

Некоторые вопросы математического и компьютерного моделирования геолого-геофизической информации

Some questions of mathematical and computer modeling of geological-geophysical information

Халманов Х.Ж.¹, Бабалиев А.М.², Кучма Н.Г.²,
Милехин Д.И.³, Момын М.К.³, Митюхин Д.Г.³, Халманова Д.Х.³

¹Казахский государственный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности;

²Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;

³Институт прикладной математики (E-mail: Orumbayevan@mail.ru)

Пайдалы қазбалардың орнын математикалық және компьютерлік модельдеу, оның табиғи және техногендік күйінің механикасын анықтау, нақты қатпарлы тау жыныстарының кескінін айқындау, сараптамалық әдістің алгоритмін қолдану арқылы, кейбір геологиялық құбылыстардың кризистік күйінің ықтималдығын болжау мәселелері қарастырылады.

We consider questions concerning mathematical and computer modeling of the deposits of natural resources, evaluation of the mechanical state of «underground rock» under natural conditions and under technical intervention; we describe algorithms and computer realization of the expert-system type methods of recognition of critical situations for drawing conclusions about the probability of some particular geological phenomenon.

Увеличение глубины разработки полезного ископаемого, повышение требований по экологии при выемке минерального сырья приводят к необходимости решения ряда задач по оптимальному раскрою шахтных полей и сокращению вскрышных работ, по управлению горным давлением и его проявлениями. В свою очередь успех решения названных задач предопределен умением объективно обработать имеющуюся геологическую информацию, прогнозировать напряженно-деформированное состояние массива в естественном состоянии и его изменение при различных техногенных вмешательствах с учетом как можно большего числа факторов, влияющих на производство. Решение указанных выше задач связано с анализом и обработкой информации о природных свойствах горных массивов и средствах их изучения на всех стадиях технологического освоения месторождений полезных ископаемых, называемой *информатикой недр*, и следующими тремя взаимодополняющими направлениями:

1. Разработка математических методов, связанных с необходимостью обработки больших объемов фактографических данных по геологическим разведочным скважинам, геофизическим и геодинамическим исследованиям, маркшейдерским, геодезическим и геомеханическим измерениям; регистрация и интерпретация этих данных в прогнозирующих моделях месторождений; идентификация и оценка достоверности прогноза горно-технической обстановки и физико-геомеханических ситуаций в конкретных горно-геологических условиях разработки полезных ископаемых, алгоритмов и программ их обработки и визуализации залегания геологических объектов (рудные тела, пласты, жилы), содержащих минеральное сырье.

2. Разработка экспериментальных и расчетных методов прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород в естественном (нетронутым) состоянии и при техногенном вмешательстве. При этом важнейшее значение имеет создание инженерно-аналитических методов структурного описания горной среды, дифференциации геологических объектов с учетом факторов стратиграфии, тектоники, геоморфологии и метаморфизма горных пород, а также с учетом влияния техногенных факторов разработки месторождений. Здесь проблемы информатики недр смыкаются с математической геологией.

3. Разработка экспертных методов распознавания критических ситуаций и их прогноза при большом объеме разнородных и несистематизированных данных. При этом важную роль играют методы фильтрации регулярной и случайной составляющих, морфодинамического анализа, распознавания образов и машинной графики, для которых нужна определенная теория критериальных оценок полноты, достоверности и оптимальности стратегии планирования комплексного изучения месторо-

ждения. В этой части информатика недр опирается на методы геометрии недр, геодинамики, геоморфологии и палеогеографии.

Как известно, геометризация месторождений позволяет обобщать большой объем разнородной геологоразведочной информации и представлять на планах, картах, разрезах и других графических документах структурные и качественные особенности конкретного месторождения или участков и рудных тел в наглядной и удобной для практики форме. Никакой другой вид моделирования месторождений полезных ископаемых не обеспечивает таких возможностей для решения основных задач геологической разведки и разработки недр, как геометризация.

