

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.14.24.002

УДК 622:528.88:004.89

© П. В. Гречишкин, О. Л. Гиниятуллина, Н. Ю. Трошков, 2024

П. В. ГРЕЧИШКИН

канд. техн. наук,

директор

Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», г. Кемерово

e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

О. Л. ГИНИЯТУЛЛИНА

канд. техн. наук,

научный сотрудник

Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», г. Кемерово

e-mail: skiporol@mail.ru

Н. Ю. ТРОШКОВ

заместитель директора

Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», г. Кемерово

e-mail: troshkoff1973@mail.ru

РАЗВИТИЕ ПОДХОДА К ПРОГНОЗУ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ И АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Предложен подход к прогнозу динамических явлений в виде панели индикаторов на основе выявления косвенных признаков, получаемых в результате дешифрирования космоснимков и обработки геофизических данных алгоритмами искусственного интеллекта. Разработанные алгоритмы позволяют выделять потенциально опасные зоны возникновения динамических явлений и предсказывать с высокой долей вероятности возникновение сильных сейсмических событий в ближайшие 12 ч. в границах шахтного поля.

Ключевые слова: МОНИТОРИНГ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ, ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ, ПАНЕЛЬ ИНДИКАТОРОВ, ЦЕНТРЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ.

В настоящее время на угольных шахтах ведение регионального прогноза динамических явлений (ДЯ) регламентируется «Инструкцией по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при обработке угольных месторождений» [1]. Особое внимание данному аспекту уделяется в регионах с повышенной природной и техногенной сейсмичностью, например, в Кузбассе. Согласно данному документу, регистрация

явлений осуществляется по непрерывным сейсмоакустическим наблюдениям, для фиксации которых используются такие системы, как «GITS», АС «РЕЛОС», «IMS» и др. [2–4].

Тем не менее, при выполнении локального прогноза динамических явлений в условиях конкретной шахты данных, описанных в Инструкции [1], недостаточно. Не вполне решены вопросы локального мониторинга и прогноза ДЯ в условиях

напряженно-деформированного состояния массива на участках тектонических дизъюнктивных и пликативных нарушений мощных пластов угля при слоевой отработке. Таким образом, остро стоит вопрос выстраивания системы предупреждения чрезвычайных ситуаций в очистном забое по всей вертикали: от получения данных о состоянии массива до их интерпретации и обеспечения необходимых мероприятий.

В Кемеровском филиале ВНИМИ накоплен большой опыт мониторинга сейсмической активности и прогноза ДЯ в шахтах Кузбасса, который позволил предложить принципиально новый подход к развитию метода локального прогноза на основе анализа комбинации косвенных показателей, фиксируемых на региональном уровне. Идея подхода базируется на интеграции методов регионального и локального прогноза с привлечением дополнительных методов поиска потенциально опасных зон при полном охвате поля шахты с оптимизацией объемов работ по локальному прогнозу ДЯ. Предлагается выполнять поиск потенциально опасных зон сейсмологическими методами и методами контроля смещений земной поверхности, одновременно оценивая структуру потока сейсмических событий алгоритмами анализа

данных и искусственного интеллекта. Таким образом, формируется стек показателей, которые в комбинации могут указывать на наличие высокой степени вероятности проявления потенциально опасных ДЯ. Дальнейшее уточнение и анализ напряженно-деформированного состояния массива в потенциально опасных зонах выполняется методами измерения и регистрации акустической и электромагнитной эмиссии, выходы буровой мелочи. Подобный подход позволяет существенно сократить трудоемкость локального и текущего прогнозов и увеличить эффективность предупреждения опасных явлений в шахтах.

