

Методика анализа достоверности геофизических методов прогноза динамических явлений, выполненных переносными приборами

А.В. Шадрин✉, М.С. Плаксин, Д.Н. Застрелов, Д.Г. Лузянин

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Кемерово, Российская Федерация
✉ avsh-357@mail.ru

Резюме: В статье излагается методика анализа достоверности геофизических методов прогноза динамических явлений, выполненных переносными приборами. Необходимость в ней обусловлена отсутствием рекомендаций в нормативных документах о выборе наиболее подходящего метода прогноза динамических явлений для конкретных условий. Этот выбор должны осуществлять соответствующие службы угледобывающих предприятий самостоятельно или с привлечением научных коллективов.

Для исследований были взяты два переносных прибора для локального прогноза горных ударов: Angel-M и Рипас, реализующие соответственно «метод электромагнитных импульсов» и своеобразную модификацию метода «по параметрам искусственного акустического сигнала». В качестве эталонного использовали более достоверный инструментальный метод «по выходу буровой мелочи». Предполагалось, что степень опасности массива горных пород одинакова при прогнозе геофизическим и инструментальным методом и может быть количественно оценена в форме отношения текущего значения измеряемого параметра к его пороговому значению. Достоверность прогноза переносными приборами оценивалась по соответствию этого отношения аналогичному, рассчитанному для инструментального метода.

Начатая проверка предлагаемой методики на одной из угольных шахт Кузбасса показала недостаточную достоверность прогноза переносными геофизическими приборами, вероятно, обусловленную следующими причинами: контролем не всех основных факторов опасности проявления динамических явлений каждым из приборов в отдельности; отсутствием обоснования связи опасности проявления динамических явлений с контролируемыми приборами параметрами; при использовании прибора Рипас геофон прижимается к стенке выработки, поэтому трещиноватость прибортового пространства выработки сильно искажает спектр зондирующего акустического сигнала.

Ключевые слова: угольный пласт, динамические явления, текущий прогноз опасности, геофизические методы, переносные приборы, достоверность прогноза

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. №АААА-А21-121012290020-4).

Для цитирования: Шадрин А.В., Плаксин М.С., Застрелов Д.Н., Лузянин Д.Г. Методика анализа достоверности геофизических методов прогноза динамических явлений, выполненных переносными приборами. *Горная промышленность*. 2023;(S2):11–17. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-11-17>

Methodology for analyzing the reliability of geophysical methods that use portable instruments for predicting dynamic phenomena

A.V. Shadrin✉, M.S. Plaksin, D.N. Zastrelov, D.G. Luzyanin

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo,
Russian Federation
✉ avsh-357@mail.ru

Abstract: The article presents a methodology for analyzing the reliability of geophysical methods that use portable instruments for predicting dynamic phenomena. The need for this methodology is explained by the lack of recommendations in regulatory documents regarding the selection of the most appropriate method to predict dynamic phenomena for specific conditions. This selection should be carried out by the relevant departments of coal-mining companies independently or with the help of scientific teams.

Two portable devices for local prediction of rock bumps were chosen for the research, i.e. the Angel-M and the Ripas units, which implement the electromagnetic pulse method and a specific modification of the method based on parameters of artificial acoustic signals, respectively. The more reliable instrumental method based on the drilling fines yield was used as the reference method. It was assumed that the hazard level of the rock mass is the same when making predictions using the geophysical and instrumental methods, and can be quantitatively estimated as a ratio of the current value of the measured parameter to its threshold value. Reliability of the predictions made with portable devices was assessed by the correspondence of this ratio to the similar one calculated for the instrumental method.

Initial testing of the proposed methodology at one of the Kuzbass coal mines showed insufficient reliability of predictions made using portable geophysical devices. This is probably explained by the following reasons: each of the devices does not control all of the key hazard factors of dynamic phenomena; there is no justification of the relationship between the hazard of the dynamic phenomena and the parameters controlled by the devices; when using the Ripas device, the geophone is pressed against the wall of the mine workings, so the fracturing within the near-wall rock mass significantly distorts the spectrum of the sounding acoustic signal.

