© Е.И. Журавлев, 2014

УДК 622.268.13:622.281.5

Е.И. Журавлев

ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ОПАСНОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ШАХТАХ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Описано программное решение моделирования прогноза сейсмической оценки состояния опасности возникновения геодинамических явлений на шахте. Данное прогнозирование осуществляется за счет контролирования показателей процессов предшествующих возникновению ГДЯ, а также наблюдению таких подготовительных процессов с последующей их экстраполяцией на перспективу для заблаговременного предупреждения возникновения опасных ситуаций на шахтах. Рассматриваемый в статье программный инструмент создан в среде разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на объектно-ориентированном языке программирования VB.NET. В основе математического механизма прогнозного модуля лежит идея оптимизации методом наименьших квадратов. А также положения по оценки опасности возникновения ГДЯ из методики сейсмоакустического анализа. Прогнозный инструмент имеет четкую и ясную структуру, чтобы диспетчер мог своевременно получить необходимые данные о возможных возникновениях опасностей на шахтах.
Ключевые слова: поддержка принятия решений, геоинформационная система, программный инструментарий, метод наименьших квадратов, опасность, геодинамическое явление.

Внезапное геодинамическое явление уносит множество человеческих жизней и оставляет после себя большое разрушение. Будь то горные удары или внезапные выбросы угля, породы и газа на шахтах и рудниках – у них есть одно общее: они труднопрогнозируемые. Однако различного рода геодинамические явления можно спрогнозировать за счет исследования напряженно-деформированного состояния (НДС), предшествующих им. Прогнозирование, в свою очередь, состоит в наблюдении таких показателей, как напряжение, сейсмические и сейсмоакустические импульсы, терморадиационное излучение, т.е. наблюдении подготовительных процессов НДС и их экстраполяцию на перспективу, что и является оценкой вероятности возникновения этого явления [1].

К основным физико-техническим свойствам горных пород относят плотностные свойства: объемная масса, пористость; механические свойства: предел прочности при сжатии, предел прочности при растяжении, модуль продольной упругости, коэффициент Пуассона; тепловые свойства: коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, коэффициент линейного теплового расширения; электрические свойства: удельное электрическое сопротивление, относительная диэлектрическая проницаемость и магнитные свойство – относительная магнитная проницаемость [2].

Процесс разрушения горной породы может характеризоваться следующими шестью стадиями. На стадии I происходит объемное сжатие образца, вызванное закрытием ранее существовавших трещин (рис. 1).

После того как основные трещины закрылись, порода деформируется почти линейно (стадия II). При напряжениях свыше примерно половины прочности наблюдается более сильное боковое расширение образца на стадиях III и IV. Это сопровождается некоторым снижением осевого модуля и увеличением объема образца. На стадии IV происходит сращивание микротрещин и постепенная локализация деформации в достаточно узкой области, т.е. наблюдается переход от объемного трещинообразования к локализованному. На стадии V происходит формирование плоскости макротрещины – разрушение перемычек породы, находящихся на пути распространения трещины. На VI стадии происходит скольжение по плоскостям макротрещин, а напряжения определяются остаточной прочностью – трением в сдвиговой зоне. Таким образом, разрушение представляет собой довольно продолжительный процесс трещинообразования.

Для возможности заблаговременного предсказания возможных опасных проявления геодинамических явлений(ГДЯ) необходимо осуществлять непрерывный комплексный мониторинг НДС массива горных пород [3, 5, 6]. Разработанная и внедренная ИПКОН РАН на шахте им. С.М. Кирова в городе Ленинск-Кузнецкий автоматизированная система поддержки принятия решений и комплексного синтезирующего мониторинга (АС ППТР и КСМ) предназначена для прогнозирования, оценки риска опасных природных и техногенных явлений при подземной разработке твердых полезных ископаемых и выработки технологических решений по их предотвращению. В состав данной системы входит модуль прогноза геодинамических явлений на основе анализа частотного распределения активностей сейсмической и сейсмоакустической эмиссии в горном массиве, а также энергетических составляющих этих импульсов.

Для решения задачи прогноза состояния опасности геодинамических явлений был разработан интеллектуальный программный модуль по предсказанию возникновения геодинамических явлений в шахтах. Согласно методике сейсмоакустического анализа [4] при определении состояния опасности геодинамических явлений выделяют 4 состояния: «неопасное», «слабоопасное», «среднеопасное» и «сильноопасное», условно обозначенные соответственно цветами: «зеленый», «желтый», «оранжевый» и «красный». Вычисление состояния опасности производится по двум критериям: «двух точек» и «критического превышения». Каждое состояние характеризуется определенной степенью опасности возникновения геодинамических явлений, а также величиной параметров в уравнениях прогноза, при этом каждая шахта должна адаптировать показатели к собственным горно-геологическим условиям и отдельным эксплуатационным районам [7].

