

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

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2025

Работа выполнена на кафедре физических процессов и строительных геотехнологий освоения недр федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» (КузГТУ) и в акционерном обществе «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела - межотраслевой научный центр ВНИМИ» (АО «ВНИМИ»).

Научный руководитель: **Простов Сергей Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры строительного производства
и экспертизы недвижимости ФГБОУ ВО «Куз-
басский государственный технический универси-
тет имени Т.Ф. Горбачева»

Официальные оппоненты: **Вознесенский Александр Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры физических процессов гор-
ного производства и геоконтроля ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский технологи-
ческий университет «МИСиС»

Фрянов Виктор Николаевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры геотехнологии ФГБОУ ВО
«Сибирский государственный индустриальный
университет»

Ведущая организация: ФГБУН «Институт горного дела им. Н. А. Чина-
кала Сибирского отделения Российской академии
наук»

Защита состоится 16 мая 2025 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного со-
вета 24.2.321.02 на базе ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя,
28, тел.+7(3842)39-63-68, e-mail: tma.geolog@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВО «Кузбасский государ-
ственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и на сайте:
<https://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М. А. Тюленев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 регионально-го 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.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Тема диссертации соответствует пункту 7 паспорта специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»:

- п. 7 «Создание на основе цифровых информационных технологий методов, приборов, автоматизированных систем для изучения и контроля свойств горных пород и грунтов, строения и состояния их массивов, а также прогнозирования динамических процессов и явлений».

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы прогноза динамических явлений при разработке угольных пластов.

Согласно ФНиП в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» (утв. 10.12.2020, № 515) к динамическим явлениям на угольных шахтах относят: горные удары; внезапные выбросы угля (пород) и газа; внезапные выдавливания угля; внезапные динамические разрушения пород почвы. События, предшествующие динамическим явлениям без газодинамических явлений, включают: повышенное давление на крепь горной выработки; удары, трески, толчки в массиве горных пород различной силы и частоты; стреляние отслоившихся кусков угля (породы); повышенный выход буровой мелочи и зажатие бурового инструмента.

Первые динамические явления были зафиксированы в конце 19 века, интенсивные проявления наблюдались на шахтах и рудниках Канады, США, Швеции, Чехии, Германии, ЮАР, Англии, Франции, Китая, Индии и других стран. Один из первых горных ударов зафиксированных в России, произошёл в 1944 г. в Кизеловском угольном бассейне. Начиная с 1960-х годов динамические явления начинают интенсивно проявляться при разработке Североуральского, Таштагольского, Октябрьского и других рудных месторождений.

В последние годы резко возросла интенсивность динамических явлений в связи с повсеместным переходом на современные скоростные и высокопроизводительные технологии добычи угля, при которых длина лав составляет 200–300 м, а темпы подвигания достигают до 10–20 м сутки.

По данным Сибирского отделения Ростехнадзора с 2015 по 2023 гг. на шахтах Кузбасса зафиксировано 25 случаев динамических явлений и внезапных обрушений.

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 неоднократно повторяющихся горных ударов с катастрофическими последствиями (шахты «Алардинская» и «Усинская» в Кузбассе).

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.

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. Мендецкий, М. А. Садовского, А. А. Куксенко, А. А. Маловичко, и других изложены фундаментальные закономерности проявлений горного давления.

Успешно развиваются численные методы моделирования НДС неоднородных сред. Одним из перспективных путей совершенствования подходов к интерпретации данных геодинамического мониторинга и прогноза является совместное использование результатов математического моделирования и шахтной геофизики. Успешные исследования в этом направлении ведутся в ИПКОН, ИГД СО РАН, ГИ МИСиС, СибГИУ, ДВО ИГД РАН, КузГТУ и других организациях. Разработанные комплексы проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов с использованием метода конечных элементов, обеспечивают расчёт НДС углепородного массива с учётом влияния выработок и дизъюнктивных нарушений, а также нелинейного деформирования пород.

Несмотря на значительные достижения 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.

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 апробированными методами геолокации использовать нейросетевые технологии, регистрацию как продольных, так и поперечных волн, корректировку скоростей сейсмических волн, методы кластерного анализа и численного моделирования напряженно-деформированного состояния углепородного массива.

Методы акустического геоконтроля развиты в работах В. С. Ямщикова, П. М. Тютюнника, И. А. Турчанинова, В. Т. Глушко, В. А. Шкуратника, А. С. Вознесенского, В. С. Зыкова, А. В. Шадрина и др.

