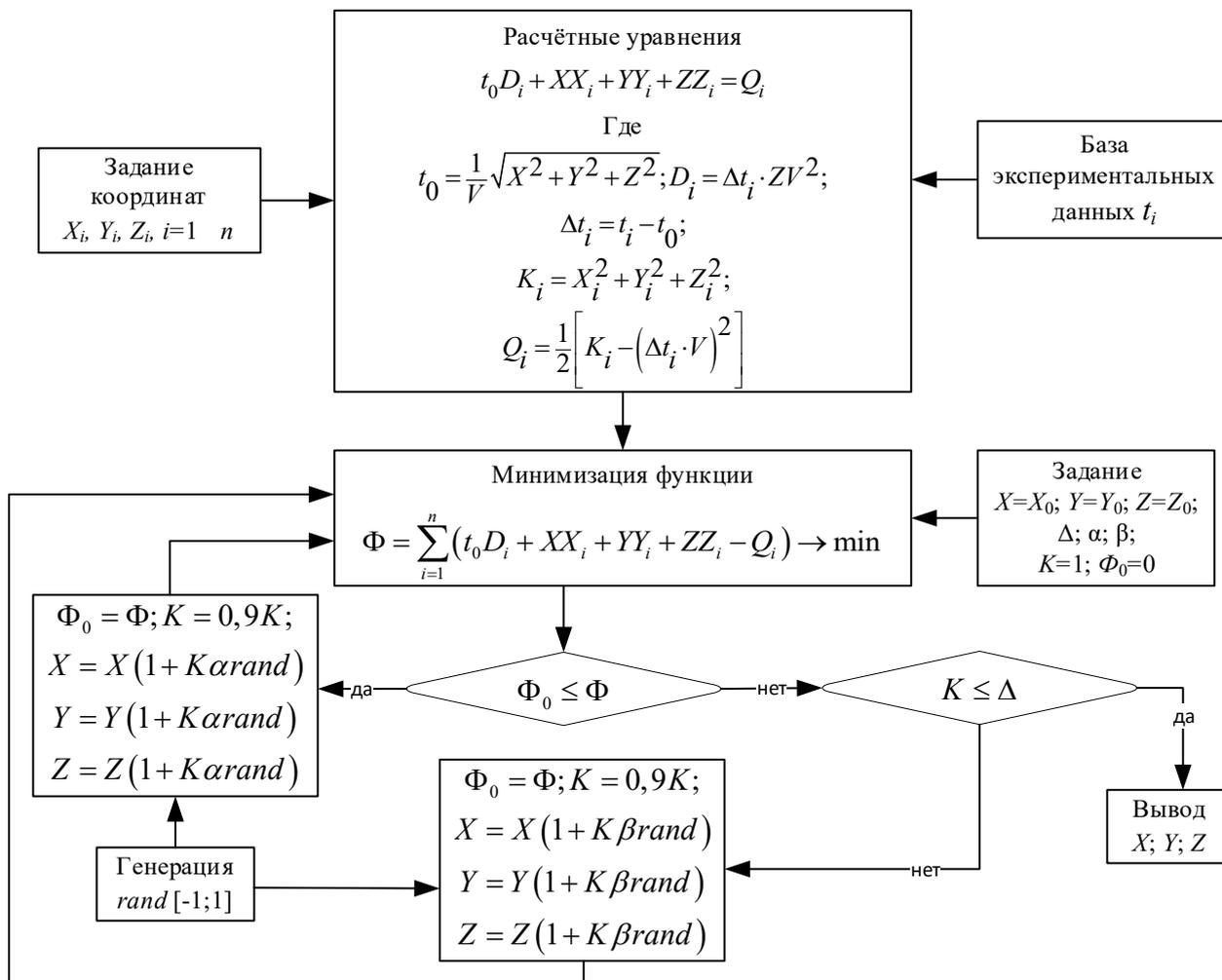


Рис. 2.7. – Алгоритм метода наименьших квадратов:  $X, Y, Z$  – координаты очага;  $X_i, Y_i, Z_i$  – координаты  $i$ -го сейсмоприёмника;  $t_0$  – время прихода сигнала от очага до сейсмоприёмника с координатами  $X_0, Y_0, Z_0$ ,  $t_i$  – время прихода сигнала от очага до  $i$ -го сейсмоприёмника;  $V$  – скорость волны;  $\Delta t_i$  – измеренные величины задержки сигнала;  $n$  – число сейсмопавильонов, участвующих в вычислениях;  $\Delta$  – заданная погрешность расчёта;  $K$  – коэффициент сдвига расчётной точки;  $\alpha$  – коэффициент расширения;  $\beta$  – коэффициент сжатия

В рамках подготовки диссертационной работы написана расчётная программа для ЭВМ «Метод определения координат очага динамического явления при сейсмическом мониторинге», которая позволяет выполнять циклический подбор координат расчётной (опытной) точки – источника сейсмосигнала с наименьшей величиной фактора качества, оцениваемого по сумме квадратов разностей между

фактическими и расчётными задержками прихода сейсмоволны. Блок-схема программы представлена на рисунке 2.8.



Рис. 2.8. – Блок-схема программы для ЭВМ «Метод определения координат очага динамического явления при сейсмическом мониторинге»

Программа получила свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024610907 от 16.01.2024 [89], код программы представлен в приложении А.

### 2.3 Интегральные показатели сейсмической активности

Построение зон удароопасности целесообразно вести на основе эмпирического параметра  $F$  [90]:

$$F = \frac{F_{T,Bl}}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{D_k + N_k}{\operatorname{tg}\beta}, \quad (2.5)$$

где  $F_{T,Bl}$  – сейсмическая активность объёма массива;  $k$  – номер ячейки объёма массива, в котором производится расчёт;  $\beta$  – угол наклона графика распределения  $N_i$  ( $E_i$ ), построенного в билогарифмическом масштабе;  $D_k$  – суммарная сейсмическая деформация блока за расчётный интервал времени регистрации  $T$ :

$$D_k = \sum_1^T D_i, \quad (2.6)$$

где  $T$  – расчётный интервал времени регистрации;  $D_i$  – сейсмическая деформация текущего сейсмического события:

$$D_i = \sqrt{E_{cor}/E_{\Phi}}, \quad (2.7)$$

где  $E_{\Phi}$  – фоновая сейсмическая энергия (минимальный уровень энергии, фиксируемый за время наблюдений);  $E_{cor}$  – скорректированная энергия сейсмического события:

$$E_{\text{cor}} = E_c \exp(-3 t/T) \frac{T-t}{T}, \quad (2.8)$$

где  $t$  – время, прошедшее с момента регистрации сейсмического события с энергией  $E_c$  до времени определения  $E_{\text{cor}}$ , сут.

$$N_k = \sum_1^T N_i, \quad (2.9)$$

где  $N_k$  – количество сейсмических событий за расчётный интервал времени регистрации  $T$ ;  $N_i$  – количество сейсмических событий за выбранный период времени;

Пример определения параметров  $N_i$ ,  $E_i$  и  $F$  для условий СП «Шахта Комсомольская» приведён на рисунке 2.9.

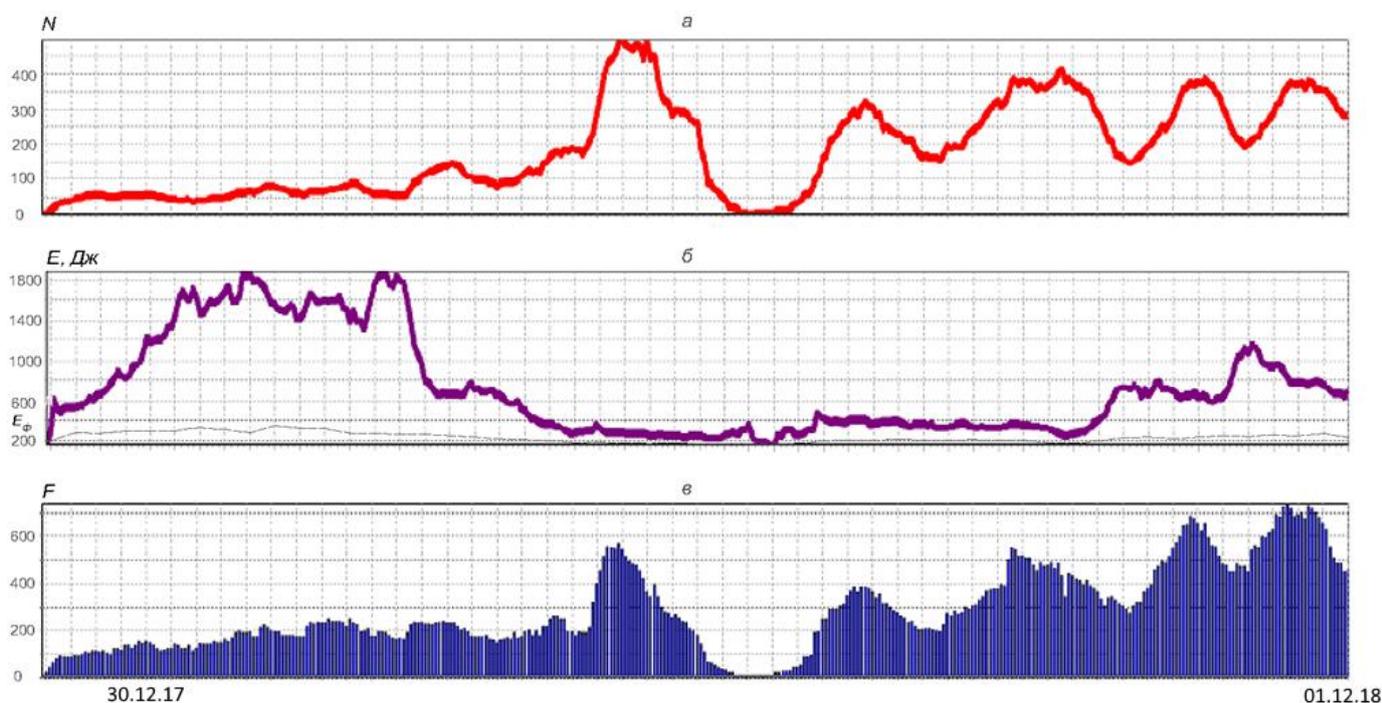


Рис. 2.9. – Графики изменения во времени сейсмической активности для всего шахтного поля СП «Шахта Комсомольская» за период с 01.12.2017 по 01.12.2018,  $N_i$  (а),  $E_i$  (б),  $F$  (в) (минимальное значение шкалы деления по оси абсцисс соответствует 1 суткам) [91]

Для учёта свойств массива (в первую очередь трещиноватости) и характера сейсмического процесса сейсмическая активность объёма массива  $F_{T.BI}$  дополнительно делится на тангенс угла наклона  $\beta$  кривой повторяемости сейсмических событий в данном блоке за период времени  $\Delta T$  [90].

Таким образом обеспечивается повышение точности оценки опасности в менее трещиноватых участках массива при снижении наклона кривой повторяемости сейсмособытий [90].

Для вычисления угла наклона  $\beta$  кривой повторяемости строится график кумулятивного распределения сейсмособытий по энергиям в билогарифмическом масштабе (рисунок 2.10) [90].

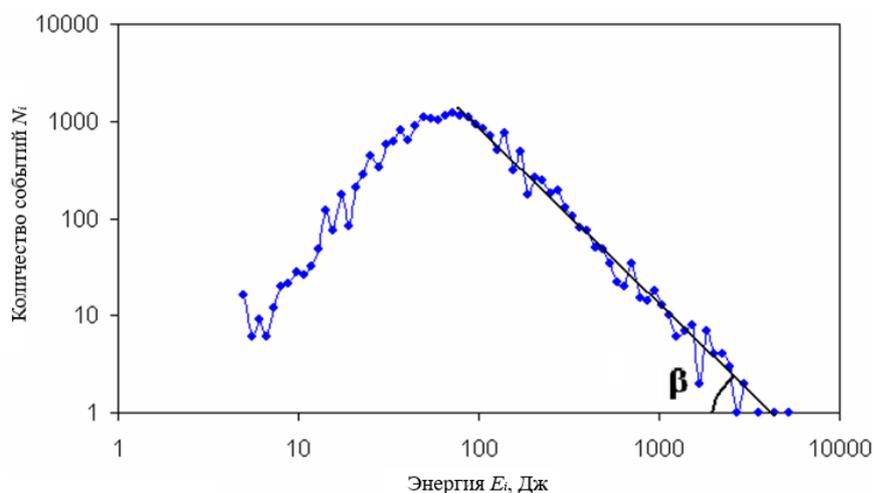


Рис. 2.10 – График распределения количества событий  $N_i$  по энергиям  $E_i$

Значения параметра  $F$  зависят от нескольких постоянных, определяемых эмпирическим путём (рисунки 2.11–2.14):

- $L$  – линейный размер объёмной матрицы ячейки, на которые разбивается массив горных пород, имеющий вид параллелепипеда с высотой, равной разнице минимальной и максимальной глубины гипоцентров сейсмических событий;
- $\Delta L$  – шаг сетки, по которой производится смещение расчётной ячейки по исследуемому участку массива;
- $\Delta T$  – временной интервал в сутках, за который производится расчёт  $F$ ;
- $\alpha$  – коэффициент затухания;
- $E_\Phi$  – фоновая энергия.

Выполнен факторный анализ, при котором указанные выше параметры изменялись в определенных диапазонах, а остальные принимались постоянными.

Для оценки тесноты связи данных, полученных в ходе факторного анализа, и определенных уравнений зависимости, выполнено определение коэффициента корреляции  $r$  (или корреляционного отношения  $\eta$ ) Оценку надёжности полученного уравнения регрессии выполнена по критерию Фишера  $F_{\text{Финш}}$ .

Коэффициент корреляции  $r$  для прямолинейного вида связи определяется по общеизвестной формуле:

$$r = \frac{\overline{x_i y_i} - \overline{x_i} \overline{y_i}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (2.10)$$

где  $\overline{x_i y_i}$  – усредненное значение произведений результативного и факторного показателей;  $\overline{x_i}$ ,  $\overline{y_i}$  – средние значения результативного и факторного показателей;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – соответственно среднее квадратическое отклонение результативного и факторного показателей.

Для криволинейной связи корреляционное отношение  $\eta$  определяется по формуле:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.11)$$

где  $y_i, \hat{y}_i, \bar{y}$  – соответственно эмпирическое, среднее и прогнозируемое значения результативного показателя.

Критерий Фишера  $F_{\text{Фиш}}$  определяется по формуле:

$$F_{\text{Фиш}} = \frac{r^2}{1-r^2} \cdot \frac{(n-m-1)}{m}, \quad (2.12)$$

где  $n$  – число пар  $(x_i, y_i)$ ;  $m$  – число факторов в модели.

Для оценки достоверности для каждой выборки определялся критическое значение критерия Фишера  $F_{\text{Ф.крит}}$  и сравнивался с расчётным значением  $F_{\text{Фиш}}$ .

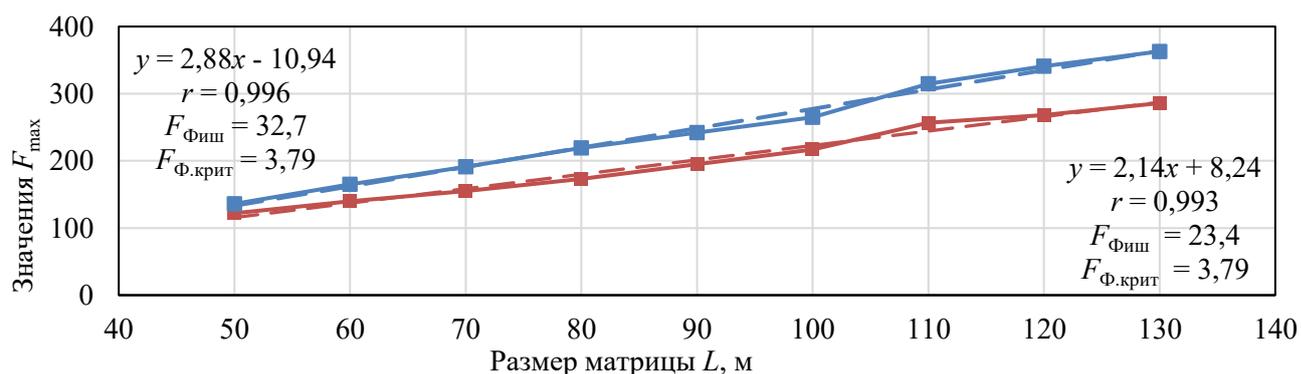


Рис. 2.11 – График зависимости  $F_{\text{max}}$  от  $L$ : 1 – при  $\Delta T = 0,2$  сут.; 2 – при  $\Delta T = 30$  сут [82]:  $r$  – коэффициент корреляции для прямолинейной связи;  $F_{\text{Фиш}}$  – критерий Фишера;  $F_{\text{Ф.крит}}$  – критическое значение критерия Фишера

На рисунке 2.11 приведены графики зависимости максимальных значений  $F_{\text{max}}$  от параметра  $L$  для двух значений  $\Delta T$ , из которых следует, что зависимость  $F_{\text{max}}(L)$  линейная (на рисунке указаны эмпирические зависимости  $y(x)$ , коэффици-

ент корреляции  $r$  и критерий Фишера  $F_{\text{Фиш}}$ ). Установлено, что связь между размером матрицы и сейсмическим параметром  $F$  достаточно тесная ( $r > 0,7$ ).

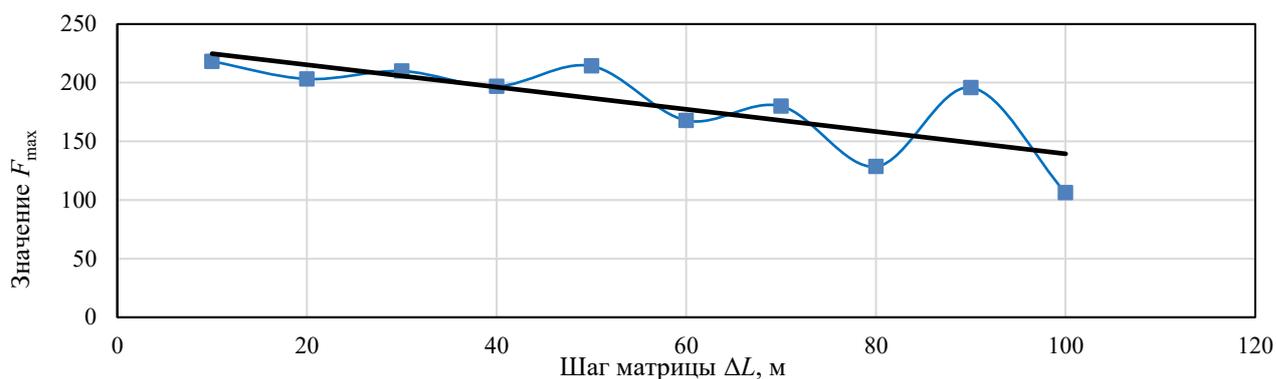


Рис. 2.12 – График зависимости  $F_{\text{max}}$  от  $\Delta L$  при  $L = 100$  м

Из графика зависимости  $F_{\text{max}}(\Delta L)$  при  $L=100$  м (рисунок 2.12) следует, что она имеет вид периодической функции с переменной амплитудой, при этом амплитуда тренда увеличивается по мере увеличения шага  $\Delta L$ , т.е. чем больше шаг, тем более «размытым» получается значение  $F$ . Таким образом, шаг сетки  $\Delta L$  не должен превышать половины размера матрицы, т.е. 50 м.

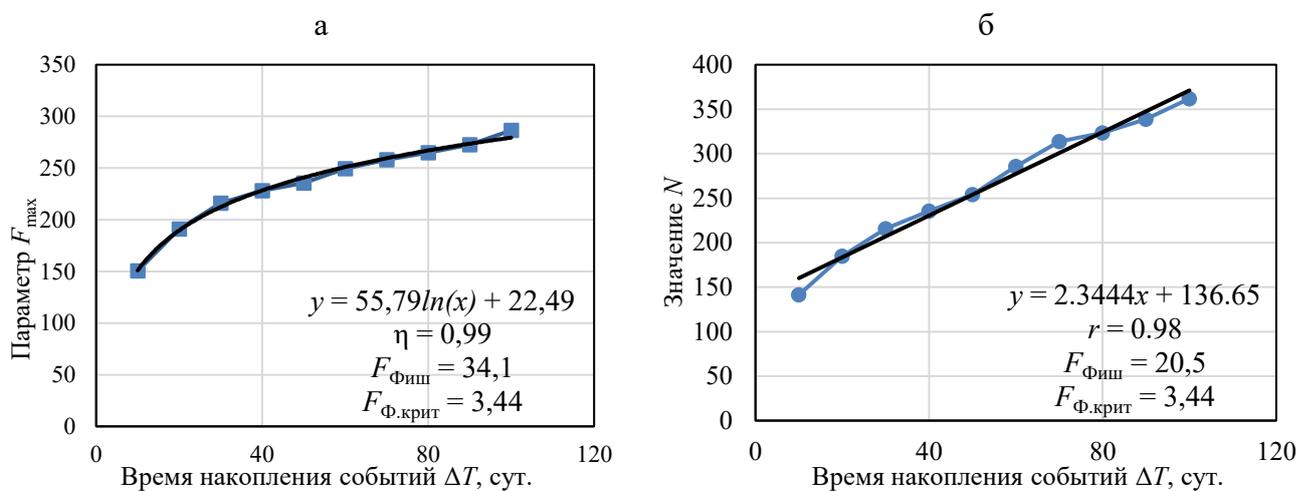


Рис. 2.13 – График зависимости параметров  $F_{\text{max}}$  (а) и  $N$  (б) от времени накопления событий  $\Delta T$ , где  $\eta$  – корреляционное отношение;  $r$  – коэффициент корреляции;  $F_{\text{Фиш}}$  – критерий Фишера;  $F_{\text{Ф.крит}}$  – критическое значение критерия Фишера

При исследовании зависимости  $F_{\text{max}}$  и  $N$  от  $\Delta T$  (рисунок 2.13) целью ставилась задача определить условие более детального выделения временных участков усиления сейсмической активности для более точного прогноза момента подготовки сильного сейсмического события с максимальной энергией. Поскольку обе зависимости монотонны, интервал целесообразно принимать в диапазоне  $\Delta T = 10\text{--}50$  сут.

а

б

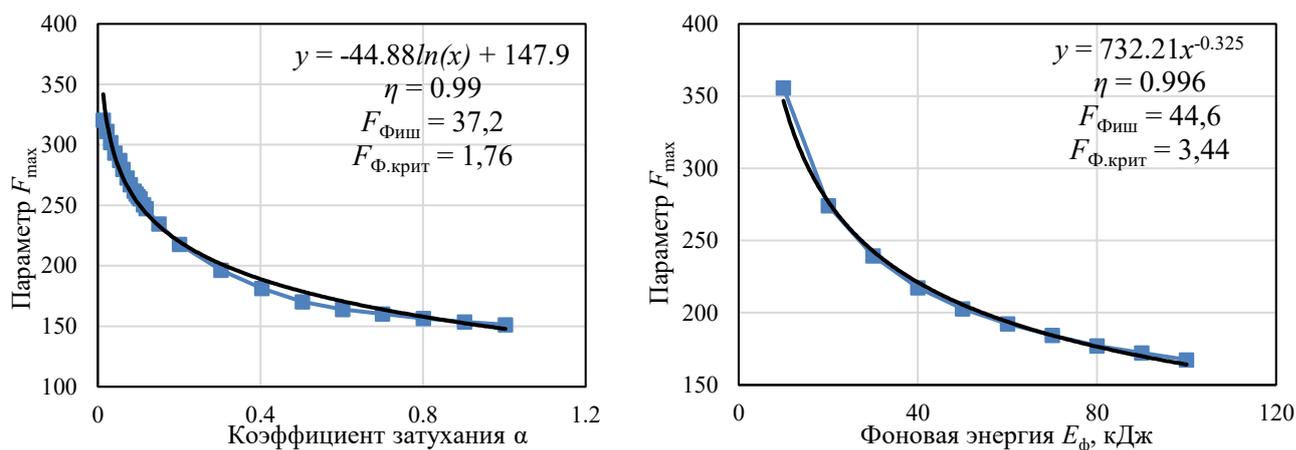


Рис. 2.14 – График зависимостей  $F$  от  $\alpha$  (а) и  $E_{\phi}$  (б), где  $\eta$  – корреляционное отношение;  $F_{\text{Фиш}}$  – критерий Фишера;  $F_{\text{Ф.крит}}$  – критическое значение критерия Фишера

Из графиков на рисунке 2.14 следует, что зависимость  $F(\alpha)$  логарифмическая и коэффициент  $\alpha$  имеет сильное влияние при начальных значениях до 0,3. С увеличением фонового значения  $E_{\phi}$  величина  $F$  параболически снижается.

С 2014 года на СП «Шахта Комсомольская» функционирует система сейсмического мониторинга GITS. Ведётся накопление информации о сейсмической активности массива при ведении горных работ с целью обоснования критериев прогноза удароопасности. Исследования проводились при отработке пластов Тройной и Четвёртый на глубине более 800 м [91].

Пласт Четвёртый, мощностью 1,65 м имеет простое строение, залегает в 0,5–20,0 м ниже пласта Тройного. Угол падения пласта от 0–10°. Непосредственная кровля пласта Четвёртого характеризуется как неустойчивая, благодаря почти повсеместному развитию неустойчивой пачки тонкослоистых аргиллитов мощностью в среднем 1,0–1,5 м. Выше залегают пачки массивных аргиллитов, мелкозернистых и крупнозернистых алевролитов суммарной мощностью от 1,0 до 4,0–6,0 м, относящихся к средним по устойчивости. На подавляющей части площади в 2,0–4,0 м от кровли пласта залегают мощные песчаники (мощность до 25 м), образующие труднообрушаемую кровлю. Непосредственная почва пласта представлена аргиллитами мощностью от 0,2 до 1,5–2,0 м, ниже залегают песчаники [91].

Пласты месторождения отнесены к угрожаемым и опасным по динамическим проявлениям горного давления (таблица 2.5) [91].

Характеристики угольных пластов

Пласт	Опасность по горным ударам		Опасность по внезапным выбросам	
	категория опасности	абс. отм., м	категория опасности	абс. отм., м
Мощный ( $n_{14+13+12+11}$ )	угрожаемый	+15 до –65	опасный	–350
	опасный	–65 и ниже		
Тройной ( $n_{14+13+12}$ )	угрожаемый	+50 до –270	опасный	–500
	опасный	–270 и ниже		
Четвёртый ( $n_{11}$ )	угрожаемый	+50 до –270	неопасный	–
	опасный	–270 и ниже		
Пятый ( $n_7$ )	угрожаемый	–510 и ниже	опасный	–450

Анализировались следующие параметры сейсмической активности массива:

- суммарное количество событий  $N$  за интервал регистрации  $\Delta T$ ;
- среднее  $\bar{E}_c$  и суммарное  $E_c$  значения сейсмической энергии, Дж;
- эмпирический параметр  $F$ .

Основное содержание обработки экспериментальных баз данных заключалось в следующем: построение полей и изолиний сейсмической активности на плане горных работ; статистический анализ временных изменений параметров сейсмической активности; выявление диапазонов изменения контролируемых параметров и их критических значений.

В таблице 2.6 показаны общие результаты наблюдений, предоставленные РЦГСК АО «Воркутауголь».

Таблица 2.6

Число событий с разной энергией  $E$ , Дж

Период, год	Максимальная энергия одного события, Дж	Кол-во событий с энергией >1000 Дж	Кол-во событий с энергией >4500 Дж	Кол-во событий с энергией >10000 Дж
2014	12861	1367	104	5
2015	24815	1578	68	7
2016	9308	1195	53	0
2017	13369	670	21	1
2018	16652	500	71	11

Графики изменения во времени параметров сейсмической активности за период 2017–2018 гг. представлены на рисунке 2.9.

Анализ приведённых данных показал следующее [91]:

- ярко выраженных монотонных закономерностей изменения среднегодовых значений параметров  $N$  и  $E$  не установлено;

- формирование гипоцентров (очагов) сейсмических событий происходит относительно равномерно в пределах выемочных участков, что свидетельствует о непрерывном развитии процессов деформации и перераспределения горного давления в угольном пласте и вмещающих пород по мере подвигания очистного забоя;
- на графиках  $N(T)$ ,  $E(T)$ ,  $F(T)$  имеют место периодические изменения, с периодом 1–2 мес., связанные с моментами посадки основной кровли;
- диапазоны изменений контролируемых параметров составляют:  $N = 0–500$ ;  $\overline{E_c} = 200–1900$  Дж;  $E_c = 0–310000$  Дж;  $F = 20–740$ ;
- наиболее информативным показателем динамики геомеханических процессов является комплексный параметр  $F$ , характеризующий интенсивность процессов дезинтеграции породного массива и их энергию.

Карта расположения гипоцентров сейсмических событий при отработке лав 512-ю и 612-ю пласта Тройной представлена на рисунке 2.15.