При разработке алгоритмов геометризации (визуализации) полезных ископаемых на ПЭВМ проблема интерполяции результатов экспериментальных наблюдений в произвольных точках к точкам регулярной сети имеет чрезвычайно важное значение. Очевидно, что регулярная сеть исходных данных более удобна, так как позволяет упростить и определенным образом стандартизировать последующие вычислительные процессы. Практика показывает, что задача интерполяции далеко не тривиальна и требует самого серьезного внимания, так как точность интерполяции фактически определяет точность решения основных задач

По теоретическим вопросам интерполяции и приближения дискретно заданных функций написано много трудов. В то же время опыт показывает, что успех решения задачи определяется не только идейными предпосылками, заложенными в алгоритм интерполяции, но и их практическим воплощением на ЭВМ. Желательно, чтобы метод был достаточно универсальным: годился к использованию как при очень малом, так и при существенном уровне помех; учитывал структуру сети исходных данных; был экономичным в расходовании машинного времени; давал высокую точность на сравнительно широком классе функций.

В настоящее время в оперативной практике применяются разные, существенно отличные друг от друга интерполяционные методы.

Один из этих методов базируется на полиномиальной аппроксимации (*метод наименьших квадратов* — МНК), т.е. на описании участка поля вблизи каждой регулярной сетки многочленом (алгебраическим или иным) заданного вида. Другой метод — *оптимальная интерполяция* — основывается на следующих предпосылках. Принимается, что неизвестное значение функции $f(x)$ в узле x может быть выражено через известные значения в M ближайших точках $f(x_i)$, $i = 1, \dots, M$, линейной комбинацией вида

$$\bar{f}(x) = \sum_{i=1}^M f(x_i) p_i. \quad (1)$$

Задача состоит в определении оптимальной системы весов p_i . Условие оптимальности имеет вид

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{j=1}^N (\bar{f}(x_j) - \sum_{i=1}^M p_i f(x_i)) \right)^2 = \min, \quad (2)$$

где σ_h — дисперсия ошибок интерполирования, N — общее число точек.

Считая, что средние значения показателя уже центрированы на величину общего среднего, вместо условия (2) можно рассматривать следующее условие:

$$\sigma_h^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^M p_i K_{0i} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M p_i p_j K_{ij} = \min,$$

K_{0i} и K_{ij} — корреляционные моменты, определенные для расстояния соответственно между узлом x и ближайшей точкой x_i и между ближайшими точками x_i и x_j ; σ^2 — эмпирическое значение дисперсии.

В последние годы теория интерполяции обогатилась новыми методами, получившими название *сплайновых интерполяций*. Следует отметить, что сплайном обычно оказывается определенная в области D функция, которая в окрестности любой внутренней точки области представляет собой полином некоторой степени m . Кроме того, эта функция, как правило, непрерывна в области вместе с производными до $m-1$ порядка и имеет интегрируемую с квадратом производную порядка m .

Как известно, объем вычислений в полиномиальной и сплайновой интерполяциях резко возрастает с ростом размерности пространства.

Для применения оптимальной интерполяции заранее должны быть известны статистические структуры функции, которыми мы не всегда располагаем. Поэтому после тщательных численных экспериментов выбран способ построения интерполирующих функций в многомерном евклидовом пространстве, применимый для широкого класса и удобных в практической реализации, предложенный в работах [1, 2].

Рассматриваемые нами интерполяционные методы могут быть описаны следующим образом.

Пусть задана функция $f(x), x \in T$, где T — замкнутая область, значение которой в точках x_1, x_2, \dots, x_N n -мерного евклидова пространства E_n известны. Требуется по этим известным значениям $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_{N-1}), f(x_N)$ найти значения функции и в других точках, т.е. задача заключается в том, чтобы построить функцию $\varphi_N(x)$, вообще говоря, отличную от функции $f(x)$, но принимающую в точках x_1, x_2, \dots, x_N те же самые значения, что и наша функция. Функцию $\varphi_N(x)$ будем называть интерполирующей функцией. В такой постановке эта задача имеет, конечно, не единственное решение.

