

На правах рукописи

Ревин Илья Евгеньевич



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ДЕФОРМАЦИИ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННОГО
ГОРНОГО МАССИВА НА ПРИМЕРЕ ХИБИНСКИХ
АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

*Специальность 25.00.20 - Геомеханика, разрушение
горных пород, рудничная аэрогазодинамика и
горная теплофизика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Господариков Александр Петрович

Официальные оппоненты:

Сидоров Дмитрий Владимирович

доктор технических наук, ООО «Полигор», заместитель генерального директора;

Трофимов Андрей Викторович

кандидат технических наук, ООО «Институт Гипроникель», центр физико-механических исследований, заведующий центром;

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Защита состоится 27 сентября 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.06 адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте: www.spmi.ru

Автореферат разослан 27 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Геомеханический мониторинг напряженного состояния массива горных пород – это активно развивающийся раздел геомеханики, в котором на данный момент практически невозможно выделить единую методологию и подход к решению задач, сбору и анализу данных при разработке систем мониторинга.

В результате ведения горных работ изменениям подвергаются все природные факторы. В процессе отработки массива горных пород наиболее явно проявляются изменения состояния структурных неоднородностей, а именно: раскрываются имеющиеся естественные неоднородности; происходят подвижки по разрывным нарушениям (разломам); образуются новые, техногенные нарушения (трещины), сопровождающиеся изменением естественного напряженного состояния различных блоков массивов пород. Так как при ведении подземных горных работ в массиве происходит изменение его естественного напряженного состояния, то главной задачей любой системы геомониторинга является изучение геомеханического состояния горнотехнических систем «сооружение-массив» и фиксация его изменения в пространстве, а также прогноз зон возможного возникновения опасных проявлений горного давления.

Одним из способов оценки вероятности проявления опасных геодинамических процессов является использование математических моделей, основанных на данных сейсмического мониторинга. Массив горных пород является сложной динамической системой, поэтому для построения таких математических моделей целесообразно использовать как пространственные координаты, так и компоненты временного ряда сейсмической активности. В соответствии с правилами промышленной безопасности геомониторинг должен осуществляться в непрерывном режиме, поэтому разработка методики анализа больших объемов данных, полученных в результате работы автоматической системы сейсмического мониторинга, является весьма актуальной научно-технической задачей, что и предопределило направленность исследований диссертационной работы.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности:

Тема диссертации соответствует двум пунктам паспорта научной специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород и рудничная аэрогазодинамика:

1. Разработка научных и методических основ количественного прогнозирования геомеханических процессов в массивах горных пород и грунтов, в том числе антропогенных, служащих основанием, средой и материалом различных сооружений.

2. Создание на основе современных информационных технологий методов, приборов, автоматизированных систем для изучения и контроля свойств горных пород и грунтов, строения и состояния их массивов, а также для прогнозирования динамических процессов и явлений.

Степень разработанности темы исследования

Проблемами анализа данных геомеханического мониторинга занимались многие ученые, среди которых Козырев А.А., Корчак П.А., Жукова С.А., Гладырь А.В. и др.

В задачу геомеханического мониторинга может входить поиск взаимосвязей различного рода между широким перечнем различных природных и технических факторов, поскольку состояние техногенно-нарушенного массива горных пород определяется этими факторами. Можно выделить две основных группы таких факторов:

1. Природные факторы: свойства пород, слагающих массив, структурные неоднородности массива и естественное природное поле напряжений.

2. Технические факторы: методы ведения горных работ, порядок строительства объектов, применяемая система разработки месторождений полезных ископаемых, характеристики горных выработок и др.

Так же, согласно исследованиям, в результате отработки горизонтов происходит подработка пород висячего бока, которая вызывает образование зон растяжения в одной части массива и увеличение напряжений сжатия в другой части. Такие разнонаправленные воздействия на массив вызывают его

растрескивание и разупрочнение.

В работах многих авторов уделено недостаточно внимания разработке математических моделей, управляемых сейсмическим мониторингом, но в последнее время появились разработки способов анализа данных мониторинга с помощью методов машинного обучения.