В настоящий момент разработаны и функционируют следующие системы сейсмомониторинга: Prognoz ADS (ИГД ДВО РАН); САКСМ (МНТЛ РИВАС); МГСК (ИПКОН РАН); «Микон-ГЕО» (ООО «ИНГОРТЕХ»); АС «Релос» (НТЦ «Автоматика»); ЕРМАК-5 («Единая геофизическая служба РАН»); GITS (АО «ВНИМИ»).

В результате проведённого анализа обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследований, приведённые в общей характеристике работы.

Вторая глава в рамках решения первой задачи посвящена совершенствованию на основе цифровых информационных технологий аппаратного обеспечения сейсмического метода и алгоритмов обработки информации.

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 , 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.

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 сейсмодолны (рис. 1). 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, включающая ввод координат сейсмоприёмников, расчёт координат пробных точек X_i, Y_i, Z_i , вычисление невязки Q , задание приращения координат δ , оптимизация координат X, Y, Z по критерию $Q \rightarrow \min$.

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:

$$F = \frac{F_{T,Bl}}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{D_k + N_k}{\operatorname{tg}\beta}, \quad (1)$$

где $F_{T,Bl}$ – сейсмическая активность объёма массива; k – номер ячейки объёма массива, в котором производится расчёт; D_k – суммарная сейсмическая деформация блока за расчётный интервал времени регистрации T ; N_k – количество сейсмических

событий за расчётный интервал времени регистрации T , сутки; β – угол наклона графика распределения N_i (E_i), построенного в билогарифмическом масштабе.



Рис. 1 – Алгоритм расчёта координат источника сейсмособытия методом SPAM: δ – приращение координаты, рациональное по критерию времени счёта; $\Delta t_{i,j}$ – задержка прихода сейсмволны от j -го вычисленного источника до i -го приёмника относительно прихода сейсмволны от того же источника до ближайшего к нему сейсмоприёмника; $t_{i,j}$ – время прихода сейсмволны от j -го вычисленного источника до i -го приёмника; $t_{0,j}$ – рассчитанное время прихода сейсмволны 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; ΔT_i – фактическая задержка прихода сейсмволны от источника до i -го приёмника относительно прихода сейсмволны от источника до ближайшего к нему сейсмоприёмника; n – количество сейсмоприёмников, $n=6$; Q_j – невязка для j -го вычисленного источника

Слагаемые правой части уравнения (1) определяют следующим образом:

$$D_k = \sum_1^T D_i, \quad (2)$$

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

$$D_i = \sqrt{E_{cor}/E_{\Phi}}, \quad (3)$$

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

$$E_{cor} = E_c \exp(-3 t/T) \frac{T-t}{T}, \quad (4)$$

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

Суммарную сейсмическую активность N_k событий за интервал времени T определяют по формуле

$$N_k = \sum_1^T N_i. \quad (5)$$

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

$$I_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \cdot \bar{\Pi}_i)}{\sum_{i=1}^n S_i}. \quad (6)$$

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

Для автоматизированного расчёта интегральных показателей I_{Π} разработана программа для ЭВМ, включающая алгоритмы ввода координат точек с параметрами Π_i , построение виртуальных изолиний Π_i , определение площадей, ограниченных изолиниями и расчёт интегрального параметра I_{Π} , защищённая свидетельством о государственной регистрации.

Разработка технических решений по аппаратному обеспечению системы сейсмического мониторинга GITS, алгоритмов, компьютерных программ первичной обработки цифровых баз данных, расчёта интегральных показателей сейсмической активности и геомеханического состояния массива горных пород позволили перейти к решению второй задачи.

Третья глава в рамках решения второй задачи посвящена обоснованию метода регионального прогноза удароопасности по интегральным параметрам сейсмического мониторинга.

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;
- 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 (рис 2).

По результатам сейсмического мониторинга установлено резкое увеличение первичных параметров активности массива при пересечении забоем зоны тектонических нарушений и передовой выработки (на рис. 2 не показана).