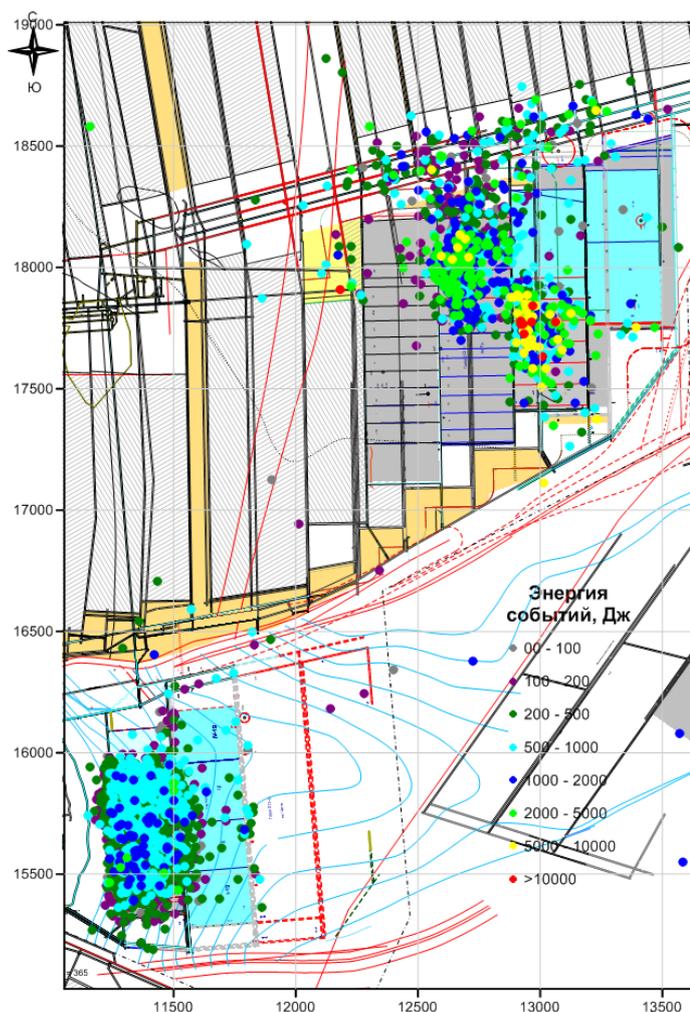


Рис. 2.15 – Карта расположения гипоцентров сейсмических событий на плане горных работ по пласту Тройной с 01.12.2017 по 01.12.2018

Из графиков энергетических спектров (рисунок 2.16) сейсмособытий следует, что от 82 до 99% сейсмоимпульсов имеют энергию  $E < 5000$  Дж.

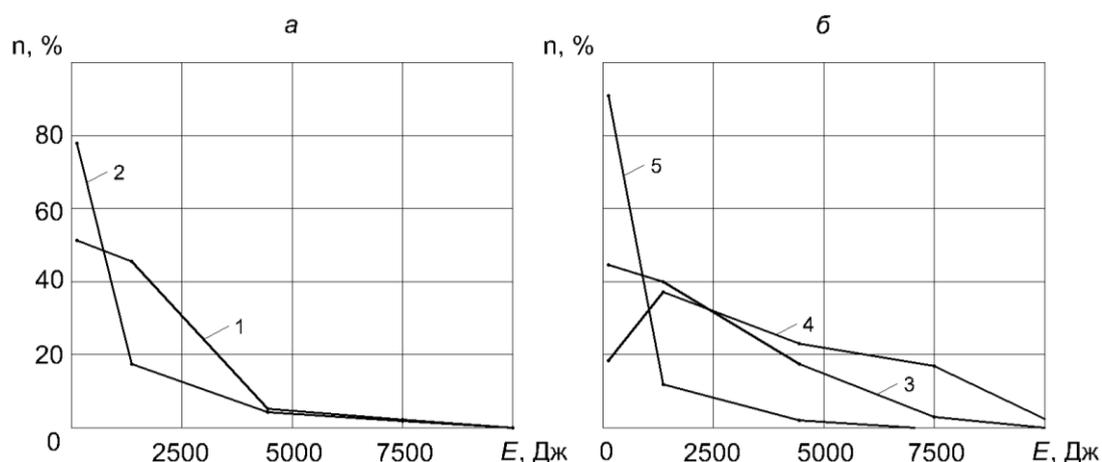


Рис. 2.16 – Энергетические спектры сейсмических событий, по шахтному полю (а), по участкам за 2018 г. (б): 1 – за период 2017 г.; 2 – за период 2018 г.; 3 – лава 512-ю пл. Тройной; 4 – лава 612-ю пл. Тройной; 5 – лава 111-ю пл. Четвёртый

Поскольку метод пассивного сейсмомониторинга в основном предназначен для регионального прогноза удароопасности массивов горных пород, важной задачей является детализация и оконтуривание зон, наиболее вероятных возникновения горного удара и подлежащих последующему периодическому локальному контролю.

С этой целью проведено картирование зон сейсмоактивности участка лавы 111-ю пл. Четвёртого по результатам сейсмомониторинга в течение одного месяца. Из результатов обработки данных (рисунок 2.17) следует, что наиболее напряженная зона выемочного участка расположена в средней части пласта, имеет размеры  $50 \times 100$  м, в пределах которой сейсмическая энергия находится в диапазоне  $E_c = 200\text{--}600$  Дж.

Интерес представляют результаты, полученные на участке проходки подготовительной выработки – конвейерного штрека 1012-ю пл. Четвёртый. Проходка выработки проходила вдоль разрывного нарушения в непосредственной близости от залегающей в междупластье линзы крепких песчаников.

Динамика изменения регистрируемой сейсмической энергии приведена в таблице 2.7.

Динамика сейсмической энергии  $E_c$  при проходке конвейерного штрека 1012-ю пл. Четвёртый

Дата	2018 год								
	10.03	11.04	16.10	26.10	27.10	28.10	29.10	06.11	07.11
$E_c$ , Дж	493	1452	11205	6740	880	1162	891	216	303

Из приведённых данных следует, что 16.10 произошло резкое возрастание  $E_c > 10$  кДж, а после чего наблюдается снижение  $E_c$  до исходного уровня. Аномальное увеличение сейсмической активности массива связано с пересечением выработкой зоны геомеханического влияния тектонического нарушения.

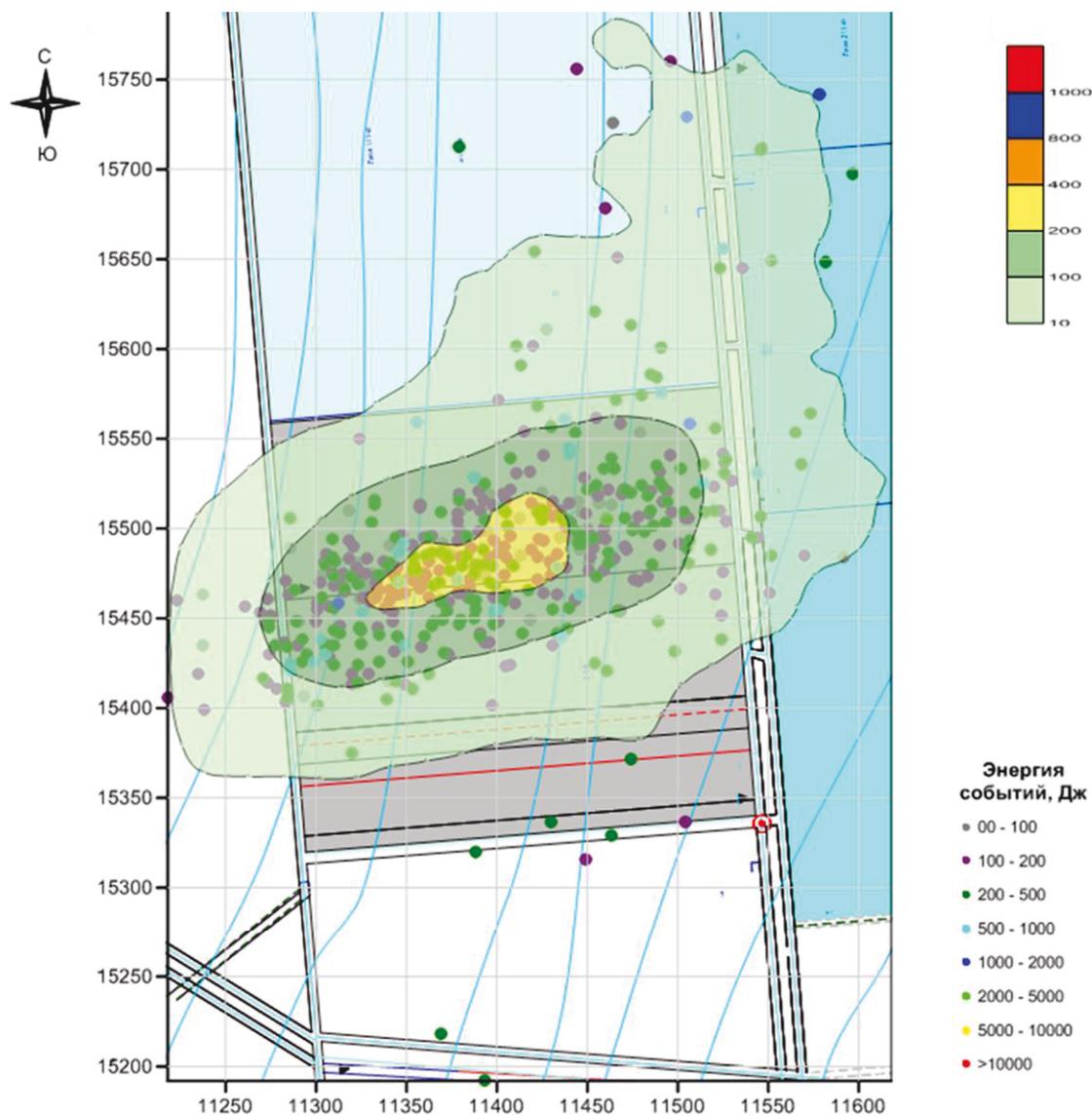


Рис. 2.17 – Карта зон сейсмоактивности по параметру  $F$  участка лавы 111-ю пл. Четвёртый за период 24.04.2018 – 09.05.2018

Опыт интерпретации результатов геофизического мониторинга показывает, что повышение достоверности инструментального прогноза обеспечивается пере-

ходом от экстремальных к интегральным показателям, отражающим не только величину информативного параметра, но и его распределение в пределах контролируемой зоны (на различных линейных интервалах, площадях, объёмах).

При площадных измерениях величина интегрального показателя параметра  $\Pi$  вычислялась по формуле

$$I_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \cdot \bar{\Pi}_i)}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (2.13)$$

где  $S_i$  – площадь зоны для  $i$ -го диапазона параметра  $\Pi$ ;  $\bar{\Pi}_i$  – среднее значение рассматриваемого параметра в данном диапазоне;  $n$  – количество зон, ограниченных изолиниями.

Идея расчёта интегрального показателя для рассматриваемого параметра  $\Pi$  сводится к определению площадей, которые ограничены конкретными изолиниями параметра, присвоению для каждой из площади значения параметра  $\Pi$  и вычисления интегрального показателя согласно формуле 2.13.

Для автоматизированного расчёта интегральных показателей  $I_{\Pi}$  разработана программа для ЭВМ, включающая алгоритмы ввода координат точек с параметрами  $\Pi_i$ , построение виртуальных изолиний  $\Pi_i$ , определение площадей, ограниченных изолиниями и расчёт интегрального параметра  $I_{\Pi}$ . Программа получила свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023681203 от 11.10.2023 [92]. Блок-схема программы представлена на рисунке 2.18, код программы представлены в приложении 2.



Рис. 2.18 – Блок-схема программы для ЭВМ «Расчёт интегрального показателя для параметров сейсмической активности»

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [78, 82, 91].

## Выводы

1. В качестве базовой системы для выполнения запланированных исследований принята разработанная во ВНИМИ система сейсмического мониторинга GITS, структурная схема которой включает наземную и подземную части. В системе использовано от 6 до 12 трёхкомпонентных датчиков пьезоэлектрического типа, устанавливаемых стационарно в скважинах или на постаментах и переустанавливаемых по мере развития горных работ или переходе на соседнюю лаву. Частотный диапазон сигнала – 0,1–800 Гц, минимальный регистрируемый уровень сигнала – 0,01 мВ, длина линий связи до 8 км.

Первичная база данных сейсмической системы включает следующие параметры: энергию упругих колебаний  $E_c$ , вычисляемую через акустические характеристики среды, колебательное ускорение, длительность и период колебаний; сейсмическую активность  $N$  – число событий за интервал времени. Информационные базы (каталоги, карты, графики, таблицы и др.) создаются с использованием стандартных программ визуализации и статистики.

В результате испытаний GITS в условиях СП «Шахта Комсомольская» АО «Воркутауголь» в период первого этапа с 2014–2019 гг. установлены следующие закономерности: среднемесячная сейсмическая активность и средняя энергия событий относительно стабильны и находятся в диапазонах соответственно 2853–7125 и 546–1150 Дж, вместе с тем, ежегодно происходит перераспределение долей событий с различной энергией; локальные увеличения во времени средней энергии единичного события совпадают с моментами обрушения кровли пласта; расположение гипоцентров сейсмических событий при подвигании лавы на 340 м свидетельствует о процессах концентрации напряжений в зоне опорного давления.

2. Для повышения точности геомеханического прогноза разработаны алгоритмы обработки цифровых баз данных.

Алгоритм точечной локации источника сейсмособытия SPAM основан на циклическом вычислении координат расчётной точки путём минимизации величины невязки, оцениваемой по сумме квадратов разностей между фактическими и расчётными задержками приходов сейсмоволны. Алгоритм метода наименьших

квадратов включает определение компонентов целевой функции и её минимизацию методом адаптивного поиска с использованием генератора случайных чисел.

Программа для ЭВМ, реализующая алгоритм SPAM, защищена свидетельством о государственной регистрации.

3. В качестве энергетической характеристики сейсмической активности массива предложено использовать комплексный параметр  $F$ , включающий отношение энергии текущего сейсмического события к фоновому уровню и суммарную сейсмическую активность за расчётный интервал времени. Параметр комплексно учитывает энергетический спектр сейсмических событий и суммарную активность за расчётный интервал времени регистрации.

В результате факторного анализа установлены зависимости параметра  $F$  от ряда функциональных параметров GITS: линейного размера  $L$  объёмной расчётной матрицы, которой представляется реальный массив; шага приращения  $\Delta L$ ; временного интервала  $\Delta T$ . В частности, установлено, что зависимость  $F_{\max}$  от  $L$  прямо пропорциональная, при этом величину  $\Delta L$  целесообразно принимать в диапазоне  $0,1L < \Delta L < 0,5L$ , а  $\Delta T$  – в диапазоне  $\Delta T = 10\text{--}50$  сут.

4. Для количественной оценки пространственного распределения комплексного параметра  $F$  и других геомеханических параметров  $\Pi$  массива (напряжения, деформация, смещения) дополнительно введён интегральный показатель  $I_{\Pi}$ , включающий суммирование средних значений геомеханических параметров  $\Pi_i$  и площадей зон, ограниченных изолиниями  $\Pi_i$ .

Для автоматизированного расчёта интегральных показателей  $I_{\Pi}$  разработана программа для ЭВМ, защищённая свидетельством о государственной регистрации.

Разработка технических решений по аппаратурному обеспечению системы сейсмического мониторинга GITS, алгоритмов, компьютерных программ первичной обработки цифровых баз данных, расчёта интегральных показателей сейсмической активности и геомеханического состояния массива позволили перейти к исследованию динамики сейсмических и геомеханических процессов при отработке угольного пласта.

### **3 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

#### **3.1 Методика экспериментально-аналитического исследования геомеханических процессов**

Целью данного исследования является изучение геомеханических процессов при интенсивной отработке угольного пласта комплексом следующих методов:

- производственный геофизический мониторинг интенсивности сейсмических проявлений горного давления;
- совместный анализ экспериментальных результатов с базами данных, полученных методами выхода бурового штыба и численного математического моделирования СибГИУ НДС пласта и вмещающих пород.

Сопоставление результатов исследований, полученных этими методами, позволит решить следующие актуальные для горного производства задачи:

- установить закономерности формирования аномальных геомеханических зон;
- обосновать новые подходы к региональному и оперативному прогнозу, а также профилактике опасных геомеханических явлений.

Программа комплексных экспериментально-аналитических исследований включала в себя решение следующих задач:

- сейсмический мониторинг системой GITS, обеспечивающий регистрацию событий, определение координат их источников, расчёт комплексного энергетического параметра, интегрального показателя и построение карт сейсмической активности;
- установление закономерности динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта, неоднородного по физическим свойствам путём совместного анализа баз данных методами сейсмического мониторинга, выхода бурового штыба и геомеханического моделирования СибГИУ;
- обоснование новых принципов, качественных и количественных крите-

риев геодинамического прогноза удароопасности по данным сейсмического мониторинга.

Сопоставление параметров НДС и сейсмического мониторинга представляет собой весьма сложную задачу, поскольку они имеют различную физическую природу. Решение данной задачи возможно двумя путями: аналитический путём разработки математических моделей на основе законов механики горных пород; эмпирическим путём статистической обработки баз данных НДС и сейсмической активности, полученных в определенных горно-геологических горно-технических условиях.

Примером подхода первого типа является разработка в ИГД СО РАН теории «активной» и «пассивной» нелинейной сейсмотографии, основанной на волнах маятникового типа, распространяющихся в напряженных геосредах блочно-иерархического строения от источников различной физической природы и энергетического уровня [93]. Другой известный подход заключается в модели эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах на основе статистической теории прочности [94]. К сожалению, на настоящий момент надёжных теоретических моделей, подтверждённых экспериментально, не разработано.

Вторая концепция реализована, например, в условиях Кировского рудника АО «Апатит» в условиях апатит-нефелинового месторождения путём совмещения карт распределения максимальной компоненты главных напряжений с кластерами сейсмических событий [95]. Данный подход представляется весьма эффективным и перспективным для решения задачи повышения точности прогноза геодинамических явлений.

Для количественной оценки эффективности косвенных (геофизических) методов мониторинга применяют показатели информативности. В МГГУ было предложено рассчитывать количество информации о нахождении объекта в каком-либо состоянии по величине информационной энтропии, отражающей меру неопределённости этого состояния [96, 97]. Этот подход весьма результативен, когда объект может находиться в двух состояниях («устойчивое – неустойчивое», «опасное – неопасное»). Этот критерий применён в работе [98, с. 197–202] для оценки методами

статистического и электрического зондирований изменения устойчивости грунтового основания, закрепляемого методом напорной инъекции.

Для оценки информативности геофизических методов мониторинга напряженного состояния и трещиноватости массива в Кольском филиале РАН предложен статистический метод, основанный на определении соотношения коэффициентов вариации физического параметра в зоне опорного давления и вне её. По результатам обработки экспериментальных данных, полученных в лабораторных и натуральных условиях данным методом, можно определить ошибку метода, его информационную способность и количество информации о геомеханическом состоянии массива [99]. В результате исследования была дана количественная оценка информативности комплекса геофизических методов оценки напряженного состояния и трещиноватости массива на начальных стадиях освоения Октябрьского месторождения сульфидных руд [100, с. 151–156].

Объектом комплексных исследований является шахта «Осинниковская», на которой с 2016 г. осуществляется сейсмический мониторинг на базе системы GITS. Сейсмическая сеть включает в себя 7 сейсмодатчиков, размещённых в пределах шахтного поля. В 2020 г. при отработке выемочного столба 4-1-5-7 наблюдалась высокая сейсмическая активность со стороны целика между действующей лавой и отработанным выемочным столбом 4-1-5-6 и при пересечении группы тектонических нарушений очистным забоем [101].

Поле шахты «Осинниковская» занимает северо-западную часть Осинковского геолого-экономического района в междуречье рек Томь и Кондома. Административно шахтное поле располагается на территории Новокузнецкого района Кемеровской области.

В границы шахтного поля входят блоки № 1, 2, 3, 4. Ведётся отработка выемочных столбов в границах блока № 4 по пласту Елбанский–5 (Е–5). Полная мощность пласта Е–5 колеблется от 2,61 до 4,02 м, составляя в среднем 3,08 м. Строение пласта сложное: содержит до 1–2 породных прослоек общей мощностью 0,23 м.

Глубина проведения работ от поверхности 570–840 м. Породы, вмещающие

угольные пласты, представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками. Непосредственная кровля пласта сложена темно-серыми умеренно трещиноватыми алевролитами мощностью до 10–12 м (коэффициент крепости пород по шкале М. М. Протодяконова  $f = 3-4$ , плотность пород  $\gamma = 2,56 \text{ т/м}^3$ ). Основная кровля сложена переслаиванием песчаников мощностью 17–20 м ( $f = 6-10$ ,  $\gamma = 2,60 \text{ т/м}^3$ ) и алевролитов ( $f = 3-5$ ). Непосредственная почва пласта – мелкозернистые трещиноватые темно-серые алевролиты ( $f = 3-4$ ) мощностью до 0,6 м, склонна к пучению.

Вскрытие шахтного поля шахты «Осинниковская» произведено вертикальными стволами и погоризонтными квершлагами. Капитальные горные выработки околоствольных дворов закреплены бетонной и железобетонной крепью. Выработки действующих горизонтов закреплены тубинговой и металлической арочной крепью. В настоящее время выработки проводятся с креплением сталеполимерными анкерами, рамной податливой (арочной или трапециевидной) и смешанной крепью.

Подготовка блока № 4 выполнена односторонней панелью. Выемочные участки отрабатываются поочередно в нисходящем порядке. Длина выемочных столбов по простиранию пласта составляет 230–1220 м (вынимаемая часть), длина лав 4-1-5-6, 4-1-5-7, 4-1-5-8, 4-1-5-9, 4-1-5-10 составляет 250 м, лава 4-1-5-5 – 240-250 м, лава 4-1-5-4 – 110–270 м. Отработка выемочных столбов в блоке № 4 выполняется обратным ходом от фланга к центральным выработкам. Выемочный участок 4-1-5-7 (рисунок 3.1) расположен в южной части шахтного поля, в IV шахтовом блоке. Пласт Е-5 в стратиграфическом разрезе угленосной толщи залегает на 55–60 м ниже пласта Е-6 и на 30–40 м выше пласта Е-4.

Пласт Е-5 на участке проведения эксперимента имеет сложное строение и состоит из двух угольных пачек, разделённых прослойком слабого, трещиноватого алевролита, мощность которого колеблется в пределах 0,05–0,40 м, при среднем значении 0,22 м. Мощность верхней угольной пачки в среднем составляет 1,20 м, нижней – 1,70 м (таблица 3.1).

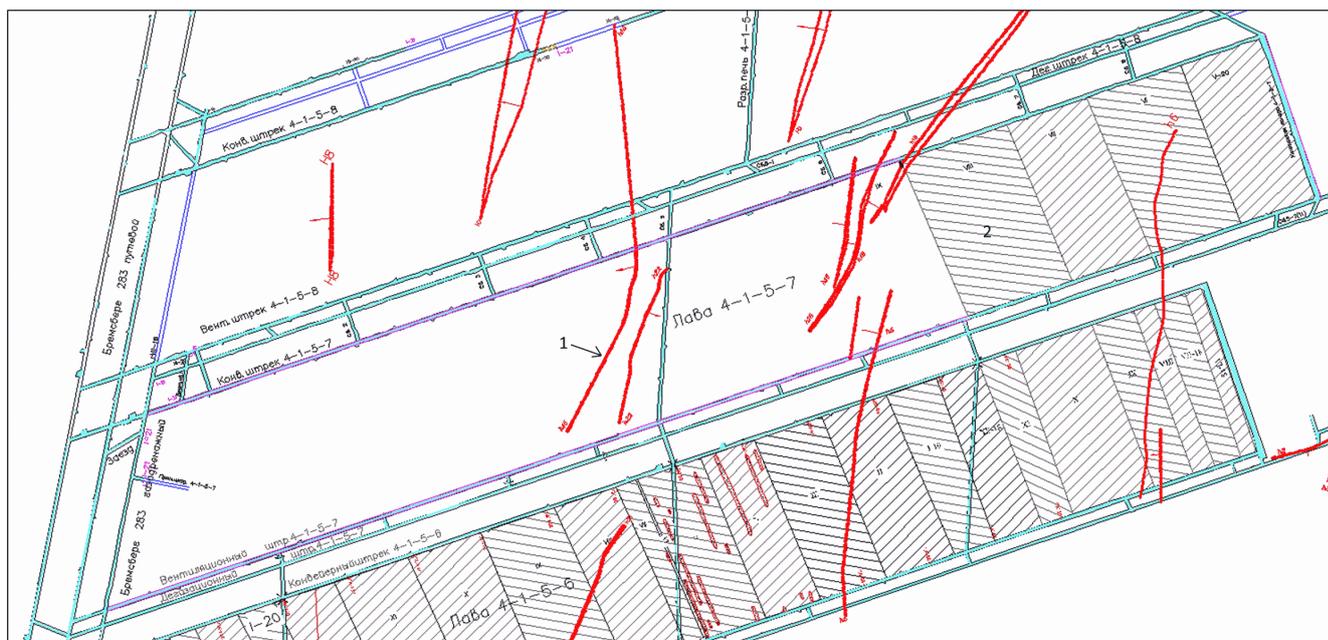


Рис. 3.1 – Выемочный столб лавы 4-1-5-7 по пласту Е-5 шахта «Осинниковская»: 1 – тектонические нарушения; 2 – отработанный участок выемочного столба

Таблица 3.1

Литологическая колонка по пласту Е-5 [102]

10 5-25 0,02-0,50 "Колчеданы" 0,07-0,09 1,20 (0,02-1,0) 1,70 "колчеданы" 0,10-0,13	№	Описание пород	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	Объёмная масса, т/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона $\mu$	Модуль Упругости $E_y \cdot 10^{-4}$ , МПа	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , град.
1	1	Песчаник мелкозернистый, трещиноватый	60-80	27-69	2,70	0,22	3,1	18,3	41
2	2	Алеврит мелкозернистый, трещиноватый	30-40	27-69	2,56	0,18	2,5	9,7	39
3	3	Аргиллит трещиноватый	30-40	15	2,56	0,18	2,5	9,7	39
4	4	Уголь слабый, трещиноватый	8-11	-	1,29	0,19	0,4	2,7	40
5	5	Алеврит мелкозернистый, трещиноватый	30-40	27-69	2,56	0,18	2,5	9,7	39
6	6	Уголь слабый, трещиноватый	8-11	-	1,29	0,2	0,4	2,7	40
7	7	Алеврит среднезернистый, трещиноватый	30-50	27-69	2,56	0,26	2,2	6,6	41

В тектоническом отношении участок расположен на восточном, лежащем крыле крупного разрывного нарушения «Н» с амплитудой смещения 100–130 м. Выемочный столб расположен по простиранию пласта. Гипсометрия пласта слабо-волнистая, углы падения по забою лавы 7–25°, по простиранию пласта 1–15° от монтажной камеры.

Ложная кровля пласта мощностью 0,02–0,35 м сложена слабым, весьма неустойчивым аргиллитом, склонным к обрушению вслед за выемкой угля ( $f = 3-4$ ) от неустойчивой до средней устойчивости. Непосредственная кровля средней устойчивости, а на участках, где в большом количестве развиты растительные остатки, породы интенсивно трещиноватые и с большим количеством зеркал скольжения – неустойчивая. Основная кровля средней мощностью 16 м сложена алевролитом от мелко до крупнозернистого ( $f = 4-5$ ), среднеобрушаемая, по нагрузочным свойствам – средняя и тяжёлая, по управляемости от средне- до трудноуправляемой. Шаг первичной посадки кровли 52 м, последующих – 12 м. Почва пласта сложена алевролитом от мелко- до крупнозернистого ( $f = 3-5$ ), склонна к пучению.

Природная газоносность пласта на выемочном участке составляет 12–22 м<sup>3</sup>/т и сохранит тенденцию к увеличению с постепенным продвижением забоя к линии остановки. Пласт Е–5 является угрожаемым по внезапным выбросам угля и газа с глубины 610 м и опасным по горным ударам с глубины 600 м. Уголь пласта не склонен к самовозгоранию, угольная пыль взрывоопасна.

В пределах участка имеются опасные зоны: у геологических нарушений (8 участков); некачественно затампонированные разведочные скважины (4 скважины).

Для решения поставленных научных задач по сопоставлению параметров сейсмической активности массива с параметрами НДС неоднородного углепородного массива с учётом влияния горных выработок, геологических нарушений разрывного типа были использованы базы данных геомеханического моделирования СибГИУ с использованием авторского пакета компьютерных программ на основе МКЭ [103–107]. В этот пакет включены программные модули, позволяющие решать следующие задачи: расчёт НДС в нелинейной постановке, прогноз остаточной прочности пород для определения границ структурных блоков, расчёт гравитационного, геотектонического и техногенного полей напряжений, прогнозирование пространственного положения опасных зон.

Ниже приведены основные сведения о постановке задачи в используемой модели.