Объект исследования – техногенно нарушенный массив горных пород на примере Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд.

Предмет исследования – система геомеханического мониторинга техногенно нарушенного массива горных пород.

Цель диссертационной работы – создание методики обработки данных сейсмического мониторинга и прогноза опасных геодинамических явлений с помощью современных методов машинного обучения и алгоритмов оптимизации математических моделей природных сред.

Идея работы. Создание комплексного подхода для обеспечения непрерывного геомеханического мониторинга.

Основные задачи исследований:

1. Анализ данных сейсмического мониторинга с помощью методов математического моделирования.
2. Подбор архитектуры композитной модели машинного обучения для прогноза геодинамических явлений.
3. Реализация выбранной архитектуры в виде программного обеспечения и его апробация на реальных данных сейсмического мониторинга.

Научная новизна работы:

1. Выявлены новые закономерности распределения сейсмических событий во времени и пространстве массива горных пород.
2. Получен алгоритм прогноза опасных геодинамических явлений внутри массива горных пород, базирующийся на результатах моделирования разработанной композитной модели анализа данных сейсмического мониторинга.
3. Выявлена аналитическая зависимость между минимальным значением тренда сейсмической активности и вероятностью наступления опасного геодинамического явления.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Разработана модель кластеризации пространственно-временных измерений на основе данных сейсмического мониторинга. Алгоритм является композитным и состоит из комбинации различных алгоритмов машинного обучения. Разработанный алгоритм позволяет моделировать распределения сейсмических событий в массиве горных пород с течением времени.

2. Разработаны методические рекомендации по прогнозу опасных геодинамических событий и дискретизации пространства сейсмических событий в массиве горных пород.

3. Результаты диссертационной работы реализованы в виде программного вычислительного комплекса и могут быть использованы в производственном процессе.

Методология и методы исследования

Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, математическим и имитационным моделированием процессов в программной среде *Python*. Построение математической модели кластеризации сейсмических событий в массиве горных пород и ее связи с данными станций деформационного мониторинга базируются на основных положениях теории алгоритмов эволюционной оптимизации, теории временных рядов, теории математической статистики.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предлагаемая информационная модель мониторинга массива горных пород Объединенного Кировского рудника КФ АО «Апатит», на основе данных сейсмического мониторинга должна включать потенциальную возможность учета данных деформационного мониторинга.

2. Разработанная композитная модель машинного обучения, обосновывающая закономерности изменения наблюдаемых величин сейсмического мониторинга и проявления опасных геодинамических явлений, примененная на рассматриваемой части массива горных пород.

3. Прогноз опасных геодинамических явлений при ведении работ в техногенно-нарушенном массиве, должен

включать в себя результаты математического моделирования разработанной композитной модели, для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием современных методов математического и имитационного моделирования и удовлетворительной сходимостью результатов имитационного моделирования с экспертными оценками. Проведено широкое сравнение полученных временных зависимостей с натурными замерами датчиков сейсмического мониторинга.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. Молодежная конференция по математическому моделированию и информационным технологиям SMIT (27.04.19-30.04.19).

2. Летняя школа на базе China university of Mining and Technology (14.06.19-30.06.19).

3. XII Российско-Германский сырьевой форум на базе Санкт-Петербургского горного университета (27.11.19-30.11.19).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении математического и имитационного моделирования; обобщении и обработке экспериментальных данных; формулировке основных научных положений и выводов, а также разработке вычислительного комплекса прогноза опасных геодинамических явлений в массиве горных пород.

Публикации по работе

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получено 1 свидетельство о регистрации государственной программы для ЭВМ.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка, включающего 95 наименований и изложена на 108 страницах машинописного текста и содержит 41 рисунок и 13 таблиц.

Благодарности

Автор выражает признательность научному руководителю д.т.н. А.П. Господарикову; к.т.н. К.В. Морозову за поддержку и советы на всех этапах выполнения работы и предоставленные данные сейсмического мониторинга; д.т.н. А.Н. Шабарову за ценные советы при выборе методологии исследования; также выражаю глубокую признательность коллективу научного центра геомеханики и проблем горного производства.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, приведены цели, задачи исследования, сформулирована научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы.

