

УДК 622.834:543.613.23

Стариков Геннадий Петрович

доктор технических наук, профессор,
директор Института физики горных процессов,
г. Донецк,
ул. Розы Люксембург, 72
e-mail: ifgpdnr@mail.ru

Шатохин Сергей Васильевич

младший научный сотрудник,
Институт физики горных процессов
e-mail: shatohin-sergej@mail.ru

Хашчеватская Надежда Владимировна

младший научный сотрудник,
Институт физики горных процессов
e-mail: mailbox93@gmail.com

**ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГИДРАТНОЙ
ВОДЫ НА ПРОЦЕСС
ВЫВАЛООБРАЗОВАНИЯ
ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СЛАНЦЕВ****Аннотация:*

В ходе проведения выработок часто встречаются сложные зоны для ведения горных работ. Одним из характерных катастрофических явлений в выработках глубоких шахт является вывалообразование. Факт вывалообразования свидетельствует о несоответствии работы крепи и способов обеспечения устойчивости выработки условиям их эксплуатации. Явление вывала горной породы в подготовительную выработку является предметом многочисленных исследований. Однако ни одна из теорий не объясняет локальности процесса вывалообразования. Существующие рекомендации, ориентированные на повышение устойчивости породных обнажений, не в полной мере могут дать необходимые сведения для своевременного уточнения и принятия мер по повышению устойчивости и снижению травматизма в процессе сооружения и поддержания горных выработок.

В процессе исследования была выдвинута гипотеза о влиянии на развитие вывалообразования процессов эпигенеза, обусловленных термобарическими условиями преобразования породообразующего кварца. Установлено, что локальное скопление водородосодержащих кристаллогидратов в горной породе, в зоне влияния объемного неравнокомпонентного нагружения, за счет ведения горных работ может диссоциировать и инициировать процесс формирования и развития зоны разрушения завершающимся вывалом.

Настоящая работа направлена на освещение вопроса локальной устойчивости породных обнажений в горизонтальных горных выработках на стадии их сооружений на основе результатов исследований геомеханических процессов.

Ключевые слова: эпигенез, кристаллогидратная вода, α – кварц, β – кварц, микроструктура, вывал породы кровли, предел прочности, образование дефектов.

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.081

Starikov Gennadiy P.

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Director of Institute of Physics
of Mountain Processes
Donetsk, 72 Rosy Luxemburg
e-mail: ifgpdnr@mail.ru

Shatokhin Sergey V.

Junior Researcher,
Institute of Physics of Mountain Processes
e-mail: shatohin-sergej@mail.ru

Khashchevatskaya Nadezhda V.

Junior Researcher,
Institute of Physics of Mountain Processes
e-mail: mailbox93@gmail.com

**INFLUENCE OF CRYSTALLIZATION
WATER ON INRUSHING PROCESS
OF SAND-AND-CLAY SHALE***Abstract:*

During draw up works, there are often difficult areas for the conduct of mining operations. One of the characteristic catastrophic occurrences in making deep mines is inrush process. The fact of fallout indicates the inconsistency of the supporting work and the stability ensuring methods of the workings under the conditions of their operation.

The phenomenon of rock falling into the preparatory workings is the subject of numerous studies. However, none of the theories explains the locality of the fallout process. Existing recommendations aimed at improving the stability of rock outcrops may not fully provide the necessary information for timely clarification and adoption of measures to improve stability and to reduce injuries during the construction and maintenance of mine workings.

In the course of the study, a hypothesis was put forward about the influence of epigenetic processes caused by thermobaric conditions of transformation of rock-forming quartz on the development of rock formation. It is established, that the local accumulation of hydrogen-containing crystallohydrates in the rock in the zone of influence of volumetric unequal loading, during the mining operations, can dissociate and initiate the process of formation and development of the zone of destruction, leading to the final collapse.

This paper is aimed at highlighting the issue of local stability of rock outcrops in horizontal mine workings at the stage of their construction on the basis of the results of studies of geomechanical processes.

Key words: epigenesis, crystallization water, α – quartz, β – quartz, microstructure, borehole breakout of roof, tensile strength, formation of defects

* Публикуется в порядке дискуссии

В порядке дискуссии

Явление вывала является предметом многочисленных исследований. Все гипотезы, объясняющие механизм этого явления, по общности исходных предпосылок могут быть отнесены как минимум к пяти большим группам (табл. 1).