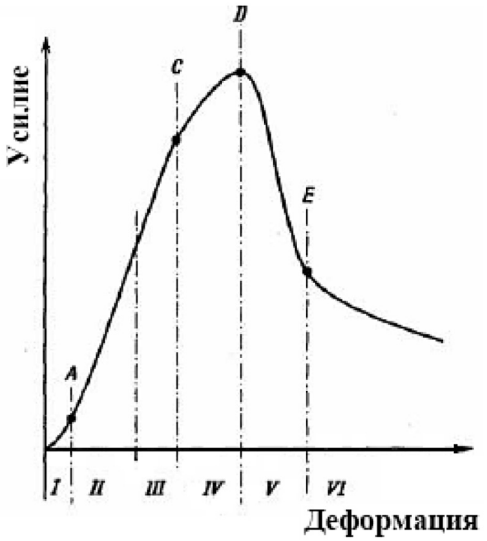

Рис. 1. Схематизированная кривая напряжение-деформация

Типы прогноза и их эмпирические формулы

Тип прогноза	$\overline{x}_s$	$\overline{y}_s$	**Формула экстраполяции**
Линейный	$\frac{x_1 + x_n}{2}$	$\frac{y_1 + y_n}{2}$	$y = ax + b$
Параболический	$\frac{\left(x_1^2 + x_n^2\right)}{2}$	$\frac{y_1 + y_n}{2}$	$y = a + bx + cx^2$
Гиперболический	$\frac{2 \cdot x_1 \cdot x_n}{x_1 + x_n}$	$\frac{y_1 + y_n}{2}$	$y = a + \frac{b}{x}$
Полулогарифмический	$\sqrt{x_1 x_n}$	$\frac{y_1 + y_n}{2}$	$y = a + b \cdot \lg(x)$
Степенной	$\sqrt{x_1 x_n}$	$\sqrt{y_1 y_n}$	$y = a \cdot x^b$
Показательный	$\frac{x_1 + x_n}{2}$	$\sqrt{y_1 y_n}$	$y = a \cdot b^x$

Созданный программное решение включает в себя интеллектуальную модель, позволяющую в автоматическом режиме в зависимости от типа входных данных определять оптимальную экстраполяцию характерных параметров НДС углепородного массива и строить соответствующую модель предсказания возможного опасного проявления ГДЯ и вычислять прогноз опасного НДС массива горных пород. В своей основе прогнозный модуль содержит 6 типов экстраполяции, а именно: линейная, параболическая, гиперболическая, логарифмическая, степенная и показательная.

В системе АС ППТР и КСМ архивные первичные данные с датчиков хранятся в базе данных Proficy Historian, а обработанная информация по анализу и выбору необходимых характеристик первичных данных хранится в базе данных Microsoft SQL Server.

Для выбора типа прогноза, наиболее подходящего при заданных входных данных, используется следующий способ оценки пригодности прогноза. Для соответствующей оценки выбираются значения $\overline{x}_s, \overline{y}_s$ и $\hat{y}_s = y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \cdot \left(\overline{x}_s - x_i\right)$. Затем вычисляется разность $\left|\hat{y}_s - \overline{y}_s\right|$, при этом наилучшим прогнозом будет тот, у которого эта разность окажется минимальной. Тип прогноза, а также формулы расчета $\overline{x}_s, \overline{y}_s$, для каждого вида прогноза приведены в таблице.

После выбора оптимального типа прогноза при заданных входных данных по соответствующим формулам осуществляется расчет прогнозных значений на требуемый период времени (час, смена, сутки). Доверительный интервал архивных данных, на основании которых строится прогноз, может быть задан в файле конфигурации программного инструмента прогноза ГДЯ.

В соответствии с идеей метода наименьших квадратов, заложенной в основе механизма программного инструмента, необходимо минимизировать сумму:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \left(\overline{y}\left(x_i\right) - y_i\right),$$

где x_i и y_i – значения архивных данных, $\overline{y}\left(x_i\right)$ – значение функции, взятое на

эмпирической зависимости в точке x_i, n – доверительный интервал (число архивных данных). После дифференцирования и элементарных преобразований для определения оптимальных значений параметров в эмпирическом уравнении прогноза получают нормальную систему уравнений. В результате решения этой системы уравнений находят искомые оптимальные коэффициенты эмпирического уравнения при заданных входных архивных значений активностей сейсмических и сейсмоакустических эмиссий, а также значения их энергий.

