



Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения

С.В. Усанов, Ю.П. Коновалова✉, Е.Ю. Ефремов, О.Д. Харисова, А.В. Усанова
Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация
✉ lisjul@mail.ru

Резюме: Внезапные аномальные деформационные процессы в массиве горных пород приводят к нарушениям эксплуатации объектов недропользования и подвергают опасности жизнь и здоровье людей. Исследования показывают, что на внезапность деформационных явлений могут оказывать влияние физико-географические условия, физико-механические свойства пород, особенности структурно-тектонического строения горного массива. Одним из важных параметров, определяющих развитие катастрофических деформационных процессов, является геодинамическая активность массива, формирующая его напряженно-деформированное состояние. Цель работы – разработка методологических подходов к выявлению потенциально опасных участков горного массива. Для этого проведены экспериментальные исследования месторождения, где происходили аварийные деформационные процессы, и проанализирована роль факторов, влияющих на их возникновение. Эксперименты выполнены на базе комплексного подхода с использованием геологических, геофизических и геодезических методов. В результате исследования установлено, что внезапные аварийные деформационные процессы развиваются в областях, где сосредоточено максимальное количество осложняющих факторов. Разработана рейтинговая оценка участка недропользования по совокупности факторов, влияющих на устойчивость горного массива. Разработанные подходы позволяют диагностировать массив горных пород и выявлять в нем области, где геомеханические процессы развиваются по особым параметрам. Районирование территорий может служить основой при разработке системы автоматизированного мониторинга деформаций горного массива для предупреждения внезапных аварийных событий.

Ключевые слова: массив горных пород, обрушение горных пород, провал, безопасность, иерархическая блочность, самоорганизация, напряженно-деформированное состояние, геодинамические движения

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания №075-00412-22 ПР. Тема 3 2022-202, (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.

Авторы статьи выражают глубокую признательность сотрудникам отдела геомеханики Института горного дела Уральского отделения РАН, теоретические и экспериментальные исследования которых послужили основой представленной работы.

Для цитирования: Усанов С.В., Коновалова Ю.П., Ефремов Е.Ю., Харисова О.Д., Усанова А.В. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения. *Горная промышленность*. 2022;(1S):111–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118.

Unexpected deformation processes in the rock mass in surface mining: Emergence factors and prevention capabilities

S.V. Usanov, Yu.P. Konovalova✉, E.Yu. Efremov, O.D. Kharisova, A.V. Usanova
Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation
✉ lisjul@mail.ru

Abstract: Unexpected abnormal deformation processes in rock masses lead to disruptions in the operation of mining facilities and endanger human life and health. The studies show that physiographic conditions, physical and mechanical properties of rocks, features of structural and tectonic structure of the rock mass can influence the unexpected character of the deformation phenomena. One of the important parameters that determines the development of catastrophic deformation processes is the geodynamic activity of the rock mass, which forms its stress state. The purpose of the research is to develop methodological approaches to identification of potentially hazardous areas in the rock mass. To do this, experimental studies were carried out in a mine where unexpected abnormal deformations took place, and the role of influencing factors was analyzed. Experiments were performed using geological, geophysical and geodetic methods. As the result of the study, it was established that unexpected emergency deformation processes develop in areas where the maximum number of complicating factors is concentrated. A rating evaluation of the area of surface development has been developed based on a combination of factors affecting the stability of the rock mass. The developed approaches make it possible to diagnose the rock mass and identify areas where geomechanical processes develop according to special parameters. Area zoning can be the basis for the development of automated monitoring system of rock mass deformations to prevent unexpected emergency events.



Keywords: rock mass, surface collapse, ground cavity, safety, hierarchical blockiness, self-organization, stress state, geodynamic movements

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the State Contract №075-00412-22 PR. Topic 3 2022-202, (FUWE-2022-0003), №1021062010536-3-1.5.1.

The authors express their deep gratitude to the staff of the Geomechanics Department of the Institute of Mining, Ural Branch of the RAS, whose theoretical and experimental research provided the basis for the work presented.

For citation: Usanov S.V., Konovalova Yu.P., Efremov E.Yu., Kharisova O.D., Usanova A.V. Unexpected deformation processes in the rock mass in surface mining: Emergence factors and prevention capabilities. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):111–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118.



