

УДК 622.831:550.34.03

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

Шифр специальности ВАК: 2.8.6

Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга

Е.Е. Разумов^{1✉}, С.М. Простов², Е.А. Шабанов²

¹ Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ», Россия, г. Санкт-Петербург

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, г. Кемерово

✉razumov@vnimi.ru

Аннотация. *Актуальность* обусловлена недостаточной обоснованностью количественных критериев регионального, локального и текущего прогноза удароопасности разрабатываемых угольных пластов, отсутствием алгоритмов, увязывающих применение при прогнозе геофизических и прямых геомеханических методов. *Цель:* разработка комплексного метода геодинамического прогноза, включающего определение протяженности удароопасного участка, выявленного по результатам регионального прогноза по данным регистрации системы сейсмического мониторинга GITS, для проведения локального и текущего прогноза удароопасности нормативными методами. *Объект:* массив горных пород выемочного столба 4-1-5-7 шахты «Осинниковская» при ведении горных работ в зоне группы тектонических нарушений и пересечении передовой выработки. *Методы:* региональный геомеханический прогноз геофизическим методом регистрации сейсмической активности (система GITS), локальный (текущий) прогноз методами естественного электромагнитного излучения (аппаратура Ангел-М) и выход буровой мелочи. *Результаты.* Представлены результаты комплексных исследований в выемочном столбе 4-1-5-7 шахты «Осинниковская» по установлению корреляции между сейсмической активностью и параметрами напряженно-деформированного состояния массива. Было введено понятие интегральных показателей рассматриваемых параметров I_F и $I_{K\sigma}$, которые учитывают площадь зоны для i -го диапазона по комплексному параметру сейсмической активности F и коэффициенту концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта K_σ . Установлено, что информативность интегральных показателей почти в два раза превышает информативность исходных параметров. Приведены экспериментальные номограммы $f(F_{\max}; XF)$ и $f(I_F; XF)$ для определения категории «ОПАСНО/НЕОПАСНО» при региональном прогнозе удароопасности по данным системы сейсмического мониторинга GITS. Разработан общий алгоритм прогноза удароопасности при ведении очистных работ, в котором применен комплексный подход, включающий региональный прогноз по регистрации сейсмической активности в пределах шахтного поля и методы локального прогноза как геофизические, так и прямые, для уточнения границ зон сейсмоэнергосыделения и подтверждения категории удароопасности. Представлен пример определения ширины зоны повышенного сейсмоэнергосыделения в ближайшей к сейсмоактивной зоне выработке. Показана динамика возникновения, развития и снижения зоны сейсмоэнергосыделения на рассматриваемых участках в горных выработках. Приведены примеры выполнения локального прогноза удароопасности на ранее установленных потенциально опасных участках методами регистрации естественного электромагнитного излучения горных пород и по выходу буровой мелочи.

Ключевые слова: система сейсмического мониторинга, геодинамические явления, горное давление, коэффициент концентрации напряжений, напряженно-деформированное состояние массива, математическое моделирование, расстояние до максимума опорного давления, локальный прогноз, естественное электромагнитное излучение горных пород, выход буровой мелочи

Для цитирования: Разумов Е.Е., Простов С.М., Шабанов Е.А. Региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности участков угольного пласта на основе сейсмического мониторинга // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 174–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

UDC 622.831:550.34.03

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring

E.E. Razumov^{1✉}, S.M. Prostov², E.A. Shabanov²

¹Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI, St. Petersburg, Russian Federation

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉razumov@vnimi.ru

Abstract. Relevance. Insufficient validity of the quantitative criteria of the regional, local and current forecast of the impact hazard of the coal seams being developed, the absence of algorithms linking the use of geophysical and direct geomechanical methods in forecasting. **Aim.** To develop a comprehensive method of geodynamic forecasting, including determining the extent of an impact-prone area identified by the results of a regional forecast based on the registration data of the GITS seismic monitoring system, for conducting local and current forecasts of impact hazard by regulatory methods. **Object.** An array of rocks of the excavation column 4-1-5-7 of the Osinnikovskaya mine during mining operations in the zone of a group of tectonic disturbances and the intersection of advanced workings. **Methods.** Regional geomechanical forecast by the geophysical method of seismic activity registration (GITS system), local (current) forecast by natural electromagnetic radiation methods (Angel-M equipment) and the output of drilling fines. **Results.** The paper introduces the results of complex studies in the excavation column 4 1-5-7 of the Osinnikovskaya mine to establish a correlation between seismic activity and the parameters of the stress-strain state of the array. The authors have introduced the concept of integral indicators of the considered parameters I_F and $I_{K\sigma}$. They take into account the area of the zone for the i -th range according to the complex parameter of seismic activity F and the coefficient of vertical stresses in the roof of the formation $K\sigma$. It is established that the informative value of the integral indicators is almost twice as high as the informative value of the initial parameters. Experimental nomograms $f(F_{max}; X_F)$ and $f(I_F; X_F)$ are presented to determine the category "DANGEROUS/NON-DANGEROUS" for the regional forecast of impact hazard according to the GITS seismic monitoring system. The authors developed a general algorithm for predicting the impact hazard during clean-up operations. This algorithm uses an integrated approach that includes a regional forecast for recording seismic activity within the mine field and local forecasting methods, both geophysical and direct, to clarify the boundaries of seismic energy release zones and confirm the category of impact hazard. The paper introduces the example of determining the width of the zone of increased seismic energy release in the mine closest to the seismically active zone. The dynamics of the occurrence, development and decrease of the seismic energy release zone in the considered areas in the mine workings is shown. The authors give the examples of the implementation of a local forecast of impact hazard in previously established potentially dangerous areas by methods of recording natural electromagnetic radiation of rocks and by the output of drilling fines.

Keywords: seismic monitoring system, geodynamic phenomena, rock pressure, stress concentration coefficient, stress-strain state of the massif, mathematical modeling, distance to the maximum reference pressure, local forecast, natural electromagnetic radiation of rocks, output of drilling fines

For citation: Razumov E.E., Prostov S.M., Shabanov E.A. Regional, local and current forecast of the impact hazard of coal seam sites based on seismic monitoring. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 174–186. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4420

Введение

В соответствии с действующей инструкцией по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений [1] на угольных шахтах, склонных и опасных по горным ударам, необходимо осуществлять региональный, локальный и текущий прогноз удароопасности.

Для выполнения регионального прогноза применяются системы сейсмического мониторинга с целью выявления зон активизации сейсмических процессов при отработке удароопасных угольных пластов.

Для осуществления регионального прогноза в АО «ВНИМИ» разработана и успешно функционирует на угольных шахтах России и Казахстана система сейсмического мониторинга *GITS* (*geoinformation transmitting system*), состоящая из трехкомпонентных датчиков с преусилителями, выносных модулей телеметрии, базовых модулей телеметрии и программного обеспечения. Система *GITS* позволяет: своевременно выявлять зоны сейсмической активности в пределах шахтного поля; осуществлять прогнозирование горных и горнотектониче-

ских ударов в соответствии с действующей нормативной базой; вести регистрацию всех случаев динамических проявлений горного давления в толще отрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород горного массива в районе контролируемых выработок; выявлять провоцирующее влияние природных факторов в их проявлении (например, предшествующих им сейсмических или геодинамических явлений) при расследовании ранее произошедших аварий геодинамической природы; производить автоматическое оповещение персонала шахт и рудников о зарегистрированных сильных сейсмических событиях [2, 3].