Реализация предлагаемого комплексного подхода к прогнозу динамических явлений в сложных горно-геологических условиях базируется на применении технологии панели индикаторов, где отдельный индикатор показывает уровень опасности по установленному показателю (рис. 1). Появление тревожного уровня хотя бы у одного индикатора инициирует проверку опасных зон методами локального прогноза ДЯ, в частности, методом электромагнитной эмиссии с использованием аппаратного комплекса «Ангел-М», разработанного в АО «ВНИМИ» [4]. К опасным зонам относятся забой, а также центры

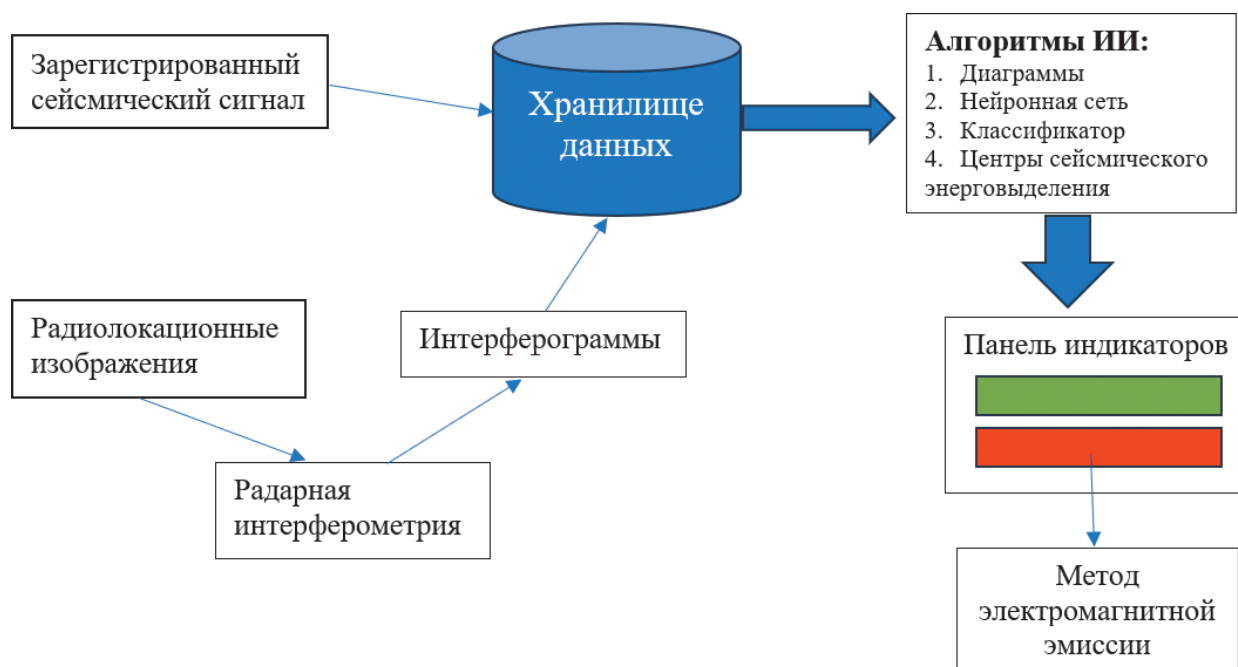


Рис. 1. Общая схема комплексного подхода к прогнозу динамических явлений в шахтах

сейсмического энерговыделения и проекции границ участков активных сдвижений поверхности на вмещающий массив и подземные горные выработки, если они доступны.

В качестве сейсмологического сигнала используются данные системы «GITS», разработанной в АО «ВНИМИ». В настоящее время существует каталог накопленных данных по различным угольным предприятиям России. На данных каталога сейсмических событий реализовано три решения:

- региональный прогноз удароопасности массива по потоку сейсмических событий;
- краткосрочный прогноз ожидаемой энергии сейсмических событий на основе аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС);

- локализация центра сейсмического энерговыделения (ЦСЭВ) на различных интервалах времени.

Прогноз удароопасности массива выполняется по нескольким показателям (параметрам) с построением карт их распределения по полю шахты (рис. 2).

Прогноз ожидаемой энергии сейсмических событий на основе аппарата искусственных нейронных сетей опирается на гипотезу о повторяемости локализации и энергии слабых сейсмических событий перед крупным [5]. Таким образом, в данных сейсмического каталога должны формироваться повторяющиеся образы, которые возможно распознать с помощью ИНС с архитектурой Swin-Transformer [6], обладающие высокой средней точностью порядка 98 % относительно всех энергий