Чтобы узнать степень достоверности прогноза, необходимо вычислить оценку достоверности прогноза – коэффициент R^2. Для вычисления оценки и подтверждения выбора оптимального прогноза при заданных входных данных коэффициент достоверности прогноза рассчитывается по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i \left(y_i - \tilde{y}_i\right)^2}{\sum_i \left(y_i - \bar{y}\right)^2}.$$

Прогноз, у которого коэффициент R будет самым близким к 1, и будет наиболее достоверным при заданных входных значениях.

Программное решение разработано в среде разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на объектно-ориентированном языке программирования Visual Basic. NET (VB.NET). Прогнозный модуль для связи с MS SQL Server использует класс SqlConnection, входящий в состав Visual Studio, а также набор интерфейсов OLE DB для обращения приложения к информации из базы данных и технологию ADODB Connection, обеспечивающую прикладному интерфейсу доступ к базам данных. Запросы по выборке архивных данных формируются при помощи оператора «Select» языка управления данными SQL, позволяющего осуществить выбор данных из нескольких таблиц, удовлетворяющих заданному условию.

Алгоритм работы программного модуля прогноза ГДЯ формируется из следующих трех этапов: «формирование архивных данных», «анализ архивных данных» и «вычисления прогноза ГДЯ».

На этапе формирования архивных данных формируются различные выборки (по времени: час, смена и день; по положению: № датчика; по характеристикам импульсов: количество активностей, значение энергии) определенного заданного количества архивных данных для проведения последующего анализа. На этапе анализа архивных данных осуществляются расчеты заранее обусловленных параметров, характеризующих оценку состояния опасности возникновения геодинамических явлений. Текущая оценка состояния опасности формируется из анализа параметров оценки состояния архивных данных, а также учитывается текущее статусное состояние опасности. На этапе вычисления прогноза ГДЯ по выбранному на этапе анализа типу экстраполяции рассчитываются возможные возникновения геодинамических явлений, их частота и переносимая ими энергия импульсов. Прогнозный инструментарий в режиме реального времени анализирует архивные данные и с учетом поступления новых текущих данных о зарегистрированных активностях геодинамических явлений строит прогноз. Экранный вид прогнозного модуля приведен на рис. 2.

Главное окно программного модуля разделено на две части (рис. 2). В первой части окна представлены ячейки, характеризующие состояние опасности возникновения геодинамического явления за сутки по часовым и десятиминутным интервалам.

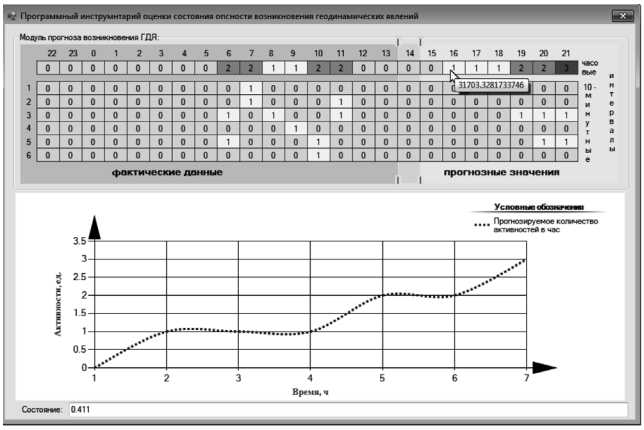

Рис. 2. Экранный вид прогнозного модуля

В зеленой зоне представлены архивные данные. В верхней строке показываются количество активностей и их суммарные энергии, зарегистрированные или спрогнозированные за часовые интервалы времени. Ниже те же часовые интервалы разделены на 6 десятиминутных интервалов, а отображение информации в ячейках происходит аналогично представлению информации в часовых интервалах. В желтой зоне показывается текущий час и его десятиминутные интервалы, с зарегистрированными активностями и значениями их энергий в соответствующий промежуток времени. В голубой зоне отображаются прогнозы активностей геодинамических явлений и их энергий на 7 часов вперед, а также соответствующие прогнозы по десятиминутным интервалов каждого часа. Ячейки принимают цветную индексацию в соответствии с моделью оценки опасности возникновения геодинамических явлений в соответствии с методикой сейсмоакустического анализа, так зеленый цвет – «неопасно», желтый – «слабоопасно», оранжевый – «среднеопасно» и красный – «сильноопасно».

Во второй (нижней) части прогнозного модуля отображается диаграмма прогнозируемых активностей геодинамических явлений по прогнозным часам (на 7 часов вперед, относительно текущего часа) для более наглядного информирования диспетчера о возможных возникновениях опасных явлениях на шахте.

В ячейках отображается число активностей, зарегистрированных или спрогнозированных за соответствующий интервал времени. При наведении курсора мыши на конкретную ячейку во всплывающей подсказке указана суммарная энергия импульсов, зарегистрированных или спрогнозированных за выбранный временной интервал.