Keywords: coal seam, dynamic phenomena, current hazard prediction, geophysical methods, portable instruments, forecast reliability

Acknowledgments: The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2021-0001 'Creation of multipurpose systems for monitoring and forecasting of gas-dynamic phenomena, control of the stress state, development of methods for their prevention and efficiency assessment during underground development of coal deposits' (Reg. No.AAA-A-A21-121012290020-4).

For citation: Shadrin A.V., Plaksin M.S., Zastrellov D.N., Luzyanin D.G. Methodology for analyzing the reliability of geophysical methods that use portable instruments for predicting dynamic phenomena. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):11–17. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-11-17>

Введение

Интенсификация горных работ и увеличение глубины разработки угольных месторождений осложняются проявлением динамических явлений (ДЯ). Наиболее сложными и опасными из них являются внезапные выбросы угля и газа и горные удары [1–5].

Анализ признаков подготовки ДЯ, зарегистрированных перед их проявлением в призабойном пространстве, а также известных моделей потери устойчивости горного массива при протекании этих явлений, свидетельствует о том, что основными факторами, определяющими их опасность, являются горное давление в призабойном пространстве, внутрислоевого давление свободного газа и прочность угля¹ [6–9]. Поэтому известные способы прогноза динамических явлений, в том числе автоматизированного прогноза геофизическими методами, основаны на контроле преимущественно одного из этих факторов или одного из этапов подготовки ДЯ. Геофизических методов одновременного контроля всех основных факторов пока в производственной практике нет. Однако необходимость в объединении разнородных методов контроля напряженного состояния призабойного пространства для повышения достоверности прогноза и примеры их реализации отмечается в ряде работ (см., например [10; 11]).

При ведении горных работ на глубинах ниже критической по тому либо иному типу динамических явлений должны применяться методы их прогноза². Методы текущего и локального прогноза ДЯ подразделяются на прямые (или инструментальные) и косвенные (или геофизические). Инструментальные методы основаны на контроле основных факторов опасности путем отбора проб угля и газа из скважин, тогда как геофизические основаны на

контроле физических величин, функционально связанных с основными факторами, определяющими выбросоопасность³ [12].

Поскольку инструментальные методы непосредственно контролируют параметры, определяющие опасность, их достоверность выше геофизических. Более того, геофизические методы нуждаются в «настройке» путем сопоставления контролируемых параметров одновременно выполняемых на одном и том же участке инструментального и геофизического методов прогноза⁴ [12; 13]. Однако высокая продолжительность и трудоемкость инструментальных методов заставляют производителей все более отдавать предпочтение геофизическим методам.

К настоящему времени известны шесть геофизических методов текущего прогноза ДЯ. Для прогноза горных ударов применяются четыре метода: сейсмоакустической активности, электромагнитных импульсов, амплитуды искусственно наведенного в угольном пласте электромагнитного поля, а также допускается проводить прогноз методом «по параметрам искусственного акустического сигнала»⁵. Для прогноза внезапных выбросов угля и газа применяются три геофизических метода: по акустической эмиссии горного массива, по параметрам искусственного акустического сигнала и по данным, зарегистрированным системами аэрогазового контроля (АГК)⁶. Как видно, два акустических метода: по акустической эмиссии и по

³ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.

⁴ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.

⁵ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.

⁶ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.

¹ Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах: Сборник документов. Серия 05. Вып. 2. 4-е изд., испр. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности»; 2011. 304 с.; Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа. М.: Недра; 1978. 164 с.

² Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.

параметрам искусственного акустического сигнала – применяются для прогноза обоих типов ДЯ. По-видимому, это обусловлено следующими причинами. Во-первых, из-за отсутствия строгого научного обоснования того или иного метода прогноза применяли феноменологический подход к его выбору. Суть этого подхода заключается в абсолютизировании одного из предупредительных признаков проявления ДЯ и создании метода прогноза, основанного на контроле параметра, определяемого только этим признаком [13]. Так, например, исторически первый геофизический метод прогноза внезапных выбросов – сейсмоакустический – основывался на предупредительном признаке: воспринимаемых оператором «на слух» ударах и тресках в массиве. Очевидно, что эти акустические сигналы вызваны скачкообразным ростом трещин в призабойном пространстве. На этом основании было предложено несколько вариантов определения критерия выбросоопасности, в основу которых были положены параметры акустической эмиссии: активность, спектральный состав, энергетические характеристики и др. [10; 14]. Развитие трещин контролирует и метод электромагнитных импульсов, нашедший применение для прогноза горных ударов.