В первой главе представлен анализ проблем развития геомеханического мониторинга, изложены известные результаты математического моделирования природных сред, необходимых для разработки методов и алгоритмов.

Во второй главе представлены теоретические исследования ретроспективных сейсмических событий, разведывательный анализ данных сейсмического мониторинга, получена формула плотности распределения сейсмических событий в течение года наблюдений.

Третья глава включает композитную модель машинного обучения, реализующую прогноз опасных геодинамических явлений. Продемонстрирована работа разработанного вычислительного программного комплекса.

В четвертой главе приведены сравнения натуральных измерений с результатами математического моделирования, показывающие достоверность полученных результатов. Даны рекомендации по прогнозу проявления опасных геодинамических явлений.

В заключении приводятся результаты проделанной работы.

Основные результаты исследования отражены в защищаемых положениях:

1. Информационная модель мониторинга массива горных пород Объединенного Кировского рудника КФ АО «Апатит», на основании данных сейсмического мониторинга, с потенциальной возможностью учета данных деформационного мониторинга.

Предлагаемая информационная модель состоит из 3 этапов анализа исходных данных сейсмического мониторинга:

1. Статистический анализ распределения энергии ретроспективных сейсмических событий в массиве горных пород в течение заданного временного периода.

2. Анализ временных рядов сейсмического мониторинга в течение заданного временного периода.

3. Кластерный анализ распределения сейсмических событий в пространстве массива горных пород в течение заданного временного периода.

В ходе статистического анализа ретроспективных сейсмических событий были получены частотные распределения сейсмических событий по месяцам (рисунок 1).

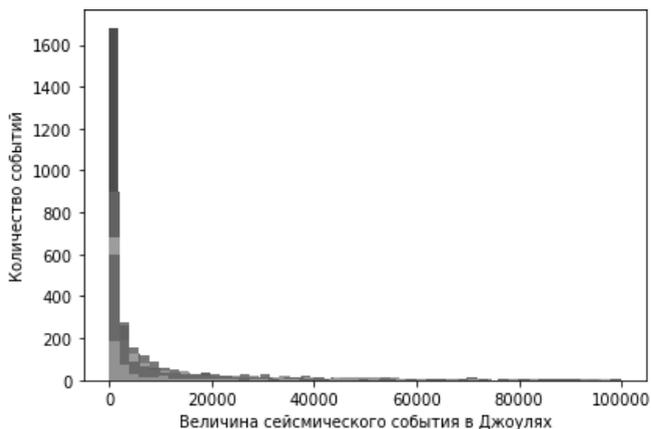


Рисунок 1 – Распределение сейсмических событий по величине энергии с января 2018 по декабрь 2018, после фильтрации исходного набора данных

В качестве модели анализа временных рядов сейсмического мониторинга была выбрана математическая модель на основе метода SSA (singular spectrum analysis). Были проанализированы данные сейсмического мониторинга предшествующих всем документально зафиксированным опасным геодинамическим явлениям (2009, 2010, 2015, 2016, 2018 года). Была выявлена единая для всех рядов структура, состоящая из аддитивных компонентов (тренда, цикличности и шума). Таким образом, было подтверждено, что все ряды порождены единой динамической системой и их параметры могут быть применены друг относительно друга. Были выявлены и сгруппированы факторы, которые могли быть причиной наступления опасного геодинамического явления (рисунок 2).