Для ведения локального прогноза удароопасности в Инструкции приняты следующие методы: на каменноугольных и антрацитовых пластах – по выходу буровой мелочи; на буроугольных пластах – по изменению естественной влаги угля; геофизические методы, основанные на регистрации сейсмоакустической активности, электромагнитных импульсов, амплитуды искусственно наведенного в угольном пласте электромагнитного поля [1].

Как правило, прямые методы недостаточно оперативны, трудоемки, не обеспечивают требуемой разрешающей способности и непрерывности мониторинга. Весьма интенсивно в последнее время развиваются геофизические методы, систематизация которых рассмотрена в работе [4]. Совершенствование геофизических методов идет в двух направлениях: расширение возможностей измерительной аппаратуры; развитие программно-методического обеспечения при обработке и интерпретации экспериментальных баз данных [5–9].

На шахтах Кузбасса и Сибири в настоящее время весьма активно применяются методы геоакустики, электромагнитного зондирования и георадиолокации. Примеры реализации этих методов при решении геомеханических проблем подземной геотехнологии следующие:

- внедрение системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений САКСМ на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» (шахта «Им. С.М. Кирова» и др.) [10–12];
- применение георадара с антенным блоком «Тритон» при изучении мерзлого массива горных пород, георадара ОКО-2 с антенным блоком на центральной частоте 400 МГц в условиях шахты «Талдинская-Западная» при диагностировании расслоений в кровле подготовительной выработки [13–16];
- использование электрического зондирования аппаратурой «Ангел-М» с высокочастотным генератором в комплексе с видеоэндоскопическим обследованием при наблюдении зон расслоений, дробления и контроля фактических параметров

анкерной крепи (шахта «Березовская» и ШУ «Карагайлинское» [17, 18], шахта «Чертинская-Коксовая» [19, 20]).

В результате комплексных исследований в выемочном столбе 4-1-5-7 шахты «Осинниковская» по выявлению корреляции между сейсмической активностью и параметрами напряженно-деформированного состояния массива установлено, что при ведении очистных работ значение комплексного параметра сейсмической активности F , определяемого по результатам работы системы сейсмического мониторинга $GITS$ в пределах шахтного поля, и коэффициент концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта $K_{\sigma\text{-верт.кр}}$ имеют общие тенденции к изменению.

Для проведения более точного сравнительного анализа были дополнительно определены интегральные показатели изменения рассматриваемых параметров, учитывающие не только их величины, но и размеры вовлекаемых зон при построении прогнозных карт. Было введено понятие интегральных показателей рассматриваемых параметров I_F и $I_{K\sigma}$, который учитывает площадь зоны для i -го диапазона по параметрам F и K_{σ} [21].

Результаты мониторинга представлены на рис. 1.

Было установлено, что информативность интегральных показателей почти в два раза превышает информативность исходных параметров (табл. 1).

Таблица 1. Информативность сейсмических и геомеханических параметров мониторинга

Table 1. Informative value of seismic and geomechanical monitoring parameters

Обозначение параметра Parameter designation	Описание параметра Parameter description	F	K_{σ}	I_F	$I_{K\sigma}$
J	Информативность параметра, бит Parameter informativeness, bits	0,612	0,57	0,927	1,322

Для повышения точности регионального прогноза удароопасности массива было предложено дополнительно определять расстояние x_i по нормали от очистного забоя до точки максимума информирующего параметра.

Накопленный банк экспериментальных данных позволил перейти к построению номограмм для прогноза удароопасности участков массива. Основная задача состояла в определении формы (уравнения) разграничительной линии и пороговых значений рассматриваемых параметров для категории «опасно». Решение задачи осложнялось тем, что на всех участках, на которых проводится сейсмический мониторинг, базовым методом прогноза по выходу буровой мелочи была получена категория «неопасно».

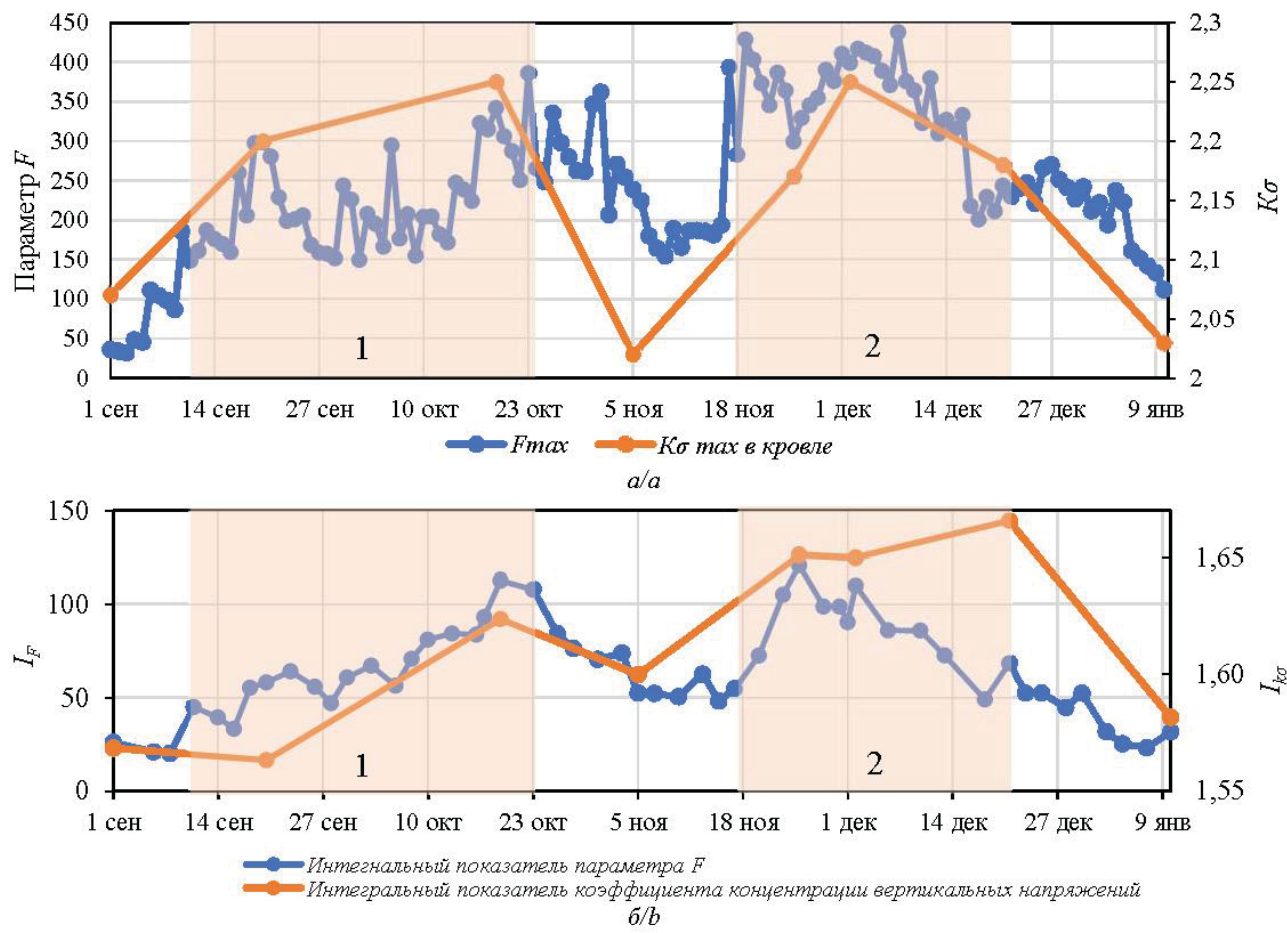


Рис. 1. Графики изменения максимальных значений коэффициента концентрации вертикальных напряжений в кровле пласта Е-5 $K_{\sigma-max}$ кр. и параметра F впереди забоя лавы (а) и интегральных показателей F и K_{σ} (б): 1 – перегруз очистным забоем группы тектонических нарушений; 2 – перегруз очистным забоем передовой выработки и тектонических нарушений

Fig. 1. Graphs of changes in the maximum values of the vertical stress concentration coefficient in the roof of the E-5 formation $K_{\sigma,max}$ kr. and the parameter F ahead of the lava face (a) and integral indicators F and K_{σ} (b): 1 – moving the group of tectonic disturbances by the treatment face; 2 – moving the advanced production and tectonic disturbances by the treatment face

Порядок построения состоял в следующем:

- на поле номограмм наносили расчетные точки с координатами ($\Pi_{max}; x_{II}$);
- выбирали разграничительную линию, наиболее точно разделяющую зоны «опасно» и «неопасно», при этом наиболее подходящей оказалась линия показательной функции $y=f(\Pi_{max};x_{II})=a^x$ (a – подбираемая константа);
- оценивали вероятность прогноза по соотношению «совпавших» точек к общему их количеству.