В пакете программ СибГИУ для обеспечения устойчивости расчётной области использовались следующие граничные условия [108]: горизонтальные смещения по бокам модели равны нулю, вертикальные и горизонтальные смещения на нижней границе модели (надработки) равны нулю, на верхней границе модели (земная поверхность) вертикальные напряжения равны нулю; на контуре подземных выработок нормальные напряжения равны нулю.

Для расчёта принимался слоистый массив в каждом слое учитывались разные деформационные характеристики пород. Модуль упругости  $E_y$  коэффициент Пуассона  $\mu$  принимались при упругом деформировании, при нелинейном деформировании, вместо модуля упругости принимался модуль деформации  $E_d$ .

При моделировании использовались следующие прочностные и деформационные характеристики: модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел прочности пород при сжатии, предел прочности пород при растяжении, паспорт прочности пород по Кулону-Мору (таблица 3.1).

Модель представляет собой цилиндр (рисунок 1.7), максимальным диаметром которого целесообразно охватывать влияющие на напряжённо-деформированное состояние участки шахтного поля: отработанные столбы, геологические нарушения, сопряжения горных выработок, протяжённые выработки. В пределах цилиндра выделяются породные слои и угольные пласты. Каждый слой делится на сектора, в пределах каждого сектора задаются переменные радиусы. Каждая доля, представляющая собой восьмиугольную усечённую пирамиду, программно делится на шесть тетраэдров – конечные элементы. Размеры тетраэдров минимальны у вертикальной оси цилиндра и максимальны у границ цилиндра. Количество тетраэдров 32400, максимальное количество вершин 18206.

Граничные условия для моделей-цилиндров устанавливались с использованием промежуточных результатов расчётов для моделей большего радиуса.

В модели ось  $OX$  направлена по линии простирания пласта, ось  $OY$  по линии восстания пласта, начало координаты  $Z = 0$  расположено в кровле отработываемого пласта. Положение вертикальной оси цилиндра принималось в глобальной системе

координат, применяемой на плане горных выработок по пласту. Посредством перемещения цилиндра и изменения его размеров решаются локальные задачи по определению НДС. Для повышения точности расчёта параметров НДС массива на каждое рассматриваемое положение очистного забоя выполнялось построение 4-х цилиндрических моделей, центр которых перемещался по длине лавы (рисунок 3.2). Радиус расчётного цилиндра был принят 150 м, и 14 промежуточных окружностей для разбивки слоя на конечные элементы с радиусами 0,5 м, 0,75 м, 1,13 м, 1,7 м, 2,55 м, 3,83 м, 5,76 м, 8,66 м, 13,02 м, 19,56 м, 29,4 м, 44,19 м, 66,41 м, 99,81 м соответственно. Очистные и подготовительные выработки и их сопряжения располагаются внутри цилиндра в виде полостей, в которых модуль упругости и прочность пород в пределах конечных элементов, оказавшихся в полости, равна нулю. Приняты следующие геометрические размеры горных выработок: для вентиляционного и конвейерного штреков, сбоек и дегазационного штрека форма сечения прямоугольная, ширина выработки составила 5,0 м, высота 4,3 м; для лавы форма сечения прямоугольная, ширина выработки 5,5 м, высота 3,2 м.

В пределах угольных целиков сохраняются прочностные и деформационные характеристики, как в нетронutom массиве. При переходе угля в упруго-пластическое и запредельное состояние модуль упругости и коэффициент Пуассона вычисляются с учётом отношения паспортной прочности по кругу Мора к расчётным напряжениям.

Влияние тектонических напряжений задаётся посредством изменения коэффициента бокового давления на границах цилиндрической модели. При расположении геологического нарушения в пределах модели модуль упругости угля или пород в тетраэдрах, расположенных в зоне нарушения, уменьшается пропорционально коэффициенту структурного ослабления [109]. Границы нарушения выделяются в виде отдельных контуров, вершины которых задаются координатами.

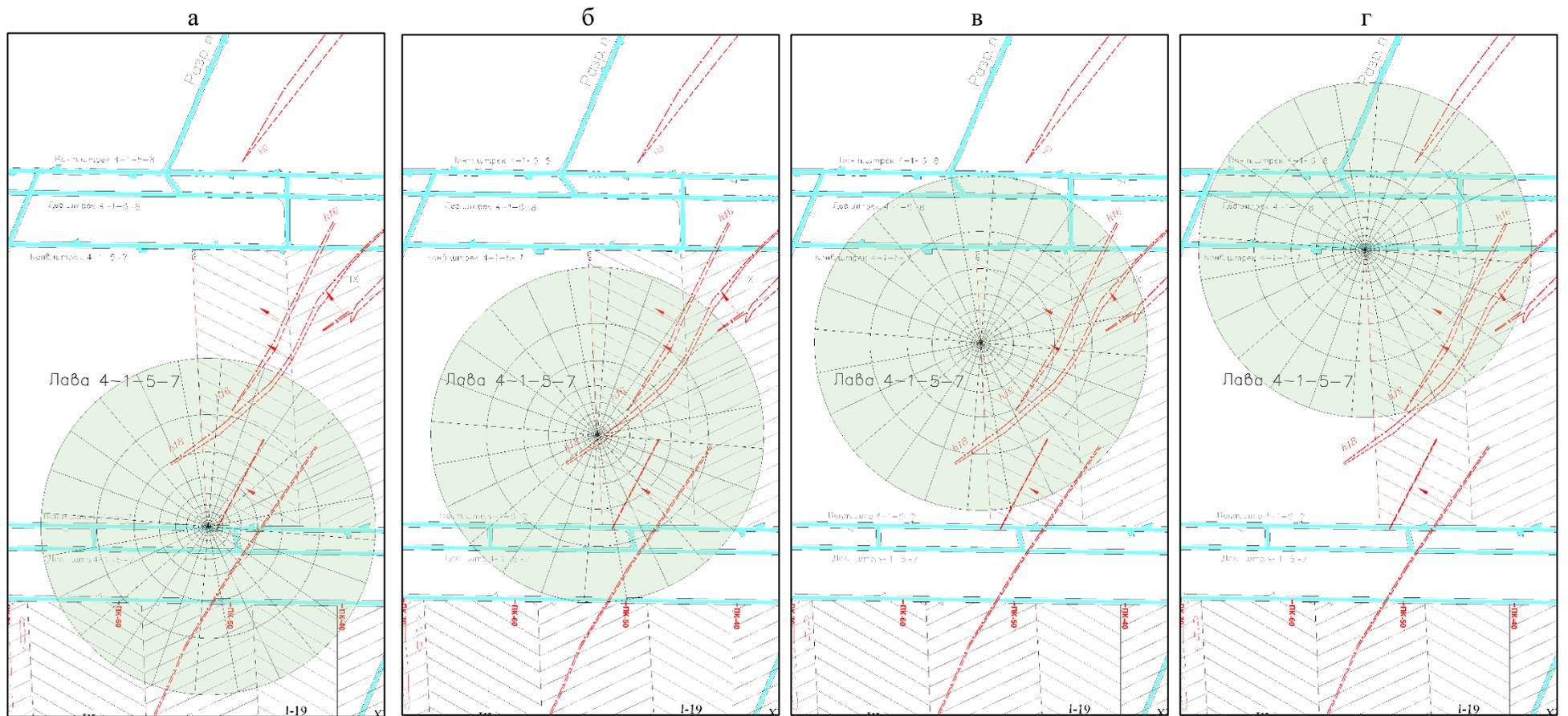


Рис. 3.2 Перемещение расчётной области вдоль очистного забоя при положении забоя лавы 4-1-5-7 на 2020.10.19

Калибровка компьютерной модели по экспериментальным данным выполнялась в два этапа: первоначально по данным давления на механизированную крепь при обосновании параметров демонтажной камеры выемочного столба 4-1-5-6 (таблица 3.2); по базам данных напряжений, определенных по выходу бурового штыба при отработке выемочного столба 4-1-5-7 (таблица 3.3)

Максимальные напряжения в массиве по выходу буровой мелочи определяли по формуле [137]

$$\sigma_{\max} = (4 \cdot V_1 \cdot V_2^{-1} - 2,3) \cdot \sigma_{\text{сж}},$$

где  $V_1$  – фактический выход буровой мелочи, л;  $V_2$  – номинальный выход буровой мелочи, л;  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности на одноосное сжатие, МПа.

Таблица 3.2

Давления в гидросистеме механизированной крепи выемочного столба 4-1-5-6 на 06.02.2019

Участок	Давление в гидросистеме механизированной крепи, МПа
Сопряжение в/ш 4-1-5-6 с лавой 4-1-5-6 секции №147, 146	31
Лава 4-1-5-6, секция №134	40
Лава 4-1-5-6, секция №135	31
Лава 4-1-5-6, секции №112-115	22
Лава 4-1-5-6, секция №100	33
Лава 4-1-5-6, секция №76	10
Лава 4-1-5-6, секция №60	11
Лава 4-1-5-6, секции №10-60	10-20

Таблица 3.3

Максимальные напряжения по выходу буровой мелочи на участках выемочного столба 4-1-5-7

Участок	$\sigma_{\max}$ , МПа	Участок	$\sigma_{\max}$ , МПа	Участок	$\sigma_{\max}$ , МПа
2020.11.05 / Лава 4-1-5-7, секция №125	43,92	2020.11.08 / Лава 4-1-5-7, секция №75	35,93	2020.11.14 / Лава 4-1-5-7, секция №125	52,12
2020.11.05 / Лава 4-1-5-7, секция №75	43,45	2020.11.08 / Лава 4-1-5-7, секция №25	34,73	2020.11.14 / Лава 4-1-5-7, секция №75	65,19
2020.11.05 / Лава 4-1-5-7, секция №25	44,96	2020.11.08 / Конв. штрек 4-1-5-7, в 25 м от сопряжения с очистным забоем	38,68	2020.11.14 / Лава 4-1-5-7, секция №25	45,65
2020.11.08 / Вент. штрек 4-1-5-7, в 90 м от сопряжения с очистным забоем	36,63	2020.11.08 / Конв. штрек 4-1-5-7, в 90 м от сопряжения с очистным забоем	40,35	2020.11.14 / Конв. штрек 4-1-5-7, в 25 м от сопряжения с очистным забоем	54,57
2020.11.08 / Вент. штрек 4-1-5-7, в 25 м от сопряжения с очистным забоем	42,35	2020.11.14 / Вент. штрек 4-1-5-7, в 90 м от сопряжения с очистным забоем	39,90	2020.11.14 / Конв. штрек 4-1-5-7, в 90 м от сопряжения с очистным забоем	46,75
2020.11.08 / Лава 4-1-5-7, секция №125	44,55	2020.11.14 / Вент. штрек 4-1-5-7, в 25 м от сопряжения с очистным забоем	59,82	2020.11.15 / Лава 4-1-5-7, секция №125	57,01

В качестве примера реализации описанной методики приведены результаты исследований при отработке выемочного столба 4-1-5-7 шахты «Осинниковская».

Схемы выемочного участка 4-1-5-7 с нанесёнными изолиниями сейсмической активности по параметру  $F$  и коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта представлены на рисунке 3.3.

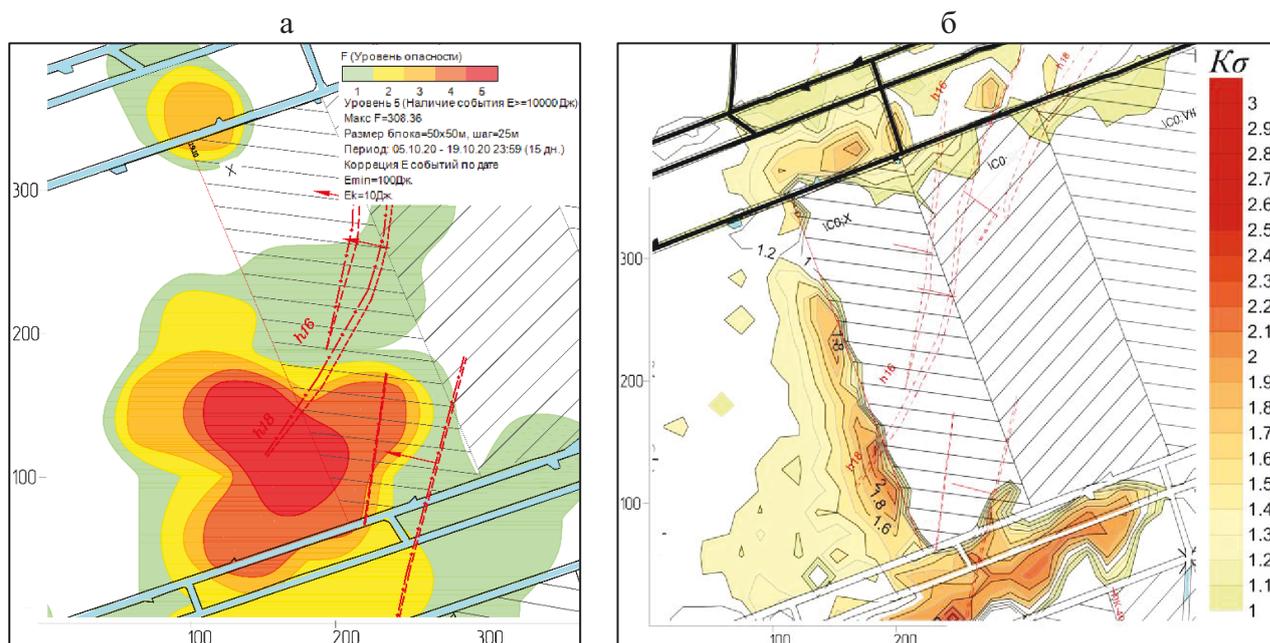


Рис. 3.3 – Зоны по параметру  $F$  (а) и коэффициент концентрации вертикальных напряжений в кровле  $K_{\sigma}$  пласта E-5 (б) при положении очистного забоя на 2020.10.19

На рисунке 3.3а отмечена сейсмоактивная зона, приуроченная к тектоническому нарушению  $h16$ , находящемуся впереди очистного забоя; также высокая активность отмечена в целике между конвейерным и газодренажным штреками. Отметим, что, учитывая погрешность при определении координат сейсмособытий, реальные контуры данных зон более точно сконцентрированы в массиве и находятся в опасных зонах от нарушений, а также в целике между штреками. На рисунке 3.3б наибольшее значение коэффициента концентрации вертикальных напряжений  $K_{\sigma}$  выявлено впереди очистного забоя в районе границы нарушения  $h16$  и в целике между штреками.

### 3.2 Закономерности динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта в изменяющихся горно-геологических условиях

По данным регистрации сейсмических событий в пределах шахтного поля в 2020 г. при отработке выемочного столба 4-1-5-7 наблюдалась высокая сейсмическая активность как со стороны целика между обрабатываемым и отработанным

выемочными столбами, так и впереди очистного забоя, с выделением удароопасных зон при пересечении группы тектонических нарушений и передовой выработки очистным забоем.

В период с сентября 2020 г. по январь 2021 г. при ведении очистных работ в выемочном столбе 4-1-5-7 было осуществлено пересечение группы тектонических нарушений ( $h5$ ,  $h16$  и  $h18$ ) и передовой выработки. В данный временной период отмечена активизация сейсмических процессов впереди очистного забоя. После перехода очистным забоем группы нарушений и передовой выработки сейсмическая активность снизилась.

Графики изменения сейсмической активности и изменения максимальной энергии сейсмособытий в период с сентября 2020 г. по январь 2021 г. представлены на рисунке 3.4.

На рисунке 3.4 *а* видно, что с 9 сентября 2020 г. резко возрастает количество регистрируемых сейсмособытий и увеличивается энергия в гипоцентре данных сейсмособытий.

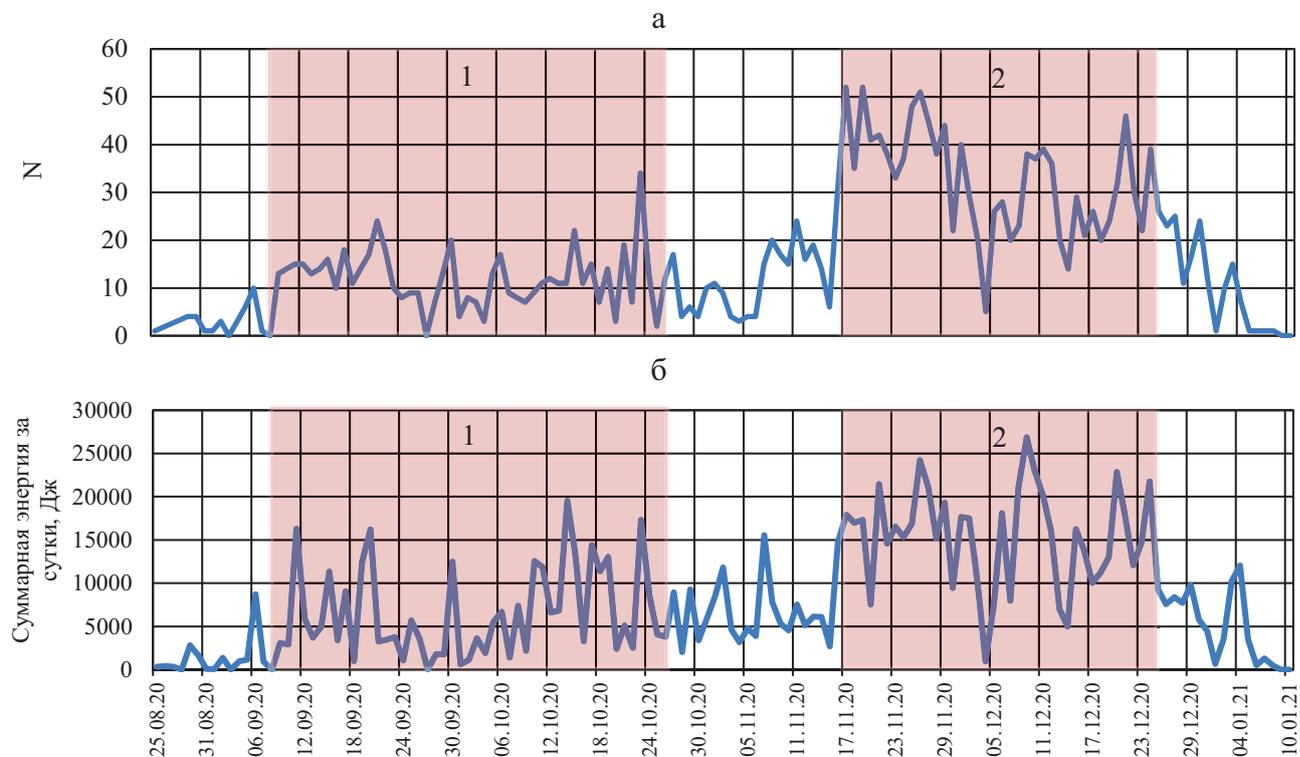


Рис. 3.4 – Графики изменения сейсмической активности: *а* – количество сейсмособытий за сутки  $N$ ; *б* – суммарная энергия сейсмособытий за сутки  $\sum E$ :

1 – зона тектонических нарушений; 2 – зона пересечения очистным забоем передовой выработки и тектонических нарушений

По результатам математического моделирования НДС массива горных пород и геодинамического мониторинга построены карты изолиний основных параметров НДС пласта и сейсмической активности при ведении очистных работ в выемочном столбе 4-1-5-7. На рисунке 3.5 представлены указанные выше карты изолиний на 19.10.2020.

Применение математического моделирования совместно с прогнозными картами опасных зон по сейсмической активности позволяет производить более точную интерпретацию процессов формирования НДС массива в окрестностях зоны ведения очистных работ.

Качественный анализ карт, представленных на рисунке 3.5, показал, что наиболее информативными являются следующие параметры НДС: коэффициент концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_{\sigma}$ , горизонтальные смещения по оси  $Y$  в кровле пласта  $\Delta_{гор.Y_{кр}}$ , горизонтальные смещения по оси  $X$  в кровле пласта  $\Delta_{гор.X_{кр}}$ .

На рисунке 3.6 представлена динамика развития геомеханических процессов (в форме изолиний указанных выше параметров) и сейсмоактивности в добычном забое 4-1-5-7 за период с 01.09.2020 по 05.11.2020.

Графическая информация на рисунке 3.6 наглядно иллюстрирует динамику формирования очага повышенного горного давления при подходе и пересечении нарушенной зоны пласта, релаксацию напряжений после отработки аномальной зоны. Выполнен качественный анализ изменений параметров, представленных на рисунке 3.6, во времени.

На рисунке 3.7 представлены графики изменения максимальных значений параметров  $K_{\sigma}$  и  $F$  в пределах выемочного участка 4-1-5-7, а также горизонтальных смещений кровли  $\Delta_{гор.X_{кр}}$  и  $\Delta_{гор.Y_{кр}}$  в процессе отработки пласта.

В период с 1 сентября 2020 г. по начало ноября очистным забоем была пересечена группа тектонических нарушений. При пересечении зон влияния геодинамически активных структур отмечен рост сейсмической активности.

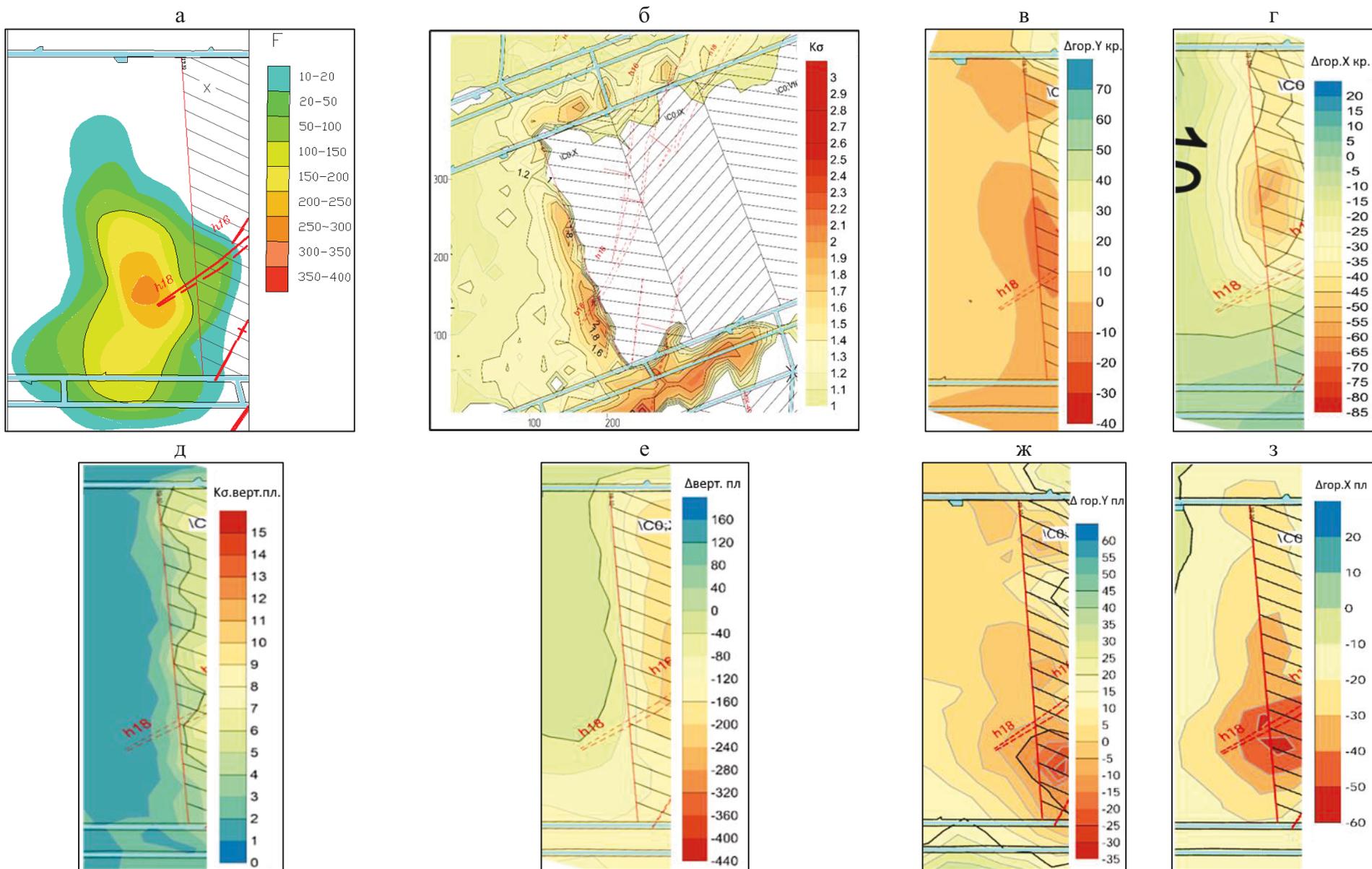


Рис. 3.5 – Карты с изолиниями распределения при положении забоя 4-1-5-7 на 19.10.2020: *а* – комплексного параметра сейсмической активности  $F$  в кровле пласта Е-5; *б* – коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_{\sigma}$ ; *в* – горизонтальных смещений по оси  $Y$  в кровле пласта  $\Delta_{гор.У кр.}$ ; *г* – горизонтальных смещений по оси  $X$  в кровле пласта  $\Delta_{гор.Х кр.}$ ; *д* – коэффициента концентрации вертикальных напряжений в пласте  $K_{\sigma-верт.пл.}$ ; *е* – вертикальных смещений пласта  $\Delta_{верт.У пл.}$ ; *ж* – горизонтальных смещений пласта по оси  $Y$   $\Delta_{гор.У пл.}$ ; *з* – горизонтальных смещений пласта по оси  $X$   $\Delta_{гор.Х пл.}$

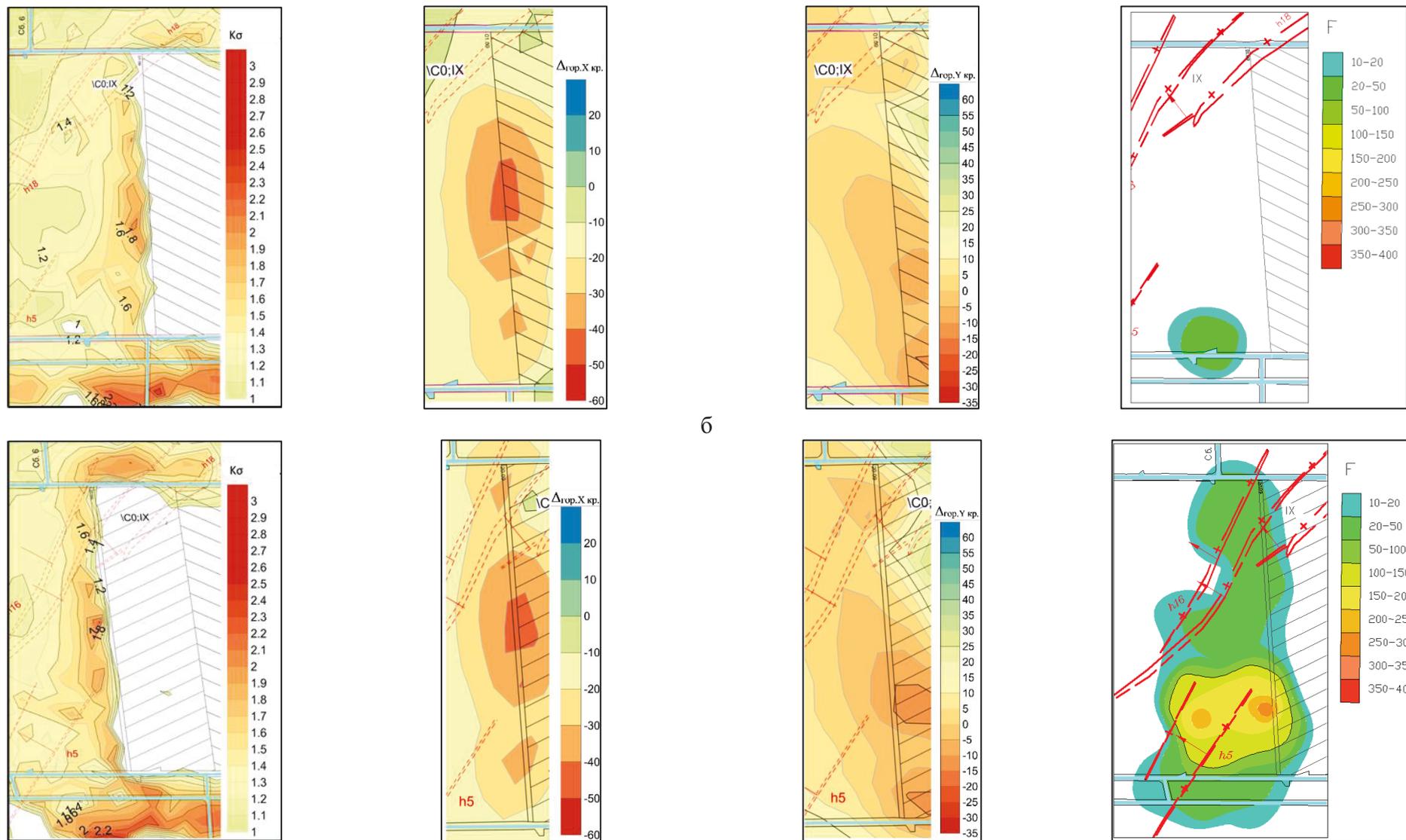


Рис. 3.6 – Карты с изолиниями геомеханических параметров: коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_{\sigma\text{-верт.кр.}}$ ; горизонтальных смещений по оси  $Y$  в кровле пласта  $\Delta_{\text{гор.}Y\text{кр.}}$ ; горизонтальных смещений по оси  $X$  в кровле пласта  $\Delta_{\text{гор.}X\text{кр.}}$ ; комплексного параметра сейсмической активности  $F$  на различных этапах отработки пласта:

