

Раздел 4

ГОРНОЕ ДЕЛО

УДК 622.363.2

Т.А. Бикмаева, С.С. Андрейко

Пермский государственный технический университет

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВНЕЗАПНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПОРОД ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКЕ КАРНАЛЛИТОВОГО ПЛАСТА В УСЛОВИЯХ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Выполнен статистический анализ геологических данных об условиях развязывания газодинамических явлений (ГДЯ) из почвы. Разработана математическая модель прогноза зон, опасных по ГДЯ из почвы, для условий отработки карналлитового пласта В. Построена прогнозная карта зон, опасных по газодинамическим явлениям из почвы горных выработок, для условий шахтного поля рудника СКПРУ-1 ОАО «Сильвинит».

При комбайновой выемке карналлитового пласта В на шахтном поле рудника СКРУ-1 ОАО «Сильвинит» было зафиксировано несколько случаев газодинамических явлений (ГДЯ) в виде внезапных разрушений пород почвы, сопровождающихся газовыделением, при отработке последнего выемочного слоя в очистных камерах. В силу своей внезапности, большой мощности (до нескольких десятков тонн) и выделения большого количества горючих газов газодинамические явления данного вида представляют серьезную угрозу жизни шахтеров, разрушают дорогостоящее добычное оборудование и нарушают ритмичность работы рудника СКПРУ-1. В связи с этим повышение эффективности и безопасности ведения горных работ при механизированной выемке карналлитового пласта В, опасного по газодинамическим явлениям из почвы горных выработок, является актуальной задачей для рудника СКПРУ-1 ОАО «Сильвинит».

В настоящее время методы прогноза ГДЯ из почвы горных выработок для условий отработки карналлитового пласта В отсутствуют, поэтому для предотвращения ГДЯ повсеместно применяется торпедирование пород почвы перед выемкой последнего технологического слоя пласта В.

Методы прогноза ГДЯ, в соответствии с задачами, решаемыми в процессе разведки месторождений, отдельных шахтных полей, проектировании,

строительстве и эксплуатации рудников, делятся на три вида: региональный, локальный и текущий. Региональный прогноз используется на стадии проектирования рудников, базируется на результатах бурения поверхностных геолого-разведочных скважин и опыте эксплуатации калийных рудников и служит основанием для выбора различных способов предотвращения газодинамических явлений. При локальном прогнозе на основе данных эксплуатационной геологической разведки учитываются и уточняются данные регионального прогноза [1]. Локальный прогноз предусматривает оценку вероятности развития ГДЯ на горизонтах и пластах отдельных участков шахтных полей рудников. Для прогнозирования могут быть использованы данные о горно-геологических условиях в местах возникновения ГДЯ. Цель настоящих исследований – разработка математической модели и получение на основе анализа комплекса геологических показателей решающих правил прогноза, дающих при максимально возможной вероятности оценку опасности по ГДЯ конкретного участка шахтного поля. В математической постановке получение решающего правила сводится к определению конечного набора горно-геологических параметров, их интервалов значений, присущих как опасным, так и неопасным по ГДЯ зонам, а также нахождение наиболее эффективных статистических процедур.

Известно большое число методов распознавания образов для построения решающих правил по обучающей выборке или так называемой статистической классификации, которые подразделяются на две группы: параметрические методы и непараметрические методы. Из параметрических методов статистической классификации наиболее известным является линейный дискриминантный анализ, основанный на линейных дискриминантных функциях следующего вида:

$$a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_pX_p - b = 0.$$

Если на стадии разведочного анализа установлено «засорение» обучающих выборок «выбросами» и эти аномальные наблюдения могут представлять определенный интерес при исследованиях, то целесообразно использовать процедуры оценки параметров распределения, нечувствительные к структуре данных. Такие процедуры оценивания называются робастными или устойчивыми. Могут использоваться следующие робастные процедуры в подстановочном дискриминантном анализе при получении устойчивых решающих правил: винзоризованные оценки, усеченные оценки, весовые оценки Хьюбера, кусочно-линейные М-оценки Хампеля. При наличии искажений в обучающих выборках и использовании в решающих правилах классических оценок параметров распределений, вероятность ошибочного прогноза значительно увеличивается, поэтому необходимо использовать устойчивые оцен-

ки. Если обучающая выборка из распределений с «тяжелыми хвостами» или отличных от нормального, то лучше использовать весовые оценки Хьюбера или Хампеля. Робастные итерационные оценки Хьюбера, определяются следующими соотношениями [2]:

$$\hat{x}_i^* = \sum_{j=1}^L x_j w_j / \sum_{j=1}^L w_j, \quad \hat{\Sigma}_i^* = \sum_{j,k=1}^L w_j w_k \left(x_j - \hat{x}_j^* \right) \left(x_k - \hat{x}_k^* \right)^T / \sum_{j=1}^L w_j^2,$$

$$w_j = \begin{cases} 1, & \text{если } d_j \leq d_0 \\ d_0 / d_j, & \text{если } d_j > d_0 \end{cases}, \quad d_0 = \sqrt{p + 2\sqrt{2}},$$

$$d_j = \left(x_j - \hat{x}_i^* \right)^T \hat{\Sigma}_i^{*-1} \left(x_j - \hat{x}_i^* \right), \quad (j = \overline{1, n}; i = \overline{1, L}).$$