Экспериментальные номограммы $f(F_{max};x_F)$ и $f(I_F;x_F)$ приведены на рис. 2, а уравнения разграничительных линий экспериментальных номограмм с оценками вероятностей прогноза представлены в табл. 2.

Таблица 2. Уравнения разграничительных линий номограмм для рис. 2

Table 2. Equations of dividing lines of nomograms for Fig. 2

Уравнение Equation	Вероятность прогноза Forecast probability, %
$f(F,x)$	
$y = f(F,x) = \sqrt{x/35}$	95,3
$y = f(F,x) = \sqrt{x/42,5}$	91,5
$y = f(F,x) = \sqrt{x/60}$	88,4
$f(I_F,x)$	
$y = f(F,x) = \sqrt{x/25}$	95,2
$y = f(F,x) = \sqrt{x/30}$	90,4
$y = f(F,x) = \sqrt{x/35}$	88,1

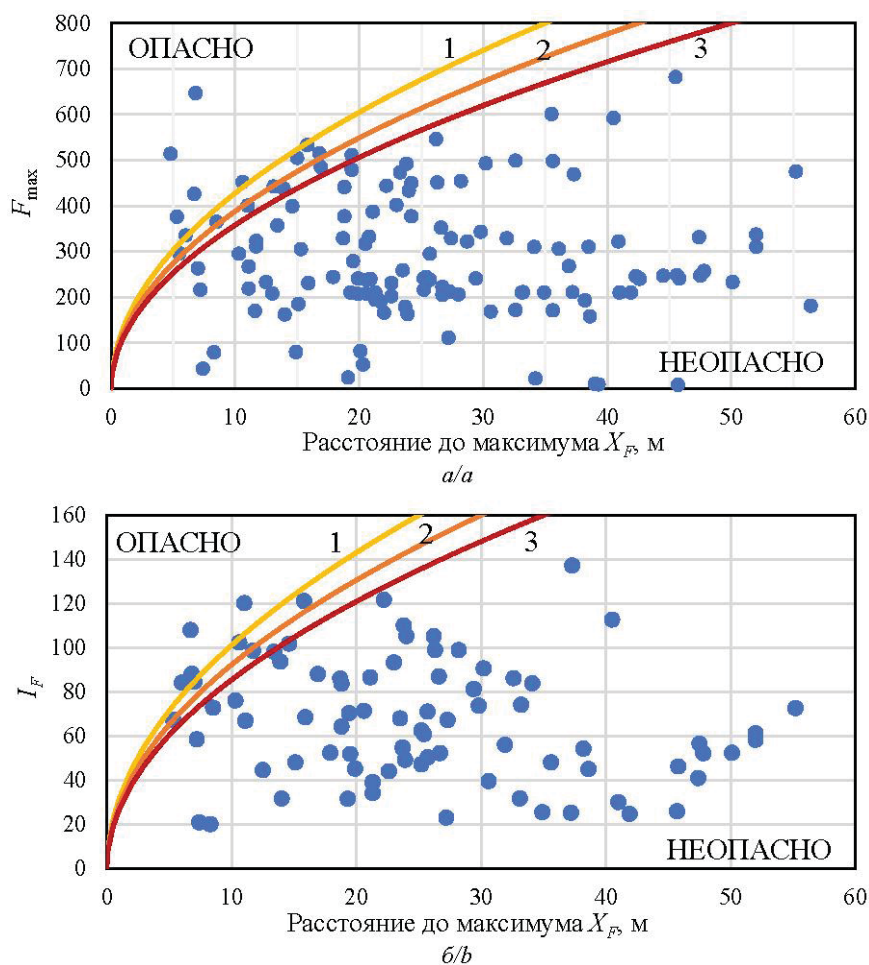


Рис. 2. Экспериментальные номограммы для прогноза удароопасности участков массива по данным сейсмического мониторинга $y=f(F_{\max};x_F)$ (а) и $y=f(I_F;x_F)$ (б): 1–3 – разграничительные линии

Fig. 2. Experimental nomograms for predicting the impact hazard of sections of the array according to seismic monitoring data $y=f(F_{\max};x_F)$ (a) and $y=f(I_F;x_F)$ (b): 1–3 – dividing lines

На основе результатов комплексных экспериментально-аналитических исследований предложено использовать для геодинамического прогноза удароопасности участков угольного пласта номограммы, включающие параметры, отражающие классические представления о механизме развязывания горных ударов: максимальные значения комплексного сейсмического параметра $F_{\max}$ (его интегральный показатель I_F) и расстояние x_F до точки со значением $F_{\max}$.

Методика проведения исследования

Для достижения поставленной цели разработан общий алгоритм прогноза удароопасности при ведении очистных работ. В алгоритме применен комплексный подход, включающий в себя региональный прогноз по регистрации сейсмической активности в пределах шахтного поля и методы локального прогноза, как геофизические, так и прямые, для уточнения границ зон повышенного сейсмоэнерговыведения и подтверждения категории удароопасности (рис. 3).

В соответствии с представленным алгоритмом прогноза удароопасности при ведении очистных работ первоначально на основе данных системы сейсмического мониторинга ведется региональный прогноз удароопасности (алгоритм на рис. 3, п. 1). По мере регистрации сейсмических событий выполняется их обработка с определением координат гипоцентра и выделившейся энергии в гипоцентре (п. 2). В результате обработки параметров сейсмособытий формируется база данных со всеми сейсмособытиями, зарегистрированными в пределах контролируемого участка (п. 3). При достаточном накоплении сейсмических событий в базе данных выполняется ежесуточное построение карт с изолиниями по параметру сейсмической активности F (п. 4). Дальнейшие шаги предусматривают определение точки максимума рассматриваемого параметра F на прогнозных картах и кратчайшего расстояния от этой точки до ближайшей открытой поверхности (борт подготовительно выработки, очистной забой), выполняется расчет интегрального показателя I_F (п. 5–7).