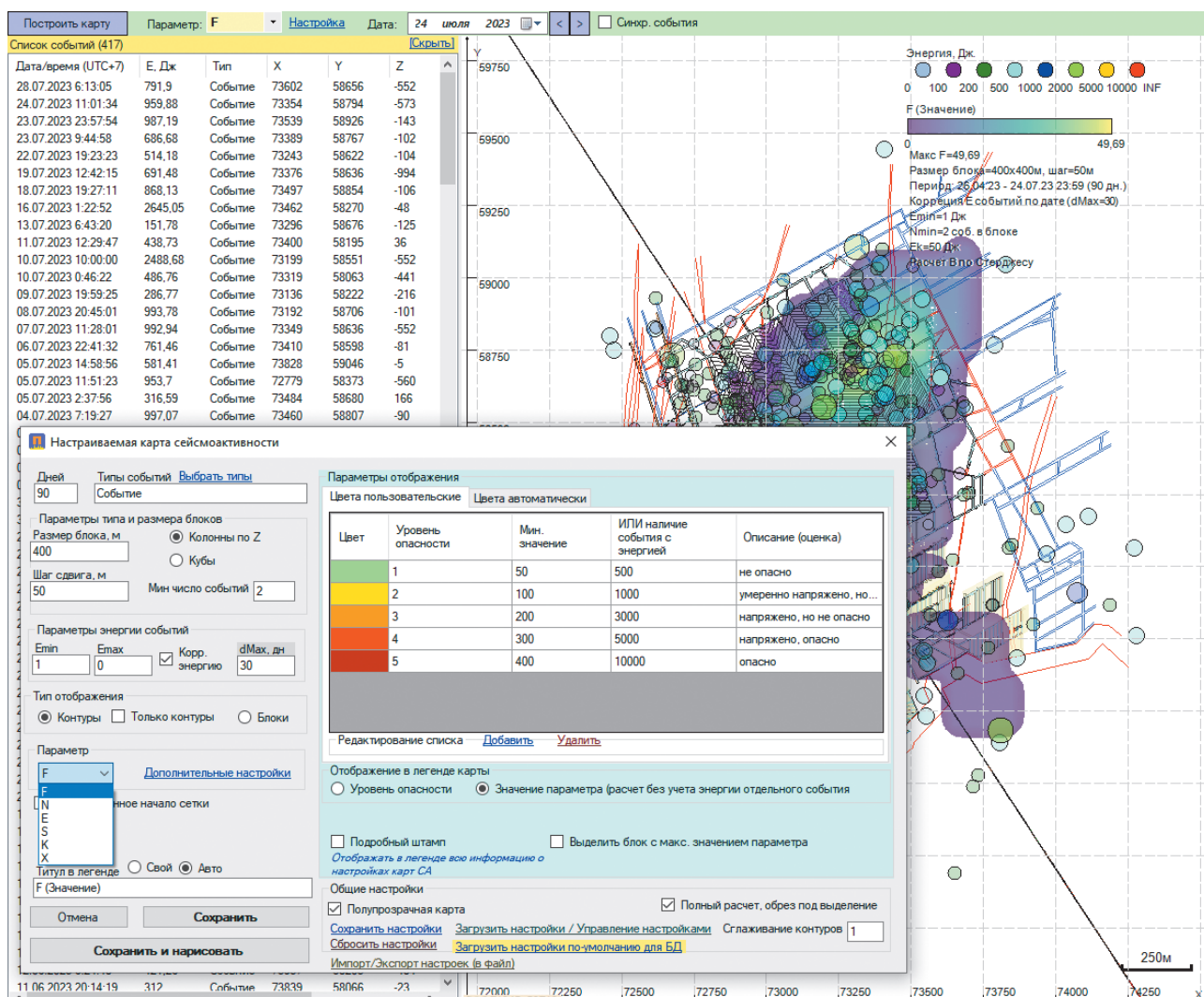


Рис. 2. Фрагмент интерфейса ПО GITS: настройка расчета показателей и карта прогноза удароопасности