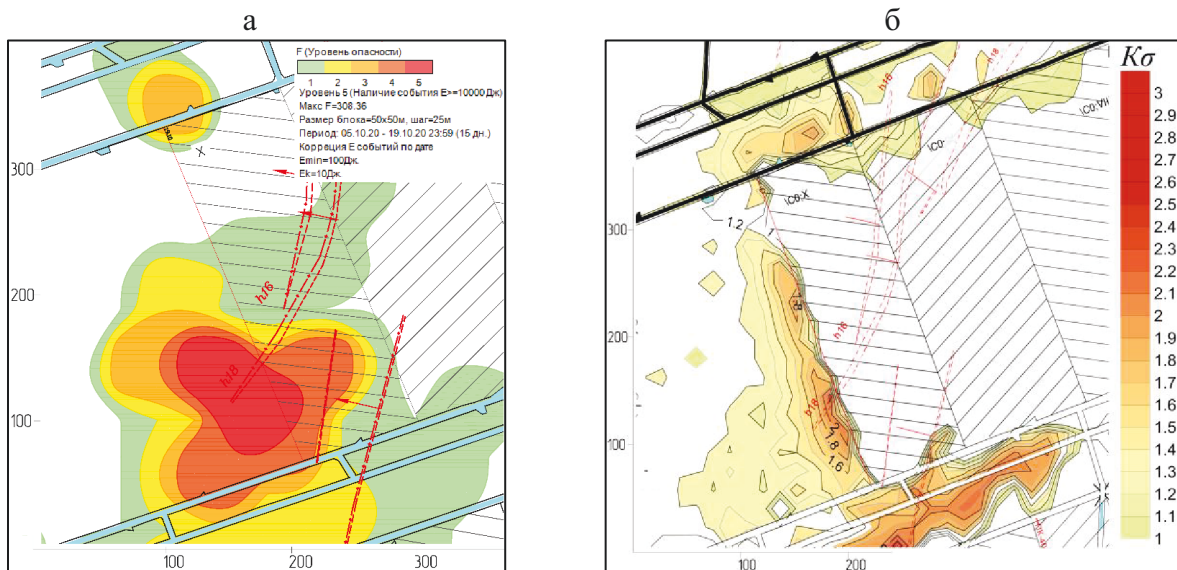


Рис. 2 – Зоны по параметру F (а) и коэффициент концентрации вертикальных напряжений в кровле K_{σ} пласта Елбанский-5 (б) при положении очистного забоя на 2020.10.19

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 (рис. 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.