$a$  – 01.09.2020;  $б$  – 20.09.2020

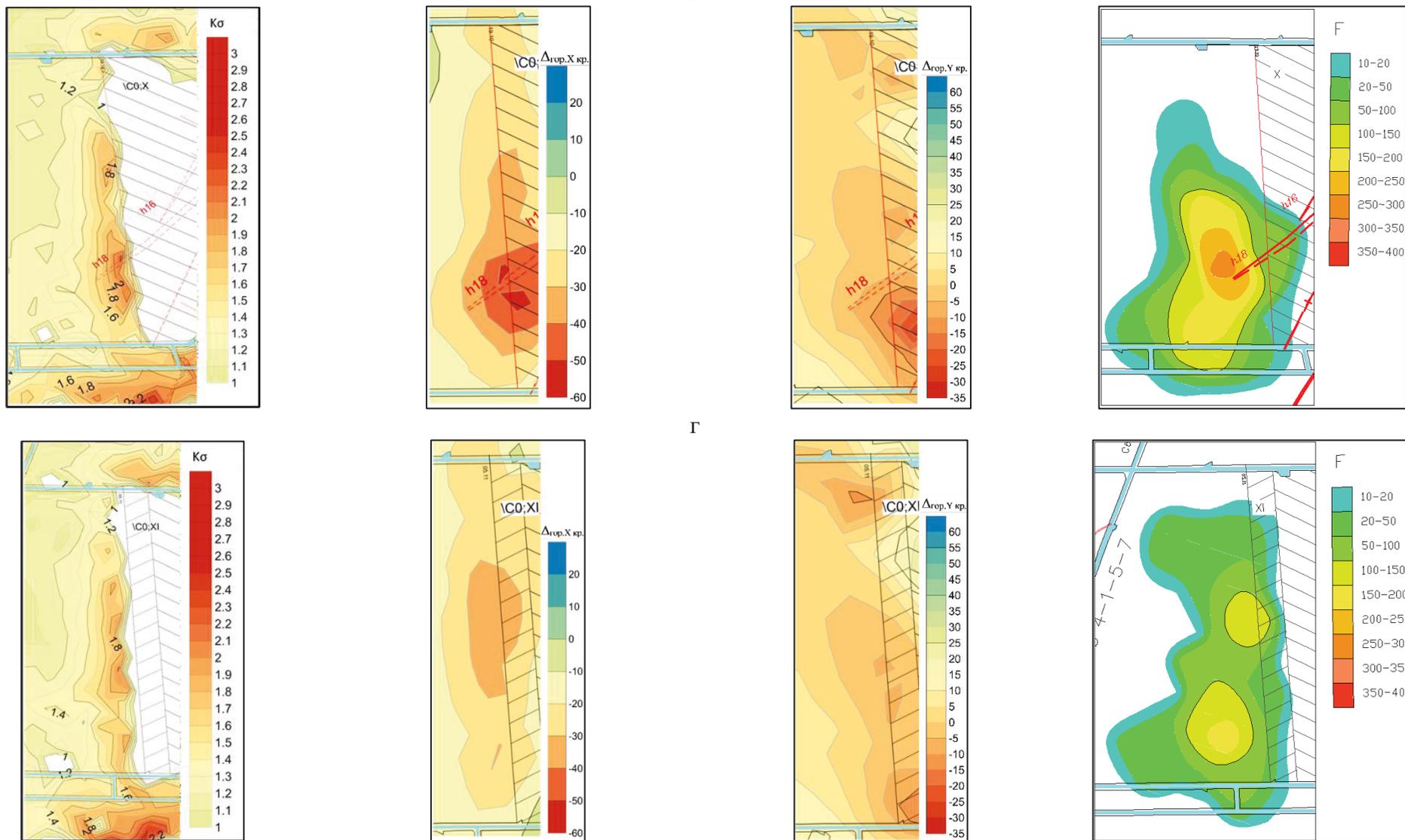


Рис. 3.6 (продолжение) – Карты с изолиниями геомеханических параметров: коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_{\sigma}$ ; горизонтальных смещений по оси  $Y$  в кровле пласта  $\Delta_{гор.У кр}$ ; горизонтальных смещений по оси  $X$  в кровле пласта  $\Delta_{гор.Х кр}$ ; комплексного параметра сейсмической активности  $F$  на различных этапах отработки пласта:

$в$  – 19.10.2020;  $г$  – 05.11.2020

В период с середины ноября до середины декабря 2020 г. очистным забоем были пересечены передовая выработка и следующие за ней нарушения, что также способствовало росту сейсмической активности впереди очистного забоя. Прослеживаются аналогичные изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений и горизонтальных смещений в кровле пласта.

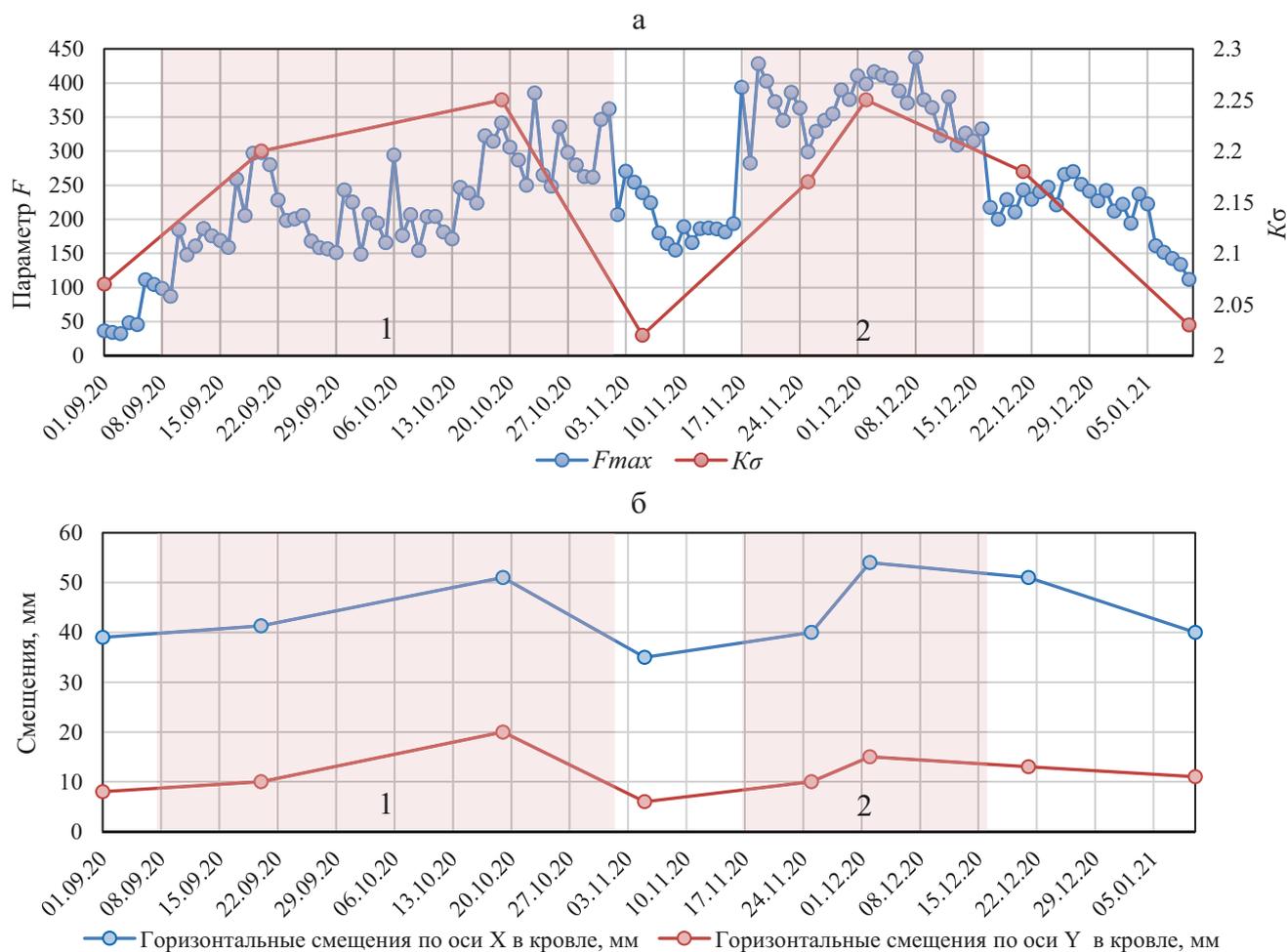


Рис. 3.7 – Графики изменения геомеханических параметров: *а* – максимальные значения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $E-5$   $K_{\sigma}$  и параметра  $F$  впереди забоя лавы; *б* – максимальные горизонтальные смещения по оси  $X$  в кровле пласта и горизонтальные смещения по оси  $Y$  в кровле пласта; 1 – пересечение очистным забоем группы тектонических нарушений; 2 – пересечение очистным забоем передовой выработки и тектонических нарушений

Изменения интегральных показателей рассматриваемых параметров представлены на рисунке 3.8. Для их определения выделялась область массива впереди очистного забоя на всю длину лавы 4-1-5-7.

Глубина рассматриваемого участка на рисунке 3.8 по выемочному столбу составила 150 м от очистного забоя. Для этой зоны были выполнены построения прогнозных карт с изображением изолиний комплексного сейсмического параметра  $F$ ,

для расчёта интегрального показателя  $I_F$  выделялись зоны коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта со значением  $K_\sigma > 1$  по всей длине лавы.

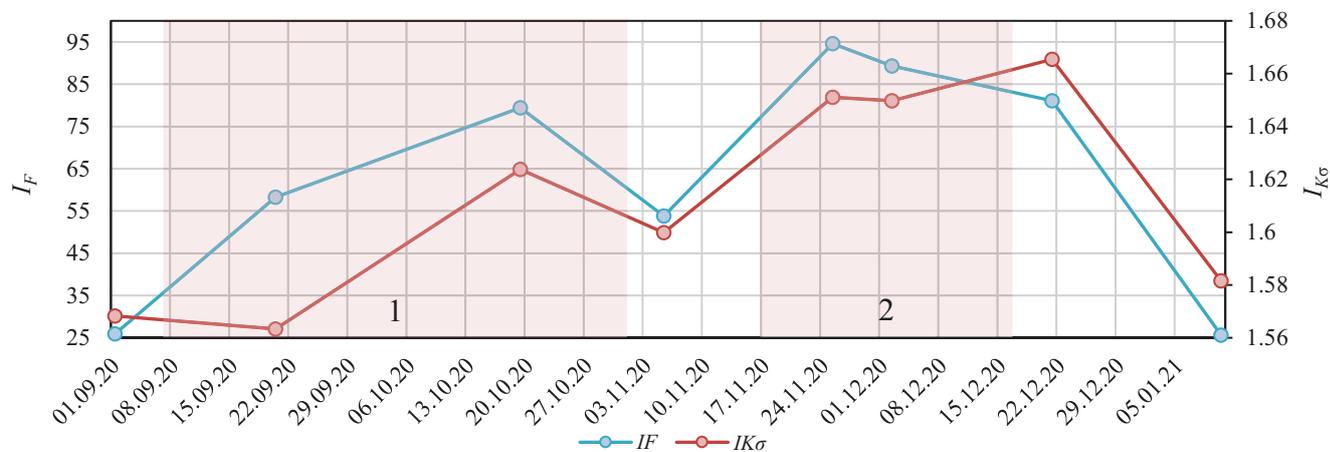


Рис. 3.8 – Графики изменения интегральных показателей параметра  $F$  и коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_\sigma$ : 1 – пересечение очистным забоем группы тектонических нарушений; 2 – пересечение очистным забоем передовой выработки и тектонических нарушений

Из графиков на рисунке 3.7 а и 3.8 следует, что диапазоны изменения анализируемых параметров составляют соответственно:  $F_{\max} = 50\text{--}420$ ;  $K_\sigma = 2,04\text{--}2,27$  и  $I_F = 26\text{--}95$ ;  $I_{K_\sigma} = 1,58\text{--}1,66$ .

Проведена статистическая обработка экспериментальных и расчётных данных, включающая установление регрессионных зависимостей; оценку информативности параметров.

Графики распределения исследуемых зависимостей максимальных значений коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_\sigma$  от максимальных значений параметра  $F$  ( $F_{\max}$ ) и интегральных показателей по параметру  $F$  ( $I_F$ ) и коэффициенту концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта Е-5  $I_{K_\sigma}$ , а также соответствующие уравнения регрессии представлены на рисунке 3.9. Из результатов расчёта следует, что наибольшая теснота связи между сейсмическим и геомеханическим параметрами имеет место на рисунке 3.9 б.

Установлено, что корреляционные отношения  $\eta$ , представленные на рисунке 3.9 равны 0,81 и 0,88 соответственно. Для проверки надёжности выполнен расчёт критерия Фишера  $F_{\text{Фиш}}$  (формула 2.12), и определен  $F_{\text{Ф.крит}}$  – максимально возможное значение критерия под влиянием случайных факторов при данных степенях

свободы и уровне значимости  $\alpha = 0,1$ ,  $F_{\text{Ф.крит}}$  определяется для числа степеней свободы  $k = n - m - 1 = 6$ , где  $n$  – количество пар, равное 8.  $F_{\text{Ф.крит}}$  равен 3,05. Полученные значения критерия Фишера  $F_{\text{Ф.иш}}$  выше  $F_{\text{Ф.крит}}$ .

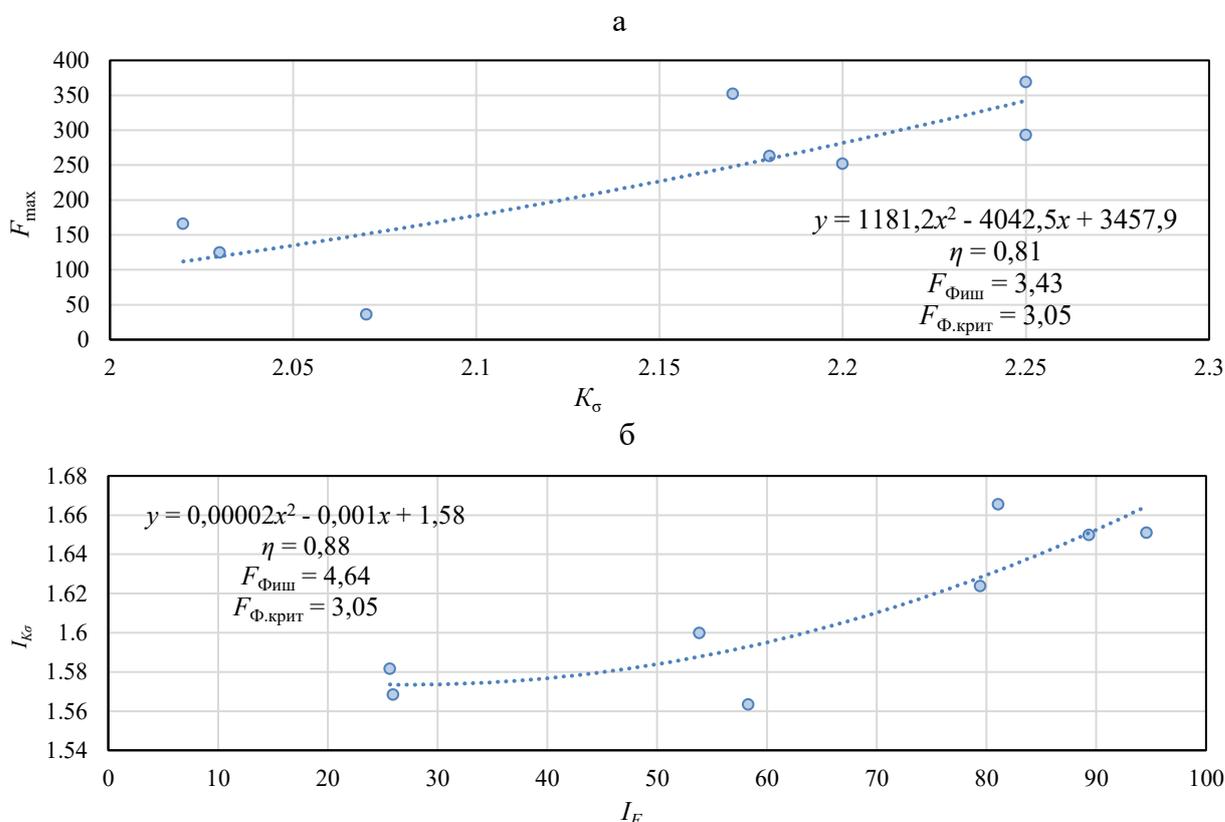


Рис. 3.9 – Графики распределения расчётных и экспериментальных параметров и уравнения регрессии исходных данных: а – представленных на рис. 7; б – представленных на рис. 8;  $\eta$  – коэффициент корреляции для криволинейной связи;  $F_{\text{Ф.иш}}$  – критерий Фишера;  $F_{\text{Ф.крит}}$  – критическое значение критерия Фишера

Поскольку фактическое значение  $F_{\text{Ф.иш}} > F_{\text{Ф.крит}}$ , то коэффициент детерминации статистически значим (найденная оценка уравнения регрессии статистически надёжна).

Информативность рассматриваемых параметров рассчитывалась по формуле (в битах), предложенной И. А. Турчаниновым и В. А. Паниным для оценки информативности геофизических методов [99]

$$J = 1,44 \cdot \ln \left( \frac{K_{\text{BA}} \sqrt{n}}{\sqrt{2} t_c K_{\text{BH}}} \right), \quad (3.1)$$

где  $K_{\text{BH}}$  – коэффициент вариации параметра при отсутствии осложняющих факторов;  $K_{\text{BA}}$  – коэффициент вариации рассматриваемого параметра в период геодинамической активности;  $t_c$  – коэффициент Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ ;  $n$  – число расчётных точек.

Коэффициент вариации определялся по следующей формуле:

$$K_{ВН,А} = \frac{\sigma_{Н,А}}{\bar{\Pi}_{Н,А}}, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_{Н,А}$  – среднеквадратическое отклонение параметра  $\Pi$  соответственно в «спокойный» и «активный» периоды;  $\bar{\Pi}_{Н,А}$  – среднее значение рассматриваемого параметра в «спокойные» и «активные» периоды.

Для определения коэффициента вариации выделены «активные» периоды, когда наблюдалась геодинамическая активность и повышенные значения рассматриваемых параметров, и «спокойные» периоды, в которых значения параметров снижались в виду отсутствия осложняющих факторов.

«Активные» периоды наблюдались при отработке выемочного столба 4-1-5-7 в периоды с 6 сентября по 1 ноября 2020 г. и 17 ноября по 22 декабря 2020 г., и «спокойные» – до, между и после активных периодов (рисунок 3.8 а).

Результаты расчёта параметров информативности представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Результаты оценки информативности рассматриваемых параметров

Параметр	$F$	$K_{\sigma}$	$I_F$ , бит	$I_{K_{\sigma}}$ , бит
$\bar{\Pi}_H$	149,733	2,105	35,15	1,583
$\bar{\Pi}_A$	187,313	2,162	62,21	1,611
$K_{ВН}$	0,523	0,033	0,376	0,008
$K_{ВА}$	0,799	0,049	0,715	0,020
$J$ , бит	0,693	0,651	1,008	1,402
$J_{IF} = 1,008 > J_F = 0,693$ в 1,4 раза				
$J_{IK_{\sigma}} = 1,402 > J_{K_{\sigma}} = 0,651$ в 2,1 раза				

Из результатов анализа следует, что информативность интегральных показателей экспериментального  $F$  и аналитического  $K_{\sigma}$  параметров в 1,4–2,1 раза выше, чем исходных локальных.

### 3.3 Критерии вероятности проявления удароопасности по данным сейсмического мониторинга

Другим геомеханическим параметрам, характеризующим опасность динамического проявления горного давления, является расстояние  $x_{II}$  по нормали между очистным забоем до точки максимума информирующего параметра.

Определение расстояния  $x_{II}$  в общем случае выполнялось в следующем порядке:

- на конкретную дату выполнялось построение изолиний параметра на плане горных выработок;
- шаг изолиний параметра  $\Pi$  уменьшался до получения требуемой точности определения  $x_{II}$ .

Пример определения расстояния  $x_F$  до точки максимума комплексного параметра  $F$  представлен на рисунке 3.10.

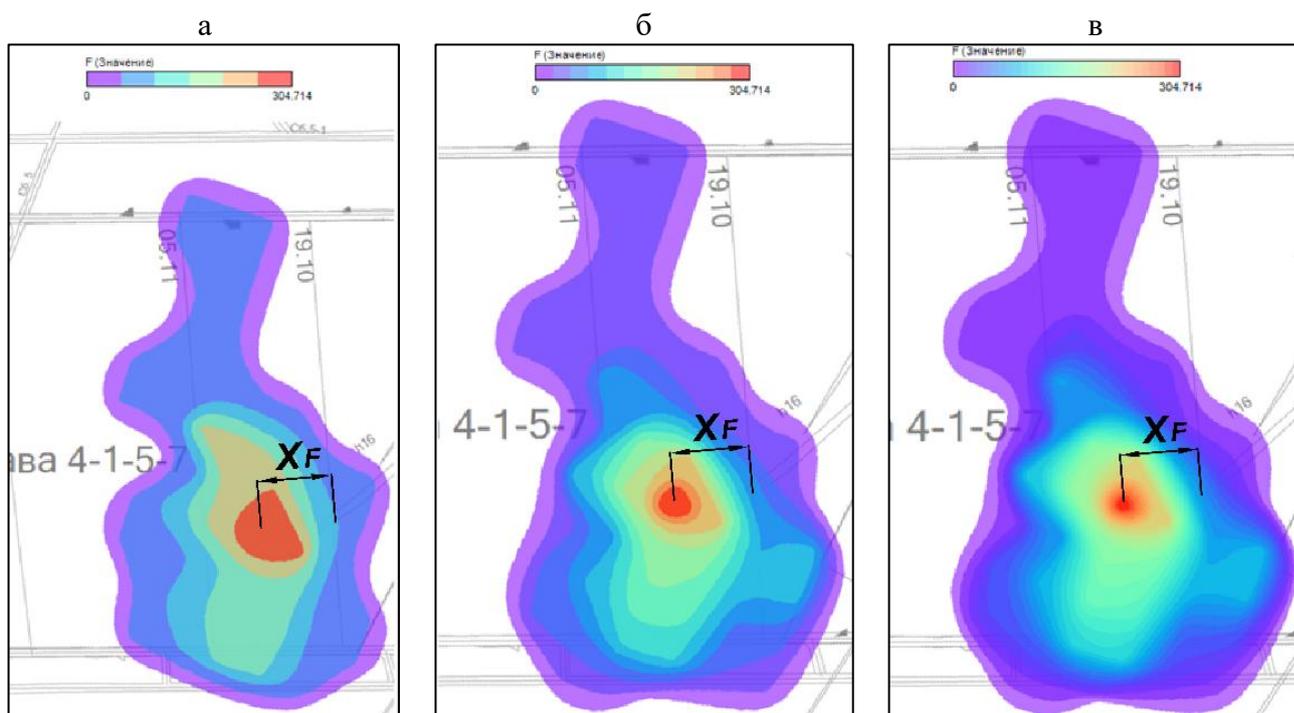


Рис. 3.10 – Определение расстояния  $x_F$  до максимума значений комплексного параметра  $F$ : а – изолинии параметра  $F$  с шагом отрисовки 50 ед.; б – то же, с шагом отрисовки 25 ед.; в – то же, с шагом отрисовки 10 ед.

В таблице 3.5 показаны значения определенных расстояний  $x_{II}$  до точки максимума значений рассматриваемых параметров.

Таблица 3.5

Результаты определения параметров  $\Pi_{\max}$ ,  $I_{II}$  и  $x_{II}$  для расчётной точки на рисунке 3.10

Параметр	Дата	2020							2021
		01.09	20.09	19.10	05.11	25.11	02.12	21.12	10.01
$F_{\max}$ , ед.		36	252	304	166	352	369	263	125
$x_F$ , м		55,4	47,1	42	33,1	22,1	18,2	23,6	13
$K_{\sigma}$ , ед.		2.07	2.2	2.25	2.02	2.17	2.25	2.18	2.03
$x_{K\sigma}$ , м		14,7	9,6	6,2	15,7	19,22	11,4	8,8	9,4
$I_F$ , ед.		25,96	58,31	79,44	53,85	94,60	89,34	81,06	25,66
$I_{K\sigma}$ , ед.		1,57	1,56	1,62	1,60	1,65	1,65	1,67	1,58

Накопленный банк экспериментальных данных позволил перейти к построению номограмм для прогноза удароопасности участков массива. Основная задача состояла в определении формы (уравнения) разграничительной линии, разделяющей зоны «опасно» и «неопасно». Решение задачи осложняется тем, что на всех участках, на которых проводится сейсмический мониторинг, базовым методом прогноза по выходу буровой мелочи была получена категория «неопасно».

Порядок построения состоял в следующем:

- на поле диаграмм наносили расчётные точки с координатами  $(F_{\max}; x_F)$  или  $(I_F; x_F)$  (рисунок 3.11).
- строили семейство разграничительных линий, наиболее точно разделяющих зоны «опасно» и «неопасно», при этом наиболее подходящими оказались линии параболической функции  $y = k \cdot \sqrt{x/a}$ , где  $a$  – подбираемая константа;
- оценивали точность прогноза  $V$  по соотношению «совпавших» точек к общему количеству.

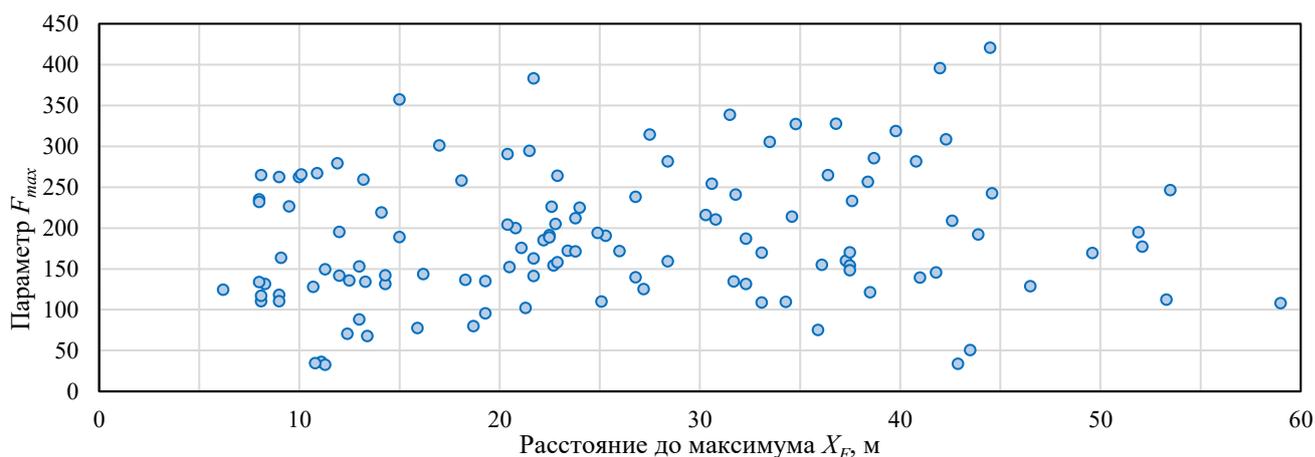


Рис. 3.11 – Исходное поле экспериментальных данных распределения параметра  $F_{\max}$  и расстояния до максимума  $x_F$

Поскольку зоны сейсмической активности и максимальные значения по параметру  $F$  не зависят от расстояния до ближайших открытых поверхностей (выработок), новый подход к прогнозу удароопасности сводится к своевременному выявлению формирования сейсмоактивной зоны, превышающей установленное критерияльные значение по параметру  $F$ , расположенной вблизи горной выработки.

Экспериментальные номограммы  $f(F_{\max}; x_F)$  и  $f(I_F; x_F)$  приведены на рисунке 3.12, расчётные значения параметров  $a$  и  $V$  для обеих номограмм приведены в таблице 3.4, а графические зависимости  $V(a)$  на рисунке 3.13.