Здесь $\hat{x}_i, \hat{\Sigma}_i$ – оценки параметров, вычисленные на предыдущем шаге; x_1, \dots, x_{n_i} – обучающая выборка для i -го класса; n_i – объем обучающей выборки для i -го класса. В качестве начального приближения используются классические оценки параметров.

В настоящей работе линейные дискриминантные функции решающих правил определялись с использованием классических процедур и робастных (по весовым оценкам Хьюбера). Критерием отбора наилучшего из полученных разными процедурами решающих правил служил максимальный процент правильной классификации.

В целом параметрическая математическая модель метода прогнозирования зон, опасных по ГДЯ, основанная на дискриминантном анализе, является мощным статистическим методом и по глубине анализа данных и ценности получаемых результатов относится к самым эффективным методам статистического анализа. Модель отличается достаточной простотой, лаконичностью, хорошей интерпретируемостью, удобна для рассмотрения геометрических иллюстраций разделения областей массива на опасные и неопасные по ГДЯ зоны. Параметрическая модель метода прогнозирования позволяет производить отбор наиболее информативных показателей, что дает возможность снизить размерность исходного пространства признаков, отбросить неинформативные и малоинформативные переменные. В случае соблюдения условий нормальности распределения многомерных данных и равенства ковариационных матриц параметрическая модель приводит к оптимальным результатам при прогнозировании. При невыполнении указанных ограничений применение в модели робастных оценок позволяет компенсировать рост вероятности ошибочного прогноза. В общем, при решении прикладных задач прогнозирования зон, опасных по ГДЯ, параметрическая математическая модель, осно-

ванная на линейном дискриминантном анализе, является наиболее предпочтительной из всех известных параметрических моделей.

Исходными данными для проведения статистического анализа с целью получения решающего правила прогноза зон, опасных по ГДЯ из почвы горных выработок, служили результаты геолого-разведочных работ, проведенных на восточной части шахтного поля рудника СКРУ-1. В настоящее время имеются полные сведения о строении и химическом составе пород пластов КрII, КрI, А, Б и В, полученные по данным подземных геолого-разведочных скважин восточной части шахтного поля. В базу исходных данных входили более 70 наблюдений по следующим геологическим показателям: абсолютная отметка кровли пласта, его мощность, содержание в породах пласта хлористого калия, хлористого натрия, хлористого магния, брома, сульфата кальция и нерастворимого остатка. По каждому показателю получены оцифрованные значения непосредственно в местах развития ГДЯ, которые вошли в обучающую выборку для проведения линейного дискриминантного анализа с использованием различных статистических процедур.

Практика ведения горных работ при комбайновой отработке карналлитового пласта В показала, что очаги ГДЯ из почвы выработок расположены в кровле пласта Б, который представлен смешанным составом, т.е. карналлит-сильвинитовой породой. Исследованиями по поиску информативных геологических показателей, имеющих наиболее тесную корреляционную связь с показателями в местах газодинамических явлений, установлено, что для получения более адекватных решающих правил прогноза зон, опасных по ГДЯ, целесообразно использовать геологические показатели пласта Б [3]. Это вполне объяснимо с позиций современной теории геологического механизма образования очагов ГДЯ в соляном породном массиве Верхнекамского месторождения калийных солей [4]. Геологические показатели пласта Б изменяются в довольно широком диапазоне, что позволяет пространственно более точно определять границы зон замещения сильвинита каменной солью или карналлита сильвинитом. Из пластов сильвинитового состава пласт Б обладает весьма высокой газоносностью, которая по месторождению изменяется от 0,2 до 2,8 м³/м³, в среднем достигая 0,78 м³/м³. Одним из факторов выбора для статистического анализа показателей пласта Б также является высокая представительность выборки данных по восточной части шахтного поля рудника СКРУ-1.

Дополнительную трудность при формировании обучающей выборки создает отсутствие данных по геологическим условиям залегания пласта Б в местах ГДЯ. Поэтому на основе известных данных по химическому составу калийных пластов путем интерполяции были восстановлены недостающие значения всех показателей в местах ГДЯ. По данным бороздового опробования и подземным скважинам эксплуатационной разведки методом Крайгинга строилась геоинформационная модель распределения каждого показателя по восточной части шахтного поля рудника СКРУ-1. Полученные модели оциф-

ровывались и включались в обучающую выборку значения геологических показателей в местах ГДЯ.