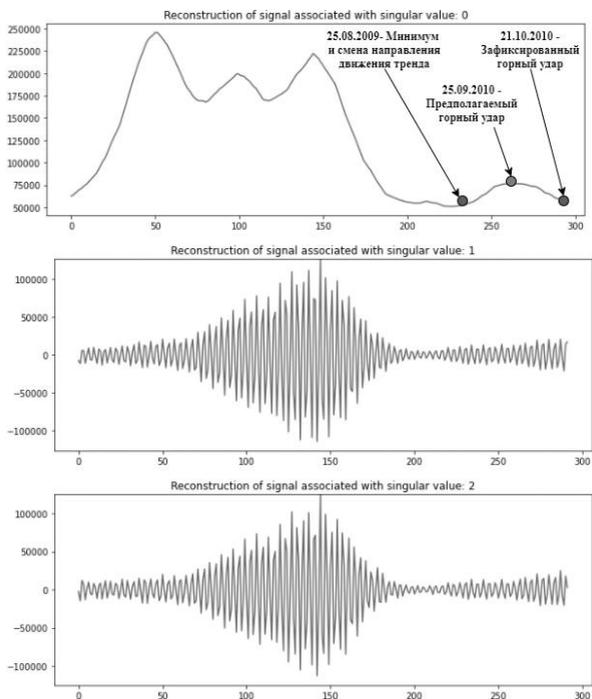


Рисунок 2 – Первая, вторая и третья элементарные матрицы, отвечающие соответственно за тренд и шум временного ряда сейсмического мониторинга за 2010 год

В ходе кластерного анализа, целью которого является поиск и идентификации потенциальных «кластеров-очагов» сейсмических событий, был использован алгоритм кластеризации HDBSCAN на основе данных сейсмического мониторинга. Были получены оценки минимально допустимого размера кластера. Форма, положение в пространстве и размер кластеров были интерпретированы с точки зрения физических процессов в массиве горных пород (рисунок 3).

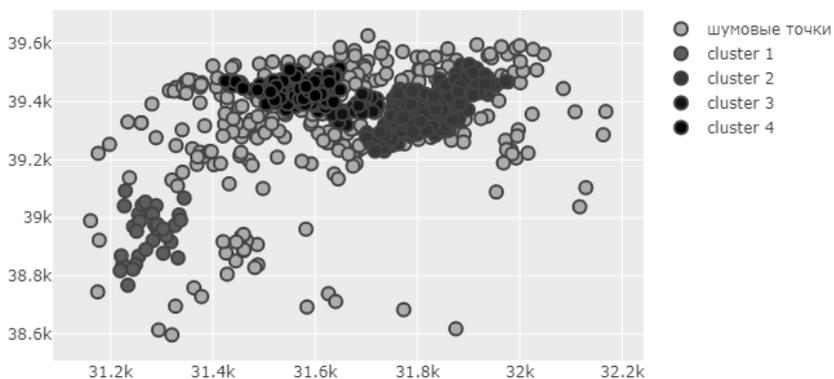


Рисунок 3 – Пример кластеризации сейсмических событий в пространстве массива горных пород за период февраль-сентябрь 2018

Итоговая информационная модель может быть представлена в виде блок-схемы, узлами которой являются предлагаемые математические модели анализа исходных данных сейсмического мониторинга.

2. Разработанная композитная модель машинного обучения, обосновывающая закономерности изменения наблюдаемых величин сейсмического мониторинга и проявления опасных геодинамических явлений рассматриваемой части массива горных пород

Предлагаемая композитная модель разработана и реализована в среде разработки *Python* и адаптирована к конфигурации, существующей сети станций сейсмического мониторинга и особенностям сейсмичности региона.

На первом этапе работы программы происходит дискретизация данных сейсмического мониторинга в пространстве и времени. Это позволяет группировать сейсмические события в связанные кластера («очаги») в пространстве через регулярные промежутки времени. Как видно из рисунка 4, общей проблемой для данных, является то, что точки не пересекаются друг с другом и на их основе невозможно построить временные ряды. Если все объекты в таблице имеют разные временные привязки и интервалы временных меток не являются постоянными, то значения помещаются на стационарную временную сетку.