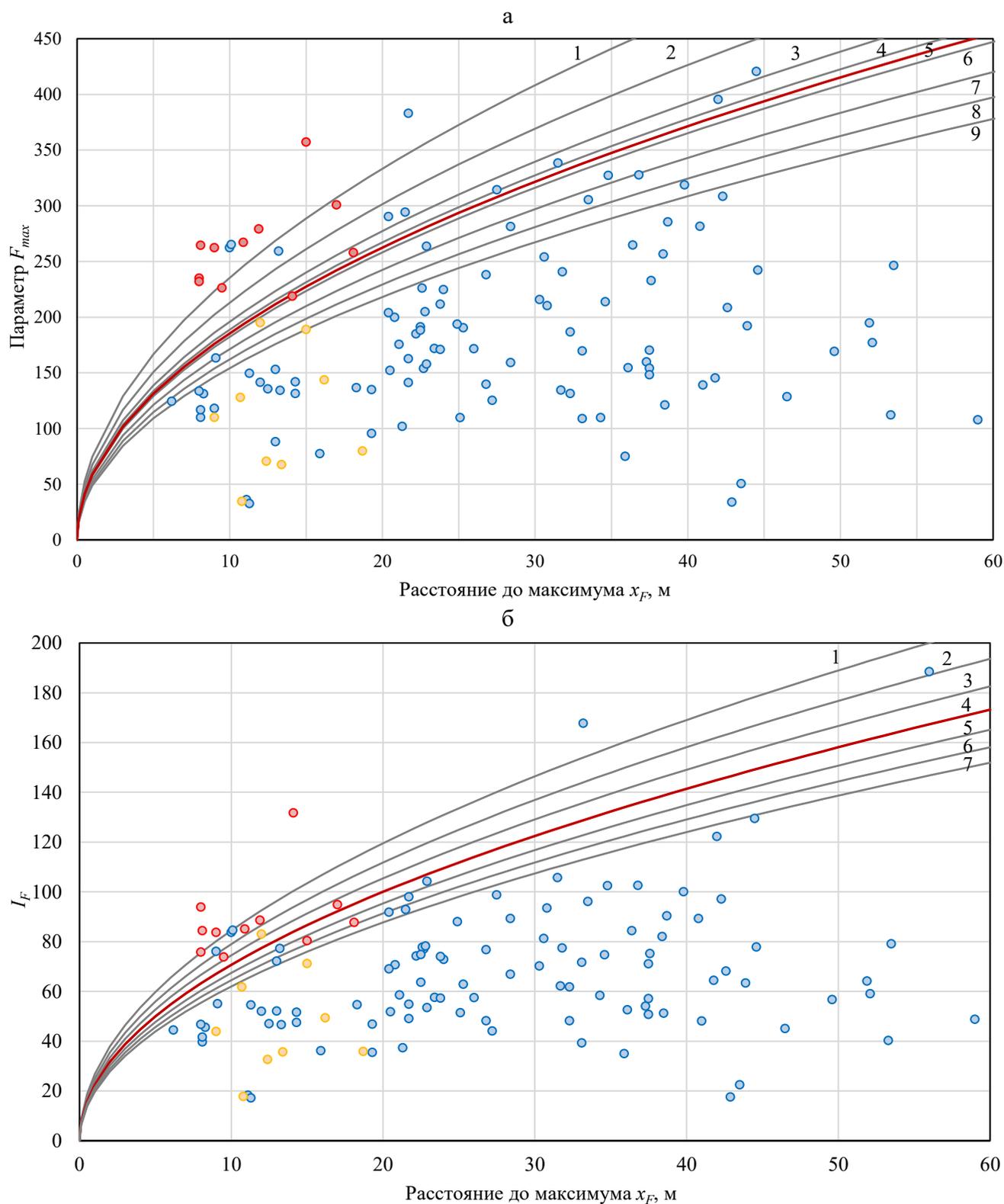


Рис. 3.12 – Построение номограмм геодинамического прогноза по параметрам  $(F_{\max}; x_F)$  (а) и  $(I_F; x_F)$  (б): 1...9 – экспериментальные разграничительные линии для прогноза удароопасности участков массива по данным сейсмического мониторинга;  $\circ$  – «пограничные» точки по результатам локального прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи, на которых объем штыба близок к значению для категории «опасно»  $P^V > 0,95 P_{\text{крит}}^V$ ;  $\circ$  – «пограничные» точки, на которых  $P^V = (0,9-0,95) P_{\text{крит}}^V$ ;  $\circ$  – точки, на которых получена категория «неопасно»

Уравнения экспериментальных разграничительных линий с оценками точности прогноза представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Расчётные значения параметров $a$ и $V(a)$									
$f(F_{\max}; x_F) = 10^3 \cdot \sqrt{x_F/a}$									
$a$	180	220	260	280	<b>300</b>	320	340	360	380
$V(a), \%$	92	89,6	87,2	84	<b>83,2</b>	82,4	80,8	78,4	76,0
$f(I_F; x_F) = 10^2 \cdot \sqrt{x_F/a}$									
$a$	12	14	16	18	<b>20</b>	22	24	26	28
$V(a), \%$	96,9	95,3	90,6	89,0	<b>88,2</b>	87,4	85,0	81,9	77,9

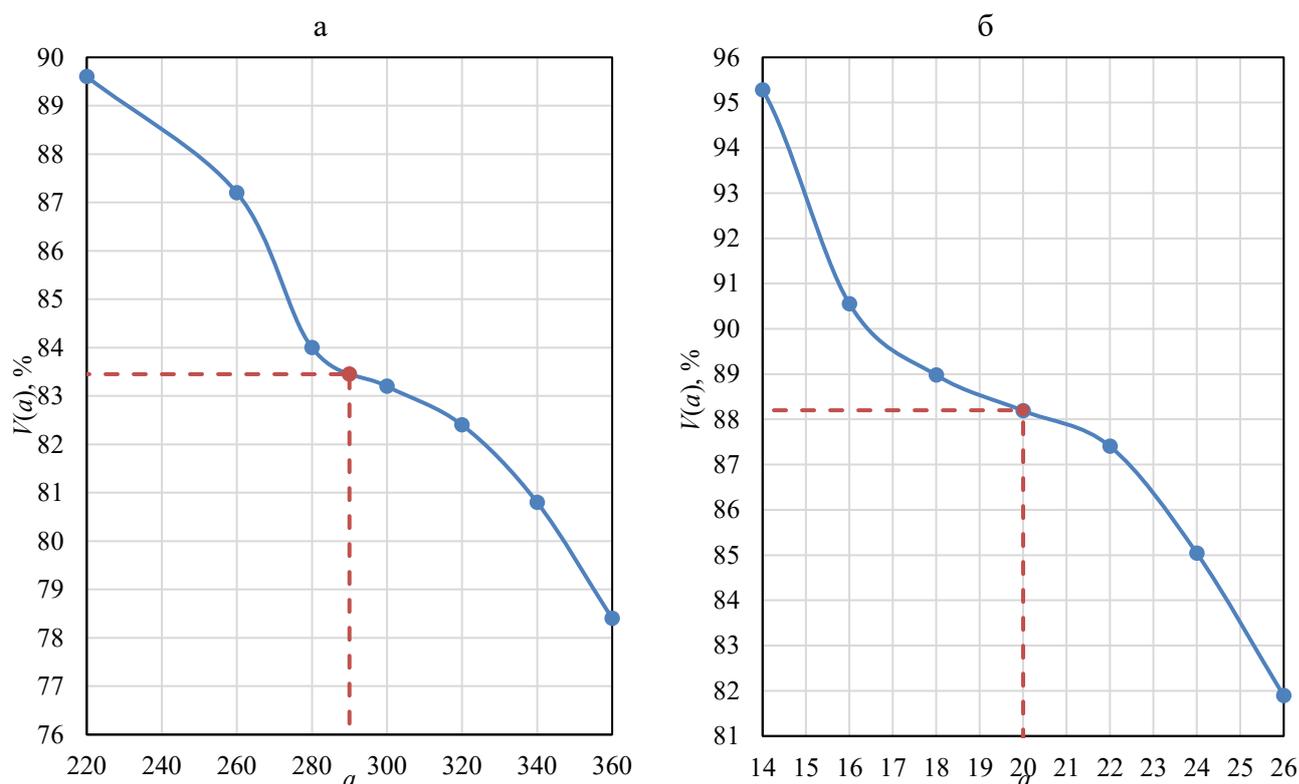


Рис. 3.13 – Графические зависимости  $V(a)$  для уравнения  $f(F_{\max}; x_F) = 10^3 \cdot \sqrt{x_F/a}$  (а), и уравнения  $f(I_F; x_F) = 10^2 \cdot \sqrt{x_F/a}$  (б)

Рациональные значения константы  $a$  соответствуют точке перегиба целевой функции  $V(a)$ , где функция  $V'$  имеет локальный экстремум, а производная  $V''$  равна нулю. Полученные разграничительные линии будут наиболее рациональными с точки зрения перехода от «пессимистичного» прогноза к «оптимистичному».

В результате выполненного анализа рациональные значения константы  $a$  составили соответственно  $a_1 = 290$  и  $a_2 = 20$ , а соответствующие им разделительные линии выделены на рисунке 3.12 красным цветом. Рассчитанные таким образом величины точности прогноза по приведённым разграничительным линиям составили

соответственно  $V_1 = 83,2\%$  и  $V_2 = 88,2\%$ .

Для проверки правомерности построенной разграничительной линии был дополнительно выполнен анализ результатов прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи в зонах повышенной сейсмической активности на удалении до 17 м от очистного забоя. Выявлены «пограничные» точки, в которых фактический объем буровой мелочи  $P^V$  на 9-ом метре прогнозного шпура оказался близким к критическим значениям  $P_{\text{крит}}^V$ :  $P^V = (0,9-0,99) P_{\text{крит}}^V$  ( $P_{\text{крит}}^V$  определен для 9-го метра прогнозного шпура при мощности пласта 3,2 м). На рисунке 3.14 представлены 3D графики расположения этих точек и пятна проекций этих областей на плоскость номограммы. Приведённый дополнительный анализ косвенно подтвердил соответствие построенной номограммы экспериментальным данным, так как из 11 «пограничных» точек в диапазоне  $P^V > 0,95P_{\text{крит}}^V$  10 оказались в поле «опасно», 1 – в поле «неопасно», а «пограничные» точки с приближением  $(0,9-0,95) F_{\text{кр}}$  все оказались в пределах поля «неопасно».

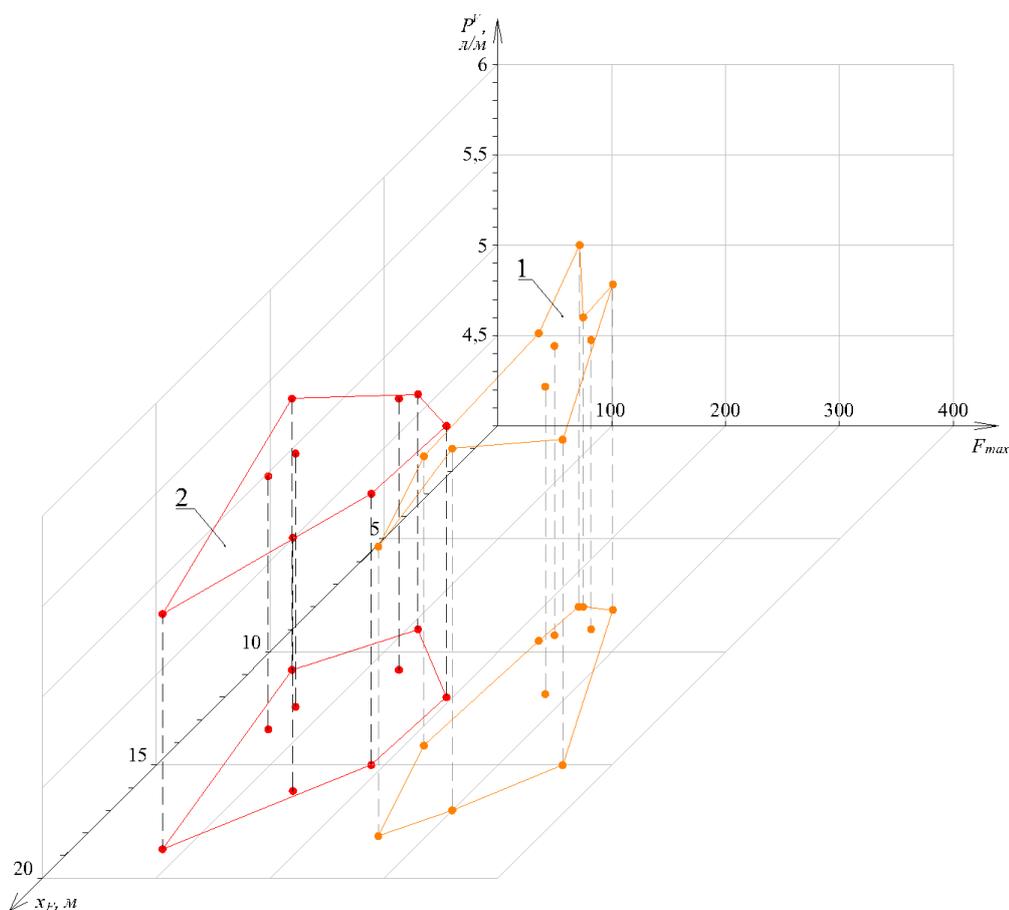


Рис. 3.14 – 3D графики расположения точек прогноза удароопасности методом выхода буровой мелочи, близких к критическим значениям  $P_{\text{крит}}^V$ : 1 –  $(0,95-1)P_{\text{крит}}^V$ ; 2 –  $(0,9-0,95)P_{\text{крит}}^V$ .

Следует отметить, что разработанные на основе экспериментальных данных разграничительные линии для прогноза удароопасности участков массива базируются на регистрации двух фундаментальных параметров, отражающих особенности механизма развязывания основной формы горных ударов: максимальной сейсмической активности массива  $F_{\max}$  (интегрального показателя  $I_F$ ) и расстояния от обнажения до точки максимума. Этот классический подход к прогнозу геодинамических явлений с большой энергией в последнее время практически не используется, предпочтение отдаётся упрощённым методикам прогноза по одному («критическому») параметру. Изложенное даёт основание для утверждения о том, что предложенная методика позволит повысить точность прогноза.

По мере накопления экспериментальных данных и, особенно, при получении базовым методом по выходу буровой мелочи категории «опасно», форма разграничительной линии «опасно-неопасно» может уточняться.

Предложенные методики регионального геодинамического прогноза могут быть реализованы на основе данных экспериментального сейсмического мониторинга (рисунок 3.12 *а* и *б*). При этом, учитывая большую информативность интегрального параметра  $I_F$  ему следует отдавать предпочтение, для его расчёта разработаны специальные компьютерные программы.

В соответствии с нормативными документами на основании результатов регионального прогноза дополнительно проводится локальный прогноз для уточнения места и объёмов профилактических мероприятий.

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [79, 101, 110, 111].

## **Выводы**

1. Идея комплексного экспериментально-аналитического исследования геомеханических процессов при интенсивной отработке угольного пласта заключается в совместном анализе экспериментальных данных производственного сейсмического мониторинга и баз данных изменения геомеханического состояния пласта, включающего неоднородности в форме тектонических нарушений и зоны влияния передовых выработок, пересекаемых при движении очистного забоя.

Программа исследований включала:

- сейсмический мониторинг системой GITS, обеспечивающий регистрацию событий, определение координат их источников, расчёт комплексного энергетического параметра, интегрального показателя и построение карт сейсмической активности;
- установление закономерностей динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта, неоднородного по физическим свойствам, путём совместного анализа баз данных методами сейсмического мониторинга, выхода бурового штыба и геомеханического моделирования СибГИУ;
- обоснование новых принципов, качественных и количественных критериев геодинамического прогноза удароопасности по данным сейсмического мониторинга.

Исследования проводились в условиях пласта Елбанский–5 шахты «Осинниковская» в изменяющихся горно-геологических условиях при отработке выемочного столба 4-1-5-7 в районе тектонического нарушения.

2. По результатам сейсмического мониторинга установлено резкое увеличение первичных параметров активности массива при пересечении забоем зоны тектонических нарушений и передовой выработки. В результате обработки данных экспериментальных исследований и компьютерного моделирования получены графики изменения сейсмического и геомеханического состояния массива и карты изолиний комплекса параметров в момент пика сейсмической активности и в течение двух месяцев наблюдений.

3. Установлено, что при пересечении лавой зон тектонических нарушений и передовой выработки комплексный сейсмический параметр  $F$  увеличивается с 50-100 до 300–450, а его интегральный показатель  $I_F$  – с 17–27 до 188. Статистическая обработка баз данных показала, что информативность интегрального показателя составила  $J_{IF} = 1,008$ , что более чем в 1,4 раза выше, чем у локального  $F$  ( $J_F = 0,693$ ). Между максимальными значениями комплексного сейсмического па-

раметра  $F$  и коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_{\sigma}$ , а также их интегральными показателями выявлены близкие к линейным значимые регрессионные зависимости.

4. На основе результатов комплексных экспериментально-аналитических исследований предложено использовать для геодинамического прогноза удароопасности участков угольного пласта номограммы, включающие параметры, отражающие классические представления о механизме развязывания горных ударов: максимальные значения комплексного сейсмического параметра  $F$  (его интегральный показатель  $I_F$ ) и расстояние  $x_F$  до точки со значением  $F_{\max}$ .

Для условий шахты «Осинниковская» уравнение разграничительной линии «опасно-неопасно» имеет вид параболической функции  $y = k \cdot \sqrt{x/a}$ . Рациональные значения константы  $a$  установлены по точке изгиба графика функции точности прогноза  $V(a)$ , при этом точность прогноза для установленных значений  $a$ , определяющих расположения разграничительных линий, составляет соответственно 83% и 88%. Диапазоны изменения информирующих параметров составили:  $F_{\max} = 30-420$ ;  $I_F = 17-188$ ;  $x_F = 5,0-58,0$  м. Соответствие построенной номограммы экспериментальным данным, полученным методом выхода бурового штыба, подтверждены тем, что 82% «пограничных» точек с выходом штыба, составляющим более 0,95 от критического уровня, оказались в поле «опасно».

Установленные закономерности динамики сейсмических и геомеханических процессов при отработке угольного пласта и критерии вероятности проявления удароопасности позволили перейти к разработке метода и критериев комплексного прогнозирования удароопасности на основе сейсмического метода.

## 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА И КРИТЕРИЕВ КОМПЛЕКСНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УДАРООПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

### 4.1 Алгоритмы регионального, локального и текущего прогноза при отработке угольного пласта на основе сейсмического мониторинга

Разработан общий алгоритм прогноза удароопасности при ведении очистных работ. В алгоритме применён комплексный подход включающий в себя региональный прогноз по регистрации сейсмической активности в пределах шахтного поля и методы локального прогноза, как геофизические, так и прямые, для уточнения границ зон повышенного сейсмоэнерговыведения и подтверждения категории удароопасности (рисунок 4.1).

В соответствии с представленным алгоритмом прогноза удароопасности при ведении очистных работ первоначально на основе данных системы сейсмического мониторинга ведётся региональный прогноз удароопасности (алгоритм на рисунке 4.1, поз. 1). По мере регистрации сейсмических событий выполняется их обработка с определением координат гипоцентра и выделившейся энергии в гипоцентре (поз. 2). В результате обработки параметров сейсмособытий формируется база данных со всеми сейсмособытиями, зарегистрированными в пределах контролируемого участка (поз. 3). При достаточном накоплении сейсмических событий в базе данных выполняется ежесуточное построение карт с изолиниями по параметру сейсмической активности  $F$  (поз. 4). Дальнейшие шаги предусматривают определение точки максимума рассматриваемого параметра  $F$  на прогнозных картах и кратчайшего расстояния от этой точки до ближайшей открытой поверхности (борт подготовительно выработки, очистной забой), выполняется расчёт интегрального показателя  $I_F$  (поз. 5–7). Затем по ранее установленным разграничительным линиям «опасно-неопасно»  $y = f(F_{\max}; x_F)$  и  $y = f(I_F; x_F)$  выполняется определение категории опасности (поз. 8, 9). Если полученная точка на номограмме попадает в зону «неопасно», продолжается ведение регистрации сейсмических событий в рамках регионального прогноза. Если по номограмме определена категория «опасно», то выполняется определение ширины зоны повышенного сейсмоэнерговыведения в выработке, попадающей в данную зону (поз. 10, 11). После установления ширины

зоны повышенного сейсмоэнерговыведения в выработке на данном участке выполняется локальный прогноз по методу регистрации ЕЭМИ, либо по выходу буровой мелочи, для подтверждения или снятия ранее установленной категории опасности (поз. 13–15).

При неподтверждении категории «опасно» выполняется корректировка разграничительной линии «опасно-неопасно»  $y = f(F_{\max}; x_F)$  и  $y = f(I_F; x_F)$  (поз. 16). В случае подтверждения категории «опасно» приступают к выполнению профилактических мероприятий с контролем эффективности принятых мер и последующим проведением текущего прогноза удароопасности методами локального прогноза не менее чем на двух циклах подвигания забоя подготовительной выработки или забоя очистной выработки после приведения его в неудароопасное состояние в соответствии с п. 97 Инструкции [29] (поз. 17–18).

Для реализации алгоритма (рисунок 4.1) в ходе опытной эксплуатации системы GITS в пределах шахтного поля шахты «Осинниковская» были определены уровни опасности сейсмической активности по комплексному параметру  $F$  для расчётного блока  $50 \times 50 \times 50$  м (таблица 4.1). Критические значения сейсмического параметра  $F_{\max}$  для шахт Кузбасса утверждённые ВНИМИ представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Классификация сейсмоактивности по параметру  $F$  для шахты «Осинниковская»

Уровень	Значение параметра $F$	Описание
0	$0 < F < 10$	$0 < F < 10$ (фоновый уровень) за 15 дней в блоке не произошло крупных сейсмических событий. <b>«не опасно»</b>
1	$10 \leq F < 50$	$10 \leq F < 50$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией от $1000 < E < 3000$ Дж. <b>«не опасно»</b>
2	$50 \leq F < 100$	$50 \leq F < 100$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $3000 < E < 5000$ Дж. <b>«умеренно напряженно, но не опасно»</b>
3	$100 \leq F < 200$	$100 \leq F < 200$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $5000 < E < 10\,000$ Дж. <b>«напряженно, но не опасно»</b>
4	$200 \leq F < 400$	$200 \leq F < 400$ или зарегистрировано событие с энергией $10\,000 \leq E < 15\,000$ Дж. <b>«напряжено, опасно»</b>
5	$F > 400$	$F > 400$ или зарегистрировано событие с энергией $E > 15\,000$ Дж. <b>«напряжено, опасно»</b>

Таблица 4.2

Критические значения сейсмического параметра  $F_{\text{кр}}$  для шахт Кузбасса (утверждены ВНИМИ №16 от 27.01.2025)

Шахта	Алардинская	Осинниковская	Распадская-Коксовая	Усковская	Ерунаковская-VIII	Есаульская
$F_{\text{кр}}$	200	200	300	400	200	200

Определение критериальных значений, указанных в таблице 4.1 выполнялось в период научно-методического сопровождения опытной эксплуатации системы в первый год её функционирования в условиях шахты «Осинниковская», и уточнялась по мере накопления базы данных сейсмического мониторинга.

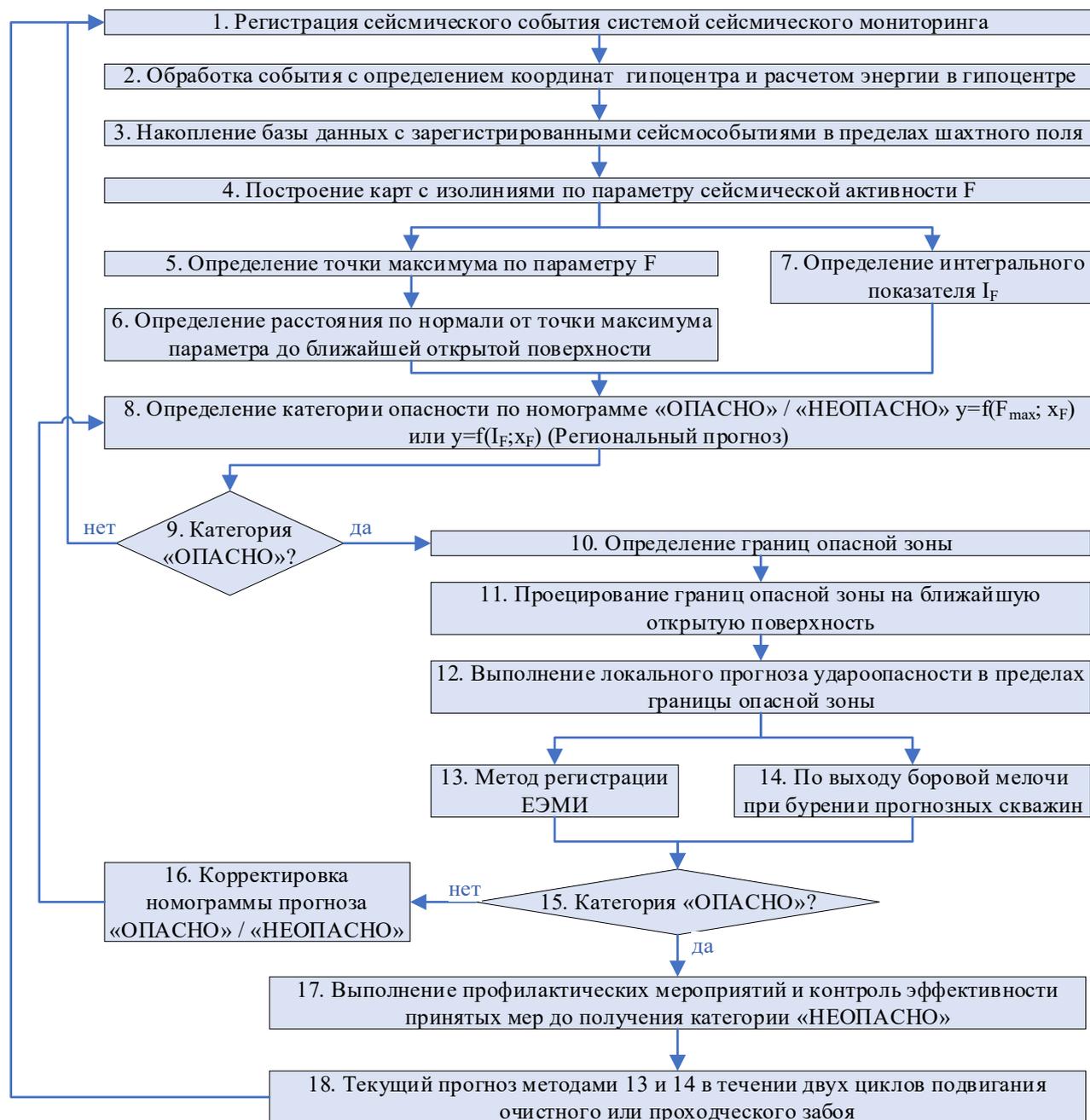


Рис. 4.1 – Алгоритм комплексного прогноза удароопасности при ведении очистных и проходческих работ

При формировании сейсмоактивной зоны вблизи очистного забоя или штрека, попадающей в зону «опасно» по номограмме «опасно-неопасно»  $y = f(I_F; x_F)$  (рисунок 3.12), следует спроецировать границы выявленной зоны на ближайшие выработки.

Рассмотрим примеры реализации описанного алгоритма.

Параметры зоны повышенного сейсмозэнерговыделения при переезде очистным забоем группы тектонических нарушений и передовой выработки показаны на рисунке 4.2.

При пересечении группы тектонических нарушений 22 октября 2020 г. (рисунок 4.2 а) по данным регистрации сейсмических событий системой GITS была выявлена категория «опасно» по комплексному параметру сейсмической активности, максимальное значение комплексного параметра достигло  $F_{\max} = 314$ , расстояние от точки максимума до очистного забоя составило 26,5 м. Ширина зоны повышенного сейсмозэнерговыделения в очистном забое составила  $\Delta x = 37$  м.

При пересечении передовой выработки фиксировались максимальные значения по параметру  $F$  за весь период отработки лавы, высокий уровень параметра  $F$  сохранялся начиная с 17 ноября по 16 декабря до момента окончания переезда передовой выработки.