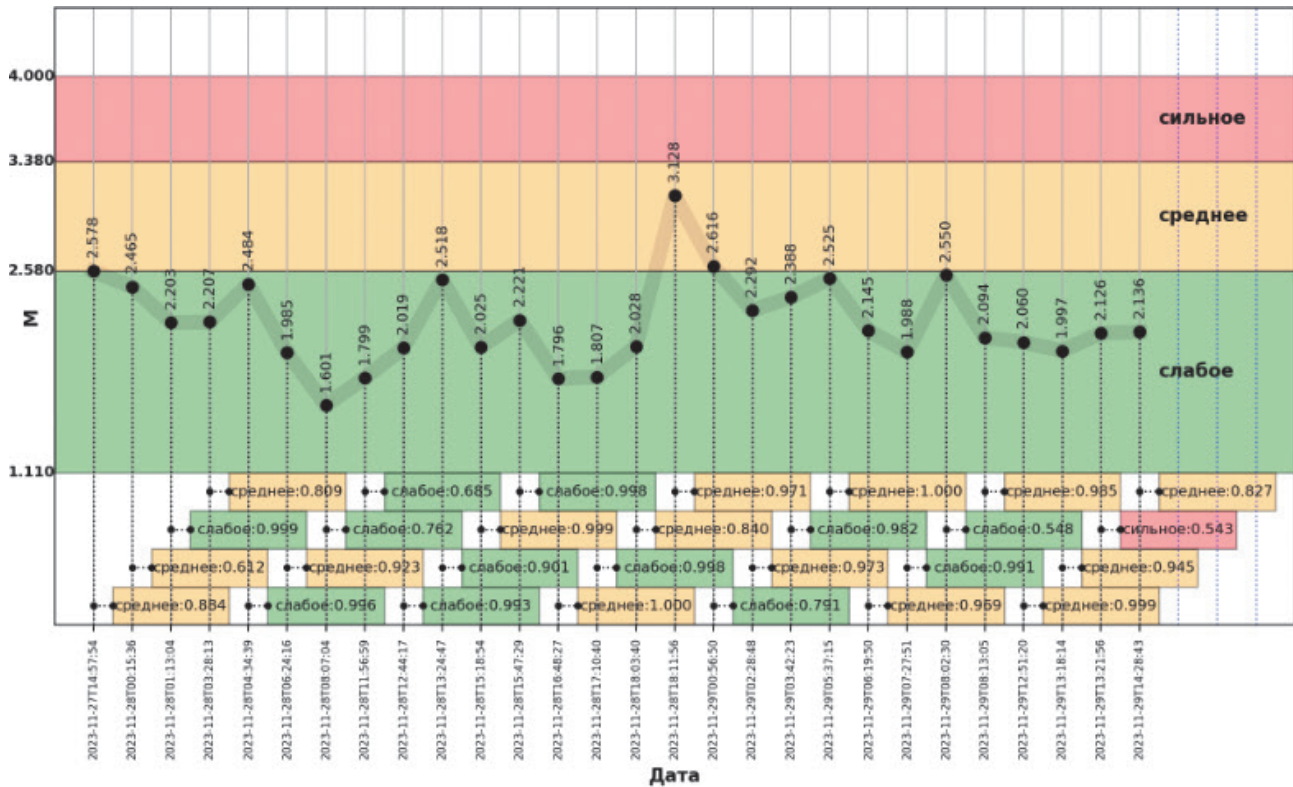


Рис. 3. Пример классификации-прогноза для множества событий (сильное, среднее, слабое — названия классов энергий событий, ниже названий классов указаны вероятности их появления, возвращаемые ИНС)

и достаточной точностью порядка 91 % относительно событий с высокой энергией (рис. 3).

Центр сейсмического энерговыделения — это центр тяжести (по энергии) рассматриваемого множества сейсмических событий на поле шахты. Любое смещение ЦСЭВ к действующему забою или месту предыдущих негативных проявлений горного давления, в том числе, в динамической форме должно рассматриваться как определенно тревожный признак [7–8]. Локализацию ЦСЭВ можно проводить, например, методом скользящего среднего, изображая таким образом краткосрочный центр и его миграцию (рис. 4). Также можно применить методы кластеризации координат сейсмических событий, чтобы определить точки (зоны) их концентрации. Следует отметить, что данный подход позволил спрогнозировать возникновение значимых сейсмособытий в течение 12 часов.

Шкала времени иллюстрирует положение (разброс) кластеров ЦСЭВ на оси времени, цвета маркеров и номера соответствуют карте.