Однако аналитические исследования показали, что критерий потери устойчивости трещины сильно зависит от ее удаления от борта выработки и может в десятки и сотни раз быть меньше критерия выдавливания блока угля в месте устья полости начинающегося внезапного выброса [14]. Поэтому, как показала практика, достоверность этого метода является недостаточной. Во-вторых, широкое применение этих акустических методов и метода электромагнитных импульсов объясняется относительной легкостью практической реализации.

Современные геофизические методы прогноза ДЯ в зависимости от решаемых задач подразделяются на непрерывно и периодически контролируемые массив. Для их выполнения требуются соответственно стационарная и переносная аппаратура. Причем для наиболее часто применяемых методов: по параметрам искусственного акустического сигнала и акустической эмиссии выпускается аппаратура как для стационарного, так и для оперативного применения в переносном варианте, а для метода электромагнитных импульсов – только в переносном варианте.

Одной из трудностей практического применения геофизических методов является отсутствие рекомендаций в нормативных документах о выборе наиболее подходящего метода для конкретных условий. Этот выбор должны осуществлять соответствующие службы угледобывающих предприятий самостоятельно. Однако оценить достоверность прогноза тем или иным способом шахтные службы самостоятельно не в состоянии, поскольку глубокого научного обоснования связи контролируемых параметров с устойчивостью массива нет. Чаще всего методики проведения геофизического мониторинга и алгоритмы обработки экспериментальной информации для определения показателя опасности разрабатываются организацией-производителем аппаратуры и широкой научной общественности не предоставляются. Вместе с тем действующие нормативные документы в случае аварии из-за ошибочного прогноза ответственность возлагают на руководство шахты, которое утверждало выбор применяемого метода прогноза, аппаратуру для его выполнения, методики ведения прогноза и определения критических (пороговых) значений

показателей опасности (см. пп. 70, 170 и 171 Федеральных норм и правил...⁷).

В этих условиях руководство угледобывающих предприятий либо доверяется убеждениям представителей отдельных компаний в высокой эффективности их оборудования (что не всегда соответствует действительности), либо вынуждено привлекать научные организации для выполнения сравнительного анализа достоверности прогноза, выполненного оборудованием нескольких компаний-разработчиков.

Цель данной работы – обосновать методику и провести в конкретных условиях сравнительный анализ достоверности геофизических методов прогноза динамических явлений, выполненных переносными приборами.

Методика выполнения исследований

Для исследований были взяты два переносных прибора для локального прогноза: Angel-M и Рипас, реализующие соответственно методы прогноза «электромагнитных импульсов» и своеобразную модификацию метода «по параметрам искусственного акустического сигнала». Приборами осуществляли прогноз горных ударов. В качестве эталонного использовали инструментальный метод «по выходу буровой мелочи».

Предполагалось, что степень опасности массива горных пород одинакова при прогнозе геофизическим и инструментальным методом и может быть количественно оценена в форме отношения текущего значения измеряемого параметра к его пороговому значению:

$$\left. \begin{aligned} K_{p,i} &= \frac{E_i}{E_{nop,i}} \\ K_{ш,i} &= \frac{g_i}{g_{nop,i}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $K_{p,i}$, $K_{ш,i}$ – показатель «опасности» при i -м измерении прибором Рипас и по методу буровой мелочи соответственно; $E_{nop,i}$, $g_{nop,i}$ – соответственно пороговые значения по показателю E (для прибора Рипас) и g (для метода по выходу буровой мелочи) и их значения при i -м измерении E_i и g_i .

Чем ближе это отношение к единице, тем выше вероятность горного удара. Критическое значение инструментального метода определялось по номограмме для установления категории «опасно»⁸, а для переносных приборов – согласно Руководствам по их эксплуатации⁹.