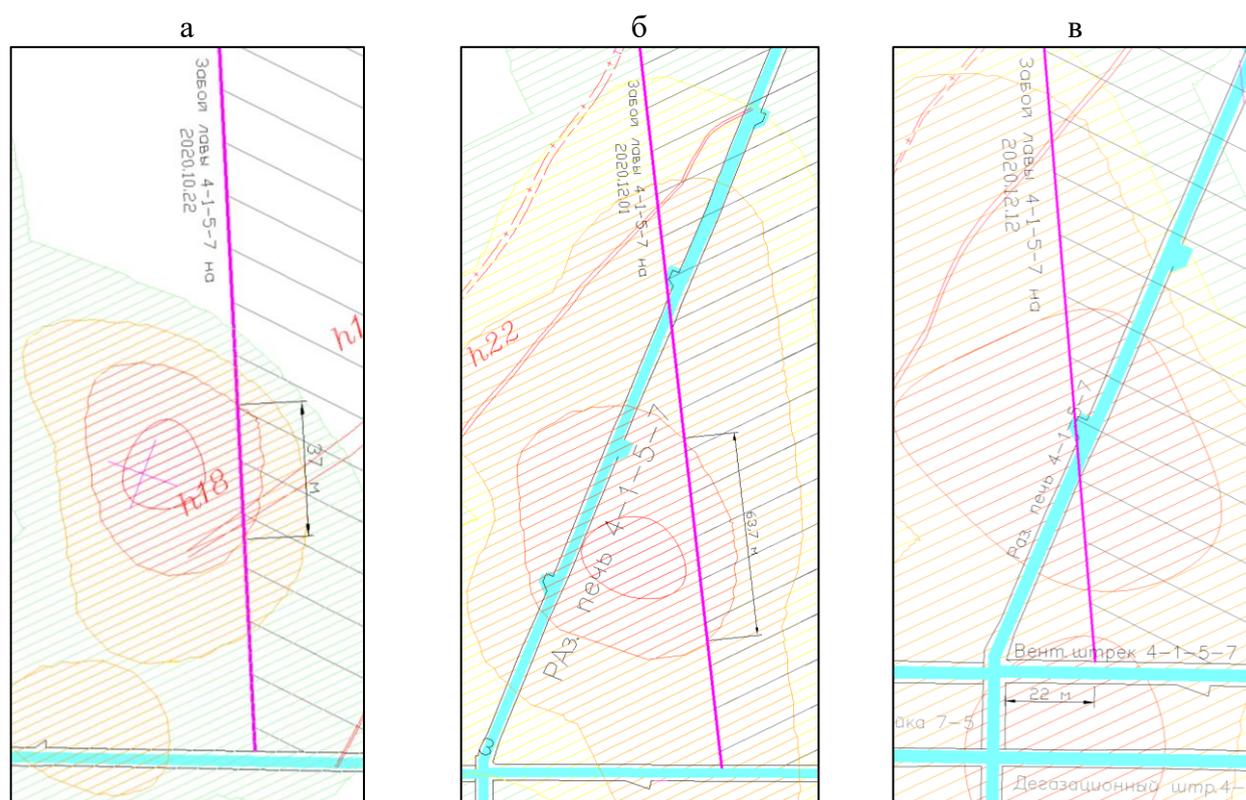


Рис. 4.2 – Параметры зоны повышенной сейсмозактивности в выработке при пересечении забоем лавы: а – группы тектонических нарушений; б – передовой выработки; в – в вентиляционном штреке 4-1-5-7. (Палитра для окрашивания зон по параметру  $F$  соответствует таблице 4.1)

На рисунке 4.2 б представлена карта с нанесением изолиний распределения значений параметра  $F$  на плане горных работ на 1 декабря 2020 г. Расстояние от

максимума параметра  $F = 300,9$  до ближайшей открытой поверхности (забой лавы) составило 20,5 м. Протяжённость зоны, соответствующей 4 уровню опасности по параметру  $F$  в забое лавы 4-1-5-7, составила  $\Delta x = 63,7$  м.

12 декабря 2020 г. появилась вторая зона повышенного сейсмоэнерговыведения в межлавном целике в районе между действующим очистным забоем 4-1-5-7 и ранее отработанным выемочным столбом. Значение сейсмического параметра достигло  $F = 296$ . Размеры зоны в очистном забое 8 м, в вентиляционном штреке  $\Delta x = 22$  м (рисунок 4.2 в).

Динамика возникновения, развития и затухания зоны сейсмоэнерговыведения для описанных выше участков показана на рисунке 4.3, где приведены графики изменения во времени ширины зоны повышенного сейсмоэнерговыведения  $\Delta x$  и комплексного параметра в форме произведения  $F_{\max} \cdot \Delta x$ , из приведённых данных следует, что длительность геомеханических процессов, способствующих формированию удароопасного состояния массива, может изменяться в диапазоне 4-10 суток.

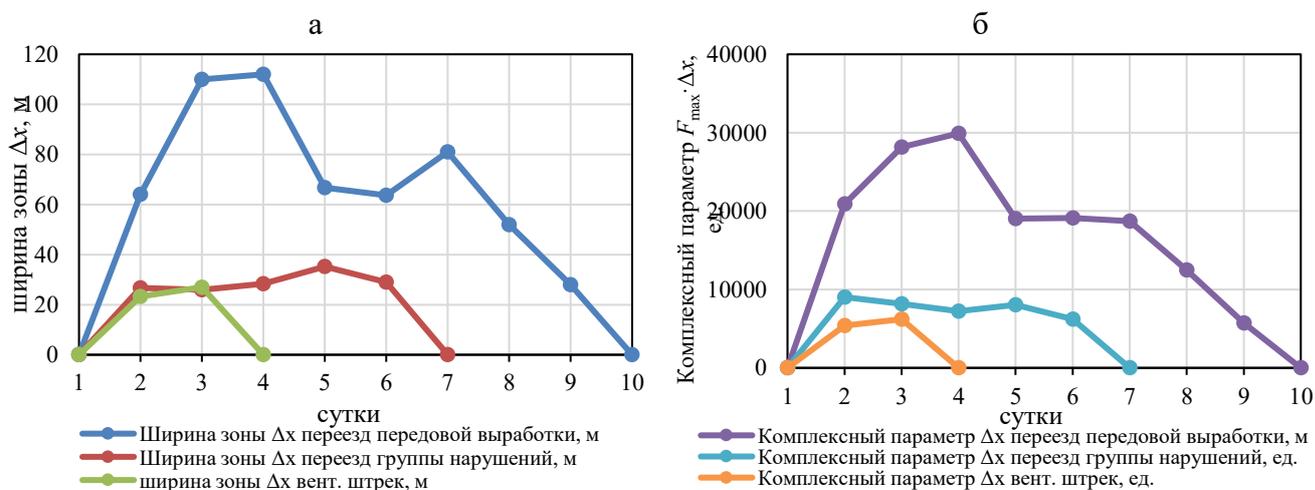


Рис. 4.3 – Графики изменения: ширины зоны  $\Delta x$  (а), комплексного параметра  $F_{\max} \cdot \Delta x$  (б)

Предложенный метод комплексного подхода к региональному, локальному и текущему прогнозу удароопасности обеспечивает рациональное сочетание геофизических и прямых методов мониторинга и будет способствовать повышению точности прогноза и снижению затрат на его реализацию.

#### 4.2 Перспективные методы локального и текущего прогноза удароопасности (ЭМИ, естественного геоэлектрического поля, георадиолокации)

Рациональное применение аналитических и компьютерных методов моделирования НДС массива горных пород для решения геомеханических задач подземной геотехнологии неразрывно связано с применением производственно-экспериментальных методов контроля свойств среды и мониторинга протекающих в них процессов. Результаты натурных исследований используют в качестве априорной информации при построении и реализации геомеханических моделей, сопоставление этих данных с расчётными даёт возможность настраивать, тарировать программные продукты, оценивать точность прогноза.

Экспериментальные методы разделяют на прямые и косвенные (геофизические), классификация локальных методов прогноза показана на рисунке 4.4.

Как правило, прямые методы недостаточно оперативны, трудоёмки, не обеспечивают требуемой разрешающей способности и непрерывности мониторинга.

В рамках данного исследования для реализации общего алгоритма прогноза удароопасности (рисунок 4.1) рассмотрены перспективы применения следующих методов локального и текущего прогнозов удароопасности:

- по выходу буровой мелочи;
- электрических потенциалов;
- георадиолокации;
- регистрации естественного электромагнитного излучения.

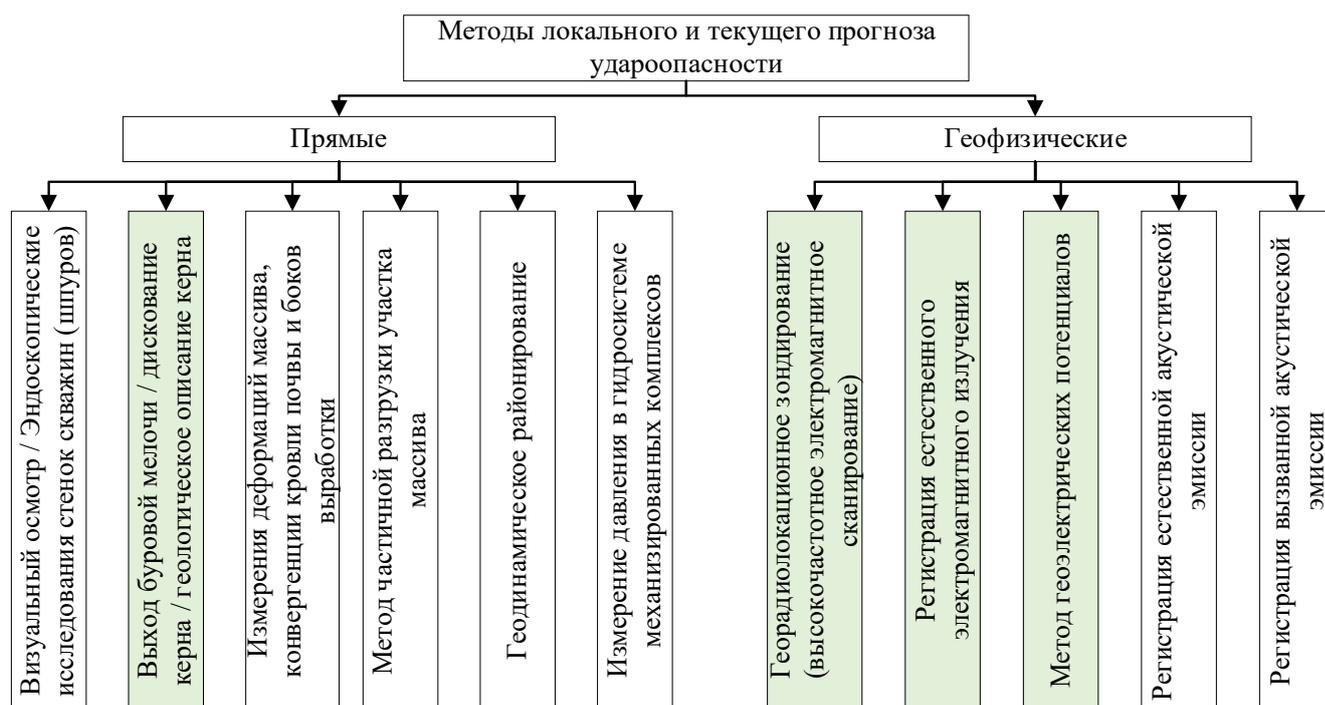


Рис. 4.4 – Классификация экспериментальных методов локального прогноза удароопасности

На рисунке 4.5 приведены рекомендуемая инструкцией [29] схема бурения прогнозных скважин и номограмма для определения категории опасности для условий шахты «Осинниковская».

При выполнении прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи в подготовительном забое по левому борту выработки в одном и 3-х метрах от забоя (скв. 1, 2) в двух прогнозных шпурах была установлена категория «опасно». Схема бурения скважин локального прогноза удароопасности представлена на рисунке 4.5 а. Максимальный выход буровой мелочи составил 30 литров с 6-го метра прогнозного шпура (скв. 2) при нормируемом значении не более 5,7 литра (рисунок 4.5 б). Забой был остановлен до приведения в безопасное состояние.

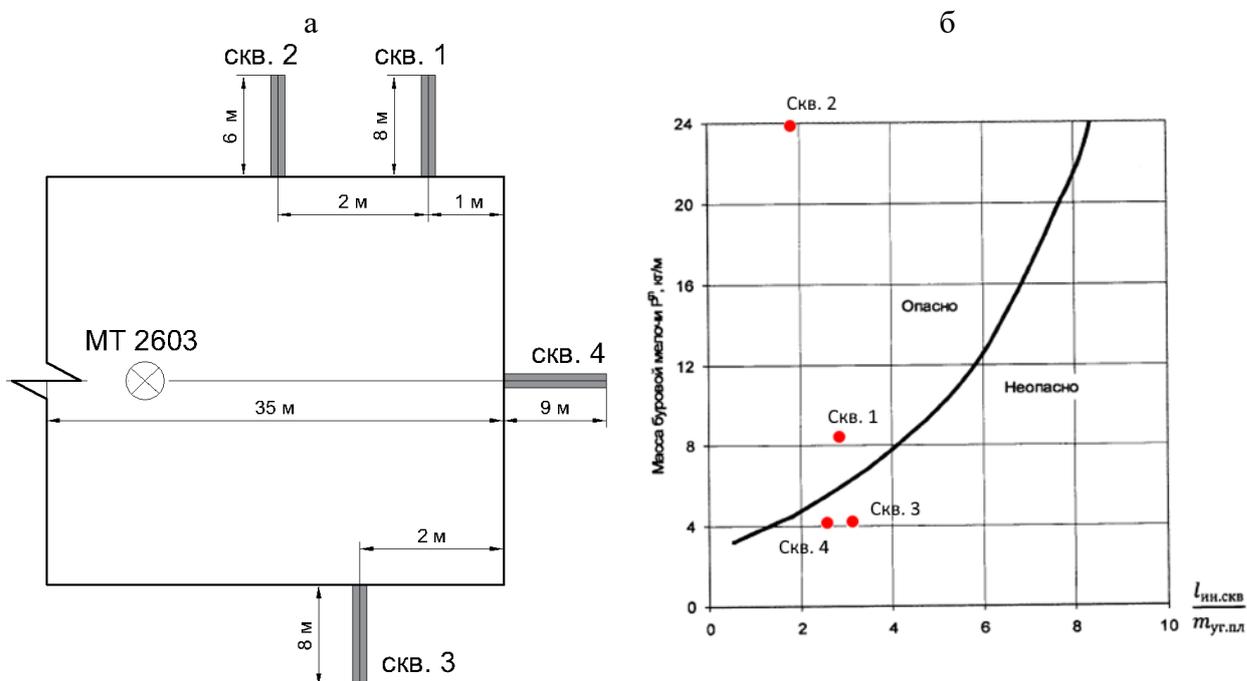


Рис. 4.5 – Схема бурения скважин локального прогноза удароопасности (а) и номограмма установления категории «опасно» или «неопасно» с результатами прогноза в конвейерном штреке 4-1-5-9 21.12.2021 (б)

Весьма интенсивно в последнее время развиваются геофизические методы, систематизация которых рассмотрена в работе [112].

Физической причиной формирования естественных электрических полей (ЕЭП) является пространственное изменение основных потенциалоопределяющих факторов: электрохимических свойств залежи, зависящих от минерального состава электронно-проводящих горных пород (руд, угля, графита) (количественным пара-

метром этих свойств является электродный потенциал); окислительно-восстановительных свойств шахтных вод, зависящих от их минерализации, концентрации ионов и растворенных газов (количественным параметром этих свойств является окислительно-восстановительный потенциал ОВП).

Принципиально различают два типа ЕЭП: региональные, вызванные изменением скачка потенциала на границе всей залежи с вмещающими породами или значительной её части; локальные, действующие в масштабах блоков, участков и даже отдельных зёрен минералов на микроуровне.

Схема образования регионального ЕЭП залежи приведена на рисунке 4.6 а.

В зоне окисления руды в шахтных водах преобладает высокое содержание кислорода. При окислении руда заряжается положительно, а раствор – отрицательно:

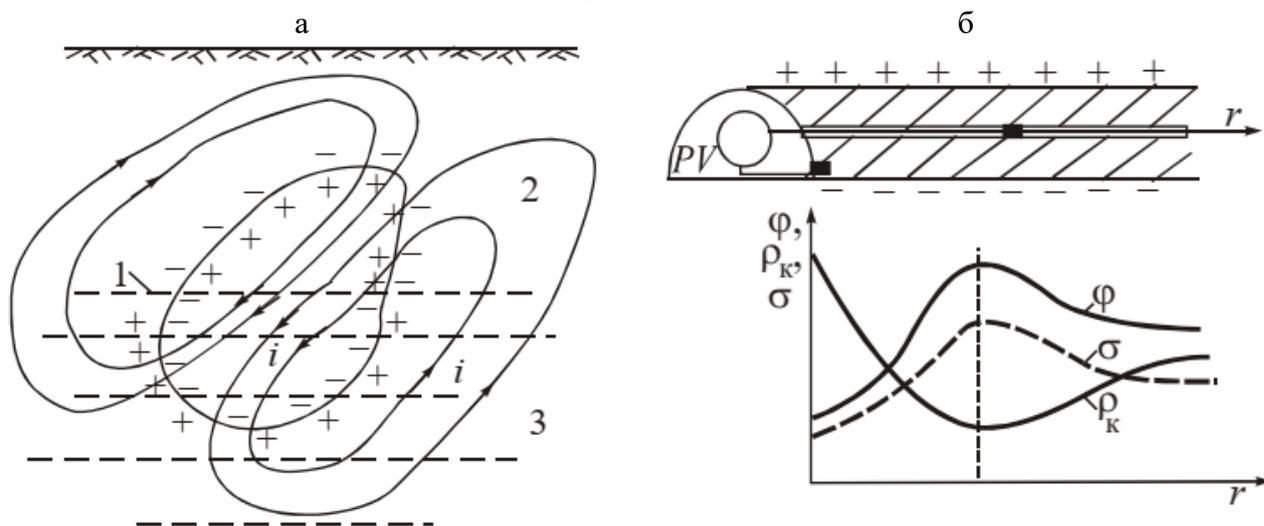
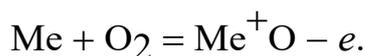


Рис. 4.6 – а – Схема формирования регионального ЕЭП: 1 – уровень шахтных вод; 2 – зона окисления; 3 – зона восстановления; б – Схема и характерные графики геоконтроля методом ЕЭП в угольном пласте

В зоне восстановления кислорода намного меньше, имеет место скопление сероводорода, вследствие чего происходит восстановление металла, при этом рудное тело заряжается отрицательно:



Таким образом образуется замкнутый гальванический элемент, ток которого

$i$  протекает вне и внутри залежи. Потенциал  $\varphi$  при геоконтроле в скважинах распределяется в соответствии с функцией  $\rho(r)$ . Экспериментально и теоретическими расчётами доказано, что график  $\varphi(r)$  связан с графиком  $\rho(r)$  и отражает распределение средних механических напряжений (первого инварианта тензора) (рисунок 4.6 б). Научное обоснование метода геоэлектрических потенциалов изложено в монографиях [113–115].

Разработана новая конструкция неполяризующегося электрода для измерений в шпурах малого диаметра, которая является объектом интеллектуальной собственности [116].

На рисунке 4.7 показано устройство неполяризующегося электрода. Устройство состоит из изоляционного слоя 1, пористого эластичного контактного элемента 2, цилиндрического малопроницаемого резервуара 3, провода с разъёмом 4, пробки 5, основания 6, электролита (раствора медного купороса) 7, наконечника 8 с резьбой, медного электрода 9 с отверстиями 10.

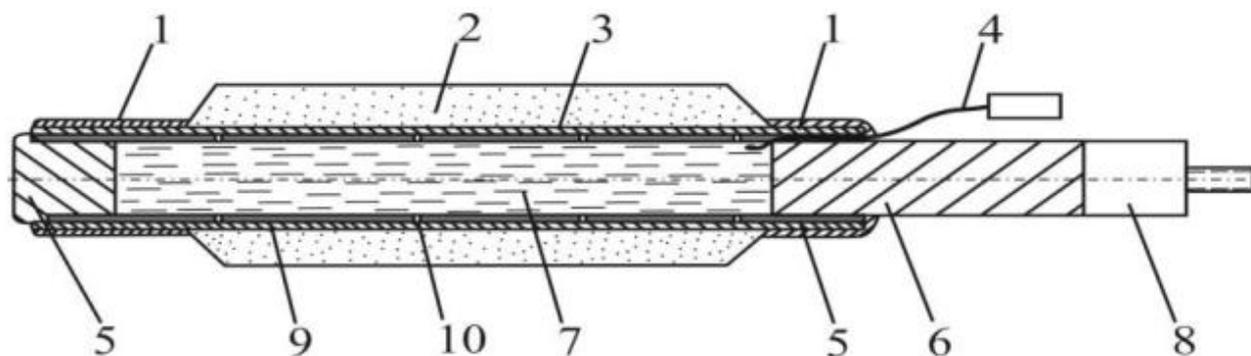


Рис. 4.7 – Неполяризующийся электрод для измерений в шпурах малого диаметра

Медный электрод 9 выполнен в виде тонкостенной перфорированной трубы с внешним диаметром на 8–12 мм меньшим диаметра контрольного шпура (на фигуре не показан). Медный электрод насажен на основание 6 и образует жёсткий каркас неполяризующегося электрода. На внешнюю поверхность медного электрода 9 надет цилиндрический малопроницаемый резервуар 3 из плотной ткани, перекрывающий отверстия 10 в медном электроде, выполняя роль капиллярной перемычки. Поверх резервуара 3 расположен пористый эластичный контактный элемент 2 из поролона, плотно прижатый с торцов медного электрода 9 изоляционным слоем 1.

Внешний диаметр контактного элемента 2 на 5–7 мм превышает диаметр контрольного шпура, что обеспечивает хороший контакт с поверхностью шпура. Полость медного электрода 9 является основной камерой, в которую заливают раствор медного купороса 7 и которая закрывается пробкой 5. Наконечник 8 служит для присоединения устройства к досылочной штанге, а провод с разъёмом 4 – для подключения к измерительному устройству (на рисунке 4.7 не показан).

Неполяризующийся электрод работает следующим образом. До начала измерений при вынутой пробке 5 в полость медного электрода 9 заливают раствор медного купороса 7. Этим же раствором пропитывают пористый эластичный контактный элемент 2. Закрывают полость медного электрода 9 пробкой 5, присоединяют наконечник 8 к досылочной штанге, а разъем провода 4 – к измерительному устройству. Перемещая неполяризующийся электрод по контрольному шпуру, производят измерение разности потенциалов между подвижным и заземляющим электродами. При контактировании пористого эластичного элемента 2 с породой происходит её смачивание, приводящее к расходу электролита 7. За счёт сил гравитации и капиллярного эффекта раствор медного купороса 7 из полости медного электрода 9 через отверстия 10 и ткань малопроницаемого резервуара 3 равномерно насыщает материал эластичного элемента 2. При этом в процессе уменьшения объёма электролита 7 до минимального уровня при любом положении неполяризующегося электрода в горизонтальных или наклонных шпурах обеспечивается контакт внешней поверхности медного электрода с пропитанными медным купоросом материалом малопроницаемого резервуара 3 и пористым эластичным контактным элементом 2, что определяет стабильность потенциала собственной поляризации неполяризующегося электрода. После того, как электролит 7 будет полностью израсходован, его доливают при снятой пробке 5. В заявленном устройстве объём основной камеры, заполняемой электролитом, составляет 70–80 % внешнего объёма неполяризующегося электрода.

Таким образом, предложенное устройство обеспечивает максимальное повышение беззаправочного ресурса неполяризующегося электрода при измерениях в шпурах малого диаметра.

Совершенствование геофизических методов идёт в двух направлениях: расширение возможностей измерительной аппаратуры; развитие программно-методического обеспечения при обработке и интерпретации экспериментальных баз данных. Наиболее активно в настоящее время развиваются методы геоакустики и георадиолокации [117].

Георадиолокационное зондирование (высокочастотное электромагнитное сканирование) основано на отражении электромагнитных волн от неоднородностей, контрастных по диэлектрическим свойствам. Основная область применения георадаров – строительные изыскания с земной поверхности, локация коллекторов, трубопроводов и т.п [117].

Возможности георадиолокации для решения задач геомеханики, подземной, открытой и строительной геотехнологии исследованы недостаточно. Кроме технических трудностей, связанных с отсутствием аппаратуры в искробезопасном исполнении, экранированием контура выработки металлическими элементами крепи (рамы, арматура, затяжка), высоким уровнем электромагнитных помех в выработках из-за наличия кабельных ЛЭП и электросиловых установок, активное применение георадаров на шахтах сдерживается отсутствием методик и программного обеспечения для интерпретации подземных радарограмм.

Обнадёживающие результаты получены в ИГД Севера СО РАН, авторами предложено использовать при интерпретации георадиолокационных данных вейвлетпреобразований, включающих анализ измеренного радаром сигнала на разных частотах и масштабах [118]. Этот подход реализован для георадара «Тритон» с центральной частотой 30 МГц. Разработанные теоретические основы и физическое моделирование в данном диапазоне частот позволило реализовать данный метод при изучении мёрзлого массива горных пород, отличительной особенностью которого является заполнение пустот и пор породы как льдом, проявляющим диэлектрические свойства, так и электропроводящим талым раствором [119–121].

Проведены испытания георадара «ОКО-2» с антенным блоком на центральной частоте 400 МГц в условиях шахты «Талдинская-Западная». Зафиксированы

расслоения в кровле подготовительной выработки [117]. Вместе с тем следует отметить, что при интерпретации радарограмм авторы не учитывали указанные выше факторы, существенно влияющие на информативность георадиолокационного метода [122, 123].

В работе [120] изложены результаты использования георадара «ОКО-2» с антенным блоком АБ-1200. Основная проблема состояла в сильном влиянии на результаты зондирования полостей, заполненных водой с высокой проводимостью. Применение комплекса корректирующих операций (выравнивание амплитуд, преобразование Гильберта, горизонтальная фильтрация) позволили повысить информативность мониторинга.

В работе [124] предложена расчётная схема для проведения одномерной георадиолокации, включая математическую модель распространения электромагнитного сигнала в неоднородной среде, основанную на классических уравнениях электродинамики, результатом которой является построение карт изолиний отражённого сигнала от границы раздела слоёв.

Другое перспективное направление электромагнитного мониторинга связано с регистрацией естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ). Результатом развития теоретической, методической и элементной базы этого метода является аппаратный комплекс «Angel-M» [125, 126]. Испытания аппаратуры в горных выработках «Шахта им. С. М. Кирова» показали положительный результат [127]. Методика прогнозирования динамических проявлений горного давления, основанная на анализе амплитудно-частотных характеристик нестационарного сигнала, рекомендована отраслевыми нормативными и методическими документами.

После установления границ зоны повышенного сейсмоэнерговыведения на данном участке необходимо выполнить прогноз удароопасности по методу регистрации ЕЭМИ горных пород [117, 128–136]. Основными преимуществами данного метода являются мобильность, быстрота выполнения качественной оценки, низкая трудоёмкость.

В ходе выполнения оценки удароопасности по методу регистрации ЕЭМИ массива горных пород устанавливается фактическая опасность данного участка;

если ЕЭМИ массива превышает установленные критериальные значения, определенные для данного пласта, то для подтверждения склонности массива к удароопасности следует выполнить прогноз удароопасности прямым методом – по выходу буровой мелочи.

Диаграмма для прогноза удароопасности методом ЕЭМИ, обоснованная результатами реального прогноза на шахте «Осинниковская», приведена на рисунке 4.8, а номограмма для прогноза по выходу буровой мелочи – на рисунке 4.5.

В ходе выполнения локального прогноза удароопасности 2021.12.21 в забое конвейерного уклона 4-1-5-9 категория «опасно» была получена как по методу ЕЭМИ, так и по выходу бурового штыба. По методу ЕЭМИ превышение установленных критериальных значений было получено при направлении измерительной антенны геофизического комплекса «Angel-M» на левый борт выработки на удалении 1 м от забоя.

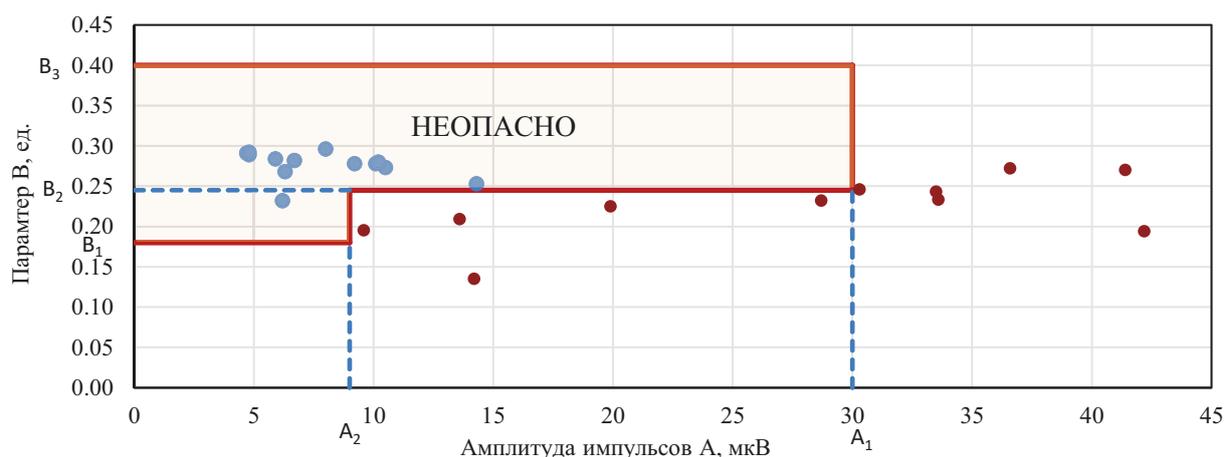


Рис. 4.8 – Диаграмма распределения параметров ЕЭМИ в забое конвейерного штрека 4-1-5-9 21.12.2021: ● – замеры ЕЭМИ, выполненные в забой и правый бок выработки; ● – замеры ЕЭМИ, выполненные в левый бок выработки;  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$  – прогностические параметры для категории «НЕОПАСНО» при проведении прогноза удароопасности комплексом «Angel-M» в проходческих забоях по пласту Е-5.