С.В. Усанов,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
сдвига горных пород
Института горного дела
Уральского отделения РАН



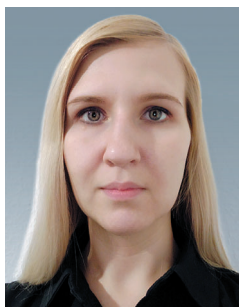
Е.Ю. Ефремов,
научный сотрудник
лаборатории сдвига
горных пород
Института горного дела
Уральского отделения РАН



Ю.П. Коновалова,
старший научный сотрудник
лаборатории сдвига
горных пород
Института горного дела
Уральского отделения РАН



А.В. Усанова,
научный сотрудник
лаборатории геомеханики
подземных сооружений
Института горного дела
Уральского отделения РАН



О.Д. Харисова,
научный сотрудник
лаборатории сдвига
горных пород
Института горного дела
Уральского отделения РАН

Введение

Специфика протекания геомеханических процессов в массиве горных пород при недропользовании зависит от множества факторов эндогенного и экзогенного происхождения. Одни процессы проявляются монотонно, другие имеют динамический характер, а третьи носят незакономерный, случайный характер, которым, собственно, и определяется понятие: внезапное аварийное деформирование горных массивов.

В нормативных документах термин «внезапный» распространяется только на наличие и проявление деформационных процессов, происходящих при комбинированной или подземной разработке месторождений: внезапные выбросы породы, газа, пыли, горно-тектонические и тех-

ногенные (наведенные) землетрясения, провальные явления в результате подработки земной поверхности или при вскрытии погребенного карста. В области открытой разработки термин «внезапный» замещен термином «опасный». К опасным деформациям относятся сдвиги и обрушения откосов и уступов карьера.

Вне зависимости от терминологии недропользователи всегда оказываются неготовыми к авариям внезапного деформационного происхождения. Такие непрогнозируемые геомеханические явления приводят к нарушениям эксплуатации объектов недропользования, а самое главное, подвергают опасности жизнь и здоровье людей.

Известны многочисленные примеры внезапных обрушений горных массивов в ходе проведения горных работ. Некоторые из них обрели статус чрезвычайных ситуаций локального и муниципального характера [1–3]. Проблема внезапных аварийных деформационных процессов неоднократно подчеркивалась не только в отечественной, но и зарубежной литературе: например, в работах [4–8] описан ряд аварий на рудниках разных стран как при подземной, так и при открытой разработке месторождений.

Комплексным исследованиям по выявлению факторов, влияющих на внезапность деформационных процессов и раскрывающих механизм их протекания на конкретных месторождениях, посвящены работы многих российских



[9–14] и зарубежных [15–19] авторов. Отмечается, что масштабные аварии всегда сопровождаются предвестниками [11, 17, 18], а локальные аварии могут не иметь видимых предвестников.

В научной литературе исследуются различные группы факторов, влияющих на проявления внезапных деформационных процессов. Физико-географические условия (климат, рельеф, гидрологические условия) обуславливают многие процессы, происходящие в массиве горных пород при недропользовании.

Петрографические особенности и физико-механические свойства пород – группа факторов, которая очень значима для изучения всех деформационных процессов в горном массиве [14].

Склонность массива к потенциальной аварии определяется также особенностями его структурно-тектонического строения. Наличие разломов, зон поперечного сдвига, поверхностей скольжения, геологических возмущений в виде складок, даек, зон ослабления свидетельствует о возможном проявлении аварийных деформаций.

Важнейшим фактором, определяющим развитие катастрофических деформационных процессов при недропользовании, является напряженно-деформированное состояние массива горных пород. К настоящему времени экспериментально установлено, что напряженно-деформированное состояние определяется двумя фундаментальными свойствами массива горных пород – его иерархически-блочным строением и постоянной подвижностью, вызванной современными геодинамическими движениями [20]. Геодинамические движения обусловлены и техногенными, и природными факторами [21]. Взаимодействие этих двух свойств массива горных пород приводит к явлению вторичного структурирования или самоорганизации в нем относительно стабильных структур. Такие преобразования в массиве приводят к формированию дискретной структуры полей напряженно-деформированного состояния. Как показывает опыт инструментальных исследований, граничные области формирующихся самоорганизованных блоков имеют напряжения и деформации в несколько раз выше, чем внутриблочные, и именно к таким зонам приурочены чаще всего аномальные, в том числе внезапные, деформационные процессы.

В связи с тем, что массив горных пород представляет собой открытую нелинейную систему, обладающую свойствами иерархичности, самоподобия (масштабной инвариантности) и циклическим характером функционирования, прогноз внезапных аварийных деформационных процессов с помощью классических, линейных методов весьма затруднителен. Идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов являются фундаментом эволюционной концепции разрушения [22]. Любая развивающаяся система должна обязательно пройти определенный эволюционный путь. Как отмечается в работе [23, с. 22], эволюция напряженно-деформированного состояния геологической среды под воздействием природных или техногенных факторов непременно должна пройти стадии адаптации, изменчивости и в стадии отбора – точке бифуркации – завершиться либо катастрофой типа горного удара или землетрясения, либо «аномальным» деформированием. Таким образом, катастрофы в таких системах неизбежны, т.к. динамическая система в силу внутренних нелинейных свойств и скоррелированности деформационного процесса на широком спектре масштабов стремится к критическому состоянию [22].