Гипотезы первых трех групп в большей степени характерны для условий эксплуатации выработок на небольшой глубине и при относительно крепких устойчивых породах. Гипотезы четвертой группы характеризуют условия эксплуатации выработок на глубоких горизонтах. Гипотезы пятой группы оценивают процесс вывала путем инструментальных измерений в шахтных условиях.

Таблица 1

Причины (механизм) вывалов [1]

Теоретическое обоснование	Механизм вывалов
В. Ритгер, Ф. Энгессер, О. Коммерель, М. Протодряконов	Вывалы считаются результатом действия сил тяжести пород в объеме сводообрушения
А. Динник, Ж. Ержанов	Ответственными за сводообразование считаются растягивающие напряжения
Ф. Мор, К. Ирвинг, Э. Айзаксон, Г. Черепанов	Свод обрушения в условиях упругосжатого контура
А. Лаблас, К. Руппенейт, Ю. Либермане	Свод обрушения есть результат образования вокруг выработки области неупругих деформаций
К. Терцаги, В. Слесарев, Н. Покровский и др.	Оценка процесса вывала основана на данных практических наблюдений

Однако ни одна из теорий не объясняет локальности процесса вывала. Существующие рекомендации, ориентированные на повышение устойчивости породных обнажений, не в полной мере могут дать необходимые сведения для своевременного уточнения и принятия мер по повышению устойчивости и снижению травматизма в процессе сооружения и поддержания горных выработок.

Разрушение твердого тела, являющегося системой связанных атомов или молекул, которые находятся в колебательном движении возле положения равновесия, и нагруженного внешней силой, следует рассматривать как процесс накопления разрывов связей, приводящий к росту дефектов и, в конечном счете, к разрушению.

Кинетику разрывов межатомных связей, вызванных или ускоренных упругой деформацией твердых тел, анализируют с позиций классической химической кинетики. Основы этого подхода были развиты С.Н. Журковым [2].

Согласно теории С.Н. Журкова, момент разрушения твердого тела под действием механических напряжений определяется временем жизни до разрыва деформированных межатомных связей:

$$\tau = \tau_0 \exp(U_0 - \gamma\sigma)/RT, \quad (1)$$

где τ – время жизни до разрыва; τ_0 – период колебаний; $(U_0 - \gamma\sigma)$ – энергия активации реакции; U_0 – энергия связи; произведение $\gamma\sigma$ служит эквивалентом энергии деформации.

В терминах кинетической теории прочности Журкова полученные результаты говорят о том, что среда может влиять как на величину энергии активации разрушения U_0 , так и на структурно-чувствительный коэффициент γ , отражающий изменение структуры материала при его взаимодействии со средой. Некоторые различия в значениях γ , рассчитанных из результатов испытаний при статическом и динамическом нагружении, могут быть связаны с различными временами контакта образцов с водными растворами при измерениях длительной и мгновенной прочности.

Многими специалистами неоднократно фиксировалось, что в горных породах из

зон вывалов концентрация влаги в 1,3...1,8 раз больше, чем в ненарушенной породе. Такое увеличение влажности в соответствии с изученной литературой [3] уменьшает упругие свойства твердого тела, особенно если оно имеет поры или трещины. Например, прочность на сжатие у песчаников с пористостью около 10 % снижается на 70 %, у известняков с пористостью 15 % – на 50 %, у габбро-долеритов и базальтов с пористостью 3...5 % – на 20 %.

Эти изменения обуславливают эффект адсорбционного понижения прочности твердых тел, реализующийся в условиях обобщенного растяжения с жидкой адсорбционно-активной средой. Характерная форма проявления эффекта – многократное падение прочности, повышение хрупкости твердого тела, снижение его долговечности.

Для исследований отбирались образцы пород непосредственной кровли угольного пласта на шахтах «Прогресс», им. Калинина, им. Засядько, «Яблоневская», им. Скочинского.