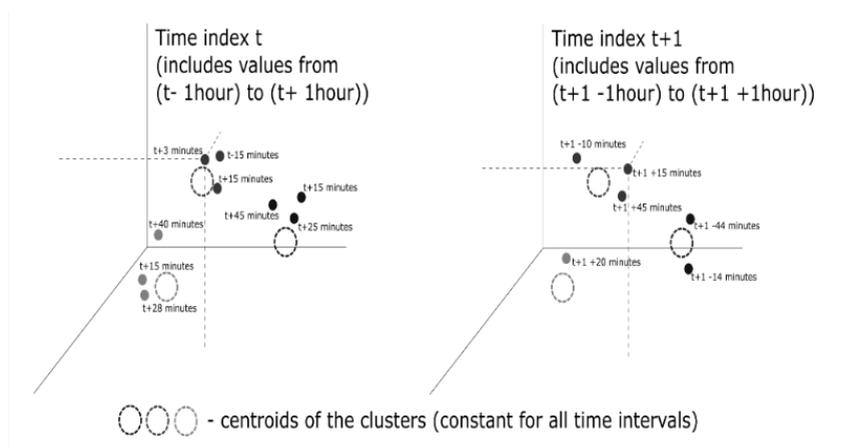


Рисунок 4 – Первый этап работы программы, на котором выбирается временной шаг дискретизации пространства сейсмических событий

На втором этапе работу программы можно представить в виде следующей цепочки:

1. Происходит оценка значения некоторых переменных (непрерывных или категориальных) в узлах регулярной временной сетки.

2. С помощью композитной модели кластеризации вычисляются координаты центроида кластера- X , Y , Z . Для каждого временного индекса на регулярной сетке определяется набор точек (строк из таблицы). Эти точки относятся к одному и тому же периоду времени, но могут принадлежать к разным

пространственным кластерам. Таким образом, на данном этапе однозначно определяются координаты центроида кластера и значение индекса времени для этих каждого сейсмического события.

3. Рассчитывается разность значений переменных для каждого сейсмического события. Таким образом формируется матрица расстояний от каждого сейсмического событий до центроида кластера.

4. На основе полученных расстояний прогнозируется значение целевой переменной в центре кластера для новой временной метки с использованием алгоритма К-ближайшего соседа, который передает значения расстояний для всех четырех координат в качестве признаков.

5. Итогом работы программы является создание набора данных, в котором каждая координата центроида кластера связана с определенным сейсмическим событием

3. Прогноз опасных геодинамических явлений, при ведении работ в техногенно нарушенном массиве, должен включать в себя результаты математического моделирования разработанной композитной модели, для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Задачу прогноза опасных геодинамических явлений можно свести к задаче поиска кластеров-"очагов разрушения горной породы". Для корректного определения таких кластеров, необходимо было вычислить значения гиперпараметров предлагаемой композитной модели. Такой подход позволит получить набор сейсмических кластеров, которые могут быть потенциальными триггерами опасных проявлений горного давления. Для оценки качества моделирования в работе предлагается ввести два критерия оценки качества итоговой модели, полученной в процессе многокритериальной оптимизации:

1. Критерий Silhouette. Силуэтом выборки называется средняя величина силуэта объектов данной выборки. Таким образом, силуэт показывает, насколько среднее расстояние до объектов своего кластера отличается от среднего расстояния до объектов других кластеров. Данная величина лежит в диапазоне $[-1, 1]$. Значения, близкие к -1 , соответствуют плохим (разрозненным)

кластерам, значения, близкие к нулю, говорят о том, что кластеры пересекаются и накладываются друг на друга, значения, близкие к 1, соответствуют "плотным", четко выделенным кластерам, то есть, чем больше силуэт, тем более четко выделены кластеры, и они представляют собой компактные, плотно сгруппированные облака точек.

2. Критерий гомогенности кластера. Данный критерий определяет насколько однородными являются полученные кластеры с точки зрения распределения в них классов сейсмических событий. Данная величина лежит в диапазоне $[0,1]$. Значения, близкие к 1, соответствуют однородным кластерам, которые можно интерпретировать с точки зрения механики разрушения горных пород, значения близкие к нулю, говорят о том, что кластеры неоднородны и не могут быть интерпретированы с точки зрения геомеханики.

Данный подход реализован в виде программного обеспечение системы прогноза опасных геодинамических явлений в среде разработки Python для автоматического определения основных параметров сейсмических и деформационных процессов внутри массива горных пород. Данная реализация запатентована под следующим названием: «Программа «SeDef» для обработки данных сейсмического мониторинга и поиска кластеров-очагов сейсмических событий с использованием методов иерархической кластеризации.