Основываясь на современных научных представлениях о природе и факторах возникновения внезапных деформаций и собственном многолетнем опыте в изучении напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях его естественного залегания и в области влияния горных работ, авторы статьи исследовали месторождения Урала и Казахстана, где на поверхности возникали подобные явления [1–3; 20]. Цель исследований заключалась в изучении и систематизировании факторов, способных влиять на аварийные деформационные процессы, и выработке методологического подхода к определению потенциальных участков возникновения опасных явлений. В данной статье приводится пример комплексного исследования факторов, способствовавших возникновению катастрофической деформации в 2015 г. на одном из таких месторождений – Качарском карьере (г. Рудный, Казахстан) в районе строительства дробильно-конвейерного комплекса.

Методы исследования

Методы исследования геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород, которые приводят в том числе и к возникновению аварийных деформаций, требуют комплексного подхода. Необходимо изучение физико-механических свойств горных пород, структурных особенностей массива и закономерностей вторичного структурирования геофизическими методами, напряженно-деформированного состояния по параметрам современных геодинамических движений на различных пространственно-временных уровнях с использованием геодезических методов.

Изучение структурных особенностей массива горных пород базируется на оценке тектонического строения по фондовым геологическим данным, а также методов аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов. Для изучения детального строения массива, определения точного местоположения тектонических нарушений, их протяженности и размеров применяются геофизические методы: методы электроразведки, спектрального сейсмопрофилирования, георадарного зондирования, которые позволяют исследовать массив на глубину до 150 м от поверхности.

Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород определяется параметрами современных геодинамических движений. В зависимости от пространственно-временного масштаба наблюдательной системы и способа измерений выделяют два вида современных геодинамических движений – трендовые и циклические короткопериодные движения.

К трендовым движениям относятся смещения, наблюдаемые за периоды от полугода-года до нескольких десятков лет. В зоне влияния горных работ трендовые движения формируются в результате перераспределения природных напряжений и деформаций в породном массиве под воздействием техногенных факторов.

Методика инструментальных наблюдений за деформациями горного массива вокруг карьера заключается в периодическом переопределении пространственных координат пунктов наблюдательной станции и определении полных векторов смещений, величин вертикальных и горизонтальных деформаций горного массива. Измерения осуществляются при помощи приборов и методов спутниковой геодезии.

К циклическим короткопериодным движениям относятся

смещения, продолжительность циклов которых укладывается один и более раз в сеансы непрерывных наблюдений, длящихся по несколько часов. Продолжительность циклов наблюдается от нескольких минут до нескольких часов.

Определение параметров циклических короткопериодных геодинамических движений выполняется в виде непрерывного мониторинга спутниковыми методами за системой реперов в течение нескольких часов. Методика оценки деформационного поля, создаваемого циклическими короткопериодными движениями, изложена в работе [24].

Комплексные экспериментальные исследования горного массива

Качарское месторождение магнетитовых руд расположено в Федоровском и Костанайском районах Костанайской области. Качарский карьер является одним из крупнейших карьеров в мире. Глубина карьера в настоящее время составляет около 440 м, а проектная глубина – 764 м. Диаметр карьера по поверхности превышает 3000 м. Объем вынудой горной массы к концу разработки превысит 11 млрд м³. Большая часть горной породы складывается во внешние отвалы вокруг карьера.

Деформационные процессы в Качарском происходили достаточно часто – 4–10 событий в год. Осенью 2015 г. в период строительства подпорных стенок дробильного комплекса произошла катастрофическая деформация юго-западного борта. На площадке строительства дробильного комплекса образовались трещины сдвигового характера. Глубина развития трещин достигла 70 м. Массив горных пород между трещинами сдвига оказался деструктурированным и разбитым на несколько обособленных деформационных участков, где происходили локальные проседания, сдвиги, выколаживания уступов и уплотнение деструктурированных пород. В результате этих процессов на горизонте –30 м проседания отдельных участков по инструментальным наблюдениям превысили 5 м. Общие размеры деформации юго-западного борта по фронту составляют 550 м, а по высоте – 160 м. Вовлеченными в деформацию оказались три транспортные бермы. Продолжительность острой фазы составила семь месяцев при скоростях смещения больше 10 мм/сут.

В проектных решениях районирование карьера по инженерно-геологическим условиям осуществлялось на основе физико-механических свойств и условий залегания комплекса палеозойских скальных пород. Наиболее неблагоприятными инженерно-геологическими условиями в пределах карьера характеризуется участок, охватывающий западный, северо-западный и юго-западный борта по причине того, что массив здесь представлен карстующимися известняками. Таким образом, катастрофическое деформирование приурочено к району со сложными инженерно-геологическими условиями.