Прибор Angel-M предназначен для бесконтактного контроля естественных электромагнитных импульсов (ЕЭМИ), генерируемых скачкообразно растущими трещинами в массиве. Оценка опасности производится путем определения показателей «А» и «В», характеризующих энергетические параметры ЕЭМИ. А именно показатель «А» равен средней амплитуде зарегистрированных импульсов в за-

7 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.

8 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с. Рис. 4.

9 Комплекс «ANGEL-M». Руководство по эксплуатации. СПб.: ООО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ». 2013. 36 с.; Руководство. Методика выполнения акустических зондирований горного массива с применением программного-аппаратного комплекса. Москва: МНТЛ РИВАС; 2016. 36 с.

данный интервал времени, а показатель «В» характеризует распределение импульсов по десяти уровням (тангенс угла наклона этого распределения), последовательно уменьшающихся от максимального до минимального при разности в величине уровней на величину, равную основанию натурального логарифма ($e \approx 2,72$)¹⁰. Заметим, что достаточно строгого объяснения зависимости устойчивости горного массива от этих параметров нет. Это обстоятельство, по-видимому, объясняет недостаточно высокую достоверность прогноза этим прибором.

Для показателя опасности «А» прибора Angel-M нормативным документом регламентируется угрожаемое состояние массива, если измеренное i -е значение превысит соответствующее пороговое значение $A_i > A_{\text{пор}}$. Поэтому степень опасности для него определится следующим выражением:

$$K_{A,i} = \frac{A_i}{A_{\text{пор}}}, \quad (2)$$

Для показателя «В» регламентируется угрожаемое состояние массива, если измеренное i -е значение окажется меньше соответствующего порогового значения $B_i < B_{\text{пор}}$. Поэтому, чтобы выразить увеличение опасности по мере уменьшения измеряемого параметра ниже порогового значения, брали отношение разности удвоенного порогового значения и измеренного параметра к величине порогового значения этого параметра:

$$K_{B,i} = \frac{2B_{\text{пор}} - B_i}{B_{\text{пор}}}. \quad (3)$$

При такой оценке область значений степени опасности по параметру B при его уменьшении ниже критического значения находилась в пределах $B \in [1; 2]$.

Прибор Рипас предназначен для оценки состояния горного массива по параметрам спектра акустического сигнала, искусственно возбуждаемого в массиве ударным механизмом (молотком)¹¹. Акустические сигналы регистрируются пьезоэлектрическим датчиком, плотно прижатым к горному массиву под анкерную сетку. Оценка опасности определяется по нескольким параметрам, для которых прибором автоматически рассчитываются соответствующие критические значения. Основным из этих параметров для оценки напряженного состояния является коэффициент относительных напряжений, определяемый как отношение амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра сигнала. Достоверность оценки напряженного состояния этим параметром подтверждается достаточно строгим обоснованием зависимости его от отношения предельных и текущих напряжений в контролируемой области [12].

Помимо основного параметра K_p , для которого прибор Рипас автоматически определяет пороговое значение $E_{\text{пор}}$, имеется еще ряд параметров (амплитуды и частоты диапазонов верхних и нижних частот).

Наибольшие наши опасения при использовании этого прибора вызывали следующие два обстоятельства. Первое заключается в том, что из-за трещиноватости прибор-

ного массива выработка спектр сигнала, дошедший до пьезодатчика, может сильно искажаться. Второе обстоятельство вызвано тем, что источник излучения находится на расстоянии 1,5–2 м от приемника, т.е. в ближней зоне излучателя. А здесь амплитуда сигнала не подчиняется экспоненциальной зависимости от расстояния между приемником и излучателем сигнала [15]. Исследований о поведении спектра сигнала в ближней зоне излучателя в просматриваемых литературных источниках горного профиля не обнаружено.

Поскольку для прогноза опасности ДЯ обоими приборами рекомендуется несколько параметров, для каждого из которых Руководством по их применению предлагается свое пороговое значение, нами был предложен комплексный показатель опасности в форме среднего значения сумм отношений измеренных и пороговых значений этих параметров.

В тех случаях, когда для некоторого контролируемого параметра Руководством указано минимальное пороговое значение, чтобы выразить увеличение опасности по мере уменьшения измеряемого параметра ниже минимального порогового значения, брали отношение разности удвоенного минимального порогового значения и измеренного параметра к величине минимального порогового значения этого параметра.