Существенная часть подходов к прогнозным оценкам проявлений опасного горного давления основывается на следующей концепции: по мере разрушения горной породы происходит формирование нескольких стадий разрушения, с постепенным переходом от одной стадии к другой. В реальности, наиболее часто, опасные проявления горного давления выражаются в виде горных ударов и других проявлений техногенной сейсмичности. В результате визуального анализа кластеров, изображенных на рисунке 5, было сделано предположение о 7 потенциально опасных кластерах сейсмических событий, которые могут являться индикаторами начала формирования процессов деформации в массиве горных пород. Данные кластеры показаны на рисунке 6.

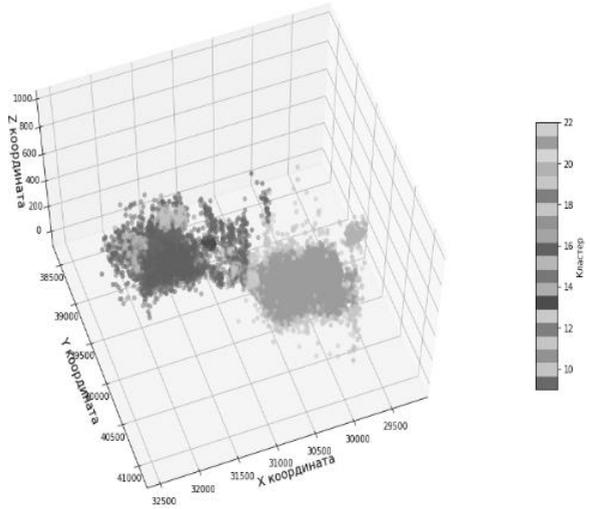


Рисунок 5 – Набор кластеров сейсмических событий полученный в результате применения композитной модели

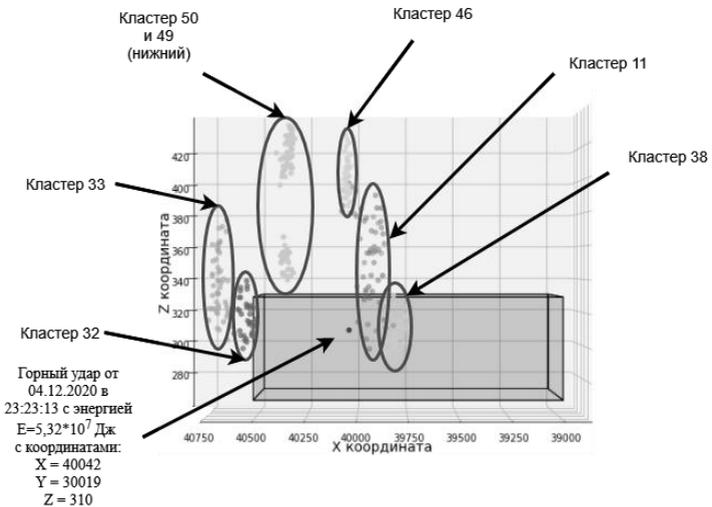


Рисунок 6 – Потенциально опасные кластеры сейсмических событий.

Как видно из рисунка 6 алгоритм смог выделить кластеры «неклассических» форм (эллипсоиды), которые условно можно поделить на 3 группы по расположению относительно произошедшего горного удара. Кластеры 32-33 находятся севернее точки удара, кластеры 50,49,46 находятся «сверху» над точкой удара. Кластеры 11 и 38 находятся на юго-востоке от точки удара. Следует отметить, что все выделенные кластеры являются «устойчивыми» во времени, т.е. включают в себя сейсмические события в течении всего периода мониторинга в 2020 году. На основе анализа результатов моделирования композитной модели были сделаны следующие выводы:

1. Были предложены даты возможных горных ударов (погрешность – 1 день).

2. Были определены количество кластеров сейсмических событий потенциально опасных для ведения горных работ (7 штук) и их пространственные координаты и размеры.

3. Были определены события-«предвестники» предполагаемых горных работ. Для каждого из предполагаемых горных ударов были найдены свои события предвестники. Их количество, разница во времени и значения энергий напрямую влияют на вероятность наступления горного удара.