При помощи АС ППТР И КСМ достигается более эффективное управление ресурсом горного оборудования. На основе оценки и анализе технического состояния очистного комплекса производится выбор и реализация оптимальных программ обслуживания и ремонта по критериям надежности и безопасности. Также данная система предусматривает формирование и ведение нормативно-справочной информации, базы данных оборудования шахты, мероприятий, ресурсов, выполненных работ и их результатов, показателей и индексов технического состояния.

Данное программное решение позволяет осуществлять непрерывный мониторинг характерных показателей НДС с возможность их наглядной визуализацией. Также разработанное программное средство помогает вычислять возможные неблагоприятные проявления ГДЯ и с помощью прогноза этих явлений заблаговременно информировать работников шахты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *О применении* метода ССП для прогнозирования геодинамических явлений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://referat.day.az/v17971-o-primenenii-metoda-ssp-dlya-prognozirovaniya-geodinamicheskikh-yavleniy?part=1

2. *Кочарян Г.Г.* Деформационные процессы в массивах горных пород. Учебное пособие. – М.: МФТИ, 2009.

3. *Шкуратник В.Л., Николенко П.В.* Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Научно-образовательный курс. – М.: МГГУ, 2012.

4. *Городниченко В.И., Дмитриев А.П.* Основы горного дела. Учебное пособие. – М.: издательство «Горная книга», 2008. – 484 с.

5. *Горное* давление и горные удары: Сборник научных трудов. – СПб.: ВНИМИ, 1993. – 175 с. – С. 10–16.

6. *Линдин Г.Л.* Горные удары на рудниках: монография. – Новокузнецк: НФИ ГОУ ВПО «КемГУ», 2011. – 137 с.

7. *Журкин И.Г., Шайтура С.В.* Геоинформационные системы. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. – 272 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Журавлев Евгений Игоревич – аспирант, *e*-mail: engene@mail.ru,
ИПКОН РАН.

UDC 622.268.13:622.281.5

FORECASTING THE STATE DANGER OF THE GEODYNAMIC PHENOMENA IN THE MONITORING SYSTEM OF THE ROCK MASS AT MINES

Zhuravlev E.I., Graduate Student, *e*-mail: engene@mail.ru,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences.

This article describes a software decision forecast modeling of seismic hazard assessment of the state of geodynamic phenomena on mine. This forecasting is carried out by controlling the process parameters prior to the emergence of the geodynamic phenomena and monitoring of such preparatory processes with subsequent extrapolation of the future to give early warning of dangerous situations in the mines. Viewed in the article a software tool created in a software development environment Microsoft Visual Studio object-oriented programming language VB.NET. In the basis of mathematical predictive mechanism module is the idea of optimizing the method of least squares . As well as provisions for assessing the risk of seismic-acoustic techniques the geodynamic phenomena of analysis. Forecast tool has a clear structure and clear to the dispatcher could obtain the necessary data in a timely manner about the possibility of a dangerous in mines.

Key words: decision support, geographic information system, software tools, least squares method, the danger, the geodynamic phenomena.

REFERENCES

1. *O primenenii metoda SSP dlya prognozirovaniya geodinamicheskikh yavlenii* (Application of spectral seismic profiling to prediction of geodynamic events), available at: http://referat.day.az/v17971-o-primenenii-metoda-ssp-dlya-prognozirovaniya-geodinamicheskikh-yavleniy?part=1

2. Kocharyan G.G. *Deformatsionnye protsessy v massivakh gornykh porod. Uchebnoe posobie* (Deformation processes in rock masses. Educational aid), Moscow, MFTI, 2009.

3. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V. *Metody opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod. Nauchno-obrazovatel'nyi kurs* (Methods of stress–strain state assessment in rock masses. Scientific-educational course), Moscow, MGGU, 2012.

4. Gorodnichenko V.I., Dmitriev A.P. *Osnovy gornogo dela. Uchebnoe posobie* (Basics of mining. Educational aid), Moscow, izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2008, 484 p.

5. *Gornoe davlenie i gornye udary: Sbornik nauchnykh trudov* (Mining and rock bursts. Collection of scientific papers), Saint-Petersburg, VNIMI, 1993, 175 p., pp. 10–16.

6. Lindin G.L. *Gornye udary na rudnikakh: monografiya* (Rock burst in mines: Monograph), Novokuznetsk: NFI GOU VPO «KemGU», 2011, 137 p.

7. Zhurkin I.G., Shaitura S.V. *Geoinformatsionnye sistemy* (Geoinformation systemsы), Moscow, KUDITs-PRESS, 2009, 272 p.