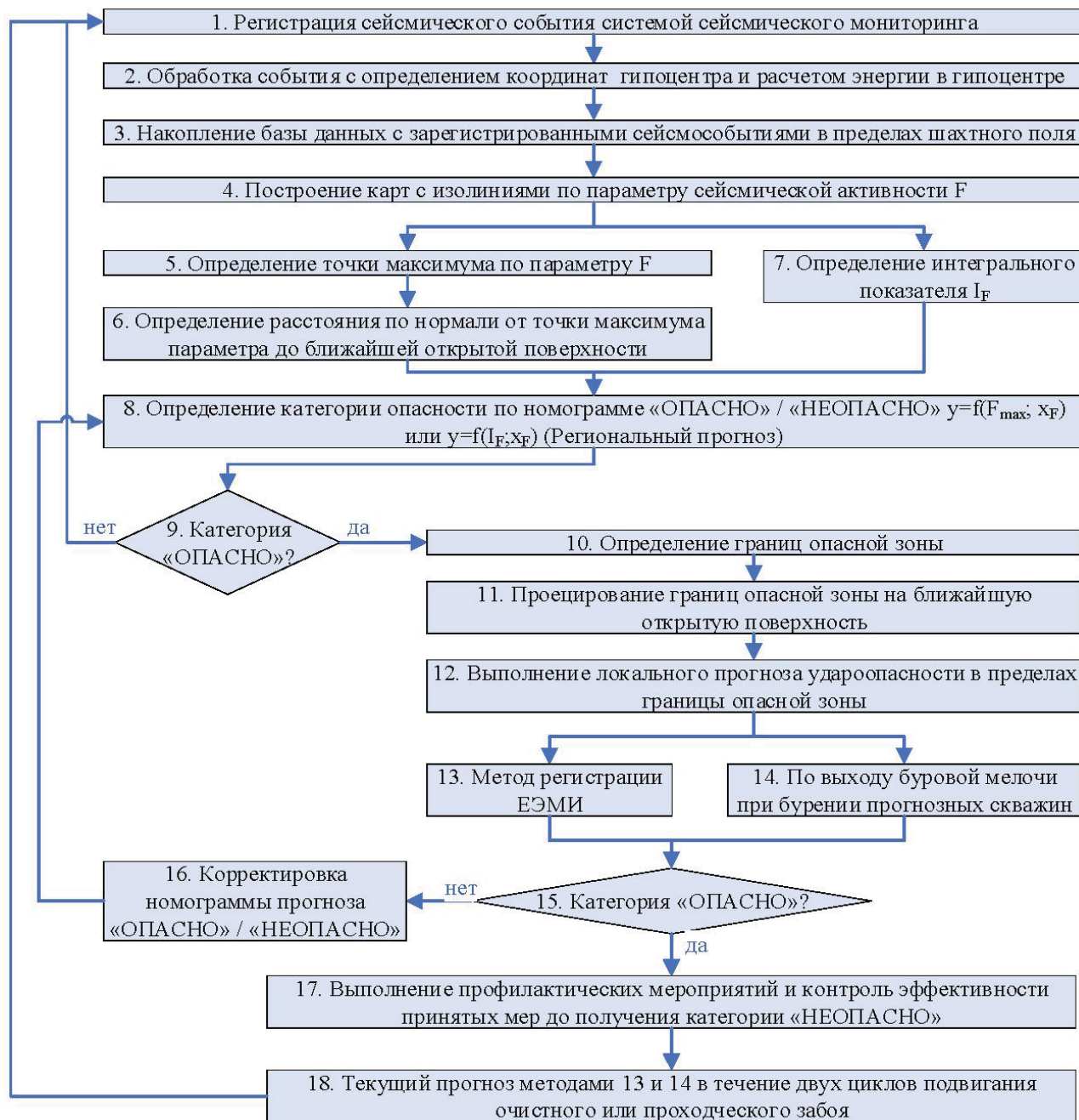


Рис. 3. Алгоритм комплексного прогноза удароопасности при ведении очистных работ
Fig. 3. Algorithm of complex prediction of impact hazard during cleaning operations

Затем по ранее установленным номограммам «ОПАСНО»/«НЕОПАСНО» $y=f(F_{\max}, x_F)$ (а) и $y=f(I_F, x_F)$ выполняется определение категории опасности (п. 8, 9). Если полученная точка на номограмме попадает в зону «НЕОПАСНО», продолжается ведение регистрации сейсмических событий в рамках регионального прогноза. Если по номограмме определена категория «ОПАСНО», то выполняется определение ширины зоны повышенного

сейсмознерговыведения в выработке, попадающей в данную зону (п. 10, 11). После установления ширины зоны повышенного сейсмознерговыведения в выработке на данном участке выполняется локальный прогноз по методу регистрации ЕЭМИ либо по выходу буровой мелочи для подтверждения или снятия ранее установленной категории опасности (п. 13–15). При неподтверждении категории «ОПАСНО» выполняется корректировка номо-

грамм «ОПАСНО»/«НЕОПАСНО» $y=f(F_{\max};x_F)$ и $y=f(I_F;x_F)$ (п. 16). В случае подтверждения категории «ОПАСНО» приступают к проведению профилактических мероприятий с контролем эффективности принятых мер с последующим выполнением текущего прогноз удароопасности методами локального прогноза не менее чем на двух циклах подвигания забоя подготовительной выработки или забоя очистной выработки после приведения его в неудороопасное состояние в соответствии с п. 97 Инструкции [1] (п. 17, 18).

Результаты

Для реализации алгоритма (рис. 3) были проведены специальные исследования, обеспечивающие переход от регионального прогноза к локальному и текущему. Экспериментальные исследования проводились в условиях шахты «Осинниковская» и включали решение следующих задач:

- обоснование метода определения границ зон повышенного сейсмозерговыделения для проведения локального и текущего прогноза;
- согласование и взаимоувязку прямых и геофизических методов прогноза.

Отработка выемочного столба 4-1-5-7 на ш. «Осинниковская» велась в сложных горногеологических условиях, а именно в контуре выемочного столба были спрогнозированы ряд тектонических нарушений. Также осложняющими факторами геомеханической обстановки являлся переезд очистным забоем передовой выработки – разрезной печи 4-1-5-7.

В ходе опытной эксплуатации системы GITS в пределах шахтного поля шахты «Осинниковская» были определены уровни опасности сейсмической активности по комплексному параметру F для расчётного блока $50 \times 50 \times 50$ м (табл. 3).

При формировании сейсмоактивной зоны вблизи очистного забоя или шпрека, попадающей в зону «ОПАСНО» по номограмме «ОПАСНО»/«НЕОПАСНО» $y=f(I_F;x_F)$ (рис. 2), следует спроецировать границы выявленной зоны на ближайшие выработки.

Параметры зоны повышенного сейсмозерговыделения при переезде очистным забоем группы тектонических нарушений и передовой выработки показаны на рис. 4.

При пересечении группы тектонических нарушений 22 октября 2020 г. (рис. 4, а) по данным регистрации сейсмических событий системой GITS была выявлена категория «ОПАСНО» по комплексному параметру сейсмической активности, максимальное значение комплексного параметра достигло $F=314$, расстояние от точки максимума до очистного забоя составило 26,5 м. Ширина зоны повышенного сейсмозерговыделения в очистном забое составила $\Delta x=37$ м.

При переезде передовой выработки фиксировались максимальные значения по параметру F за весь период отработки лавы, высокий уровень параметра F сохранялся начиная с 17 ноября по 16 декабря до момента окончания переезда передовой выработки. На рис. 4, б представлена карта с нанесением изолиний распределения значений параметра F на плане горных работ на 1 декабря 2020 г. Расстояние от максимума параметра $F=300,9$ до ближайшей открытой поверхности (забой лавы) составило 20,5 м. Протяженность зоны, соответствующей 4 уровню опасности по параметру F , в забое лавы 4-1-5-7 составила $\Delta x=63,7$ м.