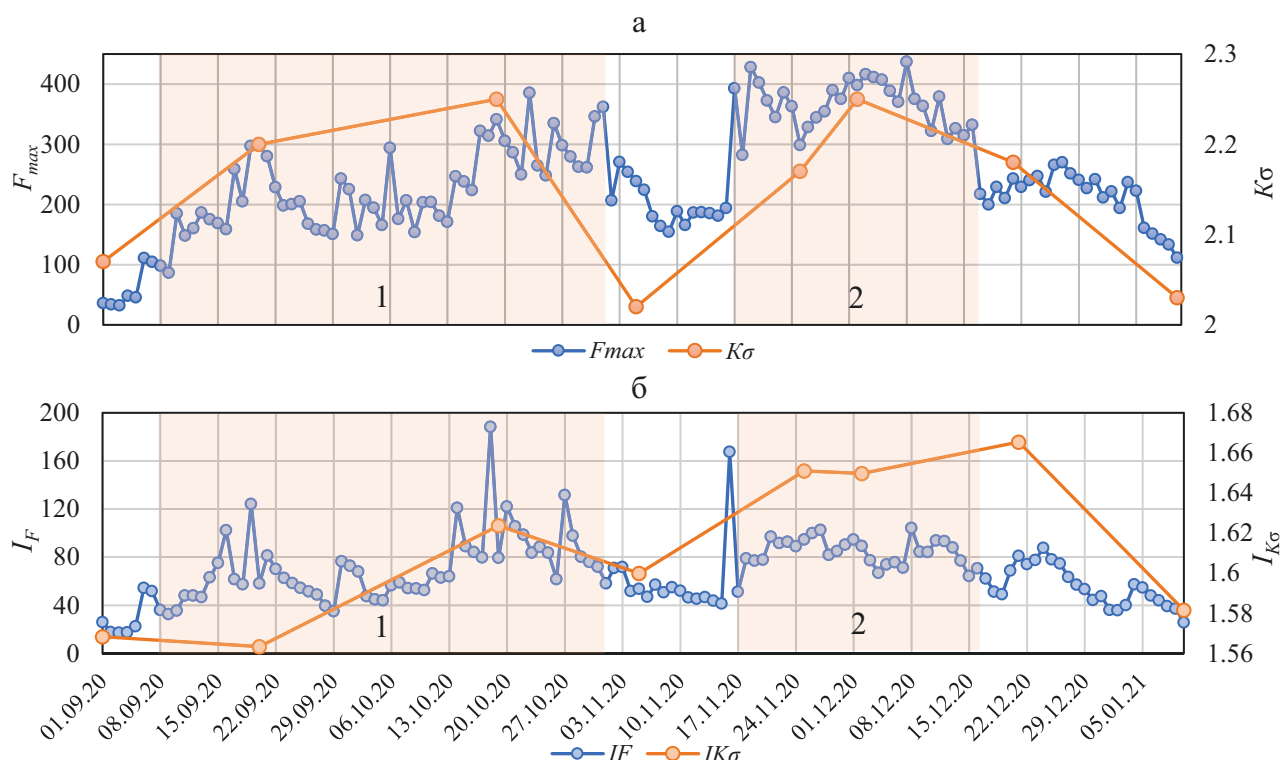


Рис. 3 – Графики изменения параметров: *а* – максимальные значения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта Елбанский–5 K_{σ} и параметра F впереди забоя лавы; *б* – интегральные показатели параметра F и коэф. концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта K_{σ} : 1 – пересечение очистным забоем группы тектонических нарушений; 2 – пересечение очистным забоем передовой выработки и тектонических нарушений

Между максимальными значениями комплексного сейсмического параметра F и коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта K_{σ} , а также их интегральными показателями выявлены близкие к линейным значимые регрессионные зависимости (рис. 4).

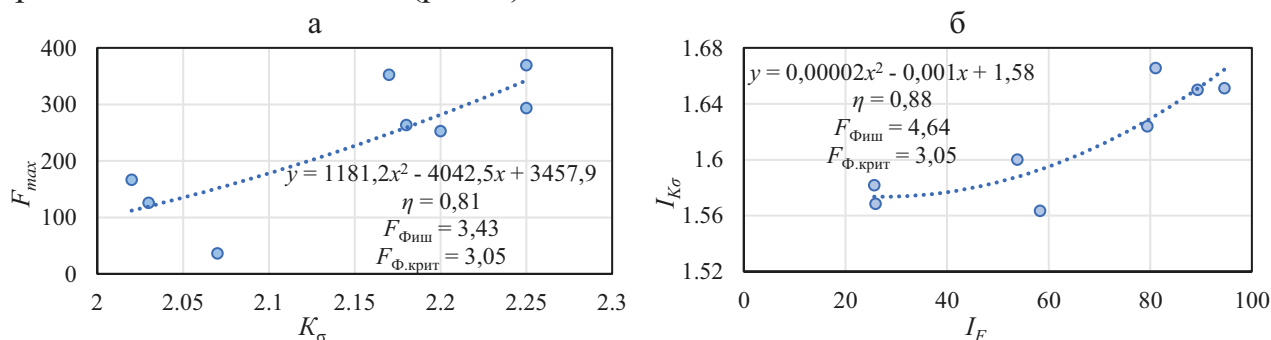


Рис. 4 – Графики распределения расчётных, экспериментальных параметров и уравнения регрессии исходных данных: η – коэффициент корреляции для криволинейной связи; $F_{\text{Финш}}$ – критерий Фишера; $F_{\text{Ф.крит}}$ – критическое значение критерия Фишера

Информативность J рассматриваемых параметров определялась по критерию, предложенным И. А. Турчаниновым и В. А. Паниным, включающим отношение коэффициент вариации параметра при отсутствии осложняющих факторов ($K_{\text{ВН}}$) и в период геодинамической активности ($K_{\text{ВА}}$).

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 ($J_F = 0,693$) (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты оценки информативности рассматриваемых параметров

Параметр	F	K_{σ}	I_F , бит	$I_{K_{\sigma}}$, бит
$K_{ВН}$	0,523	0,033	0,376	0,008
$K_{ВП}$	0,799	0,049	0,715	0,020
J , бит	0,693	0,651	1,008	1,402

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} (рис. 5).