В результате исследований было установлено, что фактически, при нарушении равновесного состояния части кровли пласта за счет ее упругого восстановления, свободная энергия системы «порода – кристаллогидратная вода» уходит из минимума энергии. Так на шахте «Прогресс» ГП «Горезантрацит» было зафиксировано, что энергия активации дегидратации глинистого сланца в интервале 200 – 700 °С, в образцах, отобранных с вывала, составила 14 – 18 кДж/моль, а на расстоянии в 10 – 20 м от вывала оставалась в пределах 41 – 45 кДж/моль (рис. 1).

При импульсном нагружении образцов давлением в 600 МПа в оборудовании гидроэкструзии значения энергии активации дегидратации с вывала стремятся достигнуть значений, присущих горной породе в нормальном состоянии.

Таким образом, чтобы восстановить этот минимум, при неизменной температуре в системе начинает увеличиваться давление, возникающее при фазовом переходе кристаллогидратной воды на величину, пропорциональную снижению упругой энергии. Молекулы воды, будучи размещенными в кристаллических решетках оксидов кварца в сжатом состоянии, вместе с собой переносят упругую энергию ближе к поверхности, где ее высвобождение будет связано с ростом пористости и трещин в минералах на микроскопическом уровне.

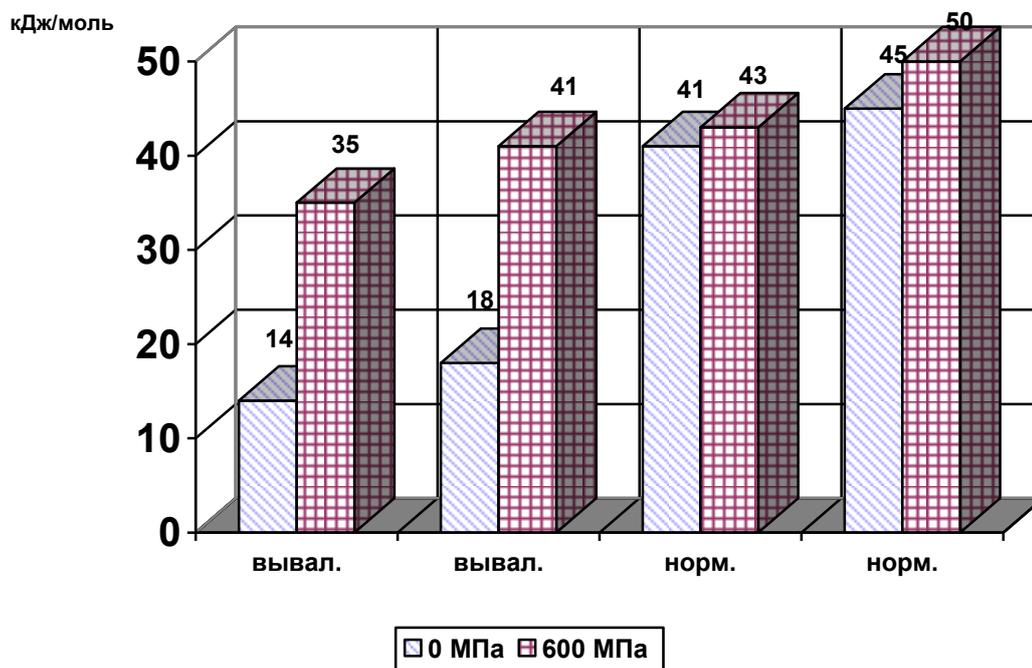


Рис. 1. Энергии активации дегидратации в интервале температур 200 – 700 °С при импульсном нагружении и без него

Это состояние обусловлено реализацией накопленной упругой энергии активной подструктуры порообразующего кварца, сопровождаемой деформациями в результате образования дефектов во второй подструктуре, что приводит к снижению физико-механических свойств материала (табл. 2).

Анализируя данные таблицы, несложно заметить, что в местах вывалообразования соотношение потери массы в образцах, подвергшихся импульсному нагружению 600 МПа и исходных, при 100 °С находится в пределах 0,8 – 1,15, т.е. стремится к единице.

Возможным объяснением этого может стать предположение, что при вывалообразовании реализовался внутренний потенциал кристаллогидратной воды, который сформировался в процессе эпигенеза горной породы и способствовал отрыву горной породы от горного массива.