Оценка структурно-тектонической нарушенности аварийного юго-западного борта карьера производилась геофизическими методами в варианте спектрального сейсмопрофилирования с высокой детальностью. Для определения общего состояния карьера пройдено два замкнутых контура карьера. В районе аварии проводилось детальное профилирование практически по всем уступам, пригодным для измерения, и по поверхности верхней бермы. Общая длина пройденных профилей на аварийном участке составила 10 км.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в районе Качарского карьера определены параметры

трендовых геодинамических движений карьера. Методами спутниковой геодезии переопределены координаты 25 пунктов Государственной геодезической сети и опорной маркшейдерской сети на площади размером 25 км – 15 км.

В ходе геодинамической диагностики прибортовых массивов Качарского карьера для определения циклических короткопериодных движений проведены непрерывные спутниковые наблюдения продолжительностью от 7 до 12 ч на шести площадках, расположенных по периметру карьера. Пункты наблюдательной сети охватили также аварийную площадку. Согласно методике [24] по преобладающему направлению и максимальной амплитуде короткопериодных движений для каждого из 56 интервалов определены параметры тензоров деформаций горного массива.

Результаты исследований

По результатам геофизических измерений построена структурно-геомеханическая модель карьера (рис. 1). Глубина распространения структурных нарушений варьируется в широких пределах – от первых десятков метров до более чем 150 м, т.е. на всю глубину посчитанных профилей. Структурные нарушения различного размера выявлены по всему контуру карьера. Наиболее сильно нарушена юго-западная часть карьера. Размер по простиранию профиля каждого структурного нарушения меняется от 20–30 м до первых сотен метров. Выделено около 40 структурных нарушений, часть из которых сгруппирована в четыре наиболее крупных подтвержденных несколькими профилями области. Одни выделенные аномалии структурного строения совпадают с контактами геологических разностей, другие попадают на подтвержденную тектонику, однако наибольшее количество нарушений приурочено к карстующимся известнякам, особенно к тем участкам, где известняки нарушены тектоникой. Наиболее нарушен инженерно-геологический участок, охватывающий западный, северо-западный и юго-западный борта, особенно его южная и юго-западная часть. Другие участки нарушены в значительно меньшей степени и, с точки зрения устойчивости бортов карьера, имеют более высокую прочность.

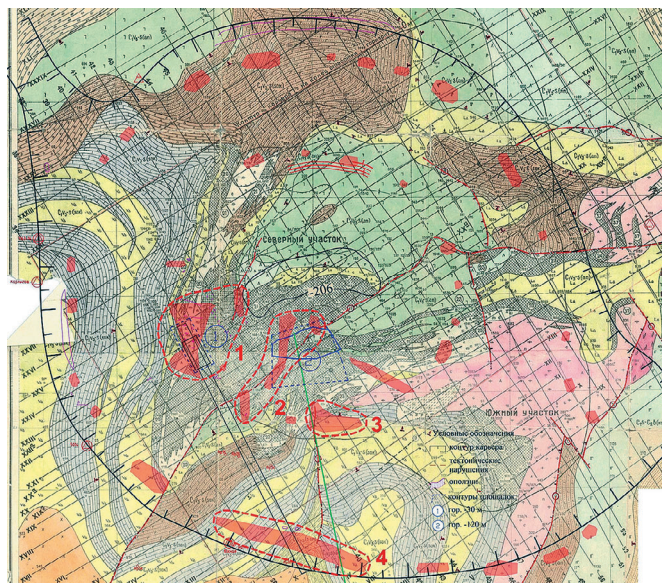


Рис. 1
Карта выявленных геофизическими методами аномалий

Fig. 1
AMap of anomalies detected by geophysical methods



Результаты определения трендовых и циклических короткопериодных смещений преобразованы в тензорное представление деформационного поля с получением главных компонентов тензора деформаций – главных линейных деформаций «растяжение – сжатие» ϵ_1, ϵ_2 и дирекционного угла ϕ , определяющего направление ϵ_1 [24]. Распределение значений главных деформаций по территории карьера представлено на рис. 2 и 3.

Неблагоприятные с точки зрения геодинамики участки выявляются по следующим критериям:

- по максимальным векторам смещений для трендовых движений и по максимальному значению амплитуд, представляющих собой разность между минимальным и максимальным значением смещений в наборе дискретных измерений многочасового сеанса наблюдений, для короткопериодных движений, а также степени их концентрации;
- по максимальному значению деформаций и степени их концентрации;
- по границе перехода от растягивающих деформаций к сжимающим.

Из опыта геодинамических исследований на различных месторождениях полезных ископаемых установлено, что аварии деформационного характера зачастую происходят на границах кластеров противоположного знака (растяжения/сжатия) и в очагах их концентрации.

По данным трендовых смещений концентрированное сжатие массива происходит в центре южного борта карьера (рис. 2). Граница между кластерами противоположного знака проходит в субмеридиональном направлении в верхней и средней частях западного борта карьера и пересекает аварийную площадку размещения дробильного комплекса на горизонте -30 м, где и произошла крупнейшая в истории карьера деформация борта. Межкластерная граница в верхней части северного борта меняет направление простирания и проходит внутри карьера по касательной к северо-восточному борту. В районе границы горные работы развиваются пока в осадочной толще, однако имеют место незначительные деформации уступов.