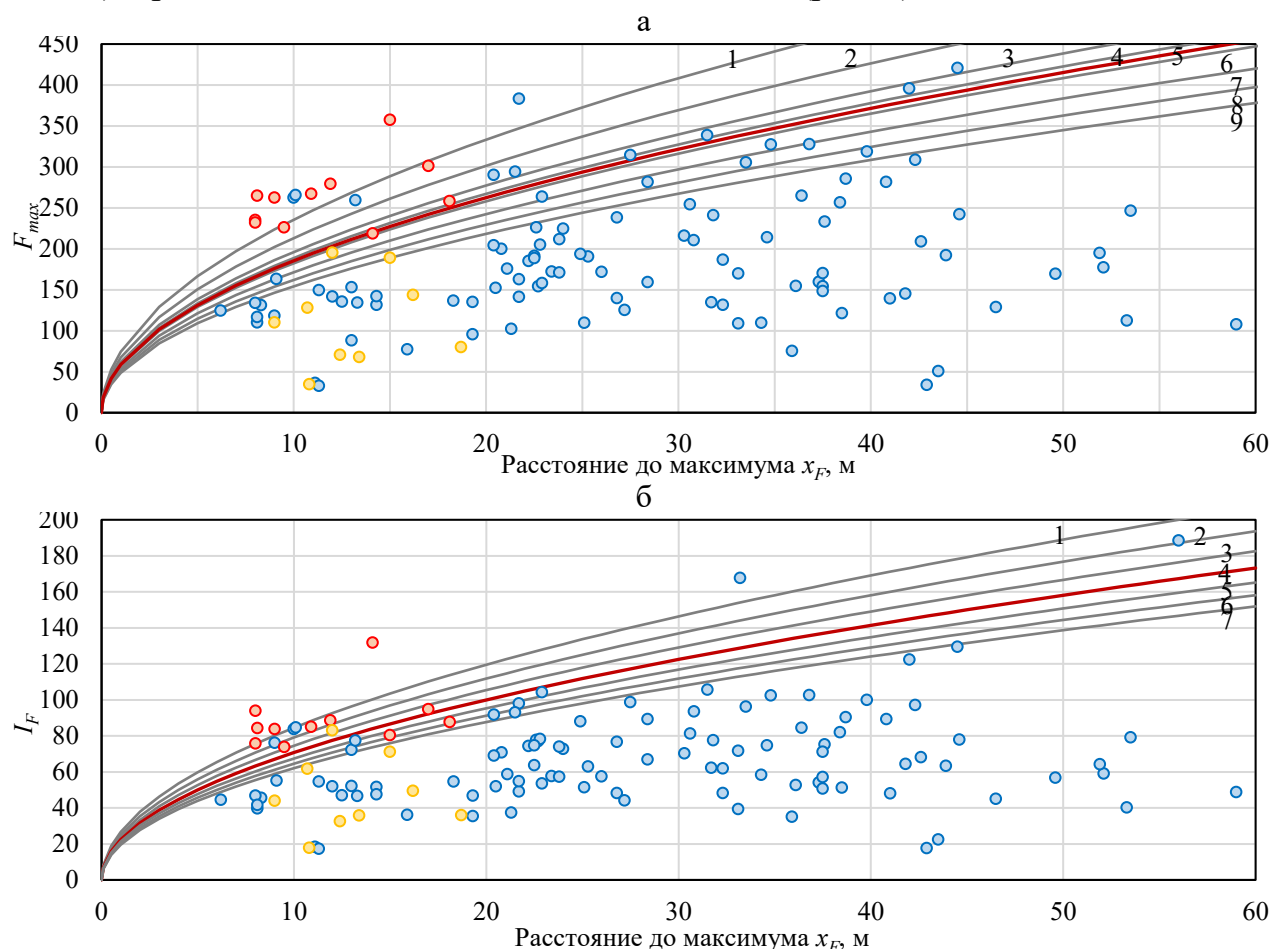


Рис. 5 – Построение номограмм геодинамического прогноза по параметрам ($F_{\max}; x_F$) (а) и ($I_F; x_F$) (б): 1...9 – экспериментальные разграничительные линии для прогноза удароопасности участков массива по данным сейсмического мониторинга; \circ – «пограничные» точки по результатам локального прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи, на которых объем штыба близок к значению для категории «опасно» $P^V > 0,95 P^V_{\text{крит}}$; \circ – «пограничные» точки, на которых $P^V = (0,9-0,95) P^V_{\text{крит}}$; \circ – точки, на которых получена категория «неопасно»

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: $F_{\max} = 30-420$ ед.; $I_F = 17-188$ ед.; $x_F = 5,0-58,0$ 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».