Спутниковый мониторинг для контроля вертикальных смещений поверхности в пределах горного отвода шахты и локализация участков активных просадок производится методом спутниковой радарной интерферометрии, которая обеспечивает одномоментную съемку большой территории и минимальное влияние атмосферных помех (облачность, туман). Технология получения смещений и скоростей смещений содержит последовательность стандартных вычислительных процедур, обеспечивающих высокую достоверность значений конечных величин, прежде всего, скоростей смещений. Конечным продуктом является векторная (точечная) карта (рис. 5) [9–11]. Каждая точка имеет набор атрибутов, в т.ч. географические координаты, отклонение от цифровой модели рельефа на дату снимка, среднюю скорость изменения вертикальных смещений и другое.

Простая фильтрация по величине смещений поверхности на горном отводе шахты за выбранный интервал времени позволяет выделить участки выхода геомеханических

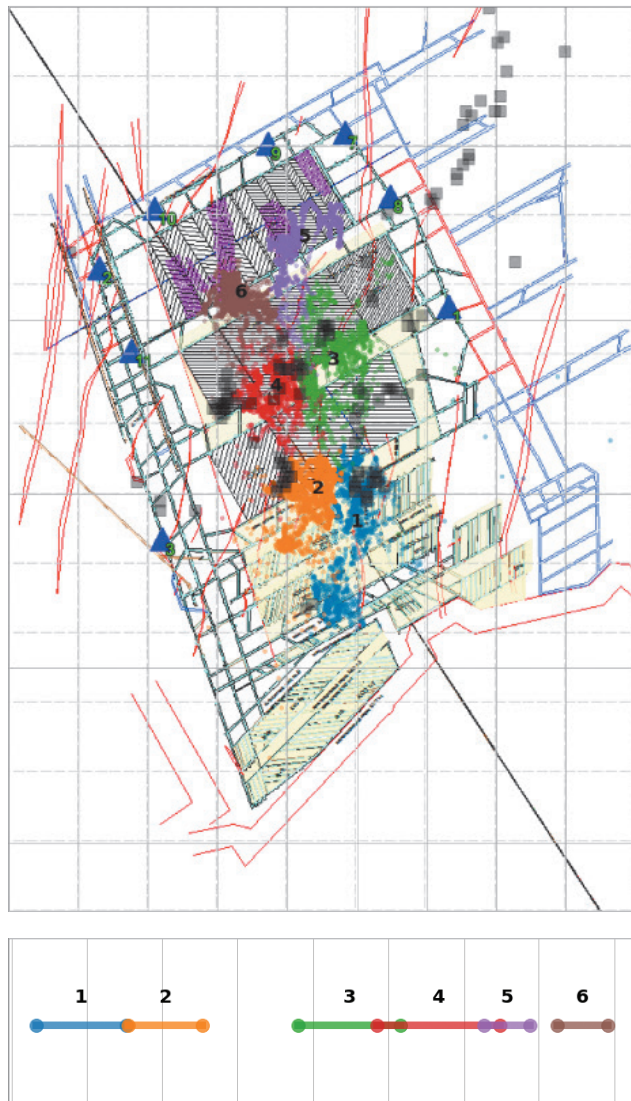


Рис. 4. Карта центров сейсмознерговыведения. Черные маркеры «■» на карте обозначают участки просадок земной поверхности, обнаруженные методом радарной интерферометрии; числа от 1 до 6 на карте и прилегающие цветные маркеры «●» обозначают выделившиеся кластеры ЦСЭВ, упорядоченные по среднему времени кластера; синие маркеры «▲» с номерами от 1 до 11 обозначают места размещения сейсмических датчиков

процессов в массиве на поверхность и одновременно определить участки горных выработок, прилегающих к зонам сдвижений, как потенциально опасные. Совмещение карт ЦСЭВ и участков активных и/или экстремальных просадок (рис. 4) рассматривается как тревожный признак и указывает на необходимость прогноза ДЯ локальными методами в зонах опорного давления.

Таким образом, предложенный комплексный подход к прогнозу динамических явлений на шахтах в сложных горно-геологических условиях на основе геофизических и спутниковых данных позволяет охватывать все поле шахты, а не отдельные участки массива; такой подход обоснован трудоемкостью методов текущего прогноза ДЯ.