Прежде чем построить интерполирующую функцию $\varphi_N(x)$, введем следующее: обозначим в n -мерном евклидовом пространстве E_n расстояния между точками x и x_j через r_{0j} , а между точками x_i и x_j — r_{ij} . Через $\rho(r)$ обозначим монотонную функцию такую, что

$$\rho(r) \geq 0, \lim_{r \rightarrow \infty} \rho(r) = \infty, \lim_{r \rightarrow 0} \rho(r) = 0.$$

Алгоритмы методов интерполирования функций следующие:

А. Искомую интерполирующую функцию представим в виде $\varphi_N(x) = \sum_{k=1}^N DP_k f(x_k)$, где D выбирается из условия $\sum_{i=1}^N DP_i = 1$, P_1, P_2, \dots, P_N находим как решение следующей системы:

$$\sum_{j=1}^N \rho(r_{ij}) P_j = \rho(r_{0i}), \quad i = \overline{1, N}.$$

Б. Искомую интерполирующую функцию представим в виде $\Psi_N(x) = \sum_{k=1}^N P_k f(x_k)$, где P_1, P_2, \dots, P_N находятся из решения следующей системы:

$$\sum_{j=1}^N \rho(r_{ij}) P_j + z = \rho(r_{0i}), \quad i = \overline{1, N}, \quad \sum_{i=1}^N P_i = 1.$$

Для получения информации о массиве пород разработана технология создания информационной модели геологического объекта, имеющего многослойное строение (осадочные породы). Исходной информацией являются данные разведочных скважин. Информационные модели позволяют систематизировать и обработать разрозненные данные об объекте и рассматривать его целиком. Восстановление всего массива по сети разведочных скважин производится при помощи упомянутого выше интерполяционного метода. На основе информационной модели строится база данных геологического объекта, позволяющая получать данные для работы в любой его точке.

Имея подробную информацию об объекте можно выбрать различные способы её представления. Одним из них является построение графических изображений, визуально представляющих геологический объект. Перенесение кропотливой и трудоемкой работы по отысканию и представлению информации в нужном виде на компьютер позволяет автоматизировать работу геолога.

Технология визуализации была апробирована на шахтах Карагандинского угольного бассейна. Объектом являлся угольный пласт и вмещающие породы на расстоянии 50–60 м выше и ниже пласта. Разработанная программа визуализации позволяет:

- работать как со всем шахтным полем, так и с его участком;
- наносить на поле условные обозначения при помощи линий и точек с метками;
- строить карты изолиний (изогипс, мощность пласта и слоев вмещающих пород, карты полей, градиентов характеристик пласта);

- строить вертикальный разрез по произвольно ориентированной линии, увеличить его участки, растянуть или сжать по вертикали;
- выделить аномальную по углам падения пласта область.

Например, на рисунках 1–8 представлены соответственно: изогипсы почвы угольного пласта; границы зон возможных тектонических нарушений; вертикальный разрез толщи пород по линии выработки (отрезок Н-К); мощность пласта Дб с локализованным участком с уменьшенной мощностью; мощность ближайшего песчаника в кровле пласта с выделенными, близко расположенными линзами; расстояние до первого песчаника в кровле; мощность первого песчаника в почве пласта с выделенными линзами и выделенные факторы.

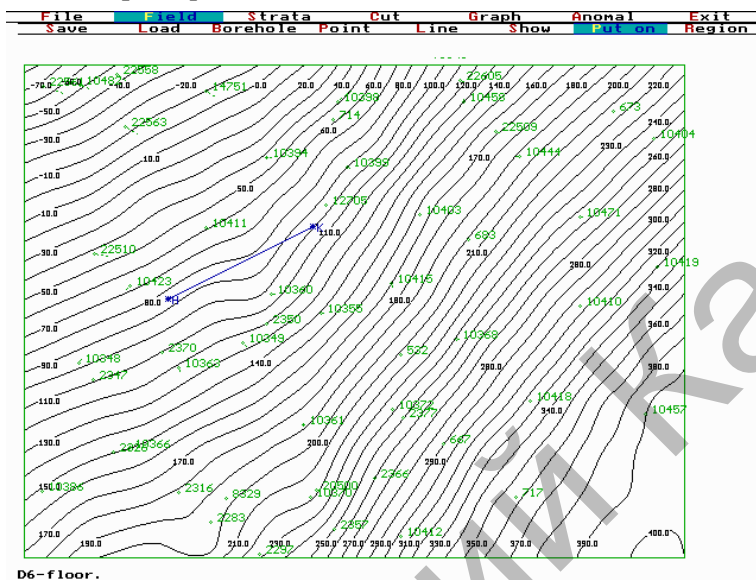


Рис. 1. Изогипсы почвы пласта угля с шагом изолиний 10 м. Точки с номерами — геологоразведочные скважины. Линия, обозначенная на концах Н и К, — начало и конец предполагаемой выработки

