

УДК 622.363.2

С.С. Андрейко, О.В. Иванов

**МЕТОД ПРОГНОЗА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИЛЬВИНИТОВЫХ
ПЛАСТОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

На основе комплекса горно-геологических параметров получены решающие правила прогноза, дающие при максимально возможной вероятности оценку опасности по газодинамическим явлениям конкретного участка шахтного поля.

Ключевые слова: шахтные поля, газодинамические явления, сильвинитовые пласты, карты прогноза опасных зон.

Семинар № 4

**S.S. Andreyko, O.V. Ivanov
THE METHOD OF GASDYNAMIC
OCCURRENCES DURING MINING THE
SYLVINITE LAYERS OF THE
VERHNEKAMENSKOE DEPOSIT OF
POTASSIUM SALT DEPOSIT**

The defining laws of the forecast are developed on the basis of the geological and mining parameters. The laws help to receive safe evaluation of the gasdynamic manifestations in the certain area of the mine field when.

Key words: mine fields, gasdynamic occurrences, sylvinite layers, dangerous area forecast maps

В соответствии с задачами, решаемыми в процессе разведки месторождений, отдельных шахтных полей, проектировании, строительстве и эксплуатации рудников, методы прогноза ГДЯ делятся на три вида: региональный, локальный и текущий. Региональный прогноз базируется на результатах бурения поверхностных геологоразведочных скважин и опыте эксплуатации калийных рудников, используется на стадии проектирования рудников и служит основанием для выбора различных способов предотвращения газодинамических явлений (ГДЯ). Локальный

прогноз предусматривает оценку вероятности развития ГДЯ на горизонтах и пластах отдельных участков шахтных полей рудников. При локальном прогнозе на основе данных эксплуатационной геологической разведки учитываются и уточняются данные регионального прогноза [1]. Для прогнозирования могут быть использованы данные о горно-геологических условиях в местах возникновения ГДЯ. Целью настоящей работы являлось получение на основе комплекса горно-геологических параметров 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 не-

параметрические методы. Из параметрических методов статистической классификации наиболее известным является линейный дискриминантный анализ, основанный на линейных дискриминантных функциях следующего вида:

$$a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p - b = 0. \quad (1)$$

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. В подстановочном дискриминантном анализе при получении устойчивых решающих правил используются 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 оценки. Если обучающая выборка из распределений с «тяжелыми хвостами» или отличных от нормального, то лучше использовать весовые оценки Хьюбера или Хампеля [2]. Робастные итерационные оценки Хьюбера, определяются следующими соотношениями [3]:

$$\hat{x}_i^* = \sum_{j=1}^L x_j w_j / \sum_{j=1}^L w_j, \quad (2)$$

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

$$w_j = \begin{cases} 1, & \text{если } d_j \leq d_0 \\ d_0 / d_j, & \text{если } d_j > d_0 \end{cases},$$

$$d_0 = \sqrt{p} + 2\sqrt{2},$$

$$d_j = \left(x_j - \hat{x}_i^* \right) \hat{\Sigma}_i^{*-1} \left(x_j - \hat{x}_i^* \right),$$

$$(j = \overline{1, n}; \quad i = \overline{1, L}).$$

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.

Линейные дискриминантные функции решающих правил определялись с использованием как классических процедур, так и робастных: по весовым оценкам Хьюбера и усеченным оценкам. Критерием отбора из полученных разными процедурами решающего правила 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, основанная на линейном дискриминантном анализе, является наиболее предпочтительной, среди других известных параметрических моделей.

В базу исходных данных для статистической обработки включены результаты бороздового опробования и подземных геологоразведочных работ по пластам АБ и КрII, а также данные о строении и химическом составе пород продуктивных пластов по результатам детальной разведки шахтных полей южной части Верхнекамского месторождения калийных солей, разрабатываемой ОАО «Уралкалий», и центральной части, разрабатываемой ОАО «Сильвинит». База данных подготовлена в формате электронных таблиц Microsoft Excel и включает в себя, в зависимости от пласта, до 1690 точек наблюдений. По каждому пласту представлены следующие показатели: номер скважины, абсолютная отметка залегания кровли пласта, мощность пласта, процентное содержание в пласте KCl, NaCl, MgCl₂, CaSO₄, Br, нерастворимого остатка. Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета прикладных программ «РОСТАН» (Робастный статистический анализ) версии 1.1.