По данным распределения короткопериодных движений западный борт также имеет более неоднородные деформационные характеристики в сравнении с другими бортами

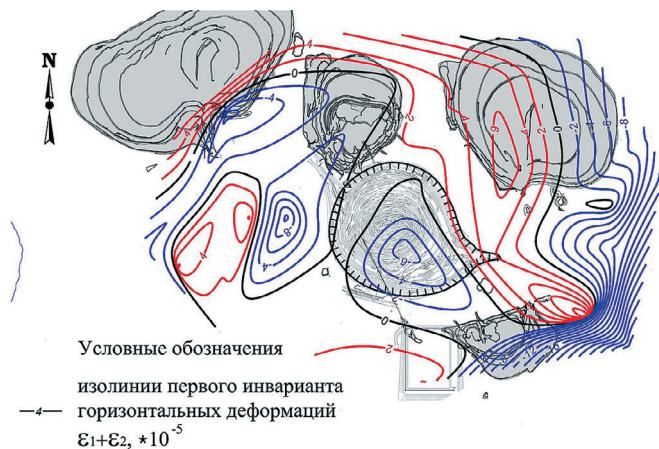


Рис. 2
Изолинии первого инварианта горизонтальных деформаций по данным трендовых смещений пунктов наблюдательной станции Качарского карьера

Fig. 2
Isolines of the first invariant of horizontal deformations based on trend displacements of the observation station marks at the Kachar open-pit mine

(рис. 3). Здесь располагаются зоны повышенных концентраций растяжений и сжатий, которые поочередно сменяют друг друга. Концентрация сжимающих деформаций с повышенным градиентом также имеет место в северо-северо-восточном борту карьера. Таким образом, по параметрам современных короткопериодных движений на Качарском карьере наиболее неблагоприятными областями являются западный и северный борты, а также два участка на нижних горизонтах в южном борту карьера.

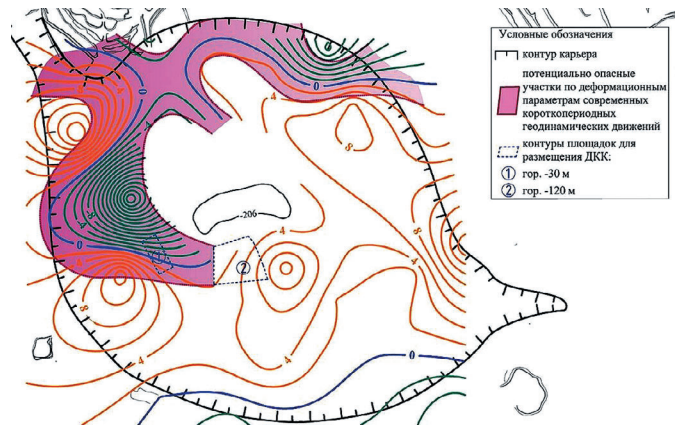


Рис. 3
Изолинии первого инварианта горизонтальных деформаций $(\epsilon_1 + \epsilon_2) \times 10^{-5}$ по данным циклических короткопериодных движений с выделенными потенциально опасными участками

Fig. 3
Isolines of the first invariant of horizontal deformations $(\epsilon_1 + \epsilon_2) \times 10^{-5}$ based on cyclic short-period movements with identified potentially hazardous zones

Обсуждение результатов

Устойчивость массива горных пород при недропользовании зависит от большого числа факторов. Очевидно, что чем большее их количество концентрируется в определенном месте, тем вероятнее развитие здесь аварийных деформаций. Таким образом, для районирования горного массива по устойчивости необходима его комплексная оценка по совокупности негативных факторов. Для анализа их распределения по исследуемой территории создается соответствующая геoinформационная система.

В ходе данного исследования для районирования бортов карьера по устойчивости реализована геoinформационная система, содержащая следующие слои: физико-механические и прочностные характеристики горных пород; угол падения напластования геологических пород в сторону выработанного пространства; области структурных ослаблений массива по результатам геофизических исследований; границы кластеров напряженно-деформированного состояния и области концентрации деформаций от трендовых геодинамических движений; границы кластеров напряженно-деформированного состояния, области концентрации деформаций и интенсивности короткопериодных геодинамических движений; распределение фактических деформаций бортов и уступов по поверхности карьера. В результате совмещения слоев с информацией по перечисленным ключевым факторам весь карьер получается под воздействием того или иного осложнения (рис. 4), но перекрытие слоев имеет свои особенности и закономерности. Наибольшее количество факторов, снижающих устойчивость бортов карьера, приходится на западный борт, где произошла самая крупная деформация борта Качарского карьера.