Выражения для определения таким образом комплексных показателей опасности для приборов Angel-M ($K_{AB,i}$) и Рипас ($K_{p,ком,i}$) при i -м измерении выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} K_{AB,i} &= \frac{\frac{A_i}{A_{\text{пор}}} + \frac{2B_{\text{пор}} - B_i}{B_{\text{пор}}}}{2}, \\ K_{p,ком,i} &= \frac{\frac{f_{н,i}}{f_{н,пор}} + \frac{f_{н',i}}{f_{н',пор}} + \frac{f_{в,i}}{f_{в,пор}} + \frac{A_{в,i}}{A_{в,пор}} + \frac{2A_{н,пор} - A_{н,i}}{A_{н,пор}}}{5} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где A_i и B_i – измеренные значения параметров A и B и их пороговые значения $A_{\text{пор}}$, $B_{\text{пор}}$ – при измерении прибором Angel-M; $f_{н,i}$, $f_{н',i}$, $f_{в,i}$, $A_{в,i}$, $A_{н,i}$ – измеренные значения ряда параметров и их соответствующие пороговые значения $f_{н,пор}$, $f_{н',пор}$, $f_{в,пор}$, $A_{в,пор}$, $A_{н,пор}$ – при измерении прибором Рипас.

Количество учитываемых параметров при измерении прибором Рипас в соответствии с (4) может изменяться с тем, чтобы к учету принимать только те параметры, значения которых соответствуют степени опасности проявления ДЯ, установленной инструментальным методом.

Достоверность прогноза переносным прибором оценивалась по соответствию установленной им степени опасности к степени опасности, определенной в форме отношения измеренного и критического значений инструментального метода.

В соответствии с данной методикой были начаты экспериментальные работы по анализу достоверности прогноза приборами Angel-M и Рипас, представленные ниже.

Схема расположения оборудования и результаты исследований

Эксперимент был выполнен на N -й шахте в Кузбассе. Угольный пласт мощностью 3,2–4,3 м на глубине от земной поверхности в 660 м и более отнесен на рабочих глубинах к угрожаемым по горным ударам и внезапным выбросам угля и газа. Оценка опасности проявления горного удара

10 Комплекс «ANGEL-M». Руководство по эксплуатации. СПб.: ООО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ». 2013. 36 с.

11 Руководство. Методика выполнения акустических зондирований горного массива с применением программно-аппаратного комплекса. Москва: МНТЛ РИВАС; 2016. 36 с.

проводилась в наиболее опасных участках массива: в зонах влияния дизъюнктивного нарушения и вблизи зон повышенного горного давления (ПГД), обусловленного горно-техническими условиями.

Вначале проверили совпадение прогнозов удароопасности, выполненных приборами Angel-M и Рипас в выработке, пройденной в зоне влияния дизъюнктивного нарушения с амплитудой $h = 1,3$ м. Расстояние между пикетами при измерении прибором Angel-M – 5 м, при измерении прибором Рипас – 10 м. Горно-геологический разрез штрека, расположение геофизических пикетов и наиболее значимые результаты прогноза показаны на рис. 1.

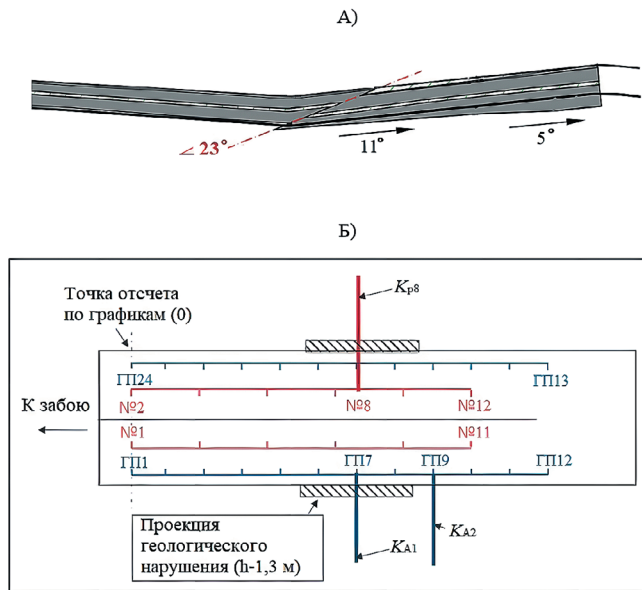


Рис. 1
Горно-геологический разрез штрека (а) и схема (б) размещения пунктов замера прибором Angel-M (геофизические пикеты ГП1–ГП24) и прибором Рипас (пикеты №1–№12)