Для проведения комплексного и достоверного прогноза удароопасности на исследуемом участке предлагается организация контрольной станции, позволяющая проведение нескольких видов локального прогноза. Контрольная станция представляет собой участок выработки, на котором возможно выполнение описанных ранее локальных методов прогноза удароопасности и их сопоставление. Схема подготовки контрольной станции представлена на рисунке 4.9.

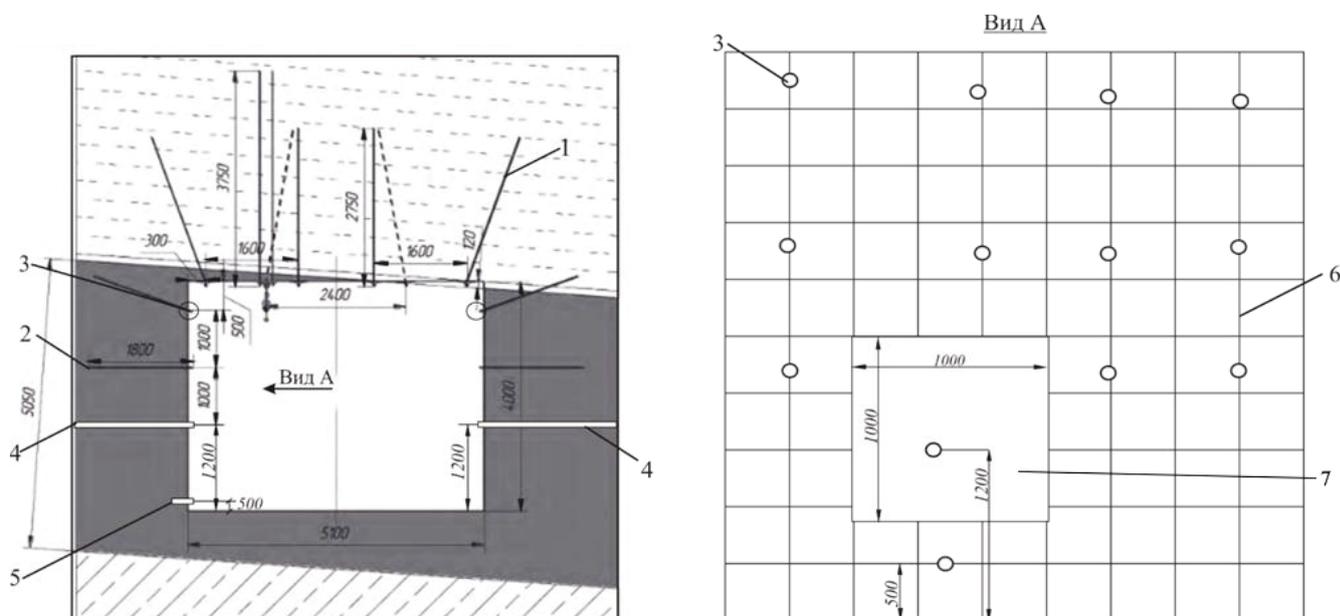


Рис. 4.9 – Схема подготовки контрольной станции: 1 – стальные анкеры; 2 – полимерные анкеры; 3 – приборы ПКА-3; 4 – контрольные шпуров; 5 – подбурок для заземления; 6 – сетчатая затяжка крепи; 7 – окно в сетчатой затяжке для одномерной георадиолокации георадаром «ОКО-2», для применения геопотенциалов  $\varphi$  и установки антенны аппаратуры «Angel-M»

Подготовка контрольной станции включает следующие операции:

- бурение контрольных шпуров 4 диаметром 30–35 мм глубиной 8–10 м с подъёмом 10–15 град. в оба бока выработки и подбурков 5 глубиной 0,4–0,5 м;
- установку приборов ПКА-3 для испытаний несущей способности анкеров в сводовой части выработки;
- закладку глубинных реперных станций (длина шпура должна превышать длину анкеров и минимум на 1 м ширину выработки) – на рисунке 4.9 не показано;
- закладку наблюдательных станций для определения конвергенции (бурение в почву выработки для установки почвенного репера) – на рисунке 4.9 не показано;
- освобождение участка бока выработки от сетчатой затяжки размером 1×1 м вокруг контрольного шпура.

#### 4.3 Внедрение результатов исследований при ведении горных работ на угольных шахтах и рудниках России и ближнего зарубежья

Результаты исследований внедрены в производство при ведении горных работ на угольных шахтах и рудниках Республики Коми, Кемеровской области, Республики Саха (Якутия), а также в Республике Казахстан, Карагандинская область

(далее РК): СП «Шахта Комсомольская», СП «Шахта Заполярная-2», шахта «Есaulьская», подземный рудник «Интернациональный», шахта «Таштагольская», шахта «Денисовская», «Шахта Им. В. И. Ленина» (РК), шахта «Саранская» (РК), шахта «Тентекская» (РК). Результаты использования разработанных рекомендаций представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

## Использование разработанных рекомендаций

№	Объект, № договора	Горно-геологические и горно-технические условия	Результаты
1	Шахта угольная «Комсомольская» АО «Воркутауголь», договор №9000091757 от 30.03.2019 г.	Пласты «Тройной» и «Четвёртый» угрожаемые с отм. +50 м до -270 м, опасные с отм. -270 м	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Разработана техническая документация на внедрение системы;</li> <li>– Проведены монтажные и пуско-наладочные работы;</li> <li>– Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности;</li> <li>– Определены значения критериев удароопасности; разработаны рекомендации по прогнозированию ДЯ</li> </ul>
2	Шахта угольная «Заполярная-2» АО «Воркутауголь», блок «Шахта Заполярная» и блок «Шахта Воркутинская» Договор №9000106862 от 14.04.2020 г. Договор №9000119462 от 22.04.2021 г.	В границах блока «Шахта Воркутинская» пласт «Четвёртый» угрожаемый с отм. -238 м, опасный с отм. -610 м (блок Северный), опасный с отм. -660 м (блок Центральный). Блок «Шахта Заполярная» пласт «Тройной» угрожаемый с отм. -95 м до -345 м, опасный с отм. -345 м. Пласт «Четвёртый» угрожаемый с отм. -95 м, опасный с отм. -834 м	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Разработана техническая документация на внедрение системы;</li> <li>– Проведены монтажные и пуско-наладочные работы;</li> <li>– Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности;</li> <li>– Определены значения критериев удароопасности; разработаны рекомендации по прогнозированию ДЯ</li> </ul>
3	Шахта Им. В. И. Ленина угольного департамента АО «АРСЕЛОРМИТТАЛ ТЕМИРТАУ» (Казахстан), Договор № R12348 от 11.05.2022 г.	Низкая устойчивость пород кровли и почвы угольных пластов, невыдержанная мощность пластов, газоопасность, выбросоопасность, большие водопритоки в совокупности определяют сложные горно-геологические условия отработки угольных пластов. Шахта отнесена к опасным по внезапным выбросам угля и газа	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Разработана техническая документация на внедрение системы;</li> <li>– Проведены монтажные и пуско-наладочные работы;</li> <li>– Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности</li> </ul>
4	Шахта Тентекская угольного департамента АО «АРСЕЛОРМИТТАЛ ТЕМИРТАУ» (Казахстан), Договор № R12348 от 11.05.2022 г.	Поле шахты отнесено ко 2-ой группе сложности. Шахта отнесена к опасным по внезапным выбросам угля и газа. Породы непосредственной кровли и почвы представлены неустойчивыми и слабоустойчивыми плитчатыми аргиллитами, которые независимо от залегания, при увлажнении легко отслаиваются, вспучиваются в почве. Устойчивость пород в зонах дробления разрывных нарушений значительно снижается	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Разработана техническая документация на внедрение системы;</li> <li>– Проведены монтажные и пуско-наладочные работы</li> <li>– Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности</li> </ul>
5	Шахта Саранская угольного департамента АО «АРСЕЛОРМИТТАЛ	Непосредственная кровля угольных пластов сложена трещиноватыми аргиллитами, алевролитами с низкой механической прочностью и лёгкой размокаемостью, неустойчивая. Основная кровля сложена	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Разработана техническая документация на внедрение системы;</li> <li>– Проведены монтажные и пуско-наладочные работы;</li> </ul>

## Использование разработанных рекомендаций

№	Объект, № договора	Горно-геологические и горно-технические условия	Результаты
	ТЕМИРТАУ» (Казахстан), Договор № R12348 от 11.05.2022 г.	мощной толщей монолитных песчаников. Непосредственная почва представлена аргиллитами с низкой несущей способностью. Вскрыто до 80 малоамплитудных нарушений взбросового и сбросового характера с амплитудами смещения 0,5–5,0 м	– Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности
6	Шахта угольная «Денисовская» АО ГОК «Денисовский» Договор №41246 от 04.04.2023 г.	Сейсмичность района 8 баллов. Залегание пласта К4 осложнено многочисленными разрывными нарушениями. Ложная кровля неустойчивая. Непосредственная кровля тяжёлая, средней устойчивости. В зонах тектонических нарушений и при сильном обводнении кровля неустойчивая, склонна к отслоениям и вывалам на мощность до 4,5 м. Склонность к горным ударам с глубины 300 м	– Проведены монтажные и пуско-наладочные работы; – Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности
7	шахта угольная «Есаульская» ООО «Распадская угольная компания» Договор № ДП-11-05/19 от 08.05.2019 г.	Пласт 29а угрожаемый по горным ударам с глубины 200 м; угрожаемый по внезапным выбросам угля и газа с глубины 420 м; угрожаемый по внезапному выдавливанию угля с глубины 420 м. Пласт 26а угрожаемый по горным ударам с глубины 200 м; угрожаемый по внезапным выбросам угля и газа с глубины 450 м; угрожаемый по внезапному выдавливанию угля с глубины 450 м	– Разработана техническая документация на внедрение системы; – Проведены монтажные и пуско-наладочные работы; – Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности; – Определены значения критериев удароопасности; разработаны рекомендации по прогнозированию ДЯ
8	ПР «Интернациональный» АК «АЛРОСА» (ПАО) Договор № 6101038010 от 18.08.2020 г Договор № 6101066063 от 18.08.2023 г.	Вмещающий массив горных пород месторождения трубки «Интернациональная» с глубины ниже 1410 м (абс. отм. -1010 м) склонный к горным ударам	– Разработана техническая документация на внедрение системы; – Проведены монтажные и пуско-наладочные работы; – Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности; – Определены значения критериев удароопасности; разработаны рекомендации по прогнозированию ДЯ
9	Шахта Таштагольская АО «ЕВРАЗ ЗСМК» Договор № ДГЗС7-025341 от 01.08.2019 г.	Динамические проявления горного давления в форме стрельяния отмечаются с глубины 300 м, с глубины 600 м горные удары различной интенсивности. Участки «Восточный» и «Северо-Западный» с горизонта -70 м, а участок «Юго-Восточный» отнесены к опасным по горным ударам	– Разработана техническая документация на внедрение системы; – Проведены монтажные и пуско-наладочные работы; – Разработана методика первичной обработки и определения интегральных показателей сейсмической активности; – Определены значения критериев удароопасности; разработаны рекомендации по прогнозированию ДЯ

Рекомендации по прогнозированию удароопасности для всех предприятий принципиально включают в себя следующее: определяются значения сейсмической энергии для крупного и пограничного сейсмического события; определяется

понятие «серия пограничных событий» – количество сейсмособытий происходящих друг за другом через короткий промежуток времени (до 30 минут); условия автоматической рассылки уведомлений при регистрации крупного сейсмического события; действия оператора сейсмического прогноза, диспетчера, главного инженера и службы прогноза динамических явлений предприятия при регистрации крупного сейсмического события; действия оператора сейсмического прогноза, диспетчера, главного инженера и службы прогноза динамических явлений предприятия при установлении различных уровней параметров сейсмической активности  $F$ ,  $N$ ,  $E$ .

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [111, 116, 117].

### Выводы

1. Рациональное сочетание геофизических и прямых методов прогноза удароопасности участков угольных пластов обеспечивается алгоритмом, включающим региональный прогноз по комплексному параметру сейсмической активности  $F$  с построением карт изолиний, определением категории опасности по максимальным значениям  $F$  (или интегрального показателя  $I_F$ ) и расстоянию  $x_F$  по нормали от точки максимума до ближайшей открытой поверхности, установлением границ опасного участка по пересечению изолинии критического уровня  $F_{кр}$  с поверхностью обнажения, проведение в соответствии с нормативными документами геофизического и прямого локального (текущего) прогноза в пределах установленных границ.

В качестве примера реализации данного алгоритма проведена оценка изменения параметров зон сейсмоактивности при пересечении забоем лавы трех аномальных зон. При этом в течение 10 суток размер опасного участка изменился в диапазоне  $\Delta x = 20,5-112$  м, а комплексный параметр – в диапазоне  $F_{max} \cdot \Delta x = 500-30000$  ед.

Данную методику регионального сейсмического прогноза целесообразно использовать также при определении границ зон локального (текущего) прогноза вне-

запных выбросов угля и газа, выдавливания угля и динамических разрушений пород почвы.

2. Для реализации общего алгоритма прогноза удароопасности рассмотрены перспективы и разработаны конкретные рекомендации по применению следующих методов локального и текущего прогноза: по выходу буровой мелочи; геоэлектрических потенциалов; георадиолокации; регистрации естественного электромагнитного излучения:

– в соответствии с рекомендуемой Инструкцией [29] схемой бурения скважин локального прогноза для условий шахты «Осинниковская» получены критериальные значения номограммы для определения категории опасности;

– для реализации метода геоэлектрических потенциалов предложено устройство неполяризующегося электрода для измерений в шпурах малого диаметра (защищено патентом РФ);

– для аппаратуры «Angel-M» регистрации естественного электромагнитного излучения разработаны рекомендации по методике измерений и экспериментальная номограмма для условий шахты «Осинниковская».

Предложена схема подготовки контрольной станции для реализации инструментального локального и текущего прогноза указанными выше методами.

3. Результаты выполненных исследований внедрены в производства при организации систем сейсмического мониторинга на шахтах Кузбасса, Воркуты, Казахстана, Якутии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, включающие алгоритмы обработки цифровой сейсмической информации, закономерности динамики сейсмических и геомеханических процессов при отработке угольного пласта в изменяющихся горнотехнических условиях, комплексный метод и количественные критерии прогноза удароопасности на основе данных системы сейсмического мониторинга, обеспечивающие повышение точности прогноза, способствующие повышению безопасности ведения горных работ.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему.

1. Актуальность совершенствования методов и систем прогнозирования удароопасности обусловлена большим объёмом динамических явлений и обрушений горных пород при интенсивной отработке угольных пластов, а также высокой погрешностью расчёта координат очагов сейсмособытий, отсутствием информативных интегральных цифровых показателей сейсмической активности массива, недостаточной изученностью закономерностей динамики сейсмических и геодинамических процессов при отработке угольного пласта в изменяющихся горно-геологических условиях, отсутствием методов и количественных критериев прогноза, увязанных с классическими геомеханическими критериями, определяющими вероятность разрушения приконтурной части массива в динамической форме.

2. Повышение точности расчёта координат источника сейсмособытия обеспечивается алгоритмом точечной локации SPAM, основанном на циклическом подборе координат расчётной точки путём минимизации невязки между фактическими и расчётными параметрами сейсмической волны, а также алгоритмом метода наименьших квадратов с минимизацией целевой функции методом адаптивного поиска с использованием случайных чисел.

Повышение информативности сейсмического прогноза обеспечивается использованием комплексного параметра  $F$ , включающего отношение энергии сейсмических событий к фоновому уровню и суммарную сейсмическую активность за

расчётный интервал времени, а также универсального интегрального показателя  $I_{\Pi}$ , включающего суммирование средних значений параметров  $\Pi_i$  и площадей зон, ограниченных изолиниями  $\Pi_i$ .

3. Исследование закономерностей сейсмических и геомеханических процессов при отработке угольного пласта, вмещающего неоднородности в форме тектонических нарушений и зон передовых выработок, выполнено комплексным методом, включающим: сейсмический мониторинг системой GITS, обеспечивающий регистрацию событий, определение координат их источников, расчёт комплексного энергетического параметра, интегрального показателя и построение карт сейсмической активности; установление закономерности динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта, неоднородного по физическим свойствам, путём совместного анализа баз данных методами сейсмического мониторинга, выхода бурового штыба и геомеханического моделирования СибГИУ; обоснование новых принципов, качественных и количественных критериев геодинамического прогноза удароопасности по данным сейсмического мониторинга.

4. В условиях пласта Елбанский–5 шахты «Осинниковская» при отработке выемочного столба 4-1-5-7 в районе тектонического нарушения установлено, что при пересечении лавой зон тектонических нарушений и передовой выработки комплексный сейсмический параметр  $F$  увеличивается с 50-100 до 300–450, а его интегральный показатель  $I_F$  – с 17–27 до 188. Статистическая обработка баз данных показала, что информативность интегрального показателя составила  $J_{I_F} = 1,008$ , что более чем в 1,4 раза выше, чем у локального  $F$  ( $J_F = 0,693$ ). Между максимальными значениями комплексного сейсмического параметра  $F$  и коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта  $K_{\sigma}$ , а также их интегральными показателями выявлены близкие к линейным значимые регрессионные зависимости.

5. На основе баз данных сейсмического и геомеханического мониторинга методом выхода буровой мелочи разработаны номограммы для регионального прогноза удароопасности по двум параметрам:  $F_{\max}$  ( $I_F$ ) и расстоянию  $x_F$  до точки со значением  $F_{\max}$ . Диапазоны изменения информирующих параметров составили:  $F_{\max} = 30–420$ ;  $I_F = 17–188$ ;  $x_F = 5,0–58,0$  м. Уравнение разграничительной линии

номограммы «опасно-неопасно» имеет вид параболической функции  $y = k \cdot \sqrt{x/a}$ . Рациональные значения константы  $a$  установлены по точке изгиба графика функции точности прогноза  $V(a)$ , при этом точность прогноза для установленных значений  $a$ , определяющих расположения разграничительных линий, составила 83% – 88%.

6. Рациональное сочетание геофизических и прямых методов прогноза удароопасности участков угольных пластов обеспечивается алгоритмом, включающим региональный прогноз по комплексному параметру сейсмической активности  $F$  с построением карт изолиний, определением категории опасности по максимальным значениям  $F$  (или интегрального показателя  $I_F$ ) и расстоянию  $x_F$  по нормали от точки максимума до ближайшей открытой поверхности, установлением границ опасного участка по пересечению изолинии критического уровня  $F_{кр} > 200$  с поверхностью обнажения, проведение в соответствии с нормативными документами геофизического и прямого локального (текущего) прогноза в пределах установленных границ. На опытном участке опасный интервал при пересечении лавой аномальной зоны в течении 10 суток изменялся в диапазоне  $\Delta x = 20,5-112,0$  м.

Для реализации общего алгоритма прогноза удароопасности на основе сейсмического мониторинга даны следующие рекомендации по применению методов локального (текущего) прогноза: для метода выхода буровой мелочи получены критические значения номограммы для условий шахты «Осинниковская»; для метода геоэлектрических потенциалов разработано устройство неполяризующегося электрода для измерений в шпурах малого диаметра; для метода георадиолокации теоретически обоснована концепция перехода от традиционной двумерной радарограммы к одномерной; для аппаратуры «Ангел-М» регистрации естественного электромагнитного излучения обоснованы критериальные значения номограммы для условий шахты «Осинниковская»; предложена схема подготовки контрольной станции для реализации инструментального локального (текущего) контроля указанными выше методами.

7. Результаты выполненных исследований внедрены в производства при организации систем сейсмического мониторинга на шахтах Кузбасса, Воркуты, Казахстана и Якутии.

Основные направления дальнейших исследований: технические и программные разработки, повышающие эффективность работы сейсмических систем геомониторинга; выявление особенностей динамики сейсмоактивности углепородного массива в условиях шахт Кузбасса с учётом влияния технологических параметров интенсивной отработки и районирования горно-геологических условий; детализация диапазонов критериальных значений регионального и локального геофизического прогноза динамических проявлений горного давления.

## Список литературы

1. Совершенствование технологических схем отработки склонных к самовозгоранию пластов угля, опасных по горным ударам / А. А. Сидоренко, П. Н. Дмитриев, В. Ю. Алексеев, С. А. Сидоренко // Записки Горного института. – 2023. – Т. 264. – С. 949-961.
2. Сластунов, С. В. Обоснованный выбор технологии пластовой дегазации для обеспечения безопасности подземных горных работ при интенсивной добыче угля / С. В. Сластунов, Е. П. Ютяев // Записки Горного института. 2017. Т.223. С. 125-130. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.125
3. Chemezov, E. N. Industrial safety principles in coal mining / E. N. Chemezov // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 240. – P. 649-653. – DOI 10.31897/PMI.2019.6.649.
4. Rudakov, M. L. Assessment of environmental and occupational safety in mining industry during underground coal mining / M. L. Rudakov, K. A. Kolvakh, I. V. Derkach // Journal of Environmental Management and Tourism. – 2020. – Vol. 11, No. 3(43). – P. 579-588. – DOI 10.14505/jemt.v11.3(43).10
5. Клишин, В. И. Комплексный метод снижения удароопасности на угольных шахтах / В. И. Клишин, Г. Ю. Опрук, А. А. Черепов // Уголь. – 2018. – № 9(1110). – С. 56-63. – DOI 0.18796/0041-5790-2018-9-56-62
6. Николаев, П. Н. Методика тектонодинамического анализа / под ред. Н. И. Николаева. – М.: Недра, 1992. – 295 с
7. Sylvester G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Am. Bull.. 1988. Vol. 100, No 31.P. 1666-1703
8. Naylor M. A., Mandl G., Sijpesteijn C. H. K. Fault geometries in basementinduced wrench faulting under different initial stress states // J. Struct. Geol. 1986. Vol. 8. P. 737-752
9. Becker G. F. Finite homogeneous strain, flow and rupture of rocks. Bull. Geol. Soc. of America, Vol. 4, 1893
10. Ажгирей, Г. Д. Структурная геология. – М.: МГУ, 1956. – 493 с
11. Лизс Ч. Структурная геология. – М.: Государственное объединённое научно-техническое издательство НКТП СССР, 1935. – 286 с
12. Mead W. J. The geological role of dilatancy // Journal Geological. – vol. 33. – 1925. – P. 678-685
13. Гзовский, М. В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975
14. Попков, Ю. Н. Информационные технологии в горном деле : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Шахтное и подземное строительство" направления подготовки "Горное дело" / Ю. Н. Попков, А. Ю. Прокопов, М. В. Прокопова ; Ю. Н. Попков, А. Ю. Прокопов, М. В. Прокопова ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Южно-Российский гос. технический ун-т (Новочеркасский политехнический ин-т), Шахтинский ин-т (фил.). – Новочеркасск : Шахтинский ин-т ЮРГТУ, 2007. – 201 с. – ISBN 978-5-88998-739-0.
15. Белоусов, В. В. Основные вопросы геотектоники. – М., 1962; Гзовский М. В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975.
16. Пейве, А. В. Глубинные разломы в геосинклинальных областях //Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1945. – № 5

17. Хаин В. Е., Шейнманн Ю. М. Сто лет учения о геосинклиналях // Советская геология. – 1960. – № 11
18. Горные удары / С. Г. Авершин. – М. : Углетехиздат, 1955. – 210 с
19. Еременко, В. А. Природные и техногенные факторы возникновения горных ударов при разработке железорудных месторождений западной Сибири / В. А. Еременко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 11. – С. 50-59.
20. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Ленинград : Издательство "Недра", 1989. – 488 с. – ISBN 5-247-00485-5.
21. Ahorner, L. Ein untertagiges Überwachungssystem in Kalibergwerk Haitorf zur langzeiterfassung von seismischen Ereignissen im Werra-Kaligebiet / L. Ahorner, H.-G. Sobisch // Rali und Steinsalz. – 1988. – Band 10, Heft 2. – P. 38-40.
22. Koza, J. Digital Seismic System Used for Registration of Mining Tremors and Strain in Polish Coal and Copper Mines / J. Koza // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam. Brookfield, 1997. – P. 145-147.
23. Ortlepp, W. D. A review of the contribution to the understanding and control of mine rockbursts / W. D. Ortlepp // Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings; 9 – 11 March, 2005. – Perth Australia, 2005. – P. 3–20.
24. Ortlepp, W. D. Rock Fracture and Rockbursts - An Illustrative Study: monograph Series M 9. – South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997. – 126 p.
25. Richardson, E. Some properties of gold-mine seismicity and implications for tectonic earthquakes / E. Richardson, T. H. Jordan // Rockbursts and Seismicity in Mines – RaSIM5, SAIMM, Symposium Series S27. – Johannesburg, 2001. – P. 149-156.
26. Riemer, K. L. Mining Seismicity in the Witwatersrand Basin: Monitoring, Mechanisms and Mitigation Strategies in Perspective [Text] / K. L. Riemer, R. J. Durrheim // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2011. – № 3. – P. 250-259.
27. Spies, Th. Acoustic emission measurements as a contribution for the evaluation of stability in salt rock / Th. Spies, D. Meister, J. Eisenbltter // Rockbursts and seismicity in mines. – Rotterdam. Brookfield, 1997. – P. 135-141.
28. Петухов, И. М. Геофизические исследования горных ударов / И. М. Петухов, В. А. Смирнов, В. Ш. Винокур, А. С. Дальнов. — Москва : Недра, 1975. — 134 с.
29. Приказ Ростехнадзора от 10.12.2020 № 515 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» (Зарегистрировано в Минюсте РФ от 30.12.2020 № 61949)
30. Костеренко, В. Н. Анализ причин обрушений с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий / В. Н. Костеренко, О. В. Воробьева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 6. – С. 74-90.

31. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Сибирское отделение: официальный сайт. – Кемерово, 2024. URL: <http://usib.gosnadzor.ru/info> (дата обращения 17.05.2024)
32. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород // М.: МГГУ, – 2012. – 111 с.
33. Серяков В. М., Риб С. В., Фрянов В. Н. Напряженно-деформированное состояние угольного целика при переходе очистным механизированным комплексом зоны геологического нарушения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 32-40
34. Серяков В. М., Риб С. В., Басов В. В., Фрянов В. Н. Геомеханическое обоснование параметров технологии отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 6. – С. 21-29
35. Zhang J., Gao S., He Y., Yang T., Li T., Yan Y., Sun J. Study on the Upper Limit of Roof Failure in Soft Rock Roadway // Shock and Vibration. – 2023. – Vol. 2. – P. 1-20. – DOI: 10.1155/2023/3837106
36. Еременко В. А., Аксенов З. В., Пуль Э. К., Захаров Н. Е. Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы MAP3D // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 5. – С. 91-104.
37. Гоголин В. А. Деформационные и прочностные характеристики хрупких горных пород при сжатии // Вестник КузГТУ. – 2016. – №3. – С. 3–7.
38. Цветков А. Б., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Нелинейная математическая модель геомеханического состояния углепородного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 5. – С. 365–370.
39. Корнев Е. С., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов методом конечных элементов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 2(96). – С. 65-69.
40. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. «Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов» / Е. С. Корнев, Л. Д. Павлова, В. Н. Фрянов; Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2012. – № 17997; дата регистрации 01.03.2012
41. Басов, В. В. Геомеханическое обоснование параметров сопряжений подземных горных выработок в зоне влияния очистного забоя /25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Басов Вадим Викторович, 2021. – 135 с.

42. Корнев Е. С., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Исследование устойчивости выемочных столбов и кровли очистных заходок при камерно-столбовой системе разработки // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2014. – № 1. – С. 113-118.

43. Черепов, А. А. Геомеханическое обоснование параметров систем разработки короткими забоями склонных к горным ударам мощных угольных пластов: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Черепов Андрей Александрович, 2019. – 135 с.

44. Простов С. М. Физико-технический контроль и мониторинг процессов горного производства: учебное пособие // Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово. – 2020. – 178 с.

45. Абдрахманов, М. И. Применение алгоритмов кластеризации для экспресс-анализа сейсмических данных / М. И. Абдрахманов, С. Э. Лапин, И. В. Шнайдер // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 27-44. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-06-0-27-44.

46. Обзор геофизических методов, применяемых при поиске геомеханических нарушений вблизи горных выработок / В. В. Романов, А. И. Посеренин, А. И. Дронов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №1. – С. 243-248.

47. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity // Geophysics, vol. 84, No 1 (January/February 2019), P. B41—B57

48. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data. A case history from China // Geophysics, vol. 81, No 5 (September/October 2016); Pp. B149—B165

49. Технология МСП – малоканальное сейсмическое профилирование на базе МОВСР. / И. П. Башилов, Л. С. Загорский, Д. Л. Загорский и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №9. – С. 128-139.

50. Дорохин, К. А. Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D и 3D-построений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 80-88. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-05-0-80-88.

51. Kubrin, S. S. Intelligent dynamic hazard prediction system for production areas in coal mines / S. S. Kubrin, E. I. Zhuravlev // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2018. – No. 3. – P. 40-45. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-3-0-40-45.

52. Линдин Г. Л., Лобанова Т. В. Энергетические источники горных ударов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 1. – С. 42-50.

53. Линдин Г. Л., Лобанова Т. В. Особенности сейсмоактивности Таштагольского месторождения перед горными ударами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 70-79.

54. Корчак, П. А. Методика получения исходных данных для обеспечения сейсмического мониторинга на подземных рудниках ОАО "Апатит" / П. А. Корчак, С. А. Жукова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 10. – С. 15-20.

55. Журавлева, О. Г. Комплексование сейсмических данных и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива в удароопасных условиях / О. Г. Журавлева, И. М. Аветисян, А. В. Земцовский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 173-183.

56. Разработка многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга удароопасного массива горных пород / И. Ю. Рассказов, А. В. Гладырь, Е. А. Кателла, В. И. Мирошников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 113-120.

57. Zhang, M., S. Liu, S. Chen, Y. Chen, G. Xu, and D. Qian. Focus Energy Determination of Mining Microseisms Using Residual Seismic Wave Attenuation in Deep Coal Mining, *Hindawi Shock and Vibration*, vol. 2018. – 2018. – P. 13.

58. Zhebel, O. Simultaneous Microseismic event localization and source mechanism Determination / O. Zhebel and L. Eisner // *Geophysics*, vol. 80, no. 1 – 2015. – P. KS1–KS9.

59. Chambers, D. J. A. Application of subspace detection on a surface Seismic network monitoring in Deep Silver Mine, in J. Wesseloo (Editor) / D. J. A. Chambers, M. S. Boltz, J. R. Richardson and S. A. Finley // *Proc. Of Eight International Conf. on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre of Geomechanics, Perth, Australia – 2017. – P. 141-154.

60. Ломов, М. А., Константинов А. В. Анализ результатов сейсмического мониторинга Кукисвумчоррского месторождения // *Проблемы недропользования*. – 2022. – № 1(32). – С. 38-44. – DOI 10.25635/2313-1586.2022.01.038

61. Ломов М. А., Сидляр А. В., Константинов А. В., Грунин А. П. Геомеханические проблемы отработки нижних горизонтов месторождения Южное (Приморский край) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 12-2. – С. 87-99. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2023\_122\_0\_87

62. Ломов М. А., Сидляр А. В., Константинов А. В., Грунин А. П. Совершенствование программно-аналитических средств системы сейсмоакустического мониторинга удароопасности «PROGNOZ-ADS» // *Цифровые технологии в горном деле: Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, Апатиты, 13–16 июня 2023 года*. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2023. – С. 26.

63. Грунин, А. П., Сидляр А. В., Косматов С. Б. Снижение погрешности локации сейсмоакустических событий в системе геомеханического мониторинга массива горных пород «Prognoz-ADS» // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. – 2024. – № 1(72). – С. 13-20.

64. Копылов, К. Н. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений / К. Н. Копылов, О. В. Смирнов, А. И. Кулик // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – № S7. – С. 574-583.

65. Контроль призабойной части массива по параметрам акустического сигнала / О. В. Смирнов, А. И. Кулик, Г. И. Колчин, В. И. Шилов // Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки, Екатеринбург, 06 апреля – 07 2016 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 31-38.

66. Кубрин, С. С. Контроль геодинамического и газодинамического состояния массива горных пород / С. С. Кубрин, Е. И. Журавлев // Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки, Екатеринбург, 06 апреля – 07 2016 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 19-25.

67. Патрушев Ю. В., Шнайдер И. В. Обзор методов и технологий сейсмических систем контроля состояния устойчивости горного массива в подземных условиях // Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки, Екатеринбург, 06 апреля – 07 2016 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 65-70.

68. Зудилин А. Э., Черепанов В. П. Функционал системы Микон-гео на региональном и локальном уровнях контроля и прогноза риска развития геодинамических явлений // Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки, Екатеринбург, 06 апреля – 07 2016 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016. – С. 106-110.

69. Креницын, Р. В. Геодеформационный полигон и геомеханические исследования на шахте Магнитовая / Р. В. Креницын // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 105-115. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-105-115.

70. Разумов, Е. Е. Геофизический прогноз удароопасности при ведении горных работ / Е. Е. Разумов, Г. Д. Рукавишников, В. К. Климов // Россия молодая : Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года / Редколлегия: К. С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2021. – С. 10908.1-10908.6.

71. Бутырин, П. Г. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.06>

72. Система сейсмического мониторинга GITS // Уголь. – 2014. – № 10(1063). – С. 13.

73. Гладырь, А. В. Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля / А. В. Гладырь // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 6. – С. 220-234.

74. Копылов, К. Н. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений / К. Н. Копылов, О. В. Смирнов, А. И. Кулик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S7. – С. 574-583.

75. Испытания автоматизированной системы акустического контроля состояния массива горных пород / К. Н. Копылов, О. В. Смирнов, А. И. Кулик, П. В. Потапов // Уголь. – 2015. – № 7(1072). – С. 44-47.

76. Смирнов, О. В. Перспективы применения акустического контроля состояния массива горных ударов и прогноза динамических явлений / О. В. Смирнов, А. И. Кулик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 5. – С. 352-359.

77. Смирнов, О. В. Прогноз геологических нарушений по параметрам акустического сигнала. / О. В. Смирнов, А. И. Кулик, Е. А. Ленин. // Уголь. – 2015. – № 11. – С. 76-79.

78. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга при отработке удароопасных угольных пластов / Е. Е. Разумов, Г. Д. Рукавишников, С. Н. Мулев, С. М. Простов // Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 8-12. – DOI 10.17580/gzh.2021.01.02.

79. Разумов, Е. Е. Экспериментально-аналитическое исследование динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта в районе тектонического нарушения / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, О. А. Петрова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 102-118. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_3\_0\_102.

80. Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный» / А. А. Вьюнников, Н. В. Хоютанова, К. В. Романевич, С. Ф. Панин, Е. Е. Разумов // Горная промышленность. – 2024. – № S3. – С. 26-31. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31.

81. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчётными методами на шахтах АО "Воркутауголь" / С. Н. Мулев, Г. Д. Рукавишников, Д. И. Мороз [и др.] // Уголь. – 2022. – № 12(1161). – С. 88-93. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.

82. Алгоритмы обработки сейсмической информации / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, С. Н. Мулев, Г. Д. Рукавишников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 17-29. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_2\_0\_17.

83. Касахара, К. Механика землетрясений. – Москва: МИР, 1985. -264 с.

84. Сабовский, М. А. Блочно-иерархическая модель горной породы и её использование в задачах сейсмологии // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясений. – Москва: Наука, 1989. – С. 5-13.

85. Сторчеус, А. В. О расчёте сейсмической энергии землетрясений и взрывов // Вулканология и сейсмология. – 2011. - №5. – С. 49-59.

86. Ломакин В. С. Региональный прогноз удароопасности на основе сейсмологических исследований. Дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. Л.: ВНИМИ, 1984.

87. Джонс М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях, - Москва: ДМК Пресс, 2004. – 312 с.

88. Елкин Д. И. Метод отжига / Д. И. Елкин, А.С. Тяхти // - Москва: Мир, 2008. – 48 с.

89. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610907. Метод определения координат очага динамического явления при сейсмическом мониторинге / Е. Е. Разумов, С. М. Простов. – № 2024610907; Заявл. 29.12.2023; Зарегистр. 16.01.2024.

90. 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. – С. 34-47.

91. Анализ сейсмической активности массива при ведении горных работ на шахте "Комсомольская" АО "Воркутауголь" / Е. Е. Разумов, Г. Д. Рукавишников, С. Н. Мулев, С. М. Простов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 1. – С. 104-114. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_1\_0\_104.

92. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681203. Расчет интегрального показателя для параметров сейсмической активности / Е. Е. Разумов, С. М. Простов. – № 2023681203; Заявл. 29.09.2023; Зарегистр. 11.10.2023.

93. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И. и др. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть I: Формулировка и обоснование задачи исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №1. – С.5-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25; Часть II: Динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоземиссионные процессы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №11. – С.5-26. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26; Часть III: Перспективные системы контроля деформационно-волновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №12. – С.5-29. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-05-29

94. Иванов В. В., Егоров П. В., Пимонов А. Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений // ФТПРПИ. – 1990. – №4. – С.59-74

95. Журавлева О. Г., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Комплексирование сейсмических данных и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива в удароопасных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №4. – С.173-183

96. Yamshchikov V. S., Voznesenskij A. S. Information basis for controlling geometrical processes // Journal of Mining Science. – 1994. – Т. 30. -№ 3. – С. 229-237.

97. Вознесенский, А. С. Системы контроля геомеханических процессов : Учеб. пособ. / А. С. Вознесенский. – Москва : Горная книга (МГГУ), 2002. – 152 с. – ISBN 5-7418-0008-4.

98. Простов, С. М. Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов / С. М. Простов, О. В. Герасимов, Н. Ю. Никулин. – Томск : Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2015. – 344 с.

99. Турчанинов И. А., Панин В. И. Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве // – Ленинград: «Наука» Ленинградское отделение. – 1976. – 164 с.

100. Хямяляйнен В. А., Простов С. М., Сыркин П. С. Геоэлектрический контроль разрушения и инъекционного упрочнения горных пород // – Москва: Издательство "Недра". – 1996, – 288 с.

101. Разумов, Е. Е. Реализация методики комплексного исследования геомеханических процессов при отработке угольного пласта / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, О. А. Петрова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 9. – С. 142-159. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_9\_0\_142.

102. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: Справочник / Г. Г. Штумпф, Ю. А. Рыжков, В. А. Шаламанов, А. И. Петров. - Москва : Недра, 1994. - 447 с.

103. Фрянов В. Н., Лукин К. Д., Петрова О. А., Шеховцова В. О., Фрянова О. В. Математическое моделирование процессов формирования напряжений и повреждений в геотектонических активных зонах углепородного массива под влиянием подземных горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 8. – С. 131-138.

104. Никитина А. М., Фрянов В. Н. Геомеханическое обеспечение устойчивости горных выработок в неоднородном углепородном массиве. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – 199 с.

105. Программа подготовки данных для проведения расчетов геомеханических параметров угольных шахт методом конечных элементов / В. Н. Фрянов, Ю. А. Степанов // Свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ № 2000610937; Заявка № 2000610798 от 24.06.2000. Зарегистр. 21.09.2000. – М.: Роспатент, 2000.

106. Программа расчета геомеханических параметров для исследования взаимодействия секции механизированной крепи с углепородным массивом / А. В. Степанов, В. Н. Фрянов, Ю. А. Степанов // Свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ № 2001610645; Заявка №2001610402 от 02.04.2001. Зарегистр. 31.05.2001. – М.: Роспатент, 2001.

107. Златицкая Ю. А., Фрянов В. Н. Геомеханическое обоснование параметров опасных зон и технологии упрочнения пород в окрестности подземных горных выработок. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 160 с.

108. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221с.

109. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР: Утв. М-вом угольной пром-сти СССР 26.12.84. - 4-е изд., доп. - Ленинград: ВНИМИ, 1986. – 220 с.

110. Разумов Е. Е., Простов С. М., Петрова О. А. Использование критериев геодинамического прогноза по данным сейсмического мониторинга при отработке угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 139–151. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_139.

111. Разумов, Е. Е. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, Е. А. Шабанов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 8. – С. 174-186. – DOI 10.18799/24131830/2024/8/4420.

112. Егоров, А. П. К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасности ведения горных работ на угольных шахтах / А. П. Егоров, В. А. Рыжов // Уголь. – 2019. – № 10(1123). – С. 29-33. – DOI 10.18796/0041-5790-2019-10-29-33.

113. Тарасов, Б. Г. Геоэлектрический контроль состояния массивов / Б. Г. Тарасов, В. В. Дырдин, В. В. Иванов. – Москва : Недра, 1983.- 216 с.

114. Хямяляйнен, В. А. Геоэлектрический контроль разрушения и инъекционного упрочнения горных пород / В. А. Хямяляйнен, С. М. Простов, П. С. Сыркин.- Москва : Недра, 1996. – 288 с.

115. Простов, С. М. Методы и средства геоэлектрического контроля.- Кемерово, 2013. – 165 с.

116. Патент на изобретение №RU 2 730 400 С1. неполяризуемый электрод для электроразведки в шпурах малого диаметра / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, Н. С. Лоскутов. – № RU 2 730 400 С1. Заявка: 2019139736, 2019.12.04, Опубликовано: 21.08.2020 Бюл. №24

117. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса / С. М. Простов, Е. Е. Разумов, С. Н. Мулев, Е. А. Шабанов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 12. – С. 99-110. – DOI 10.18799/24131830/2022/12/3831.

118. Федорова, Л. Л. Решение задач обработки и интерпретации георадиолокационных данных на основе вейвлет-анализа / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 8. – С. 153-158.

119. Соколов, К. О. Вейвлет-критерий для анализа данных георадиолокации мерзлого горного массива / К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 262–265.

120. Набатов, В. В. Обработка данных георадиолокационной съёмки при выявлении полостей в заобделочном пространстве / В. В. Набатов, Р. М. Гайсин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 1. – С. 19–25.

121. Прудецкий, Н. Д. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной заполненной льдом / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов, Л. Л. Федорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 107-113. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-11-0-107-113.

122. Анализ обследований состояния горных выработок закрепленных анкерной крепью с применением георадара / В. А. Бакин, Е. Ю. Пудов, Е. Г. Кузин, К. К. Ремпель // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 10. – С. 172-178.

123. Калинин, С. М. Перспективы применения георадиолокации для определения состояния кровли шахтовых выработок / С. М. Калинин, Е. Ю. Пудов, Е. Г. Кузин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 297–299.

124. Расчетная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения / С. М. Простов, Е. Е. Разумов, С. Н. Мулев,

Е. А. Шабанов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 11. – С. 183-193. – DOI 10.18799/24131830/2022/11/3840.

125. Theoretical Justification for the One- Dimensional Geolocation Method / D. Yu. Sirota, S M. Prostov, E. Rasumov, N. Loskutov // E3S Web of Conferences: 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 01009. – DOI 10.1051/e3sconf/202017401009.

126. Мулёв, С. Н. Современный этап развития геофизического метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) / С. Н. Мулёв, В. Н. Старников, О. А. Романевич // Уголь. – № 10. – 2019. – С. 6–15.

127. Исследование динамики параметров импульсного электромагнитного излучения в выбросоопасных зонах угольного пласта при проходке выработок / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, Р. Р. Рахматуллаев, С. Ф. Панин // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – № 7. – С. 299-302.

128. Бизяев, А. А. Методика бесконтактного определения опасно нагруженных зон в массиве горной выработки / А. А. Бизяев, Н. М. Воронкина, А. В. Савченко, М. Н. Цупов // Уголь. – № 11. – 2019. – С. 127–131.

129. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors, X. Song, X. Li, Z. Li, Z. Zhang, F. Cheng, P. Chen, Y. Liu. Journal of Applied Geophysics. 2018, Vol. 148, P. 216-225.

130. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Surface oscillations a possible source of fracture induced electromagnetic radiation, Tectonophysics. 2007, Vol. 431, P. 15-21.

131. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining-induced coal and gas outburst, L. Qiu, Z. Li, E. Wang, Z. Liu, J. Ou, X. Li, M. Ali, Y. Zhang, S. Xia. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018, Vol. 54, P. 206-215.

132. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR, L. Qiu, E. Wang, D. Song, Z. Liu, R. Shen, G. Lv, Z. Xu. Journal Geophys. Eng. 2017, Vol. 14, P. 949-959.

133. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock, D. Song, E. Wang, X. Song, P. Jin, L. Qiu. Rock Mech Rock Eng. 2016, Vol. 49, P. 291-302.

134. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment, D. Song, E. Wang, X. He, H. Jia, L. Qiu, P. Chen, S. Wang. Journal Geophys. Eng. 2018, Vol. 15, P. 1093-1103.

135. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine. Journal Geophys. Eng. 2018, Vol. 15, P. 909-920.

136. Shaporeva G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction. Progress through Innovations Proceedings 2018 VIIth International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students. Novosibirsk, 2018, P. 159-160.

137. Большинский М. И., Лысиков Б. А., Каплюхин А. А. Газодинамические явления в шахтах. Монография // Севастополь: «Вебер» – 2003. – 284 с.

## Приложение А

Фрагмент программы для ЭВМ «Метод определения координат очага динамического явления при сейсмическом мониторинге». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610907 [116].

<pre>import math import pandas as pd  # Qj [baseCords_,datchCords_,tPrihoda_,V_]:= # Module[{Dij,tij,dt={},minT,qq,dT}, #   minT =Min[Table[EuclideanDis- tance[baseCords,i]/V,{i,datchCords}]]; # dT=Table[i-Min[tPrihoda],{i,tPrihoda}]; # Table[Dij=EuclideanDistance[baseCords,i]; #   tij=Dij/V; #   dt=Append[dt,tij-minT],{i,datchCords}]; #   qq=1/(Length[datchCords]-1)*(Total[Table[(dT[[i]]-dt[[i]]]^2,{i,Length[dt]}]]^(1/2) # ]  def euclidian_distance(A, B):     return sum([(A[i] - B[i]) ** 2 for i in range(len(A))])** (1/2)  def Qj(base_coord, sensors_coords, times, v):     minT = min([euclidian_distance(base_coord, i) for i in sensors_coords])     dT = [i-min(times) for i in times]     dt = []     for i in sensors_coords:         Dij = euclidian_distance(base_coord, i)         tij = Dij/v         dt.append(tij-minT)     return 1/(len(sensors_coords)-1) * (sum([(dT[i] - dt[i]) for i in range(len(dt))])** (0.5))  def get_points_4_check(base, beta):     result = []     for j in range(len(base)):         for i in [-1, 1]:             base_copy = base.copy()             base_copy[j] = base[j] + i*beta             result.append(base_copy)     return result</pre>	<pre>#   cords = Delete[cords,Position[qq,Max[qq]][[1,1]]]; #   eventTime = Delete[eventTime,Position[qq,Max[qq]][[1,1]]]; # data = Join[{eventTime,cords}]/Transpose; # basis = MinimalBy[data,First][[1,2]]; # beta=b,Break],Nothing]; # process = AppendTo[process,basis]];process]  def SPAM(sensors_coords, times, v):     b = 5000     eps = 0.05     base = sensors_coords[min(enumerate(times), key = lambda x: x[1])[0]]     beta = b     while (beta &gt; 5e-5):         check_points = get_points_4_check(base, beta)         check_points.append(base)         base_qualities = [Qj(base, sensors_coords, times, v) for base in check_points]         if min(base_qualities) == base_qualities[-1]:             beta = beta/2         else:             base = check_points[min(enumerate(base_quali- ties), key = lambda x: x[1])[0]]             check_points = get_points_4_check(base, beta)             check_points.append(base)             if min(base_qualities) &lt; eps:                 if (max(base_qualities) &gt; eps) and (len(sen- sors_coords) &gt;= 4):                     sensors_coords.remove(base)                     times.remove(min(times))                     base = sensors_coords[min(enumerate(times), key = lambda x: x[1])[0]]                     beta = b             else:                 return base             else:                 beta = beta/2                 return base</pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre># SPAMLite[c_,eventT_,b_,V_,eps_] := #                               Module[{listBasis={},eventTime=eventT,cords=c,beta = b,qq,newCords,basis,data,process={}},data = Join[{eventTime,c}]/Transpose; # basis = MinimalBy[data,First][[1,2]]; # process={basis}; # While[beta&gt;=0.0005, #   newCords = {basis,{basis[[1]]-beta,basis[[2]],basis[[3]},{basis[[1]]+beta,basis[[2]],basis[[3]},{basis[[1]],basis[[2]]-beta,basis[[3]},{basis[[1]],basis[[2]]+beta,basis[[3]},{basis[[1]],basis[[2]],basis[[3]]+beta},{basis[[1]],basis[[2]],basis[[3]]-beta}}; # qq = Table[Qj[i,cords,eventTime,V],{i,newCords}];\[IndentingNewLine]listBasis=Append[listBasis,basis]; # If[Min[qq]==First[qq], #   beta = beta/2., #   basis = newCords[[Position[qq,Min[qq]][[1,1]]]]; # If[Min[qq]&lt;eps, #   If[And[Max[qq]&gt;eps, Length[cords]&gt;=4],</pre>	<pre>def get_data(): print('введите скорость продольной волны: ') v = float(input()) # v = 100 print('введите имя файла в формате name.xlsx, файл должен лежать в одной папке со скриптом. наименование столбцов: x, y, z, time') name = input().strip() # name = 'test_sample.xlsx' df = pd.read_excel(name) sensors_coords = list(df[['x', 'y', 'z']].values) times = list(df.time) return sensors_coords, times, v  def main(): sensors_coords, times, v = get_data() print('координаты гипоцентра: ' + ', '.join(list(map(lambda x: str(x), SPAM(sensors_coords, times, v))))))  main()</pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## Приложение Б

Фрагмент программы для ЭВМ «Расчёт интегрального показателя для параметров сейсмической активности». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681203 [115].

<pre> import PySimpleGUI as sg from pandas import read_excel from collections import defaultdict def get_actual_squares(squares):     sorted_squares = {k: v for k, v in sorted(squares.items(), key=lambda x: x[1])}     new_d = dict()     new_val = 0     for i in sorted_squares:         new_d[i] = sorted_squares[i] - new_val         new_val = sorted_squares[i]     return new_d def get_int_param(squares, params):     for i in params.values():         try:             float(i.replace(",", "."))         except:             return "error"     sum_squares = sum(list(squares.values()))     sum_squares_mult_params = sum([squares[i] * float(params["p-%s" % i].re- place(",", ".")) for i in squares.keys()])     return sum_squares_mult_params/sum_squares def get_square(df): #df = df[df["level"] == level] x, y = df[0].values, df[1].values assert len(x) == len(y) # первый сумматор first_acum = sum(map(lambda x: x[0]*x[1], zip(x[:-1], y[1:]))) # второй сумматор second_acum = -1*sum(map(lambda x: x[0]*x[1], zip(x[1:], y[:-1]))) return (1/2)*abs(first_acum + second_acum + x[- 1]*y[0] - x[0]*y[-1]) def set_params(files):     #layout = [[sg.Text('Результат:', size=(25, 1), key='-text-', font='Helvetica 16'), </pre>	<pre> sg.Text("S = %.4f м²" % squares[file_name], font='Helvetica 16')]) layout.append([sg.Button("Рассчитать интегральный показатель", key='-GET_P-', font='Helvetica 16')])     layout.append([sg.Text("", key='- param_text-', font='Helvetica 16')])     layout.append([sg.Text("", key='- param_val-', font='Helvetica 16')])     window = sg.Window('Расчет инте- грального показателя', layout)     while True:         event, values = window.read()         if event in (sg.WIN_CLOSED, 'Exit'):             break         elif event == "-BACK-":             window.close()         main()         elif event == "-GET_P-":             param = get_int_param(squares, values)             if param == "error":                 window['-param_text- '].Update("Неверно указаны параметры", text_color = "red")                 window['-param_val- '].Update("")             else:                 window['-param_text- '].Update("Интегральный показатель, у.ед.", text_color = "white")                 window['-param_val- '].Update("Iп = %.4f" % param)                 window.close() def main():     layoutStart = [[sg.Text('Расчет интегрального показателя', key='-text-', font='Helvetica 18'), [sg.FilesBrowse("Добавить фигуры", key='-DATA_FILES-', font='Helvetica 16', </pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<pre> sg.Input()]]     layout = [[sg.Button("↔", font='Helvetica 16', tooltip = "Назад", key='-BACK-')]     squares = defaultdict(float)     for j, i in enumerate(files.split(";")):         file_name = i.split('/')[-1].re- place(".xlsx", "").replace(".xls", "")         df = read_excel(i, header = None)         df = df[~df[0].astype(str).str.isal- pha()].dropna(axis = 1)         s = get_square(df)         squares[file_name] = s     squares = get_actual_squares(squares)     for j, i in enumerate(files.split(";")):         file_name = i.split('/')[-1].re- place(".xlsx", "").replace(".xls", "")         layout.ap- pend([sg.Text(file_name, size=(10, 1), font='Hel- vetica 16'),                                 sg.Input(size = (7, 5), key='p-%s' % file_name, default_text = '1'), </pre>	<pre> change_submits=True, file_types = (('xls/xlsx', '*.xls?'),),),), ]     layout = [[sg.VPush()], [sg.Push(), sg.Column(layoutStart, element_jus- tification='c'), sg.Push()], [sg.VPush()]]     windowStart = sg.Window('Расчет интегрального показателя', layout, size=(500, 100), grab_anywhere=True)     while True:         event, values = windowStart.read()         if event in (sg.WIN_CLOSED, 'Exit'):             break         elif event == "-DATA_FILES-":             windowStart.close()             set_params(values["- DATA_FILES-"])             windowStart.close() if __name__ == "__main__":     main() </pre>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## Приложение В

### Акт внедрения результатов исследования



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА –  
МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
ВНИМИ

Утверждаю:

Генеральный директор  
АО «ВНИМИ»,  
канд. техн. наук  
Шадрин М.А.  
\_\_\_\_\_ 2024 г.



#### АКТ

**использования методических разработок, изложенных в диссертации  
Разумова Е.Е. «Разработка метода прогнозирования динамических  
явлений при интенсивной отработке угольных пластов на основе  
системы сейсмического мониторинга»**

В АО «ВНИМИ» было принято решение по использованию следующих разработок, изложенных в диссертации Разумова Е.Е.:

- методики и общего алгоритма комплексного прогноза удароопасности при ведении горных работ;
- методики и программного продукта для расчета интегральных показателей сейсмических и геомеханических параметров;
- методик и программного продукта для расчета координат источника сейсмособытия;
- методики экспериментально-аналитического исследования геомеханических процессов.

Использование разработок осуществлялось при ведении сейсмологических наблюдений для прогноза удароопасности на следующих предприятиях:

- Шахта угольная «Комсомольская» АО «Воркутауголь», договор №9000091757 от 30.03.2019 г., заказчик – АО «Воркутауголь»;
- Шахта угольная «Заполярная-2» АО «Воркутауголь», договор №9000106862 от 14.04.2020 г., договор №9000119462 от 22.04.2021 г., заказчик – АО «Воркутауголь»;
- Шахта угольная «Им. В. И. Ленина» АО «QARMET» (ранее АО «Арселормиттал Темиртау», Казахстан), договор № R12348 от 11.05.2022, заказчик – АО «Арселормиттал Темиртау»;
- Шахта угольная «Тентекская» АО «QARMET» (ранее АО «Арселормиттал Темиртау», Казахстан), договор № R12348 от 11.05.2022,



заказчик – АО «Арселормиттал Темиртау»;

– Шахта угольная «Саранская» АО «QARMET» (ранее АО «Арселормиттал Темиртау», Казахстан), договор № R12348 от 11.05.2022, заказчик – АО «Арселормиттал Темиртау»;

– Шахта угольная «Денисовская» АО ГОК «Денисовский», договор №41246 от 04.04.2023, заказчик – ООО «УК «КОЛМАР»;

– Шахта угольная «Есаульская» ООО «РУК», договор № ДП-11-05/19 от 08.05.2019 г., заказчик – ООО «РУК»;

– Подземный рудник «Интернациональный» МНГОК АК «АЛРОСА» (ПАО), договор № 6101038010 от 18.08.2020 г., договор № 6101066063 от 18.08.2023 г., заказчик – МНГОК АК «АЛРОСА» (ПАО);

Результаты использования разработок изложены в соответствующей проектной документации, являющейся составной частью отчетов по указанным выше договорам.

Директор по науке АО «ВНИМИ»

С.Н. Мулев

## Приложение Г

### Титульный лист «Методических указаний по сейсмическому геодинамическому мониторингу при отработке удароопасных угольных пластов»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ)

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт горной  
геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр  
«ВНИМИ» (АО «ВНИМИ»)

СОГЛАСОВАНО:

Генеральный директор АО «Научный  
центр ВостНИИ по промышленной и  
экологической безопасности в горной  
отрасли

  
«01» «01» 2024  
О.В. Тайлаков



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и  
международному сотрудничеству  
ФГБОУ ВО КузГТУ

К.С. Костиков

«10» «01» 2024



«10» «01» 2024  
Генеральный директор  
АО «ВНИМИ»  
А.А. Шадрин



**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
по сейсмическому геодинамическому мониторингу при отработке  
удароопасных угольных пластов

Кемерово 2024