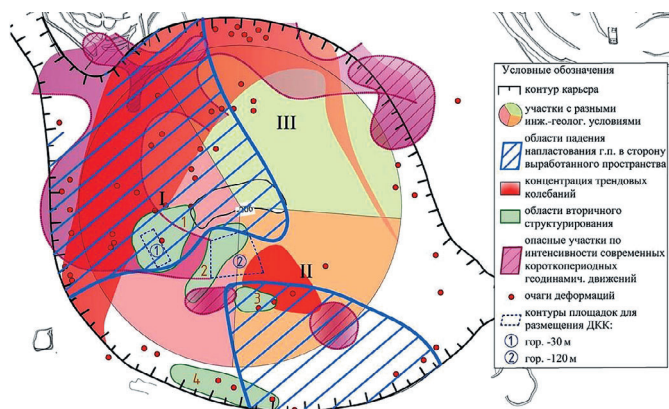


Рис. 4
Совмещение всех областей влияния негативных факторов по комплексу геомеханических исследований в бортах Качарского карьера

Fig. 4
Superposition of all impact zones of negative factors according to complex of geomechanical investigations of the Kachar open-pit walls

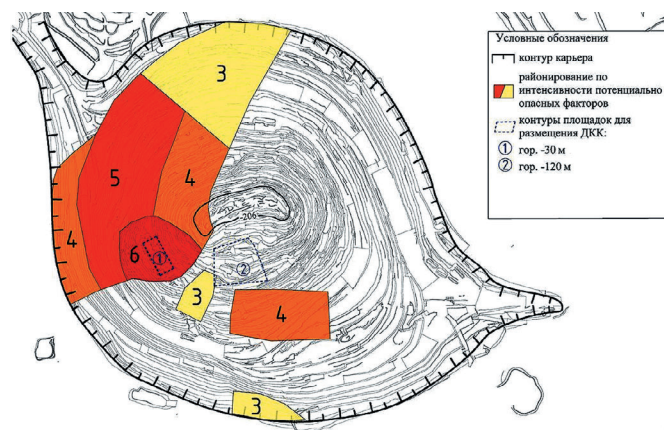


Рис. 5
Районирование территории карьера по количеству факторов, влияющих на устойчивость бортов

Fig. 5
Zoning of the open-pit mine according to the number of factors affecting the wall stability

В результате сопоставления и интерпретации данных комплекса теоретических и инструментальных геомеханических исследований выделены участки, где высока вероятность проявления негативных деформационных процессов, влияющих на устойчивость бортов Качарского карьера (рис. 5). Ранжирование участков выполнено по количеству (цифры на рисунке) выявленных в данной области карьерного пространства осложняющих факторов. Соответственно, чем больше факторов, тем участок опаснее с точки зрения устойчивости и возможности проявления аномальных деформаций.

Заключение

Как показывают опыт и многочисленные исследования, внезапные деформационные процессы, проявляющиеся в горном массиве при недропользовании, зависят от многих факторов. Одним из факторов является геодинамиче-

ская активность массива, формирующая его напряженно-деформированное состояние. Зачастую горные работы инициируют природную геодинамическую активность, которая на современном уровне проектирования горных выработок практически не учитывается.

По данным проведенных исследований на примере Качарского карьера, где произошли аварийные аномальные деформации борта карьера, установлено, что предложенная рейтинговая оценка участка недропользования по совокупности факторов, влияющих на подвижность горного массива, может являться базой для прогноза эпицентров внезапных деформационных явлений. Кроме того, подобное районирование может служить основой при разработке системы автоматизированного мониторинга деформаций горного массива для предупреждения аварийных событий.

Список литературы

1. Харисова О. Д., Харисов Т. Ф. Прогноз обрушений земной поверхности по данным инструментальных наблюдений за сдвижением горных пород при подземной разработке месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):264–274. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-264-274>
2. Ручкин В.И., Коновалова Ю.П. Изменение напряженно-деформированного состояния геологической среды под воздействием комплекса естественных и техногенных геодинамических факторов на горнодобывающих предприятиях. *Проблемы недропользования*. 2015;(1):32–37. Режим доступа: <https://trud.igdur.ru/edition/4/5>
3. Усанов С.В. Мониторинг геодинамических движений горного массива Высокогорского железорудного месторождения при масштабном техногенном воздействии сложного горнодобывающего комплекса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(10):208–213.
4. Longoni L., Papini M., Brambilla D., Arosio D., Zanzi L. The risk of collapse in abandoned mine sites: the issue of data uncertainty. *Open Geosciences*. 2016;8(1):246–258. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0022>
5. Al Heib M., Duval C., Theoleyre F., Watelet J.-M., Gombert P. Analysis of the historical collapse of an abandoned underground chalk mine in 1961 in Clamart (Paris, France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015;74(3):1001–1018. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0677-6>
6. Strozik G., Jendrus R., Manowska A., Popczyk M. Mine subsidence as a post-mining effect in the Upper Silesia coal basin. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016;25(2):777–785. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61117>
7. Cui X., Gao Y., Yuan D. Sudden surface collapse disasters caused by shallow partial mining in Datong coalfield, China. *Natural Hazards*. 2014;74(2):911–929. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1221-5>
8. Wang J.-A., Shang X.C., Ma H.T. Investigation of catastrophic ground collapse in Xingtai gypsum mines in China. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2008;45(8):1480–1499. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.02.012>