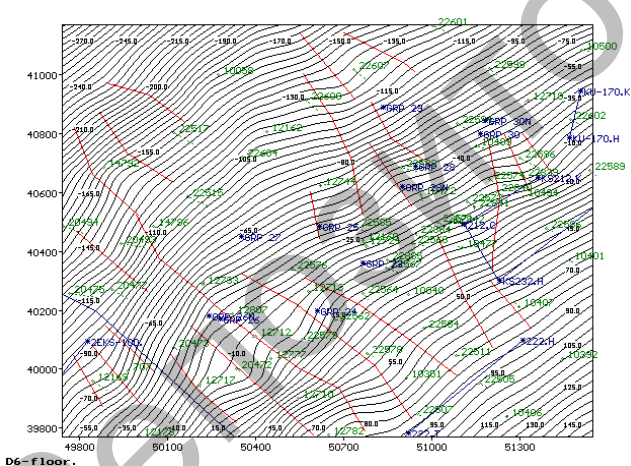
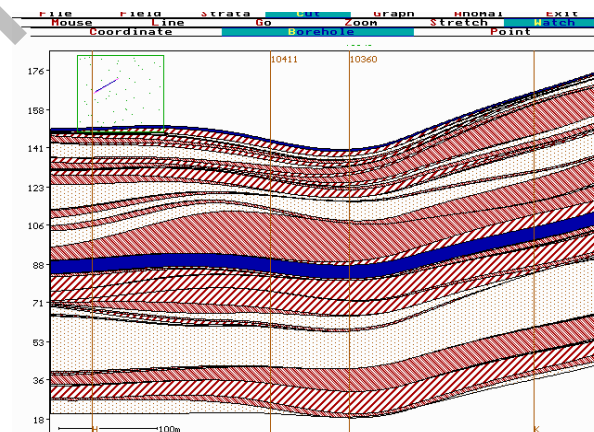


Рис. 2. Границы зон возможных тектонических нарушений



- Условные обозначения
- Уголь
 - Аргиллиты
 - Песчаники
 - Алевриты

Рис. 3. Вертикальный разрез толщи пород. Вертикальные линии с обозначениями Н и К — начало и конец выработки, вертикальные линии с отметками 10411 и 10360 — проекции разведочных скважин. Вертикальная шкала слева — z-координаты в балтийской системе высот. Отрезок в левом нижнем углу показывает горизонтальный масштаб

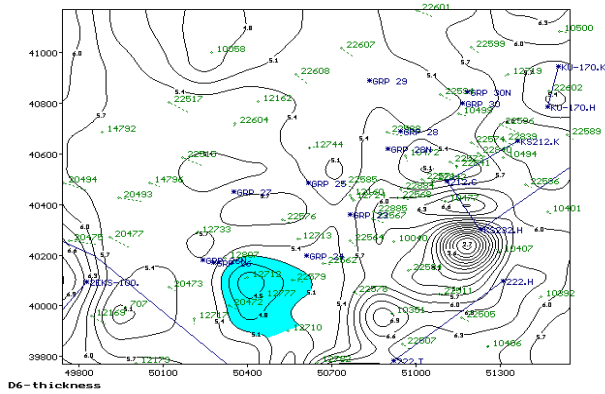


Рис. 4. Мощность пласта Д6 с локализованным участком с уменьшенной мощностью

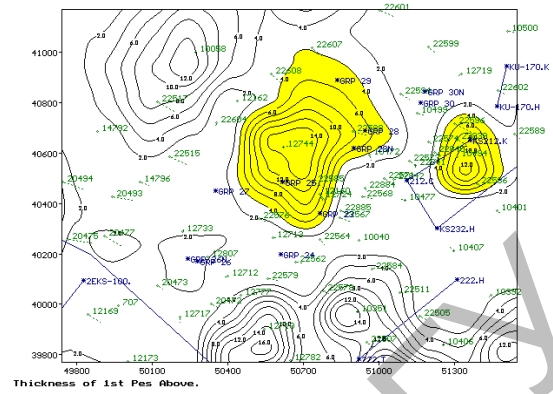


Рис. 5. Мощность ближайшего песчаника в кровле пласта с выделенными, близко расположенными линзами