Fig. 1
Mining and geological cross-section of the drift (а) and a schematic view (б) of the Angel-M (GP1–GP24) geophysical stations and the Ripas (geophysical stations No.1–No.12) measuring points

Исследования показали следующее.

При измерении прибором Angel-M показателя A при обходе вдоль левого борта выработки два его значения K_{A1} и K_{A2} , соответствующие положениям ГП7 и ГП9, показали опасные значения. При обходе вдоль правого борта выработки значения этого показателя были в неопасной области. Значения показателя B , напротив, были все в области «неопасно» при обходе вдоль левого борта выработки и «опасно» при обходе вдоль правого борта. В итоге вся исследуемая область штрека отнесена к состоянию «напряженно».

При измерении прибором Рипас некоторую опасность показал параметр f_n (показатель опасности K_{p8}) при обходе выработки вдоль правого борта напротив пикета ГП8. При обходе вдоль левого борта выработки этот показатель имел неопасные значения.

Таким образом, оба прибора при исследовании данного участка штрека обнаружили опасность. Однако степень опасности, определенная числом пикетов, у которых была зарегистрирована опасность, разная, а именно, опасность, определенная прибором Angel-M, оказалась

выше определенной прибором Рипас. Данное расхождение в результатах прогноза может быть объяснено, во-первых, различным принципом оценки опасности, во-вторых, описанными выше недостатками этих приборов.

Следующий цикл работ был направлен на сравнение показателей прогноза прибором Рипас и методом «по выходу буровой мелочи». Для анализа были взяты результаты прогноза обоими методами, выполненными на следующих трех участках газодренажного бремсберга с различной степенью опасности, определенной горно-геологическими условиями.

Участок 1 соответствовал «спокойной» горно-геологической обстановке; участок 2 находился в зоне ПГД; участок 3 расположен между зонами ПГД в непосредственной близости от нарушения.

С целью оценки наличия корреляции между показаниями прибора Рипас и инструментального метода прогноза исследовалась линейность зависимости показаний опасности между этими двумя методами прогноза опасности. Показатели опасности обоими методами рассчитывались в соответствии с выражением (1). Выполненные расчеты показали, что каждому участку соответствовал свой коэффициент достоверности аппроксимации. Наибольшее значение $R^2 = 0,61$ было получено на первом участке. На остальных участках оно было значительно ниже. Сводные результаты расчетов по трем участкам представлены на рис. 2.

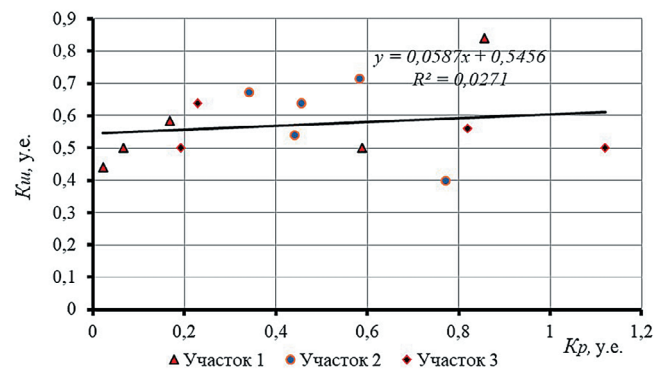


Рис. 2
Зависимость $K_m = F(K_p)$ по результатам замеров на трех участках бремсберга

Fig. 2
Dependence of $K_m = F(K_p)$ based on the results of measurements at three sections of a gravity haulage

Как видно из приведенных данных, низкое значение коэффициента достоверности аппроксимации свидетельствует о том, что корреляция между результатами прогноза прибором Рипас и инструментальным методом по буровой мелочи практически отсутствует. Мы полагаем, что это обусловлено тем, что при наложении геофона прибора Рипас на борт выработки высокая трещиноватость приборного пространства массива сильно искажает спектр акустического сигнала, возникающего при ударе молотком по борту выработки.