Исходя из современной теории физико-геологического механизма образования очагов ГДЯ статистические исследования по получению решающих правил для отнесения участков шахтного поля к зонам, опасным или неопасным по ГДЯ, разделены по пластам, при отработке которых зафиксированы ГДЯ. Такое разделение обусловлено различием горно-геологических условий образования очагов ГДЯ и их местоположением, что к тому же облегчает статистический анализ за счет уменьшения количества вводимых для нахождения решающих правил переменных.

Отсутствие данных по горно-геологическим условиям в местах ГДЯ за

всю многолетнюю практику разработки Верхнекамского месторождения создает дополнительную трудность при формировании обучающей выборки. Поэтому потребовалось на основе известных данных по химическому составу сильвинитовых пластов путем интерполяции восстановить недостающие значения всех параметров в местах ГДЯ. По данным бороздового опробования и подземным скважинам эксплуатационной разведки методом Крайгинга строилась геоинформационная модель распределения каждого параметра по шахтным полям рудников. Затем, используя полученные модели, оцифровывались и включались в обучающую выборку значения геологических параметров 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 параметров в рассматриваемой точке параметрам в местах ГДЯ. Для этого анализировалась выборка данных по геологическим параметрам в местах ГДЯ и задавались интервалы их изменения для создания кластеров по каждому параметру. Всего количество принятых к рассмотрению параметров 7. Общая выборка по каждому параметру разделялась на два класса. Если значение рассматриваемого параметра 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 параметрам. При соответствии значений геологических параметров условиям в местах ГДЯ суммарный бал составлял 7 – точка наблюдения в этом случае относилась к группе 2, т.е. входила в опасную зону. Если же суммарный бал меньше 7, то в этом случае точка наблюдения относилась к группе 1 (неопасная по ГДЯ). Данный способ позволил формализовать процедуру фор-

мирования достоверных обучающих выборок [4].

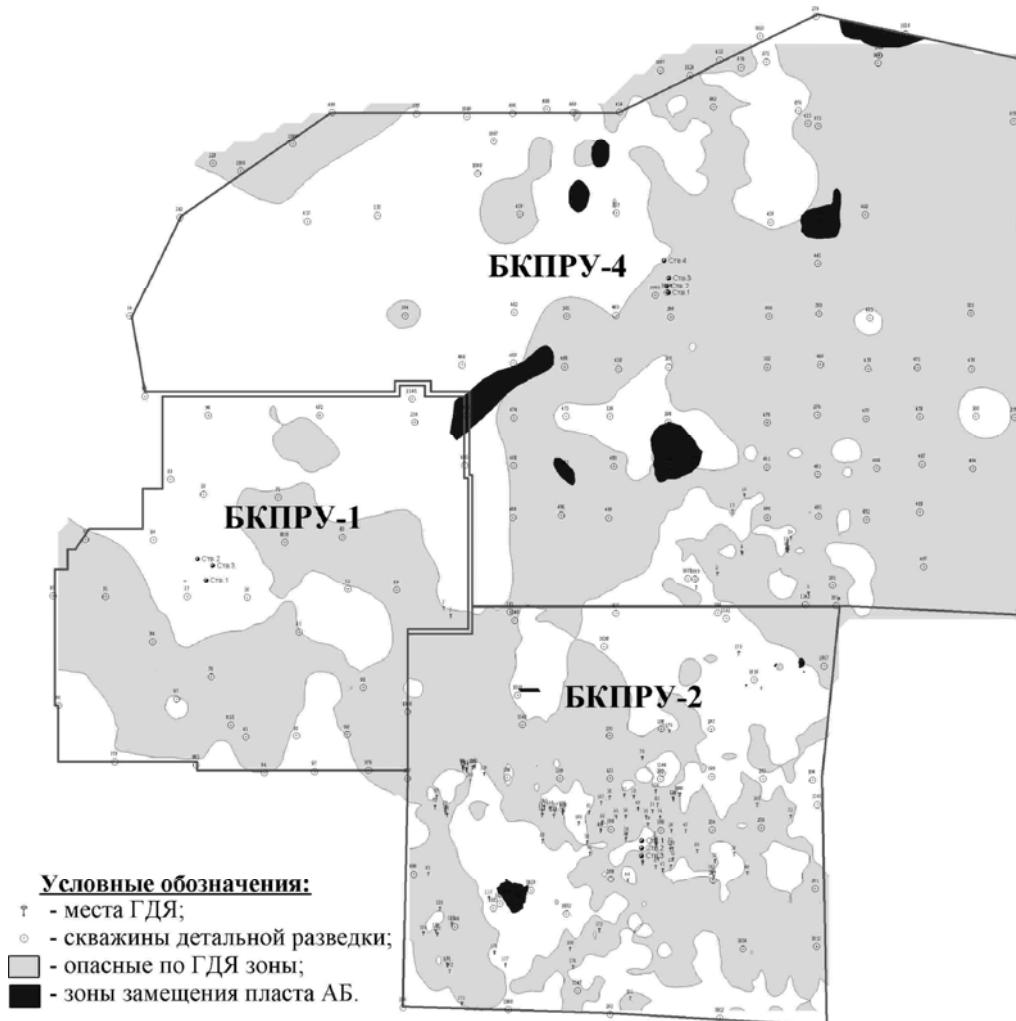


Рис.1. Региональная карта зон, опасных по ГДЯ при отработке пласта АБ, для южной части Верхнекамского месторождения калийных солей