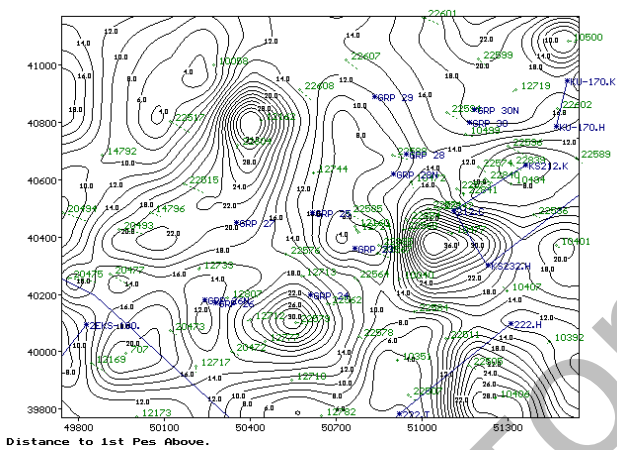


Рис. 6. Расстояние до первого песчаника в кровле

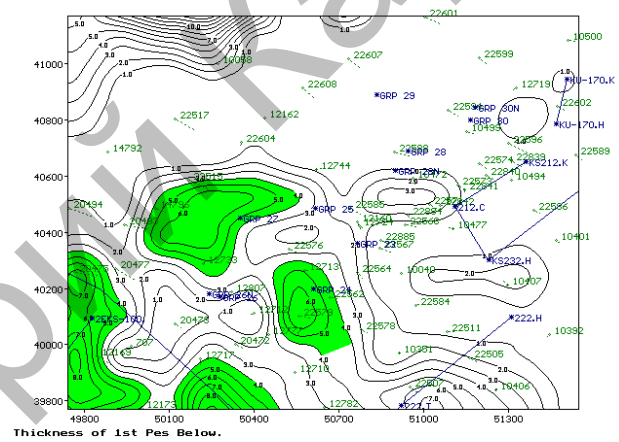


Рис. 7. Мощность первого песчаника в почве пласта с выделенными линзами

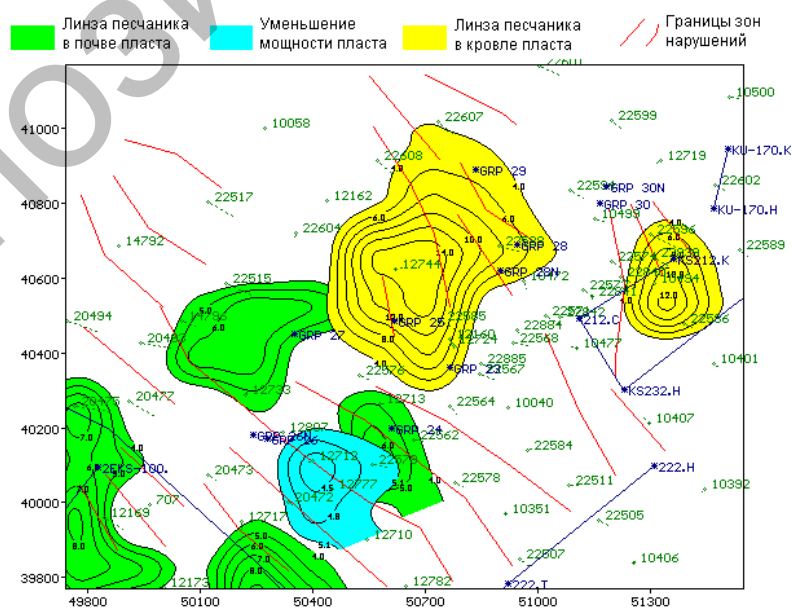


Рис. 8. Выделенные факторы

Известно, что с увеличением глубины разработки месторождений увеличивается разнообразие форм проявления горного давления, существенно усложняются способы управления горным давлением, условия поддержания горных выработок и разрушения пород, возникают новые трудности в обеспечении безопасности и интенсификации горных работ. При этом с каждым шагом увеличения глубины разработки повышается интенсивность и проявляется разнообразие форм горного давления при ведении горных работ и поддержании выработок. Наряду с обрушением пород и движениями массива наблюдаются «стреляния» и «шелушения», горные удары, внезапные выбросы угля и газа, интенсивное раздавливание целиков и другие формы проявления горного давления.