Была дана высокая оценка вероятности наступления горного удара 03.12.20. Это связано с анализом распределения выбранных событий во времени, отсутствием горного удара 17 ноября 2020, ростом числа событий в период с 21 по 28 ноября 2020 года. Учитывая, что все эти события сосредоточены в кластерах 32 и 33 представляется возможным спрогнозировать местоположения предполагаемого горного удара, однако для этого требуется дополнительные данные визуального мониторинга трещин в массиве горных пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи - прогноза опасных геодинамических явлений на Кировском руднике КФ АО «Апатит». Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Сформировано предположение о связи между минимальным значением тренда сейсмической активности и наступлением опасного геодинамического события. Резкая смена тренда, без наличия периода стационарности тренда, может служить триггером для проявления опасных геодинамических явлений.

2. Сформировано предположение о связи между разницей значений трендов сейсмической активности в точке начала роста и в точке наступления опасного события. Данное предположение согласуется с эвристикой «трех сигм» и его можно использовать в качестве «предвестника» опасных геодинамических событий. Поскольку наступлению опасного периода предшествует период «затишья» длиной от 15 до 30 дней, разработанная методика позволит предпринять меры по предотвращению проявления опасных геодинамических событий.

3. Предложена методика прогноза опасных геодинамических явлений на основе данных сейсмического мониторинга, с помощью методов машинного обучения.

4. На основании проведенных исследований разработан вычислительный программный комплекс алгоритм прогноза опасных геодинамических явлений.

5. На основании данных, полученных в ходе сейсмического мониторинга за 2018 год подтверждена достоверность результатов применения композитной модели прогноза опасных геодинамических явлений. Полученные результаты являются развитием идеи, предложенной в данной работе, об использовании методов машинного обучения при работе с математическими моделями временных рядов, которые базируются на данных сейсмического мониторинга.

6. Предложена схема композитной модели анализа данных сейсмического мониторинга. На основании данных сейсмического мониторинга за 2020 год, были получены экспериментальные данные. Анализ полученных данных, их распределения во времени и пространстве, выявил даты двух потенциально возможных опасных проявлений ГД 06.04.2020 и 03.12.20 соответственно. При этом, фактические даты горных ударов от 08.04.2020 и 04.12.2020 отличаются от предполагаемых на 1-2 дня.

7. В случае с фактическим горным ударом от 06.07.2020 был проведен дополнительный анализ временного ряда сейсмического мониторинга и внесены поправки в прогноз опасных проявлений ГД. Таким образом можно утверждать, что композитная модель, основанная на анализе временного ряда сейсмического мониторинга и прогнозе распределения кластеров- «очагов» сейсмических событий в МГП, является эффективным средством контроля опасных проявлений ГД.

Перспективы развития темы диссертации преимущественно связаны с использованием современных методов математического и имитационного моделирования с использованием алгоритмов машинного обучения. Поскольку кластеризация сейсмических событий в массиве горных пород и их связь с данными станций деформационного мониторинга базируются на основных положениях теории алгоритмов эволюционной оптимизации, теории временных рядов, теории математической статистик, весьма актуальной и перспективной задачей является построение математических моделей с учетом обратной связи датчиков сейсмического мониторинга.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Господариков, А.П. О методе обработки данных сейсмического и деформационного мониторинга при ведении подземных горных работ на примере кикусвумчоррского месторождения АО «Апатит» / Господариков А.П., Морозов К.В., Ревин И.Е. // DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-157-168 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 157–168.

2. Ревин, И.Е. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кикусвумчоррского месторождения АО "Апатит" / Ревин И.Е., Господариков А.П., Морозов К.В. // DOI: 10.31897/PMI.2021.6.628// Записки Горного института. - 2021. - Т.252.

Свидетельство:

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021616652. Программа «SeDef» для

обработки данных сейсмического мониторинга и поиска кластеров-очагов сейсмических событий с использованием методов иерархической кластеризации : заявл. 16.04.2021 : опубл. 23.04.2021 / Ревин И.Е., Господариков А.П.; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 6 с.: ил.