Таблица 2

Степень влияния давления на изменение потери массы в породах, склонных к обрушению

Шахта	Наличие вывала	Место отбора образца	Потеря массы		
			100 °С		
			0 МПа	600 МПа	W _з / W ₀
«Прогресс»	+	ПК 47+12	0,71	0,71	1
		ПК 47+15	0,34	0,61	1,79
		ПК 47+17	0,36	0,67	1,86
им. Калинина	+	Левый	0,26	0,27	1,04
		Правый	0,22	0,28	1,27
«Яблоневская»	+	h ₁₁	0,31	0,35	1,12
		h ₇	0,26	0,43	1,65
им. Засядько	+	точка №2	0,59	0,48	0,81
		точка №4	0,29	0,47	1,62
		точка №5	0,27	0,62	2,29
им. Скочинского	+	ПК 101+3	0,26	0,3	1,15
		ПК 199	0,28	0,55	1,96

Кристаллические структуры кварца, построенные из кремний-кислородных тетраэдров, характеризуются тем, что в направлении осей симметрии высшего порядка (тригональной для α -кварца и гексагональной для β -кварца) в них имеются сквозные каналы, поперечные размеры которых превышают размеры тетраэдров. Из-за этого в кварце может наблюдаться эффективная диффузия примесей по каналам, параллельным рассмотренным осям симметрии [4].

Был проведен ряд экспериментальных исследований с использованием метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на протонах водорода. Основа такого подхода допустима, поскольку площадь уменьшения широкой линии спектра ЯМР H^1 (ΔS) пропорциональна потере массы. Значения интенсивностей спектров ЯМР H^1 для широких и узких линий, а также площадей широкой линии представлены в табл. 3. Особенно значительное количество связанной воды содержится в тонкодисперсных, глинистых породах, которые характеризуются очень мелкими порами и большой поверхностью частиц. Вода, связанная в гидратные оболочки, имеет меньшую подвижность, соответственно, для ее перехода в свободную фазу необходима большая энергия активации, т.е. ее показатели выше, чем при вывале (см. рис. 1).

Таблица 3

Результаты исследования образцов породы из мест нормального залегания пласта и мест геологического нарушения (зоны вывала) на спектрометре ЯМР

Шахта «Прогресс»	$I_{ш}$	$I_{уз}$	$\Delta H_{ш}$	$\Delta H_{уз}$	$I_{уз}/I_{ш}$	S_y	$S_{ш}$	$S_y/S_{ш}$	$S_{общ}$
Вывал.	0,144	0,356	7,709	1,360	2,4688	1,417	1,512	0,937169	2,929
Норм.	0,208	0,366	6,731	1,104	1,7596	1,22	1,717	0,710542	2,937
Вывал. 6 кБр	3,715	0,294	21,25	1,08	0,0791	0,675	3,0124	0,224074	3,687
Норм. 6 кБр	0,121	0,156	5,026	0,898	1,2893	0,424	0,802	0,528678	1,226

Превышение предела прочности образовавшейся структуры материала на растяжение возникшими растягивающими напряжениями, появляющимися при фазовом преобразовании кристаллогидратной воды, будет являться причиной накопления потенциальных областей образования дефектов, склонных к началу их реализации. Этот процесс носит континуальный (непрерывный) характер, период и степень затухания которого определяются конкретными физико-механическими характеристиками горной породы.

Образование дефектов сопровождается приращением деформаций материала, что приводит к снижению прочностных и деформационных характеристик с соответствующим перераспределением внутренних напряжений, и будет зависеть от условий, накладываемых на изменение НДС материала при уменьшении бытовых (обыденных) давлений [5].

Рассмотрим результаты рентгено-структурного исследования на примере изучения фазовой структуры кварца в образцах, взятых в месте вывала и на удалении от него в условиях шахты «Прогресс» ГП «Торезантрацит».

Проведенный фазовый анализ образца песчано-глинистого сланца от обрушенной глыбы (ПК 47+12 м) выявил, что в больших дифракционных углах, $\Theta > 50^\circ$, уменьшается интенсивность основных линий, а также количество и интенсивность слабых максимумов и изменяется их угловое положение, что указывает на катастрофическое накопление искажений, приведших к локальным разрушениям и развитию магистральных трещин (рис. 2).