Заключение

Настоящая работа вызвана наличием нескольких переносных приборов, реализующих геофизические методы прогноза ДЯ, и отсутствием методики выбора наиболее подходящего из них для конкретных условий. Для реше-

ния этой задачи предложена методика оценки достоверности результатов прогноза горных ударов переносными приборами Angel-M и Рипас путем сравнения показателей опасности, определенных этими приборами, и инструментальным методом «по выходу буровой мелочи», взятым в качестве эталонного.

Начатые экспериментальные исследования в соответствии с предложенной методикой показали следующее. Во-первых, прогноз переносными приборами на участке горной выработки, проведенной в зоне влияния дизъюнктивного нарушения, на котором инструментальным методом была установлена опасность по горным ударам, также показал наличие опасности. Во-вторых, сравнение результатов прогноза прибором Рипас и инструментальным методом на трех участках газодренажного бремсберга показало отсутствие корреляционной зависимости между показателями прогноза. Это свидетельствует о недостаточной достоверности прогноза прибором Рипас.

Недостаточная достоверность прогноза переносными геофизическими приборами, по нашему мнению, обусловлена следующими причинами:

- контролем не всех основных факторов опасности проявления ДЯ каждым из приборов в отдельности;
- отсутствием обоснования связи опасности проявления ДЯ с контролируемыми приборами параметрами;
- при использовании прибора Рипас геофон прижимается к стенке выработки. Поэтому трещиноватость прибортового пространства выработки сильно искажает спектр зондирующего акустического сигнала.

Для более качественной оценки достоверности прогноза ДЯ указанными приборами необходимо продолжить исследования в соответствии с предложенной методикой. Для повышения достоверности прогноза приборами, как мы полагаем, можно привлечь технологию нейросетей, что позволило бы уточнить весовые коэффициенты регистрируемых прибором параметров в выражении (4).

Список литературы

1. Зыков В.С. *Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в угольных шахтах*. Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН; 2010. 333 с.
2. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. *Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений*. Новосибирск: Новосибирский писатель; 2011. 524 с.
3. Rui Y., Zhou Z., Cai X., Lan R., Zhao C. A novel robust AE/MS source location method using optimized M-estimate consensus sample. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022;32(4):779–791. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.06.003>
4. Watanabe Y., Nakajima J. The application of AE techniques as a forecasting method to the rock and gas outburst in coal mine. In: *19th International conference of research institutes in safety in mines*. Katowice, Poland; 1981, pp. 564–573.
5. Cai W., Dou L., Zhang M., Cao W., Shi J.-Q., Feng L. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018;80:232–245. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.029>
6. Петухов И.М., Линьков А.М. *Механика горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 280 с.
7. Ходот В.В. *Внезапные выбросы угля и газа*. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу; 1961. 364 с.
8. Чернов О.И., Пузырев В.Н. *Прогноз внезапных выбросов угля и газа*. М.: Недра; 1979. 296 с.
9. Lama R.D. (ed.) *International symposium-cum-workshop on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. 20–24 March, 1995, Wollongong, NSW, Australia*. Australia; 1995. 620 p.
10. Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю. Разработка метода сейсмоакустического мониторинга динамических явлений в очистных забоях угольных шахт. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(1):28–35.
11. Reuter M., Crash M., Kiessling W., Veksler Yu. Геомеханический мониторинг методом анализа конвергенции: прогноз вероятности горных ударов и участков их проявления в лавах. *Научно-технические проблемы разработки и использования минеральных ресурсов*. 2018;(4):17–22.
12. Шадрин А.В., Клишин В.И. Комбинация подсистем многофункциональной системы безопасности шахты для прогноза динамических явлений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023;(1):81–104. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-1-1-81-108>
13. Шадрин А.В., Потапов П.В. Идеология обоснования высокодостоверных подсистем текущего прогноза динамических явлений, происходящих в угольных шахтах. *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2023;(1):16–25.
14. Шадрин А.В., Телегуз А.С., Дюк Ю.А. Анализ учета основных факторов выбросоопасности существующими методами текущего прогноза. *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2021;(2):56–72. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.40.57.007>
15. Кайно Г. *Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов*. М.: Мир; 1990. 656 с.