Следует отметить, что одни и те же формы проявления горного давления в различных районах происходят на разных глубинах. Это предопределено исходным напряженно-деформированным состоянием массива горных пород для данного месторождения или его участка, физико-механическими свойствами пород и горно-геологическим строением массива. Очевидно, что создание эффективных вариантов систем разработки, определение оптимальных параметров конструктивных элементов и порядка выемки полезных ископаемых, обеспечивающих безопасность ведения горных работ невозможно без достаточно полной информации об исходном состоянии массива и его изменении в процессе отработки месторождения. Нам представляется, что настало время разработать общую методику получения такой информации, определить и стандартизировать соответствующие методы, которые исключили бы субъективные представления о состоянии массива и позволили бы проводить научно обоснованный сравнительный анализ не только отдельных участков шахтных полей, но и различных месторождений. Таким образом, одной из основных проблем горного давления является проблема комплексной оценки исходного состояния массива горных пород. (К этому комплексу оценки относятся и визуализация горного массива.) Для оценки НДС в окрестности горной выработки, в том числе и впереди фронта очистных работ, должен использоваться комплексный метод измерения напряжений, который включает в себя необходимое оборудование для определения физико-механических свойств массива в зоне измерения напряжений.

Основную опасность при подземных разработках представляет собой не горное давление, как таковое, а его проявления: горные удары, газодинамические явления (ГДЯ) и т.д. Динамические явления, как правило, происходят в местах высокой концентрации напряжений или в областях массива, ослабленных неоднородностями или какими-либо нарушениями. Поэтому массив находится в состоянии весьма хрупкого равновесия, даже небольшое изменение которого может привести к катастрофическим последствиям. С другой стороны, активное управление равновесным состоянием неоднородного массива горных пород может дать положительные результаты при производстве горных работ (ослабление и частичное или полное разрушение пород в районе работ), воздействию на массив активными средами. Для такого управления необходимо уметь количественно оценить изменения НДС в процессе производства работ.

Одним из эффективных методов количественной оценки НДС массива является метод граничных элементов (МГЭ) [3]. Поэтому разработана программа, реализующая метод граничных элементов для расчета НДС неоднородного массива с последующей визуализацией результатов.

Кратко постановку задачи можно сформулировать следующим образом:

Предположим, что рассматриваемая область состоит из двух конечных подобластей, как показано на рисунке 9. Каждая из подобластей, обозначенных на рисунке через R_1 и R_2 , считается однородной, изотропной и линейно-упругой с упругими постоянными ν_1, E_1 и ν_2, E_2 . Граничные контуры C_1 и C_2 обходятся по часовой стрелке. Тогда локальные системы координат s, n связаны с контурами так, как показано на рисунке. Общая часть двух граничных контуров определяет поверхность контакта подобластей. На контакте локальные координаты s_1, n_1 и s_2, n_2 имеют противоположные направления, т.е. $s_1 = -s_2$ и $n_1 = -n_2$.

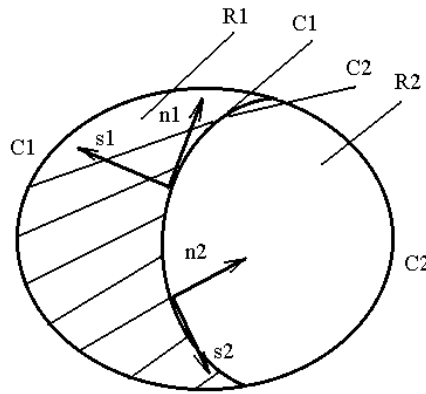


Рис. 9. Неоднородное тело, состоящее из двух однородных линейно-упругих подобластей

Краевая задача для неоднородного тела (рис. 9) формулируется заданием условий для смещений и напряжений на «свободной» части контуров C_1 и C_2 , а также условий непрерывности смещений и усилий на контакте подобластей. Условия непрерывности в точке Q границы можно записать в виде

$$\sigma_s^{[1]}(Q) = \sigma_s^{[2]}, \sigma_n^{[1]}(Q) = \sigma_n^{[2]} \quad (3)$$

для напряжений и

$$U_s^{[1]}(Q) = -U_s^{[2]}, U_n^{[1]}(Q) = -U_n^{[2]} \quad (4)$$

для смещений. Знак минус в (4) есть следствие противоположности направлений локальных координат s_1, n_1 и s_2, n_2 на поверхности контакта.