Таблица 3. Классификация участков шахтного поля сейсмоактивности по параметру F

Table 3. Classification of sections of the mine field of seismic activity by parameter F

Уровень Level	Min значение параметра F Min value of the parameter F	Описание Description
0	0	Значение F – в диапазоне $0 < F < 10$ (фоновый уровень), или за 15 дней в блоке не произошло крупных сейсмических событий, «неопасно» F value is in the range of $0 < F < 10$ (background level) or there have been no major seismic events in the block for 15 days, "not dangerous"
1	10	Значение F – в диапазоне $10 \leq F < 50$, или внутри блока зарегистрировано событие с энергией от $1000 < E < 3000$ Дж, «неопасно» F value is in the range of $10 \leq F < 50$ or an event with an energy of $1000 < E < 3000$ J was registered inside the block, "not dangerous"
2	50	Значение F – в диапазоне $50 \leq F < 100$, или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $3000 < E < 5000$ Дж, «умеренно напряженно, но не опасно» F value is in the range of $50 \leq F < 100$ or an event with an energy of $3000 < E < 5000$ J was registered inside the block, "moderately tensely, but not dangerous"
3	100	Значение F – в диапазоне $100 \leq F < 200$, или внутри блока зарегистрировано событие с энергией $5000 < E < 10000$ Дж, «напряженно, но не опасно» F value is in the range of $100 \leq F < 200$ or an event with an energy of $5000 < E < 10000$ J was registered inside the block, "tensely, but not dangerous"
4	200	Значение F – в диапазоне $200 \leq F < 300$, или зарегистрировано событие с энергией $10000 \leq E < 15000$ Дж, «напряжено, опасно» F value is in the range of $200 \leq F < 300$ or an event with an energy of $10000 \leq E < 15000$ J was registered, "tensely, dangerous"
5	300	Значение $F > 300$, или зарегистрировано событие с энергией $E > 15000$ Дж, «напряжено, опасно» $F > 300$ or an event with an energy of $E > 15000$ J was registered, "tensely, dangerous"



Рис. 4. Параметры зоны повышенного сейсмозергосвыделения в выработке при переезде забоем лавы: а) группы тектонических нарушений; б) передовой выработки; в) в вентиляционном штрехе 4-1-5-7 (Палитра для окрашивания зон по параметру F соответствует табл. 3)

Fig. 4. Determination of the boundary of the danger zone on the nearest open surface when moving the lava face: a) groups of tectonic disturbances; b) advanced workings; c) in the ventilation drift 4-1-5-7 (The palette for coloring zones by parameter F corresponds to Table 3)

12 декабря 2020 г. появилась вторая зона повышенного сейсмозергосвыделения в межлавном целике в районе между действующим очистным забоем 4-1-5-7 и ранее отработанным выемочным столбом. Значение сейсмического параметра достигло $F=296$. Размеры зоны в очистном забое 8 м, в вентиляционном штрехе $\Delta x=22$ м (рис. 4, в).

Динамика возникновения, развития и снижения зоны сейсмозергосвыделения для описанных выше участков показана на рис. 5, где приведены графики изменения во времени ширины зоны повышенного сейсмозергосвыделения Δx и комплексного параметра в форме произведения $F_{\max} \cdot \Delta x$. Из приведенных данных следует, что длительность геомеханических процессов, способствующих формированию удароопасного состояния массива, может изменяться в диапазоне 4–10 суток.

После установления границ зоны повышенного сейсмозергосвыделения на данном участке требу-

ется выполнить прогноз удароопасности по методу регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) горных пород [22–31]. Основными преимуществами данного метода являются: мобильность, быстрота выполнения качественной оценки, низкая трудоемкость.

В ходе выполнения оценки удароопасности по методу регистрации ЕЭМИ массива горных пород устанавливается фактическая опасность данного участка. Если ЕЭМИ массива превышает установленные критерийные значения, определенные для данного пласта, то для подтверждения склонности массива к удароопасности следует выполнить прогноз удароопасности прямым методом – по выходу буровой мелочи.

Номограмма для прогноза удароопасности методом ЕЭМИ, обоснованная результатами реального прогноза на шахте «Осинниковская», приведена на рис. 6, а номограмма для прогноза по выходу буровой мелочи – на рис. 7.

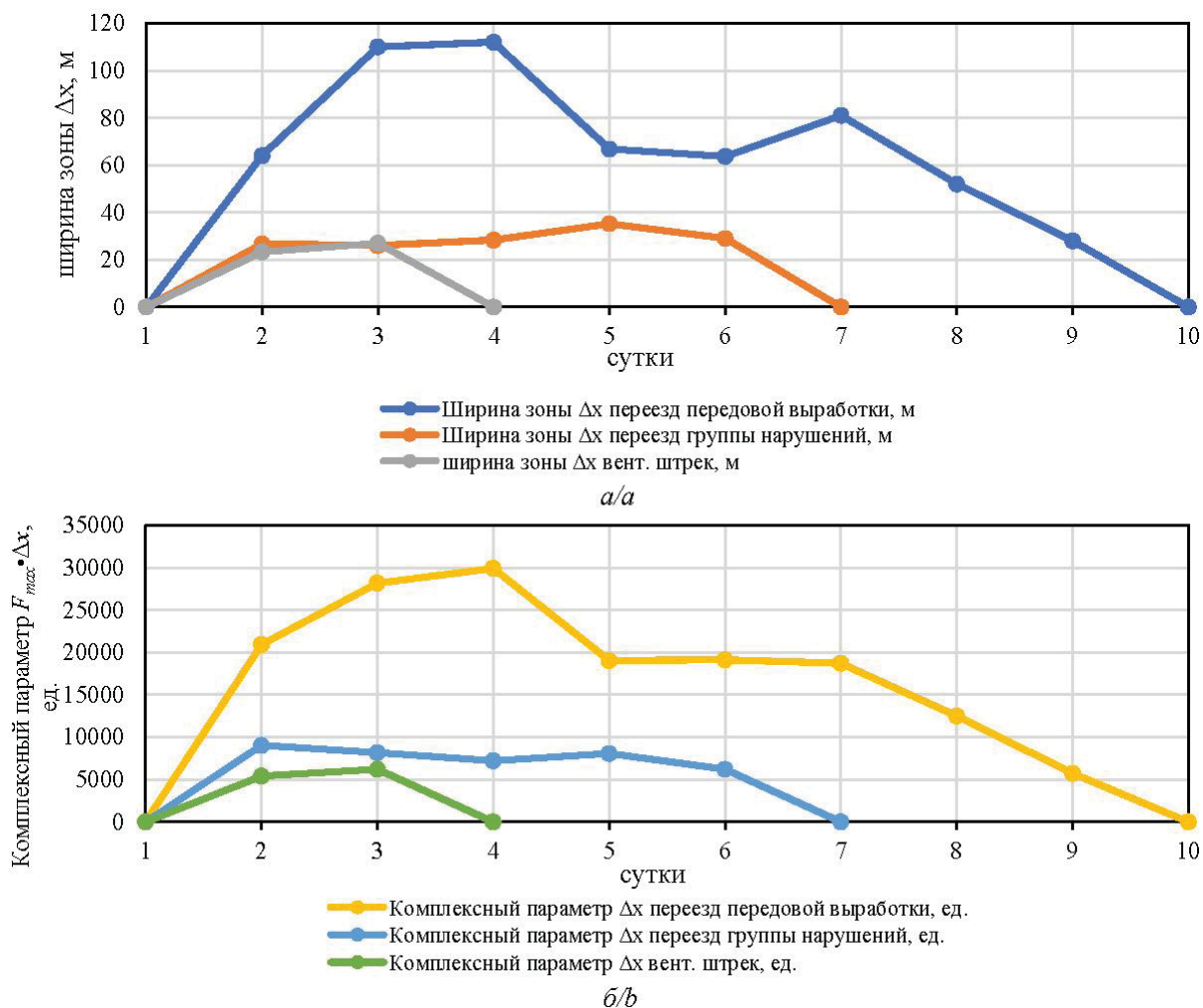


Рис. 5. Графики изменения: ширины зоны Δx (а), комплексного параметра $F_{max} \cdot \Delta x$ (б)
Fig. 5. Graphs of changes in: the width of the zone Δx (a), the complex parameter $F_{max} \cdot \Delta x$ (b)