References

1. Zыkov V.S. *Sudden coal and gas outbursts and other gas-dynamic phenomena in coal mines*. Kemerovo: Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2010. 333 p. (In Russ.)
2. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. *Safety challenges and new technologies of underground mining of coal deposits*. Novosibirsk: Novosibirskii pisatel; 2011. 524 p. (In Russ.)
3. Rui Y., Zhou Z., Cai X., Lan R., Zhao C. A novel robust AE/MS source location method using optimized M-estimate consensus sample. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022;32(4):779–791. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.06.003>

4. Watanabe Y., Nakajima J. The application of AE techniques as a forecasting method to the rock and gas outburst in coal mine. In: *19th International conference of research institutes in safety in mines*. Katowice, Poland; 1981, pp. 564–573.
5. Cai W., Dou L., Zhang M., Cao W., Shi J.-Q., Feng L. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018;80:232–245. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.029>
6. Petukhov I.M., Linkov A.M. *Mechanics of rock bursts and bumps*. Moscow: Nedra; 1983. 280 p. (In Russ.)
7. Khodot V.V. *Sudden coal and gas outbursts*. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo literatury po gornomu delu; 1961. 364 p. (In Russ.)
8. Chernov O.I., Puzyrev V.N. *Prediction of sudden coal and gas outbursts*. Moscow: Nedra; 1979. 296 p. (In Russ.)
9. Lama R.D. (ed.) *International symposium-cum-workshop on management and control of high gas emissions and outbursts in underground coal mines. 20–24 March, 1995, Wollongong, NSW, Australia*. Australia; 1995. 620 p.
10. Reuter M., Krach M., Kiessling U., Veksler Ju. Method for seismic and acoustic monitoring of longwall face areas in coal mines. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2021;(1):28–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRI20210104>
11. Reuter M, Crash M, Kiessling W, Veksler Yu. Geomechanical monitoring using the convergence analysis method: predicting the probability of rock bumps and areas of their occurrence in longwall faces. *Naukoemkie Tekhnologii Razrabotki i Ispolzovaniya Mineralnykh Resursov*. 2018;(4):17–22. (In Russ.)
12. Shadrin A.V., Klishin V.I. Combination of multifunctional subsystems mine safety systems for predicting dynamic phenomena. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2023;(1):81–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-1-1-81-108>
13. Shadrin A.V., Potapov P.V. The occurring in coal mine dynamic phenomena current forecast highly reliable subsystems' justification ideology. *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*. 2023;(1):16–25. (In Russ.)
14. Shadrin A.V., Diyuk Y.A., Teleguz A.S. Analysis of consideration of main emission factors by existing methods of current forecast. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2021;(2):56–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.40.57.007>
15. Kino S. *Acoustic waves*. N. J.: Englewood Cliffs; 1987. 601 p.

Информация об авторах

Шадрин Александр Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории угольного машиноведения, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: avsh-357@mail.ru

Плаксин Максим Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: plaksin@bk.ru

Застрелов Денис Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: zastrelov@uglemetan.ru

Лузянин Дмитрий Геннадьевич – ведущий инженер лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: luzyanin36@yandex.ru

Information about the authors

Aleksandr V. Shadrin – Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, Coal Engineering Laboratory, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: avsh-357@mail.ru

Maksim S. Plaksin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Coal Field Gas Dynamics, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: plaksin@bk.ru

Denis N. Zastrelov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Laboratory of Coalbed Methane Resources and Recovery Technologies, Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: zastrelov@uglemetan.ru

Dmitry G. Luzyanin – Lead Engineer, Laboratory of Coalbed Methane Resources and Recovery Technologies, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: luzyanin36@yandex.ru

Article info

Received: 07.08.2023

Revised: 30.08.2023

Accepted: 01.09.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.08.2023

Поступила после рецензирования: 30.08.2023

Принята к публикации: 01.09.2023