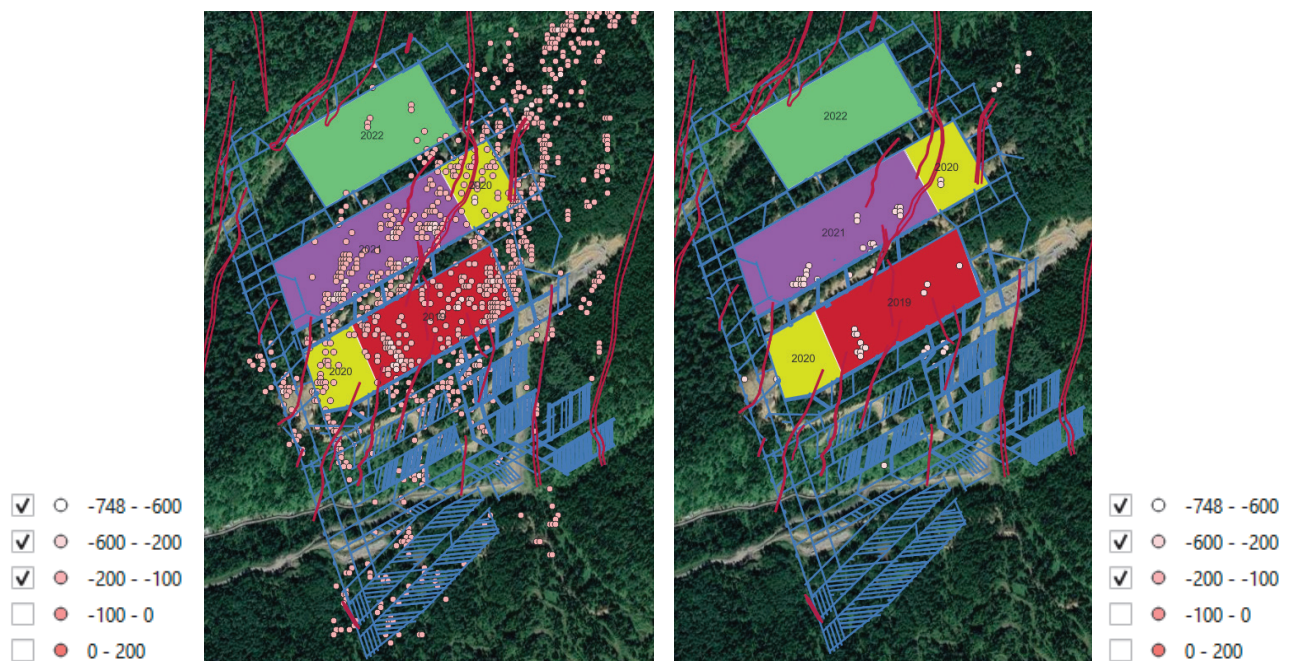


Рис. 5. Мониторинг деформаций поверхности по данным космического зондирования

После обучения нейронной сети по каталогу сейсмособытий удастся с достоверной вероятностью более 90 % спрогнозировать максимальную энергию значимых сейсмособытий в течение следующих 12 часов в пределах горного отвода шахты. В результате комплексного подхода можно

определить, какие поддерживаемые выработки находятся в потенциально опасном состоянии по динамическим проявлениям горного давления, и таким образом уточнить, где требуется локальный прогноз удароопасности в поддерживаемых пластовых выработках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений [Электронный ресурс]: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264171> (дата обращения 13.07.2023).
2. Разумов Е. Е., Простов С. М. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга // Горный журнал. 2021. № 1. С. 8–12.
3. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. No. 5. P. 829–837.
4. Разумов Е. Е., Простов С. М., Мүлөв С. Н., Рукавишников Г. Д. Алгоритмы обработки сейсмической информации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 2. С. 17–29.
5. Еременко В. А. Исследование влияния глубины подземных взрывов на выделение сейсмической энергии динамических явлений в условиях разработки удароопасного месторождения // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания. М., 2015. С. 221–227.
6. Liu Z. et al. Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021. С. 10012–10022.
7. Nordström E., Dineva, S., Nordlund E. Back Analysis of Short-Term Seismic Hazard Indicators of Larger Seismic Events in Deep Underground Mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). Pure Appl. Geophys, 177. 2020. P. 763–785.
8. Батугин А. С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры // Горная промышленность. 2023. S1. С. 14–21.
9. Кузьмин Д. К. Моделирование смещений земной поверхности, полученных различными спутниками со встроенным модулем РСА (на примере мониторинга месторождений нефти и газа) // Проблемы недропользования. 2021. № 2(29). С. 94–104.
10. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е. П. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа // Геофизические исследования. 2012. № 3. С. 5–17.
11. Hanssen R. F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. N.Y., 2001. 308 p.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.14.24.002