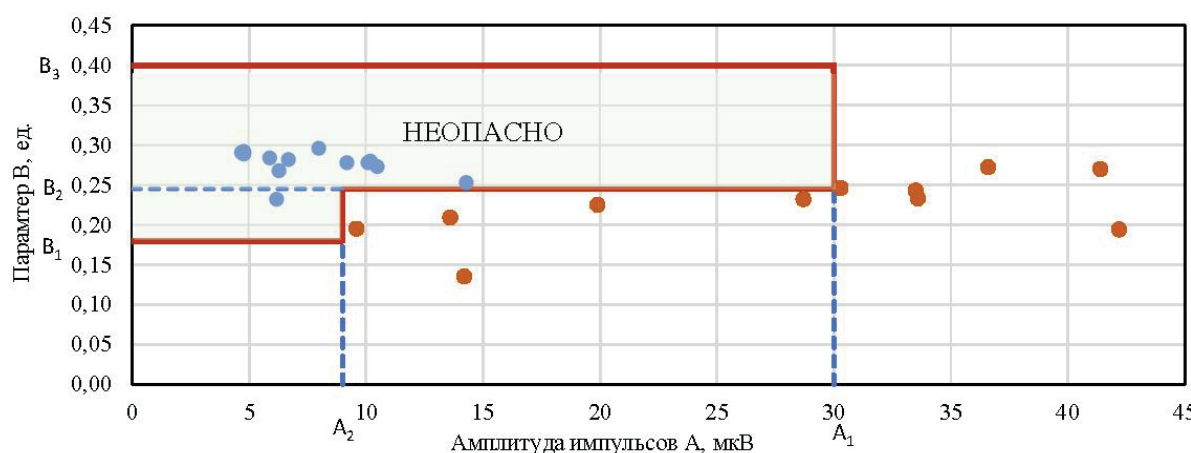


Рис. 6. Номограмма распределения параметров ЕЭМИ в забое конвейерного штрека 4-1-5-9 21.12.2021: ● – замеры ЕЭМИ, выполненные в забой и правый бок выработки; ● – замеры ЕЭМИ, выполненные в левый бок выработки; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 и B_3 – прогностические параметры для категории «НЕОПАСНО» при проведении прогноза удароопасности комплексом ANGEL-M в проходческих забоях по пласту Е-5
Fig. 6. Nomogram of the distribution of the EEM parameters in the bottom of the conveyor drift 4-1-5-9 on 12.21.2021: ● – measurements of the EEM performed in the bottom and right side of the workings; ● – measurements of the EEM performed in the left side of the workings; A_1 , A_2 , B_1 , B_2 and B_3 – prognostic parameters for the category "NOT DANGEROUS" during the prediction of impact hazard by the complex ANGEL-M in tunneling faces along the E-5 formation

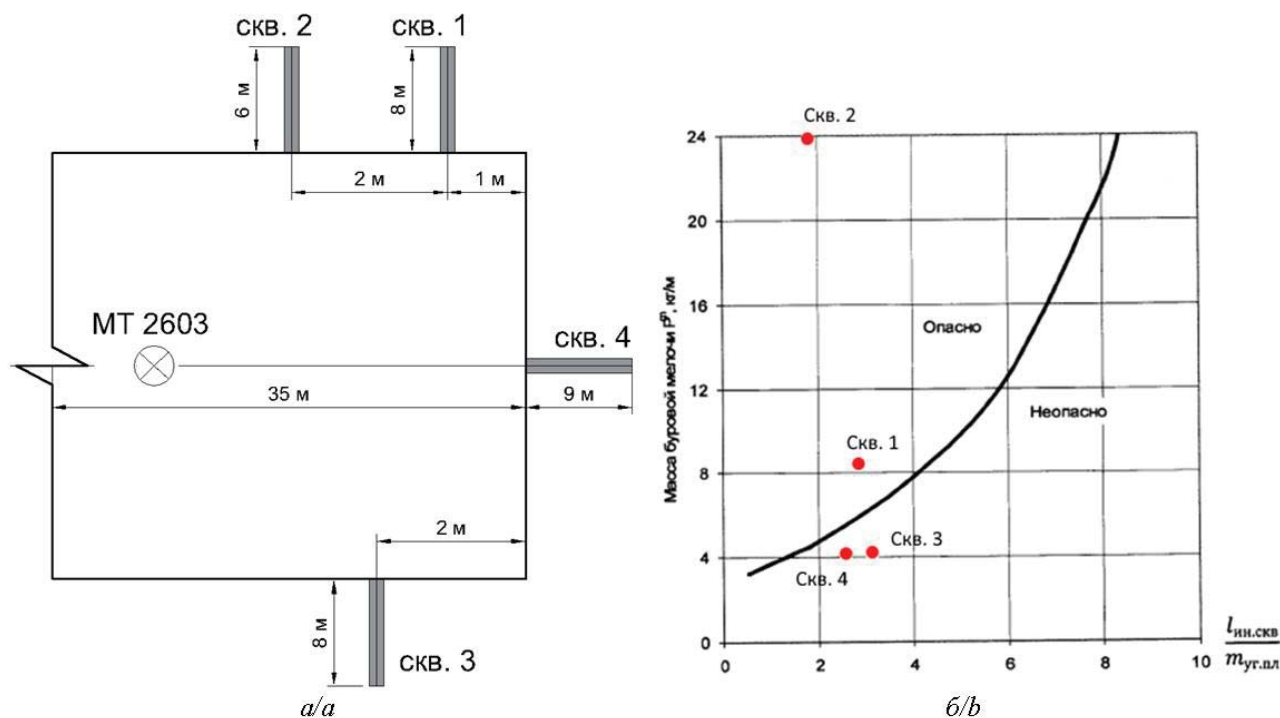


Рис. 7. Схема бурения скважин локального прогноза удароопасности (а) и номограмма установления категории «ОПАСНО» или «НЕОПАСНО» с результатами прогноза в конвейерном штреке 4-1-5-9 21.12.2021 (б)

Fig. 7. Scheme of drilling wells of the local forecast of impact hazard (a) and the nomogram of the establishment of the category "DANGEROUS" or "NOT DANGEROUS" with the results of the forecast in the conveyor drift 4-1-5-9 on 12.21.2021 (b)

В ходе выполнения локального прогноза удароопасности 2021.12.21 в забое конвейерного уклона 4-1-5-9 категория «ОПАСНО» была получена как по методу ЕЭМИ, так и по выходу бурового штыба. По методу ЕЭМИ превышение установленных критериальных значений было получено при направлении измерительной антенны геофизического комплекса ANGEL-M на левый борт выработки на удалении 1 м от забоя.

При выполнении прогноза удароопасности по выходу буровой мелочи в подготовительном забое по левому борту выработки в одном и четырех метрах от забоя в двух прогнозных шпурах была установлена категория «ОПАСНО». Схема бурения скважин локального прогноза удароопасности представлена на рис. 7, а. Максимальный выход буровой мелочи составил 30 литров с шестого метра прогнозного шпура (скв. 2) при нормируемом значении не более 5,7 литра. Забой был остановлен до приведения в безопасное состояние.

Предложенный метод комплексного подхода к региональному, локальному и текущему прогнозу удароопасности обеспечивает рациональное сочетание геофизических и прямых методов мониторинга и будет способствовать повышению точности прогноза и снижению затрат на его реализацию.