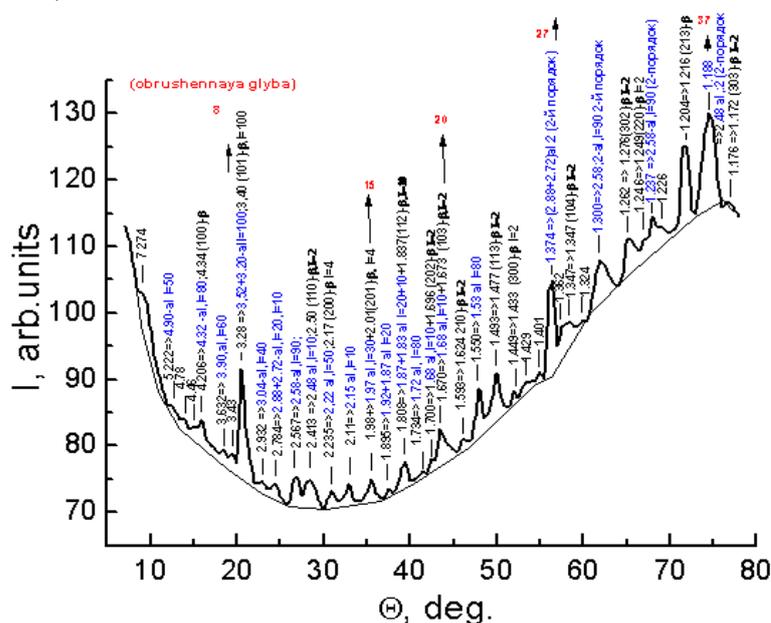


Рис. 2. Дифракционная картина образца песчано-глинистого сланца от обрушенной глыбы (ПК 47+12 м), шахта «Прогресс»

Это следует из усиления пологости склонов дифракционных максимумов, особенно средней и малой интенсивности, так что наблюдается слияние соседних линий у их оснований, означающее измельчение типа аморфизации кристаллической структуры. Кроме того, имеют место случаи повторения характерных элементов структуры в виде дифракционных максимумов с одними и теми же межплоскостными расстояниями, что означает пространственное расслоение пакетов из параллельных однотипных плоскостей с отслоением небольших плоских групп от основного пакета, свойственного кристаллиту макроскопического размера.

При разрушении сжатием в областях наивысших сдвиговых напряжений растяжения вызывают перестройку кристаллической решетки, а высокий уровень напряжений – появление аморфных, менее прочных образований. В тех областях, где произошла аморфизация, в результате дальнейших сдвигов и развиваются затем трещины разрушения.

Проведенный фазовый анализ образца песчано-глинистого сланца (рис. 3), отобранного на удалении от обрушения (ПК 47-17 м), указывает на благоприятное природное объединение вязко-прочной смеси аргиллита и алевролита, способной препятствовать развитию хрупкой магистральной трещины и разрушению, поскольку, как было выяснено в предыдущем случае, присутствие более прочного, но хрупкого нелегированного β -кварца (β - S_iO_2) в образце песчано-глинистого сланца от обрушенной глыбы (ПК 47+12 м) привело к обрушению.