9. Зеленцов С.Н., Кутепов Ю.Ю., Боргер Е.Б. Изучение провалов и механизма их образования на подрабатываемой земной поверхности шахты им. А.Д. Рубана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(5):271–280. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/5/271_280_5_2017.pdf
10. Лобанова Т.В. Особенности обрушения земной поверхности над выработанным пространством слепых рудных тел юго-восточного участка Таштагольского месторождения. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019;6(1):169–175. <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060129>
11. Kharisova O., Kharisov T. Searching for possible precursors of mining-induced ground collapse using long-term geodetic monitoring data. *Engineering Geology*. 2021;289:106–173. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106173>
12. Белодедов А.А., Должиков П.Н., Легостаев С.О. Анализ механизма образования деформаций земной поверхности над горными выработками закрытых шахт. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2017;(1):160–169.
13. Кожогулов К.Ч., Тажибаев К.Т., Абдибаитов Ш.А. Анализ влияния систем разработок на сдвиги горных пород и образование провалов земной поверхности. *Наука и новые технологии*. 2008;(7-8):24–26. Режим доступа: <http://science-journal.kg/media/Papers/nntiik/2008/7/nntiik-2008-N7-8-24-26.pdf>
14. Абдибаитов Ш.А., Исаев Б.А., Абдиев А.Р. Влияние физико-механических свойств и структурных нарушений пород на процесс образования провалов земной поверхности. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2017;17(8):140–143. Режим доступа: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/30/1359>
15. Xia K., Chen C., Yang K., Zhang H., Pang H. A case study on the characteristics of footwall ground deformation and movement and their mechanisms. *Natural Hazards*. 2020;104:1039–1077. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04204-4>
16. Hui X., Ma F., Zhao H., Xu J. Monitoring and statistical analysis of mine subsidence at three metal mines in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019;78:3983–4001. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1367-6>
17. Szwedzicki T. Precursors to rock mass failure in underground mines. *Archives of Mining Sciences*. 2008;53(3):449–465.
18. Szwedzicki T. Rock mass behaviour prior to failure. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2003;40(4):573–584. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00023-6)
19. Baer G., Magen Y., Nof R.N., Raz E., Lyakhovskiy V., Shalev E. InSAR measurements and viscoelastic modeling of sinkhole precursory subsidence: Implications for sinkhole formation, early warning, and sediment properties. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2018;123(4):678–693. <https://doi.org/10.1002/2017JF004594>
20. Сашурин А.Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород. *Проблемы недропользования*. 2015;(1):38–44. Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/edition/4/6>
21. Кузьмин Ю.О. *Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании*. М.: Агентство экономических новостей; 1999. 220 с.
22. Макаров П.В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения. *Физическая мезомеханика*. 2010;13(5):97–112. Режим доступа: <http://www.ispms.ru/ru/journals/359/1378/>
23. Мельников Н.Н. (ред.) *Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2012. 632 с.
24. Коновалова Ю.П., Ручкин В.И. Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3-1):90-104. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104>

References

1. Kharisova O.D., Kharisov T.F. Prediction of ground surface collapse by instrumental observation data on rock mass movements during underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):264–274. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-264-274>
2. Ruchkin V.I., Konovalova Yu.P. Variation of the geological medium stressed-deformed state under the influence of the complex of natural and technogenic geo-dynamic factors in mining plants. *Problemy nedropolzovaniya*. 2015;(1):32–37. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/edition/4/5>
3. Usanov S.V. Monitoring of geodynamic movements of rocks under large-scale complicated mining impact in the Vysokogorsky iron ore mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014;(10):208–213. (In Russ.)
4. Longoni L., Papini M., Brambilla D., Arosio D., Zanzi L. The risk of collapse in abandoned mine sites: the issue of data uncertainty. *Open Geosciences*. 2016;8(1):246–258. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0022>
5. Al Heib M., Duval C., Theoleyre F., Watelet J.-M., Gombert P. Analysis of the historical collapse of an abandoned underground chalk mine in 1961 in Clamart (Paris, France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015;74(3):1001–1018. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0677-6>
6. Strozik G., Jendrus R., Manowska A., Popczyk M. Mine subsidence as a post-mining effect in the Upper Silesia coal basin. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016;25(2):777–785. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61117>
7. Cui X., Gao Y., Yuan D. Sudden surface collapse disasters caused by shallow partial mining in Datong coalfield, China. *Natural Hazards*. 2014;74(2):911–929. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1221-5>
8. Wang J.-A., Shang X.C., Ma H.T. Investigation of catastrophic ground collapse in Xingtai gypsum mines in China. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2008;45(8):1480–1499. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.02.012>
9. Zelentsov S.N., Kutepov Yu.Yu., Borger E.B. Investigation of surface failures and mechanism of their formation on undermined earth surface of the mine named after Ruban. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017;(5):271–280. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/5/271_280_5_2017.pdf
10. Lobanova T.V. Features of the earth's surface collapse over mined-out space of blind ore bodies in south-eastern site of the Tashtagol deposit. *Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences*. 2019;6(1):169–175. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FPVGN2019060129>
11. Kharisova O., Kharisov T. Searching for possible precursors of mining-induced ground collapse using long-term geodetic monitoring data. *Engineering Geology*. 2021;289:106–173. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106173>
12. Belodedov A.A., Dolzhikov P.N., Legostaev S.O. Analyzing mechanism of forming earth surface deformations over liquidated mines