Обоснованный метод регионального прогноза удароопасности по интегральным параметрам сейсмического мониторинга позволил перейти к решению третьей задачи.

Четвертая глава в рамках решения третьей задачи посвящена разработке метода и критериев комплексного прогнозирования удароопасности на основе сейсмического мониторинга.

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 (интегрального показателя F , табл. 2) и расстоянию по нормали от точки максимума до ближайшей открытой поверхности, установлением границ опасного участка по пересечению изолинии опасного уровня F с поверхностью обнажения, проведение в соответствии с нормативными документами геофизического и прямого локального (текущего) прогноза в пределах установленных границ (рис. 6).

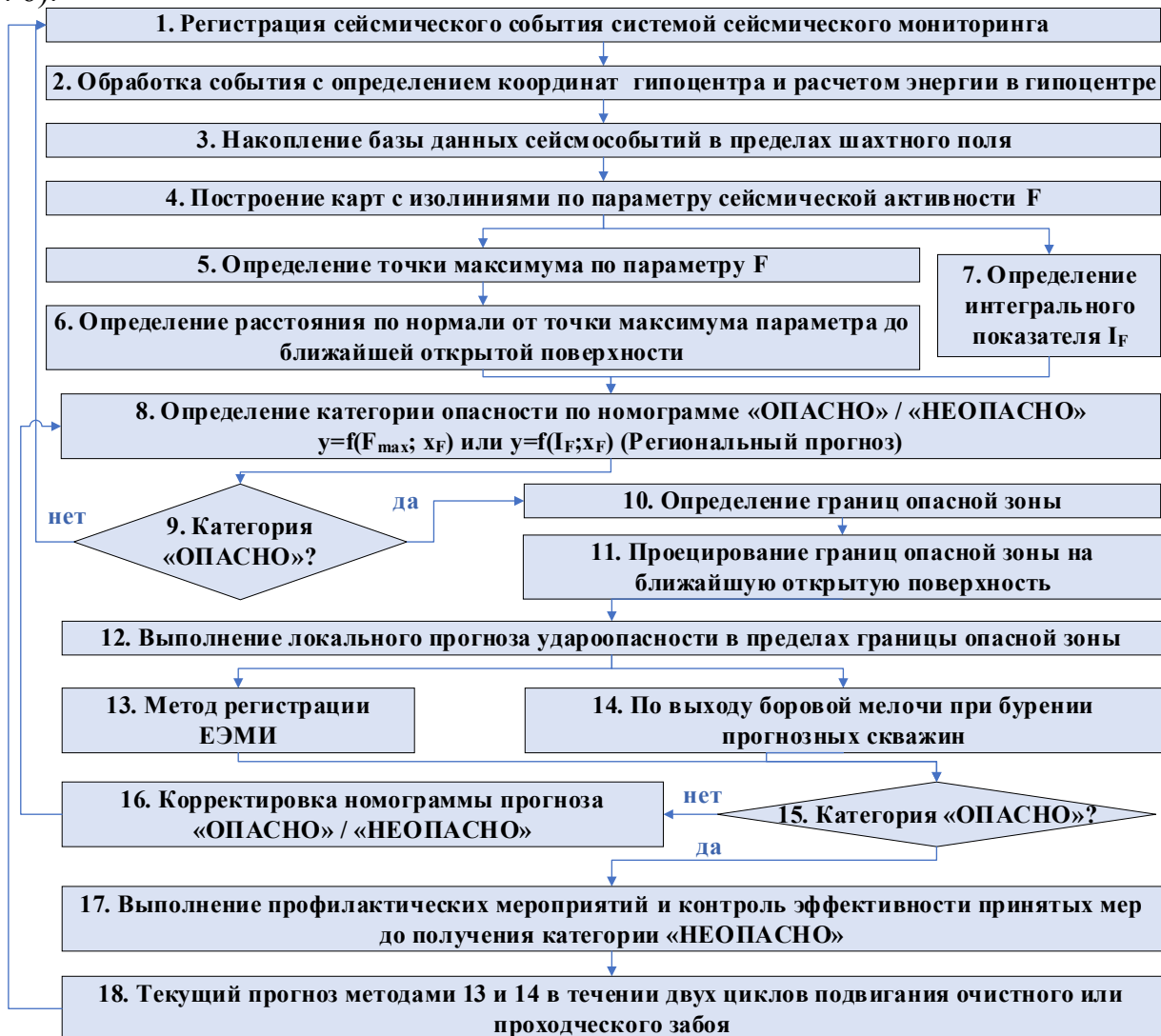


Рис. 6 – Алгоритм комплексного прогноза удароопасности при ведении очистных работ