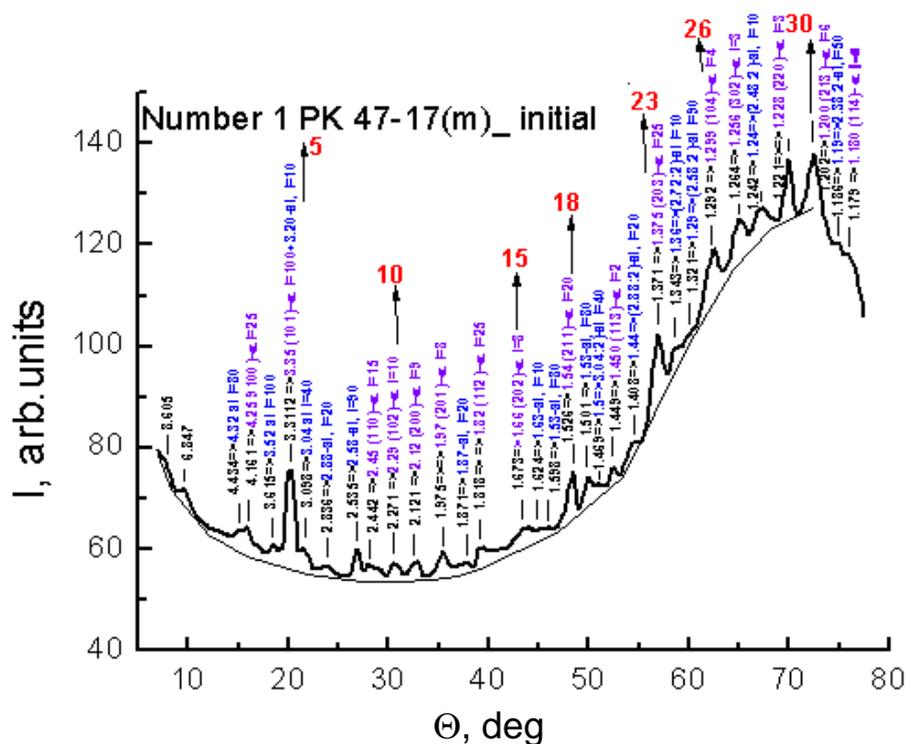


Рис. 3. Дифракционная картина образца песчано-глинистого сланца, отобранного на удалении от обрушения (ПК 47-17 м), шахта «Прогресс»

Дальнейшие исследования показали, что во всех образцах пород кварц находится в напряженном состоянии с преобладанием остаточных растягивающих напряжений в макроструктуре.

Откликом системы на изменение внешних условий является фазовый переход (процесс превращения одной модификации в другую), скорость протекания которого определяется целым рядом термодинамических факторов: температурой, давлением и т.д.

Для того чтобы раскрыть сложную историю образования повторяющихся трещин, гидротермальных потоков жидкости и циклов уплотнения, что привело к динамической проницаемости массива горных пород, были проведены систематические анализы и целенаправленные микроструктурные исследования [5]. Их результатом стало утверждение, что изменение морфологии и уменьшение размера зерен кварца со временем дополнительно указывает на переход от медленного пластического вскрытия к быстрым хрупким событиям.

При переходе из одной модификации в другую у кварца изменяются скачкообразно свойства, и одновременно происходит выделение или поглощение теплоты перехода. Например, при температуре 573 °С теплоемкость и коэффициент теплового расширения кварца изменяются скачкообразно. При этом поглощается 10,9 кДж/моль (2,5 ккал/моль). В связи с этим переход $\alpha \leftrightarrow \beta$ кварц можно отнести и к фазовым переходам первого рода (так как имеет место выделение или поглощение теплоты перехода) и к фазовым переходам второго рода (так как имеет место скачкообразное изменение теплоемкости и коэффициент теплового расширения).

Неоднородность структуры различных модификаций кварца обуславливает неоднородность его физических свойств. Так, например, имея одинаковую молекулярную массу 60,9 г, фазовый переход

– альфа-кварца в бетта-кварц сопровождается изменением молекулярного объема с 22,93 до 24,1 см³ и уменьшением твердости с 7 – 7,5 до 6,5 – 6 (по Моосу);

– альфа-кварца в кристобалит сопровождается изменением молекулярного объема с 22,93 до 25,74 см³ и уменьшением твердости с 7 – 7,5 до 6,5 – 7 (по Моосу).

Однако в нетронутым породном массиве прирост объема возможен только при дилатации (увеличение объема при неизменных внешних размерах за счет образования внутренних трещин) или уплотнении внутренней структуры за счет менее плотных компонент, например, образованием кристаллогидратной воды.

При проведении горных выработок нарушение равновесного состояния горного массива приводит к переходу части физически и химически связанной воды в свободную.

Представленные результаты приводят к выводу о том, что влияние кварца на прочность песчано-глинистых горных пород связано с изменением так называемых кинетических свойств растворов, определяемых подвижностью воды вблизи гидратированных ионов в структурных каналах кварца.

Фактически можно предположить, что локальное скопление водородосодержащих кристаллогидратов в горной породе, в зоне влияния объемного неравнокомпонентного нагружения, за счет ведения горных работ может диссоциировать и инициировать процесс формирования и развития зоны разрушения завершающимся вывалом.