- mining workings. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2017;(1):160–169. (In Russ.)
13. Kozhogulov K.Ch., Tazhibayev K.T., Abdibaitov Sh.A. Analysis of impact of mine systems on rock movement and formation of earth surface cavity. *Science, New Technologies and Innovations in Kyrgyzstan*. 2008;(7-8):24–26. (In Russ.) Available at: <http://science-journal.kg/media/Papers/nntiik/2008/7/nntiik-2008-N7-8-24-26.pdf>
14. Abdibaitov Sh.A., Isaev B.A., Abdiev A.R. Influence of physical and mechanical properties and structural infringement of rocks on the process of education failures earth surface. *Vestnik KRSU*. 2017;17(8):140–143. (In Russ.) Available at: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/30/1359>
15. Xia K., Chen C., Yang K., Zhang H., Pang H. A case study on the characteristics of footwall ground deformation and movement and their mechanisms. *Natural Hazards*. 2020;104:1039–1077. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04204-4>
16. Hui X., Ma F., Zhao H., Xu J. Monitoring and statistical analysis of mine subsidence at three metal mines in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019;78:3983–4001. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1367-6>
17. Szwedzicki T. Precursors to rock mass failure in underground mines. *Archives of Mining Sciences*. 2008;53(3):449–465.
18. Szwedzicki T. Rock mass behaviour prior to failure. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2003;40(4):573–584. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00023-6)
19. Baer G., Magen Y., Nof R.N., Raz E., Lyakhovsky V., Shalev E. InSAR measurements and viscoelastic modeling of sinkhole precursory subsidence: Implications for sinkhole formation, early warning, and sediment properties. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2018;123(4):678–693. <https://doi.org/10.1002/2017JF004594>
20. Sashourin A.D. Forming stressed-deformed state of hierarchically unitized rock mass. *Problemy nedropolzovaniya*. 2015;(1):38–44. (In Russ.) Available at: <https://trud.igduran.ru/edition/4/6>
21. Kuzmin Yu.O. *Recent geodynamics and evolution of geodynamic risk at use of subsoil resources*. Moscow: Agentstvo ekonomicheskikh novostei; 1999. 220 p. (In Russ.)
22. Makarov P.V. Self-organized criticality of deformation and prospects for fracture prediction. *Physical Mesomechanics*. 2010;13(5):97–112. Available at: <http://www.ispms.ru/ru/61/373/1560/>
23. Melnikov N.N. (ed.) *Earth's crust destruction and self-organization processes in highly industrial regions*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012. 632 p. (In Russ.)
24. Konovalova Yu.P., Ruchkin V.I. Assessment of influence of short-period geodynamic movements on stress-strain behavior of rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):90-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104>

Информация об авторах

Усанов Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией сдвижения горных пород, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Коновалова Юлия Павловна – старший научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: lisjul@mail.ru

Харисова Ольга Дмитриевна – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Ефремов Евгений Юрьевич – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Усанова Анна Витальевна – научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Information about the authors

Sergey V. Usanov – Chief of Rock Movement Laboratory, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Yuliya P. Konovalova – Senior Researcher of Rock Movement Laboratory, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: lisjul@mail.ru

Olga D. Kharisova – Researcher of Rock Movement Laboratory, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Evgeny Yu. Efremov – Researcher of Rock Movement Laboratory, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Anna V. Usanova – Researcher of Geomechanics Laboratory of Underground Structures, Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

Article info

Received: 06.10.2021

Revised: 22.10.2021

Accepted: 25.10.2021

Информация о статье

Поступила в редакцию: 06.10.2021

Поступила после рецензирования: 22.10.2021

Принята к публикации: 25.10.2021