Таблица 2 – Классификация участков шахтного поля сейсмоактивности по параметру F

Уровень	Значение параметра F	Описание
0	$0 < F < 10$	$0 < F < 10$ (фоновый уровень) за 15 дней в блоке не произошло крупных сейсмических событий. «не опасно»
1	$10 \leq F < 50$	$10 \leq F < 50$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией от $1000 < E < 3000$ Дж. «не опасно»
2	$50 \leq F < 100$	$50 \leq F < 100$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $3000 < E < 5000$ Дж. «умеренно напряженно, но не опасно»
3	$100 \leq F < 200$	$100 \leq F < 200$ или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $5000 < E < 10\,000$ Дж. «напряженно, но не опасно»
4	$200 \leq F < 300$	$200 \leq F < 300$ или зарегистрировано событие с энергией $10\,000 \leq E < 15\,000$ Дж. «напряжено, опасно»
5	$F > 300$	$F > 300$ или зарегистрировано событие с энергией $E > 15\,000$ Дж. «напряжено, опасно»

В качестве примера реализации данного алгоритма проведено изменение параметров зон сейсмоактивности при пересечении забоем лавы трех аномальных зон (рис. 7). При этом в течении 10 суток размер опасного участка изменился в диапазоне $\Delta x = 20,5\text{--}112$ м, а комплексный параметр в диапазоне $F_{max} \cdot \Delta x = 500\text{--}30000$ м.



Рис. 7 – Параметры зоны повышенной сейсмоактивности в выработке при пересечении забоем лавы: а – группы тектонических нарушений; б – передовой выработки; в – в вентиляционном штрехе 4-1-5-7. (Палитра для окрашивания зон по параметру F соответствует табл. 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 схемой бурения скважин локального прогноза для условий шахты «Осинниковская» получены критериальные значения номограммы для определения категории опасности;

- для реализации метода геоэлектрических потенциалов, предложено устройство для измерений в шпурах малого диаметра (защищено патентом РФ);

- для аппаратуры «Ангел-М» регистрации естественного электро-магнитного 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.

Результаты выполненных исследований внедрены в производства при организации систем сейсмического мониторинга на шахтах Кузбасса, Воркуты, Казахстана, Якутии и Горной Шории (табл. 3).

Таблица 3 – Использование разработанных рекомендаций

№	Объект	Горно-геологические и горно-технические условия	№ договора
1	Шахта угольная «Комсомольская» АО «Воркутауголь»	Пласты «Тройной» и «Четвертый» угрожаемые с отм. +50 м до -270 м, опасные с отм. -270 м;	№9000091757 от 30.03.2019 г.
2	Шахта угольная «Заполярная-2» АО «Воркутауголь»	В границах блока «Шахта Воркутинская» пл. «Четвертый» угрожаемый с отм. -238 м, опасный с отм. -610 м (блок Северный), опасный с отм. -660 м (блок Центральный). Блок «Шахта Заполярная» пл. «Четвертый» угрожаемый с отм. -95 м, опасный с отм. -834 м.	№9000106862 от 14.04.2020 г. №9000119462 от 22.04.2021 г.
3	Шахта Им. В. И. Ленина АО «Арселормиттал Темиртау» (Казахстан)	Низкая устойчивость пород кровли и почвы угольных пластов, невыдержанная мощность пластов, газоносность, выбросоопасность, водопритоки. Шахта отнесена к опасным по внезапным выбросам угля и газа.	№ R12348 от 11.05.2022
4	Шахта Тентекская АО «Арселормиттал Темиртау» (Казахстан)	Поле шахты отнесено ко 2-ой группе сложности. Шахта отнесена к опасным по внезапным выбросам угля и газа.	№ R12348 от 11.05.2022
5	Шахта Саранская АО «Арселормиттал Темиртау» (Казахстан)	Непосредственная кровля угольных пластов сложена трещиноватыми аргиллитами, алевролитами с низкой механической прочностью и легкой размокаемостью, неустойчивая. Основная кровля сложена мощной толщей монолитных песчаников.	№ R12348 от 11.05.2022
6	Шахта угольная «Денисовская» АО ГОК «Денисовский»	Сейсмичность района 8 баллов. Непосредственная кровля тяжелая, средней устойчивости. Склонность к горным ударам с глубины 300 м	№41246 от 04.04.2023
7	шахта угольная «Есаульская» ООО «РУК»	Пл. 26а, 29а угрожаемые по горным ударам с глубины 200 м; угрожаемые по внезапному выдавливанию угля с глубины 450 м и 420 м соответственно.	№ ДП-11-05/19 от 08.05.2019 г.
8	ПР «Интернациональный» АК «АЛРОСА» (ПАО)	Вмещающий массив горных пород месторождения трубки «Интернациональная» с глубины ниже 1410 м (абс. отм. -1010 м) склонный к горным ударам.	№ 6101038010 от 18.08.2020 г № 6101066063 от 18.08.2023 г
9	Шахта Таштагольская АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	Стреляния отмечаются с глубины 300 м, с глубины 600 м горные удары различной интенсивности.	№ ДГЗС7-025341 от 01.08.2019 г.