Приведенные результаты могут использоваться для объяснения локальности вывалообразования при проведении горных выработок: в частности, степень вывалоопасности функционально должна зависеть от количественного содержания твердофазной воды.

Список литературы

1. Стариков Г.П., Самойленко З.А., Шатохин С.В., 2020. Прогноз устойчивости породных обнажений по энергиям их формоизменения и энергии активации дегидратации твердофазной воды, и фазовому составу породообразующего кварца. *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр*. Москва: ИПКОН РАН, С. 142 – 145.

2. Стариков Г.П., Самойленко З.А., Шатохин С.В., 2019. Научные основы метода определения очага внезапного обрушения горных пород. *Труды РАННИИ*, Донецк, № 8, С. 352 – 359.

3. Стариков Г.П., Шатохин С.В., 2018. Основы оценки склонности горной породы к вывалам. *Научный вестник НИИГД «Респиратор»*, №4 (55), С. 58 - 70.
4. Стариков Г.П., Шатохин С.В., Кравченко А.В., Гонгало А.Н., 2018. Методические основы оценки склонности горной породы к вывалообразованию. *Труды РАНИМИ*, Донецк, № 6, С. 252 – 257.
5. Стариков Г.П., Шажко Я.В., Хащеватская Н.В, Шатохин С.В., 2017. Диффузия водородосодержащих компонент угля в условиях высокоскоростной разгрузки. *Труды РАНИМИ: сборник научных трудов*, Донецк, № 3, С. 19 – 27.
6. Стариков Г.П., Шажко Я.В., Кравченко А.В., Хащеватская Н.В, Шатохин С.В., 2017. Влияние импульсного нагружения на энергию активации десорбции углеводородных компонент угля. *Труды РАНИМИ: сборник научных трудов*, Донецк, №4, С. 230 - 239.

References

1. Starikov G.P., Samoilenko Z.A., Shatokhin S.V., 2020. *Prognoz ustoichivosti porodnykh obnazhenii po energiyam ikh formoizmeneniya i energii aktivatsii degidrata-tsii tverdogaznoi vody, i fazovomu sostavu porodoobrazuyushchego kvartsa* [Prediction of the stability of rock outcrops based on the energies of their shape change and the activation energy of solid-phase water dehydration, and the phase composition of rock-forming quartz]. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh nedr*. Moscow: IPKON RAN, Pp. 142 - 145.
2. Starikov G.P., Samoilenko Z.A., Shatokhin S.V., 2019. *Nauchnye osnovy metoda opredeleniya ochaga vnezapnogo obrusheniya gornykh porod* [Scientific basis of the method of determining the source of a sudden collapse of rocks]. *Trudy RANIMI, Donetsk*, № 8, Pp. 352 – 359.
3. Starikov G.P., Shatokhin S.V., 2018. *Osnovy otsenki sklonnosti gornoj porody k vyvalam* [Fundamentals of the assessment of the propensity of a rock formation to outburst]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator"*, №4 (55), P. 58 - 70.
4. Starikov G.P., Shatokhin S.V., Kravchenko A.V., Gongalo A.N., 2018. *Metodicheskie osnovy otsenki sklonnosti gornoj porody k vyvaloobrazovaniyu* [Methodology of the assessment for the propensity of a rock formation to outburst]. *Trudy RANIMI, Donetsk*, № 6, Pp. 252 – 257.
5. Starikov G.P., Shazhko Ya.V., Khashchevatskaya N.V, Shatokhin S.V., 2017. *Dif-fuziya vodorodosoderzhashchikh komponent uglya v usloviyakh vysokoskorostnoi razgruzki* [Diffusion of hydrogen-containing components of coal in conditions of high-speed unloading]. *Trudy RANIMI: sbornik nauchnykh trudov, Donetsk*, № 3, Pp. 19 – 27.
6. Starikov G.P., Shazhko Ya.V., Kravchenko A.V., Khashchevatskaya N.V, Shatokhin S.V., 2017. *Vliyanie impul'snogo nagruzheniya na energiyu aktivatsii desorbtsii uglevo-do-rodnykh komponent uglya* [Influence of pulsed loading on the activation energy of desorption of carbon-hydrogen components of coal]. *Trudy RANIMI: sbornik nauchnykh trudov, Donetsk*, №4, Pp. 230 - 239.