После проведения процедур пошагового дискриминантного анализа обучающих выборок в решающие правила включены следующие геологические параметры: мощность пласта – X_1 ; содержание хлористого калия (KCl) в породах пласта – X_2 ; содержание хлористого магния ($MgCl_2$) – X_3 ; содержание хлористого натрия (NaCl) – X_4 ; содержание брома (Br) – X_5 ; содержание сульфата

кальция ($CaSO_4$) – X_6 ; содержание нерастворимого остатка (Н.О.) – X_7 .

Для пласта КрII в условиях шахтных полей рудников ОАО «Уралкалий» решающее правило метода прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям, имеет следующий вид [5]:

$$F_p = -14,11 \times X_1 + 21,75 \times X_2 + 23,44 \times X_3 + 21,73 \times X_4 - 289,2 \times X_5 + 4,1 \times X_6 + 17,73 \times X_7 - 2034,33 \geq 0, \quad (3)$$

Литологический состав пласта Б по шахтным полям ОАО «Уралкалий» дос-

точно неоднороден – от каменной соли до карналлита.

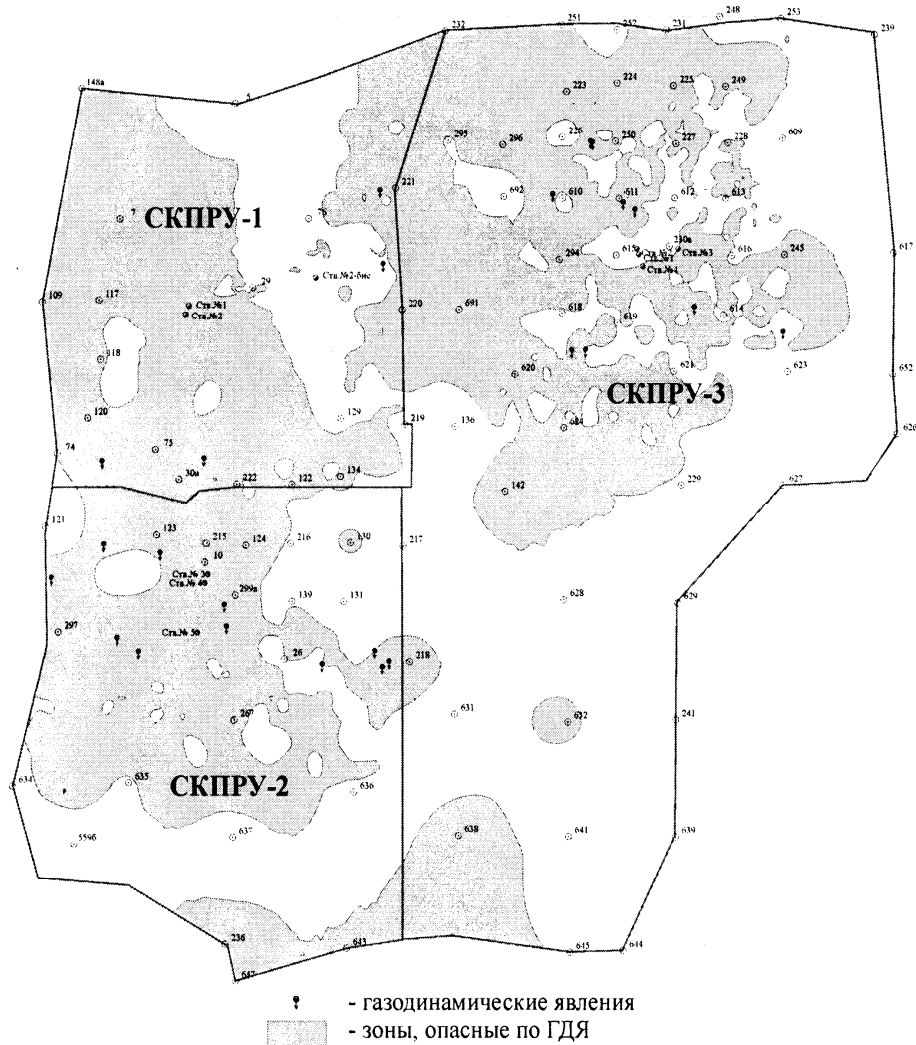


Рис.2. Региональная карта зон, опасных по ГДЯ при отработке пласта АБ, для центральной части Верхнекамского месторождения калийных солей