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 сейсмодолны, а также алгоритмом метода наименьших квадратов с минимизацией целевой функции методом адаптивного поиска с использованием случайных чисел.

Повышение информативности сейсмического прогноза обеспечивается использованием комплексного показателя F , включающего отношение энергии сейсмических событий к фоновому уровню и суммарную сейсмическую активность за расчётный интервал времени, а также универсального интегрального показателя I_p , включающего суммирование средних значений параметров Π_i и площадей зон, ограниченных изолиниями Π_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 $J_{IF} = 1,008$, 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_σ , 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: $F_{\max} = 30–420$ ед.; $I_F = 17–188$ ед.; $x_F = 5,0–58,0$ 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 опасного уровня F 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО

в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. **Разумов, Е. Е.** 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.

2. **Разумов, Е. Е.** 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 (научно-технический журнал). – 2022. – № 1. – С. 104-114. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_1_0_104.

3. **Разумов, Е. Е.** Алгоритмы обработки сейсмической информации / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, С. Н. Мулев, Г. Д. Рукавишников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 2. – С. 17-29. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.

4. **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 (научно-технический журнал). – 2024. – № 9. – С. 142-159. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_9_0_142.

5. **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 (научно-технический журнал). – 2024. – № 3. – С. 102-118. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_102.

6. **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.

7. Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный» / А. А. Вьюников, 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.

8. Применение геомеханического показателя качества породы RQD для прогноза газодинамических явлений при проходке выработок на руднике «Интернациональный» / Н. Е. Мороз, С. Г. Гендлер, А. А. Вьюников, **Е. Е. Разумов** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 4. – С. 628-639.

в изданиях, индексируемых в международных базах данных

Публикации по пп.1-8.

9. Dmitry Sirota, Sergei Prostov, **Egor Razumov**, Nikolay Loskutov, Theoretical Justification for the One-Dimensional Geolocation Method // E3S Web of Conferences 174 (5):01009. – 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401009.

10. **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.

11. Простов С. М., **Разумов Е. Е.**, Мулёв С. Н., Шабанов Е.А. Расчетная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – №11. С. 183-193 DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3840.

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

в прочих изданиях

13. **Разумов Е. Е.**, Рукавишников Г. Д., Климко В. К., Геофизический прогноз удароопасности при ведении горных работ // XIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных «РОССИЯ МОЛОДАЯ». – 2021. – С. 10908.1-10908.6

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

свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

15. 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.

16. 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.

патент на изобретение

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

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем:

[1, 2], [7, 8] – обработка, визуализация и анализ информации об аппаратурном и методическом обеспечении систем сейсмического мониторинга;

[3] – разработка циклических алгоритмов;

[4-6] – разработка методики, шахтные исследования, обработка, визуализация и анализ экспериментальных данных;

[9, 11, 12] – обоснование перспективности применения методов локального геофизического прогноза в комплексе с сейсмическим мониторингом;

[13, 14] – шахтные исследования, обработка и анализ экспериментальных данных;

[15, 16] – разработка детальных алгоритмов программы, подготовка априорной информации для написания кодов и экранных форм;

[17] – предложена конфигурация элементов устройства.

Подписано в печать 14.03.2025. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать на ризографе.

Усл. печ. л. 1,37. Тираж 100 экз. Заказ №

Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО КузГТУ
650000, г. Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а, тел. 8-3842-39-63-98