Выводы

1. Рациональное сочетание геофизических и прямых методов прогноза удароопасности участков угольных пластов обеспечивается алгоритмом, включающим региональный прогноз по комплексному параметру сейсмической активности F с построением карт изолиний, определением категории опасности по максимальным значениям F (интегрального показателя F) и расстоянию по нормали от точки максимума до ближайшей открытой поверхности, установлением границ опасного участка по пересечению соответствующей изолинии с поверхностью обнажения, проведение в соответствии с нормативными документами геофизического и прямого локального (текущего) прогноза в пределах установленных границ.
2. В качестве методов локального (текущего) прогноза в условиях угольных шахт Кузбасса целесообразно использовать геофизические методы регистрации сейсмической активности и естественного электромагнитного излучения, а также прямой метод по выход бурового штыба. При этом следует применять диапазоны критериальных значений, полученные в ходе экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору приказ от 10 декабря 2020 года № 515.
2. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга при отработке удароопасных угольных пластов / Е.Е. Разумов, Г.Д. Рукавишников, С.Н. Мулёв, С.М. Простов // Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 8–12.
3. Алгоритмы обработки сейсмической информации / Е.Е. Разумов, С.М. Простов, Г.Д. Рукавишников, С.Н. Мулёв // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 2. – С. 17–29.
4. Егоров А.П., Рыжов В.А. К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасности ведения горных работ на угольных шахтах // Уголь. – № 10. – 2019. – С. 22–28.
5. Klishin V.I., Shadrin A., Teleguz A. Controlling coal rock massif hydro-treating process by instrumental and geophysical methods // E3S Web of Conferences: Vth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, 19–21 October 2021. – Kemerovo: EDP Sciences, 2021. – Vol. 315. – P. 03029. DOI: 10.1051/e3sconf/202131503029.
6. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geophysical methods / V. Lyashenko, O. Khomenko, T. Chekushina, F. Topolnij // Technology audit and production reserves. – 2020. – Vol. 5. – № 3 (55). – P. 9–18. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215737.
7. Pudov E., Kuzin E., Efremkov A. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods // IOP conference series: materials science and engineering: the conference proceedings ISPCIT'2020. – Veliky Novgorod, 25–26 June 2020. – Veliky Novgorod: IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 939. – P. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012063.
8. Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals / A. Tristanov, O. Lukovenkova, Y. Marapulets, A. Kim // Signal Processing – Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications Conference Proceedings, SPA. – Poznan, 18–20 September 2019. – Poznan: IEEE Computer Society, 2019. – P. 256–260. DOI: 10.23919/SPA.2019.8936817.
9. Overview of processing and analysis methods for pulse geophysical signals / O.O. Lukovenkova, Yu.I. Senkevich, A.A. Solodchuk, A.O. Shcherbina // E3S Web of Conferences. – Paratunka, 22–25 September 2020. – Paratunka: EDP Sciences, 2020. – Vol. 196. – P. 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/202019602023.
10. Копылов К.Н., Смирнов О.В., Кулик А.И. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – С. 82–88.
11. Испытания автоматизированной системы акустического контроля состояния массива горных пород / К.Н. Копылов, О.В. Смирнов, А.И. Кулик, П.В. Потапов // Уголь. – 2015. – № 7. – С. 44–47.
12. Смирнов О.В., Кулик А.И., Лапин Е.А. Прогноз геологических нарушений по параметрам акустического сигнала // Уголь. – 2015. – № 11. – С. 76–79.
13. Соколов К.О. Частотно-временное представление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // ФТПРПИ. – 2014. – № 1. – С. 77–81.
14. Прудеский Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной, заполненной льдом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 107–113.
15. Анализ обследований состояния горных выработок, закрепленных анкерной крепью с применением георадара / В.А. Бакин, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин, К.К. Ремпель // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 10. – С. 172–177.
16. Kavin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar: case study of upper Kama potash deposit // Mine Water: Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference. – Perm: Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. – P. 23–27.
17. Применение современных технических средств мониторинга для оценки соответствия проектных параметров анкерной крепи изменяющимся условиям проведения подземных выработок / А.В. Рогачков, А.С. Позолотин, В.Ф. Исамбетов, П.И. Муравский, П.В. Гречишкин // Уголь. – 2012. – № 12. – С. 38–40.
18. Особенности технического аудита подготовительных выработок угольных шахт, закрепленных анкерной крепью / П.В. Гречишкин, А.В. Хаймин, А.С. Позолотин, А.В. Рогачков, Е.А. Разумов // Уголь. – 2013. – № 8. – С. 89–90.
19. Буянова Д.С. Особенности электрометрического контроля трещиноватости массива горных пород вокруг подземных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 6. – С. 227–232.
20. Повышение эффективности оценки состояния пород кровли выработок с применением различных методов в условиях шахты «Чертинская-Коксовая» / П.В. Гречишкин, В.Ф. Харченко, Е.Ю. Розанов, В.С. Горностаев, С.Ф. Панин // Уголь. – 2019. – № 10. – С. 42–45.
21. Разумов Е. Е., Простов С. М., Петрова О. А. Экспериментально-аналитическое исследование динамики геомеханических процессов при отработке угольного пласта в районе тектонического нарушения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 102–118. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_102
22. Расчётная и аппаратная база геомониторинга состояния массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения / С.М. Простов, Е.Е. Разумов, С.Н. Мулёв, Е.А. Шабанов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 183–193.
23. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors / X. Song, X. Li, Z. Li, Z. Zhang, F. Cheng, P. Chen, Y. Liu // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 148. – P. 216–225.
24. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Surface oscillations – a possible source of fracture induced electromagnetic radiation // Tectonophysics. – 2007. – Vol. 431. – P. 15–21.

25. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining-induced coal and gas outburst / L. Qiu, Z. Li, E. Wang, Z. Liu, J. Ou, X. Li, M. Ali, Y. Zhang, S. Xia // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2018. – Vol. 54. – P. 206–215.
26. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR / L. Qiu, E. Wang, D. Song, Z. Liu, R. Shen, G. Lv, Z. Xu // *Journal Geophys. Eng.* – 2017. – Vol. 14. – P. 949–959.
27. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock / D. Song, E. Wang, X. Song, P. Jin, L. Qiu // *Rock Mech Rock Eng.* – 2016. – Vol. 49. – P. 291–302.
28. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment / D. Song, E. Wang, X. He, H. Jia, L. Qiu, P. Chen, S. Wang // *Journal Geophys. Eng.* – 2018. – Vol. 15. – P. 1093–1103.
29. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine // *Journal Geophys. Eng.* – 2018. – Vol. 15. – P. 909–920.
30. Shaporeva G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction // *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIIIth International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. – Novosibirsk, 2018. – P. 159–160.
31. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса / С.М. Простов, Е.Е. Разумов, С.Н. Мулёв, Е.А. Шабанов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 99–110.