Поэтому получено два решающих правила для прогнозирования в зависимости от состав пород пласта Б. Критерий отнесения пород пласта Б к сильвинитовому составу – содержание KCl не менее 22% и содержание MgCl₂ не более 1%, к смешанным солям – со-

держание KCl не менее 22% и содержание MgCl₂ свыше 1%. В случае локального замещения сильвинита пласта Б каменной солью или карналлитом точка наблюдения относится к опасной по ГДЯ зоне.

Решающее правило для прогнозирования зон, опасных по ГДЯ, при сильвинитовом составе пород пласта Б в условиях шахтных полей калийных рудников ОАО "Уралкалий" имеет следующий вид:

$$F_p = -19,98 \times X_1 - 1,16 \times X_2 + 31,18 \times X_3 - 3,64 \times X_4 - 747,02 \times X_5 + 6,87 \times X_6 - 4,57 \times X_7 + 310,72 \geq 0. \quad (4)$$

При смешанном составе пород пласта Б в условиях шахтных полей калийных рудников ОАО "Уралкалий" решающее правило для прогноза зон, опасных по ГДЯ, представлено функцией следующего вида:

$$F_p = -1,39 \times X_1 + 0,06 \times X_2 - 0,66 \times X_3 - 0,05 \times X_4 - 40,24 \times X_5 - 1,46 \times X_6 - 1,3 \times X_7 + 23,73 \geq 0. \quad (5)$$

Для сильвинитовых пластов в условиях шахтных полей рудников ОАО «Сильвинит» решающее правило метода прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям, имеет следующий вид:

$$F_p = -0,86 \times X_1 + 0,28 \times X_2 - 0,23 \times X_3 + 0,05 \times X_4 + 0,61 \times X_5 - 6,46 \times X_6 - 0,35 \times X_7 + 0,83 \geq 0. \quad (6)$$

Прогнозирование зон, опасных по ГДЯ, осуществляется следующим образом. В том случае, если после подста-

новки численных значений в решающие правила (3-6) значение $F_p \geq 0$, точка наблюдения относится к опасной по ГДЯ зоне, при $F_p < 0$ – к неопасной. В зависимости от типа точки наблюдения прогноз может быть региональным, если используются результаты детальной разведки, или локальным – при использовании данных эксплуатационной разведки.

Для построения прогнозных карт в каждой координатно привязанной точке наблюдения с имеющимися значениями геологических параметров, входящих в решающее правило для прогноза зон, опасных по ГДЯ, рассчитывается значение линейной дискриминантной функции F_p . Затем по полученным значениям F_p методом геостатистической интерполяции строится прогнозная карта с разделением опасных и неопасных по ГДЯ зон по изолинии, в которой значение функции $F_p = 0$.

Примеры построения региональных карт прогноза опасных по ГДЯ зон для сильвинитового пласта АБ в условиях калийных рудников ОАО «Уралкалий» и ОАО «Сильвинит» представлены на рис. 1 и 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрейко С.С., П.А.Калугин, В.Я.Шерба.* Газодинамические явления в калийных рудниках: Генезис, прогноз и управление – Мн: Выш.шк., 2000. –335 с.
2. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984. –304 С.
3. *Харин Ю.С.* Робастность в статистическом распознавании образов. –Мн.: "Университетское", 1992. –232 с.
4. *Иванов О.В.* Процедура формирования обучающих выборок геологических показателей для получения решающих правил прогнозирования газодинамических яв-

лений. // Горное эхо. Вестник Горного института. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005, № 4(22). С.26-28.

5. *Иванов О.В.* Прогнозирование опасных по газодинамическим явлениям зон на сильвинитовых пластах Верхнекамского месторождения калийных солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы научн. сессии Горного ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2004 г. 18-22 апреля 2005 г. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005. С.267-270. **ИАС**

Коротко об авторах

Андрейко С.С. – доктор технических наук, заведующий лабораторией геотехнологических процессов и рудничной газодинамики,
Иванов О.В. – кандидат технических наук, научный сотрудник,
 Горный институт УрО РАН, arc@mi-perm.ru