Гранично-элементное решение этой задачи можно найти, разделяя контуры C_1, C_2 на прямолинейные отрезки, примыкающие друг к другу и предполагая, что смещения и напряжения в пределах каждого отрезка постоянны. С учетом частей контуров, которые представляют контакт, имеем N_1 элементов на контуре C_1 и N_2 элементов на контуре C_2 . Элементы, расположенные на контактирующих участках, должны полностью совпадать друг с другом. Тогда с каждым элементом на контакте связаны четыре неизвестные величины: две компоненты смещения U_1 и U_2 и две компоненты напряжения σ_1, σ_2 . Условия непрерывности (3) и (4) дают для каждого элемента области контакта еще четыре соотношения. Полученная таким образом система оказывается разрешимой.

Программа реализации метода состоит из пяти этапов.

Первый этап — ввод исходных данных: осуществляются ввод и обработка координат граничных элементов каждого однородного участка, определяются физические константы однородных участков и граничные условия для однородных участков. Данные считываются из подготовленных пользователем следующих текстовых файлов:

1) файл координат граничных элементов — в нем записаны координаты каждого граничного элемента в следующей последовательности: $X_b, Y_b; X_e, Y_e$, где X_b, Y_b — координаты начала элемента, X_e, Y_e — координаты конца элемента. Направление обхода — по часовой стрелке. После считывания координат с помощью простых вычислений находим координаты центра каждого элемента, длину каждого элемента и угол наклона каждого элемента к оси OX . Полученные результаты записываются в типизированный файл, где хранятся до момента использования;

2) файл физических констант — в нем записаны физические константы каждой области в виде E, ν , где E — модуль Юнга соответствующего участка, ν — коэффициент Пуассона того же участка. После считывания данные хранятся в памяти компьютера до конца выполнения программы;

3) файл граничных условий — в нем записаны граничные условия для каждого элемента в виде σ_s^i, σ_n^i , где σ_s^i — касательная составляющая напряжения на i -м участке, σ_n^i — нормальная составляющая напряжения на i -м участке. Данные записываются в типизированный файл и хранятся до момента использования.

Второй этап — вычисление коэффициентов влияния. На этом этапе программы формируется система линейных алгебраических уравнений МГЭ:

$$\sum_{j=1}^N B_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N B_{sn}^{ij} P_n^j = U_s^i,$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N B_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N B_{nn}^{ij} P_n^j &= U_n^i, \\ \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} P_n^j &= \sigma_s^i, \\ \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} P_n^j &= \sigma_n^i, \end{aligned} \quad (5)$$

где $B_{ss}^{ij} \dots A_{ss}^{ij} \dots$ — коэффициенты влияния МГЭ; $U_s^i \dots \sigma_s^i \dots$ — свободные члены системы линейных алгебраических уравнений МГЭ.

Третий этап — вычисление фиктивных нагрузок: решается система линейных алгебраических уравнений МГЭ. Значения неизвестных есть значения фиктивных нагрузок МГЭ. Для решения системы был применен итерационный метод:

$$\varphi^{k+1} = \varphi^k - \tau A^T (A\varphi^k - f), \quad (6)$$

где $\tau = \frac{1}{\|A^T A\|}$, A — матрица коэффициентов, A^T — транспонированная матрица коэффициентов, f — вектор свободных членов.

Четвертый этап — вычисление главных напряжений: вычисляются компоненты тензора напряжения в точках внутри области и по ним находятся значения главных напряжений и углов наклона главных площадок в полевых точках. Для вычислений используются фундаментальные формулы теории упругости [9, 10].

Пятый этап — визуализация главных напряжений: главные напряжения визуализируются на экране компьютера в виде осей эллипса напряжений.

Используя описанную выше программу, был проведен ряд численных экспериментов. В частности, были рассмотрены следующие случаи:

1. Нетронутый массив:
 - а) горизонтальный пласт и вмещающие;
 - б) наклонный пласт и вмещающие;
 - в) горизонтальный пласт со вздутием и вмещающие;
 - г) изгиб горизонтального пласта и вмещающие;
 - д) утонение горизонтального пласта и вмещающие.
2. Нетронутый массив с геологическими нарушениями:
 - а) сброс, амплитуда больше мощности пласта;
 - б) сброс, амплитуда меньше мощности пласта;
 - в) взброс, амплитуда больше мощности пласта;
 - г) взброс, амплитуда меньше мощности пласта.