Формирование обучающих выборок проводилось следующим образом. Главным условием отнесения точки наблюдения из общей выборки к опасной или неопасной по ГДЯ зоне является максимальное соответствие геологических показателей в рассматриваемой точке показателям в местах ГДЯ. Для этого анализировалась выборка данных по геологическим показателям в местах ГДЯ и задавались интервалы их изменения для создания кластеров по каждому показателю. Всего количество принятых к рассмотрению показателей было семь. Общая выборка по каждому показателю разделялась на два класса. Если значение рассматриваемого показателя в точке наблюдения входило в заданный интервал, то ему присваивалось новое значение, равное 1, в обратном случае – 0. После чего проводилось суммирование полученных значений по всем показателям. При соответствии значений геологических показателей условиям в местах ГДЯ суммарный балл составлял 7 – точка наблюдения в этом случае относилась к группе 2, т.е. входила в опасную зону. Если же суммарный балл меньше 7, то в этом случае точка наблюдения относилась к группе 1 (неопасная по ГДЯ). Данный способ позволил формализовать процедуру формирования достоверных обучающих выборок [5].

С помощью робастной математической модели линейного дискриминантного анализа данных по результатам геологической разведки шахтного поля рудника СКРУ-1 ОАО «Сильвинит» получено решающее правило для отнесения точки наблюдения к зоне, опасной по ГДЯ из почвы горных выработок, при комбайновой отработке карналлитового пласта В, которое имеет следующий вид:

$$F_p = -3,35 \cdot X_1 + 37,05 \cdot X_2 - 3,03 \cdot X_3 + 7,28 \geq 0,$$

где X_1 – мощность пласта В, м;

X_2 – содержание брома в породах пласта В, %;

X_3 – содержание нерастворимого остатка в породах пласта В, %.

Прогноз зон, опасных по ГДЯ из почвы горных выработок при комбайновой отработке карналлитового пласта В, и построение прогнозной карты осуществляется по геологическим показателям пласта В смешанного состава. В локальных зонах замещения карналлитовых пород пласта В сильвинитом точки наблюдения априори относятся к зонам опасным по ГДЯ из почвы горных выработок, и значение решающего правила (F_p) принимается равным 2.

Процедура прогноза заключается в подстановке численных значений показателей X_1 , X_2 , X_3 в решающее правило и получении рассчитанного значения F_p . В том случае, если рассчитанное значение $F_p \geq 0$, то точка наблюдения относится к зоне, опасной по ГДЯ, в противном случае, если $F_p < 0$, точка наблюдения относится к зоне, неопасной по ГДЯ. Точками наблюдения могут служить поверхностные скважины детальной разведки, подземного разведочного бурения и бороздовые пробы.

В каждой точке опробования определяется численное значение решающего правила (F_p), которое заносится на карту с заданными координатами. Путем интерполяции между точками с полученными значениями решающего правила находится его нулевое значение, являющееся границей зон с положительным значением – опасной по ГДЯ, с отрицательным – неопасной.

На основании подстановки численных значений в полученное решающее правило составлена прогнозная карта зон, опасных по ГДЯ из почвы горных выработок, для условий комбайновой отработки карналлитового пласта В на шахтном поле рудника СКПРУ-1 ОАО «Сильвинит» (рисунок).



Рис. Прогнозная карта зон, опасных по ГДЯ из почвы горных выработок, при комбайновой отработке карналлитового пласта В для условий рудника СКПРУ-1 ОАО «Сильвинит»

Прогнозная карта зон, опасных по ГДЯ, наглядно демонстрируют адекватность решающего правила практике ведения горных работ. Это свидетельствует о работоспособности метода прогноза зон, опасных по ГДЯ из почвы горных выработок. Все зафиксированные на руднике СКПРУ-1 ГДЯ из почвы горных выработок при комбайновой отработке карналлитового пласта В попадают в прогнозируемые зоны, опасные по ГДЯ.

Список литературы

1. Газодинамические явления в калийных рудниках: генезис, прогноз и управление / С.С. Андрейко [и др.]. – Минск: Выш.шк., 2000. – 335 с.

2. Харин Ю.С. Робастность в статистическом распознавании образов. – Минск: Университетское, 1992. – 232 с.

3. Иванов О.В. Прогнозирование опасных по газодинамическим явлениям зон на сильвинитовых пластах Верхнекамского месторождения калийных солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сессии Горн. ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2004 г. Пермь, 18–22 апреля 2005 г. – Пермь, 2005. – С. 267–270.

4. Андрейко С.С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве: моногр. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 196 с. (Инновационный университет XXI века)

5. Иванов О.В. Процедура формирования обучающих выборок геологических показателей для получения решающих правил прогнозирования газодинамических явлений // Горное эхо. Вестник Горного института. – Пермь, 2005. – № 4(22). – С. 26–28.

Получено 4.05.2010