UDC 622:528.88:004.89

© P. V. Grechishkin, O. L. Giniyatullina, N. Y. Troshkov, 2024

P. V. GRECHISHKIN

Candidate of Engineering Sciences,

Director

Kemerovo branch of JSC «VNIMI», Kemerovo

e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

O. L. GINIYATULLINA

Candidate of Engineering Sciences,
Research Scientist
Kemerovo branch of JSC «VNIMI», Kemerovo
e-mail: skiporol@mail.ru

N. Y. TROSHKOV

Deputy Director
Kemerovo branch of JSC «VNIMI», Kemerovo
e-mail: troshkoff1973@mail.ru

DEVELOPMENT OF APPROACH TO PREDICTION OF DYNAMIC PHENOMENA IN COAL MINES USING COMBINATION OF GEOPHYSICAL AND SPATIAL DATA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

An approach to predicting dynamic phenomena is proposed in the form of an indicator panel based on the identification of indirect features obtained as a result of decrypting space images and processing geophysical data by artificial intelligence algorithms. The developed algorithms make it possible to identify potentially dangerous zones of dynamic phenomena and predict with a high degree of probability the occurrence of strong seismic events in the next 12 hours within the boundaries of the mine field.

Keywords: MONITORING OF DYNAMIC PHENOMENA, GEOPHYSICAL DATA, SPATIAL DATA, INDICATOR PANEL, SEISMIC ENERGY SEPARATION CENTERS.

REFERENCES

1. Instructions for forecasting dynamic phenomena and monitoring of rock formations during mining of coal deposits [Electronic resource]: federal norms and rules in the field of industrial safety. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573264171> (date of application 13.07.2023). [In Russ.].
2. Razumov E. E., Prostov S. M. Basic principles of building seismic monitoring systems // Mining Journal [Gornyy zhurnal]. 2021. No. 1. P. 8–12. [In Russ.].
3. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28. No. 5. P. 829–837.
4. Razumov E. E., Prostov S. M., Mulev S. N., Rukavishnikov G. D. Algorithms for processing seismic information // Mining information and analytical bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2022. No. 2. P. 17–29. [In Russ.].
5. Yeremenko V. A. Investigation of the influence of the depth of underground explosions on the release of seismic energy of dynamic phenomena in the conditions of the development of an impact-prone field // Trigger effects in geosystems: Materials of the third All-Russian seminar-meeting. M., 2015. P. 22–227. [In Russ.].
6. Liu Z. et al. Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021. P. 10012–10022.
7. Nordström E., Dineva, S., Nordlund E. Back Analysis of Short-Term Seismic Hazard Indicators of Larger Seismic Events in Deep Underground Mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). Pure Appl. Geophys, 177. 2020. P. 763–785.
8. Batugin A. S. Geodynamic effects of the extremely stressed state of the Earth's crust // Mining industry [Gornaya promyshlennost]. 2023. S1. P. 14–21. [In Russ.].
9. Kuzmin D. K. Modeling of displacements of the Earth's surface obtained by various satellites with an integrated RSA module (on the example of monitoring oil and gas fields) // Problems of subsurface use [Problemy nedropolzovaniya]. 2021. No. 2(29). P. 94–104. [In Russ.].
10. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Smolyaninova E. I., Timoshkina E. P. Estimation of the full vector of displacements of the Earth's surface and man-made objects according to radar satellite interferometry data for areas of oil and gas field development // Geophysical Research [Geofizicheskiy issledovaniya]. 2012. No. 3. P. 5–17. [In Russ.].
11. Hanssen R. F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. N.Y., 2001. 308 p.