Информация об авторах

Егор Евгеньевич Разумов, ассистент, научный сотрудник лаборатории геофизических исследований Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт горной геомеханики маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ», Россия, 650002, г. Санкт-Петербург, ул. Сосновый бор, 1. razumov@vnimi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3696-8553>

Сергей Михайлович Простов, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Евгений Анатольевич Шабанов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства и экспертизы, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. evgenshab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 10.01.2024

Принята к публикации: 14.06.2024

REFERENCES

1. *Federal norms and rules in the field of industrial safety. Instructions for the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during mining of coal deposits*. Federal service for environmental, technological and nuclear supervision order no. 515, December 10, 2020. (In Russ.)
2. Razumov E.E., Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Prostov S.M. The basic principles of building seismic monitoring systems when working off impact-prone coal seams. *Mining journal*, 2021, no. 1, pp. 8–12. (In Russ.)
3. Razumov E.E., Prostov S.M., Rukavishnikov G.D., Mulev S.N. Algorithms for processing seismic information. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2022, no. 2, pp. 17–29. (In Russ.)
4. Egorov A.P., Ryzhov V.A. On the issue of systematization of geophysical studies of the geomechanical state of the rock mass and the Earth's surface for operational safety control of mining operations at coal mines. *Coal*, 2019, no. 10, pp. 22–28. (In Russ.)
5. Klishin V.I., Shadrin A., Teleguz A. Controlling coal rock massif hydro-treating process by instrumental and geophysical methods. *E3S Web of Conferences, VIth International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, October 19–21, 2021. Kemerovo, EDP Sciences, 2021. Vol. 315, p. 03029. DOI: 10.1051, e3sconf, 202131503029.
6. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F. Justification of safe underground development of mountain deposits of complex structure by geophysical methods. *Technology audit and production reserves*, 2020, vol. 5, no. 3 (55), pp. 9–18. DOI: 10.15587, 2706-5448.2020.215737.
7. Pudov E., Kuzin E., Efremkov A. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods. *IOP conference series, materials science and engineering, the conference proceedings ISPCIT'2020*. Veliky Novgorod, June 25–26, 2020. Veliky Novgorod, IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 939, p. 012063. DOI: 10.1088, 1757-899X, 939, 1, 012063.
8. Tristanov A., Lukovenkova O., Marapulets Y., Kim A. Improvement of methods for sparse model identification of pulsed geophysical signals. *Signal Processing, Architectures, Arrangements, and Applications Conference Proceedings, SPA*. Poznan, September 18–20, 2019. Poznan, IEEE Computer Society, 2019. p. 256–260. DOI: 10.23919, SPA.2019.8936817.
9. Lukovenkova O.O., Senkevich Yu.I., Solodchuk A.A., Shcherbina A.O. Overview of processing and analysis methods for pulse geophysical signals. *E3S Web of Conferences*. Paratunka, September 22–25, 2020. Paratunka, EDP Sciences, 2020. Vol. 196, p. 02023. DOI: 10.1051, e3sconf, 202019602023.
10. Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I. Acoustic control of the array state and forecast of dynamic phenomena. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 7, pp. 82–88. (In Russ.)

11. Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I., Potapov P.V. Tests of an automated acoustic control system for the state of an array of rocks. *Coal*, 2015, no. 7, pp. 44–47. (In Russ.)
12. Smirnov O.V., Kulik A.I., Lapin E.A. Forecast of geological disturbances by acoustic signal parameters. *Coal*, 2015, no. 11, pp. 76–79. (In Russ.)
13. Sokolov K.O. Frequency-time representation of geo-radar sections based on continuous wavelet transform. *FTRPI*, 2014, no. 1, pp. 77–81. (In Russ.)
14. Prudetsky N.D., Sokolov K.O., Fedorova L.L. Physical modeling of electromagnetic high-frequency wave propagation in an array of rocks with a crack filled with ice. *Mining information and analytical bulletin*, 2018, no. 11, pp. 107–113. (In Russ.)
15. Bakin V.A., Pudov E.Yu., Kuzin E.G., Rempel K.K. Analysis of surveys of the state of mine workings secured with anchorage using georadar. *Mining information and analytical bulletin*, 2015, no. 10, pp. 172–177. (In Russ.)
16. Kovin O.N. Assessment of the prospective water inflow hazards using georadar, case study of upper Kama potash deposit. *Mine Water, Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference*. Perm, Perm State University, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of RAS, 2019. pp. 23–27.
17. Rogachkov A.V., Pozolotin A.S., Isambetov V.F., Muravsky P.I., Grechishkin P.V. Application of modern technical monitoring tools to assess compliance of design parameters of anchor support with changing conditions of underground workings. *Coal*, 2012, no. 12, pp. 38–40. (In Russ.)
18. Grechishkin P.V., Khaimin A.V., Pozolotin A.S., Rogachkov A.V., Razumov E.A. Features of technical audit of preparatory workings of coal mines fixed with anchorage. *Coal*, 2013, no. 8, pp. 89–90. (In Russ.)
19. Buyanova D.S. Features of electrometric control of fracturing of rock mass around underground workings. *Mining information and analytical bulletin*, 2014, no. 6, pp. 227–232. (In Russ.)
20. Grechishkin P.V., Kharchenko V.F., Rozanov E.Yu., Gornostaev V.S., Panin S.F. Improving the efficiency of assessing the condition of the roof rocks of workings using various methods in the conditions of the Chertinskaya-Koksovaya mine. *Coal*, 2019, no. 10, pp. 42–45. (In Russ.)
21. Razumov E.E., Prostov S.M., Petrova O.A. Experimental and analytical study of the dynamics of geomechanical processes during mining of a coal seam in the area of tectonic disturbance. *Mining information and analytical Bulletin*, 2024, no. 3, pp. 102–118. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_102
22. Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., Shabanov E.A. Calculation and hardware base of geomonitoring the state of the array by the method of registration of natural electromagnetic radiation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 183–193. (In Russ.)
23. Song X., Li X., Li Z., Zhang Z., Cheng F., Chen P., Liu Y. Study on the characteristics of coal rock electromagnetic radiation (EMR) and the main influencing factors. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, vol. 148, pp. 216–225.
24. Rabinovitch A., Frid V., Bahat D. Surface oscillations a possible source of fracture induced electromagnetic radiation. *Tectonophysics*, 2007, vol. 431, pp. 15–21.
25. Qiu L., Li Z., Wang E., Liu Z., Ou J., Li X., Ali M., Zhang Y., Xia S. Characteristics and precursor information of electromagnetic signals of mining-induced coal and gas outburst. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, vol. 54, pp. 206–215.
26. Qiu L., Wang E., Song D., Liu Z., Shen R., Lv G., Xu Z. Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR. *Journal Geophys. Eng.*, 2017, vol. 14, pp. 949–959.
27. Song D., Wang E., Song X., Jin P., Qiu L. Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock. *Rock Mech Rock Eng.*, 2016, vol. 49, pp. 291–302.
28. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P., Wang S. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining induced stress field assessment. *Journal Geophys. Eng.*, 2018, vol. 15, pp. 1093–1103.
29. Liu X., Wang E. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine. *Journal Geophys. Eng.*, 2018, vol. 15, pp. 909–920.
30. Shaporeva G., Bizyaev A., Jakovitskaya O. Analysis of electromagnetic emission signals accompanying the process of rock destruction. *Progress through Innovations Proceedings 2018 VIIth International Academic and Research Conference of Graduate and Post graduate Students*. Novosibirsk, 2018. pp. 159–160.
31. Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., Shabanov E.A. Substantiation of criteria for local prediction of impact hazard by the method of registration of natural electromagnetic radiation in the mines of Kuzbass. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 99–110. (In Russ.)

Information about the authors

Egor E. Razumov, Assistant, Researcher, Scientific Research Institute of Mining Geomechanics of Surveying – Intersectoral Research Center VNIMI, 1, Sosnovy Bor street, St. Petersburg, 650002, Russian Federation. razumov@vnimi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3696-8553>

Sergey M. Prostov, Dr. Sc., Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyyaya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. psm.kem@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0780-2690>

Evgeny A. Shabanov, Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Construction Production and Expertise Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University», 28, Vesennyyaya street, Kemerovo, 650002, Russian Federation. evgenshab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2460-6467>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Поступила после рецензирования: 10.01.2024

Принята к публикации: 14.06.2024