3. Массив с техногенным вмешательством. Рассматривались два варианта: выработка, проведенная на всю мощность пласта, и выработка, проведенная по верхней части пласта. Эксперимент был проведен для всех случаев, рассмотренных в пунктах 1–3.

Результат численного эксперимента — поле главных напряжений в окрестности геологической и/или техногенной неоднородности. Представление результатов в виде эллипсов главных напряжений вызвано следующими соображениями. Как было сказано выше, мы вычисляем НДС массива для прогнозирования его возможного дальнейшего поведения, т.е. выявления потенциально более или менее слабых областей.

Нами был проведен численный эксперимент по моделированию геомеханической ситуации приведшей к внезапному выбросу угля и газа на шахте им. Ленина 24 ноября 1995 г. Цель эксперимента — показать, как менялось состояние массива горных пород в районе выброса под влиянием техногенных операций. Данными для численного эксперимента являлась горно-геологическая и горнотехническая обстановка в районе выброса.

Горнотехническая обстановка в районе выброса характеризовалась следующими условиями. Мощность угольного пласта Д6 в месте выброса составляла 6,5 м, глубина — 545 м от земной поверхности, угол наклона пласта к горизонтали — $5-14^{\circ}$. Выше пласта Д6 (180 м по нормали) залегает пласт Д9. В 1980 г. по пласту Д9 велись очистные работы, в ходе которых была отработана часть пласта Д9 и оставлен целик. Ниже пласта Д6 в районе выброса расположены две выработки, пройденные

в 1988–1990 гг. В 1995 г. при проведении выработки сечением $12,8 \text{ м}^2$ по верхнему слою пласта Дб произошел внезапный выброс угля и газа.

Моделировалась следующая последовательность ситуаций: влияние на распределение напряжений в нетронутом горном массиве: очистных работ на вышележащем пласте Д9; выработок, пройденных ниже пласта Дб; выработки, пройденной по верхней части пласта Дб. На слайдах 10.1–13.1 приведены соответствующие расчетные схемы. Для расчетных схем приняты следующие обозначения:

– σ_v, σ_r — вертикальная и горизонтальная составляющие напряжений на границе рассматриваемой области. Вертикальная составляющая σ_v равна произведению глубины на удельный вес пород, горизонтальная составляющая σ_r равна произведению вертикальной составляющей на коэффициент бокового отпора (коэффициент бокового отпора — эмпирическая величина, которая определяется для каждого месторождения);

I — породы кровли пласта;

II — угольный пласт;

III — породы почвы пласта;

B_1, B_2 — выработки, пройденные под пластом;

B_3 — выработка, пройденная по верхней части пласта.

На рисунках 10–13 показан угольный пласт (средний слой) с углом наклона 8° и соответственно залегающие вмещающие породы кровли и почвы.

На рисунке 10 показано поле распределения главных напряжений в нетронутом массиве горных пород. Как видно из рисунка, массив находится в состоянии почти однородного НДС. Небольшие отклонения (до 5 %) видны при анализе численных данных по НДС.

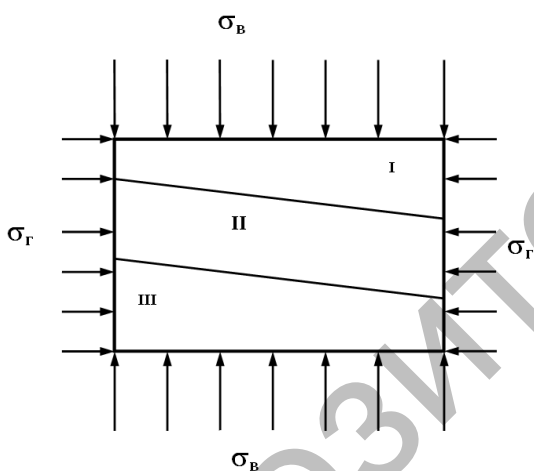


Рис.10.1. Расчетная схема для нетронутого массива

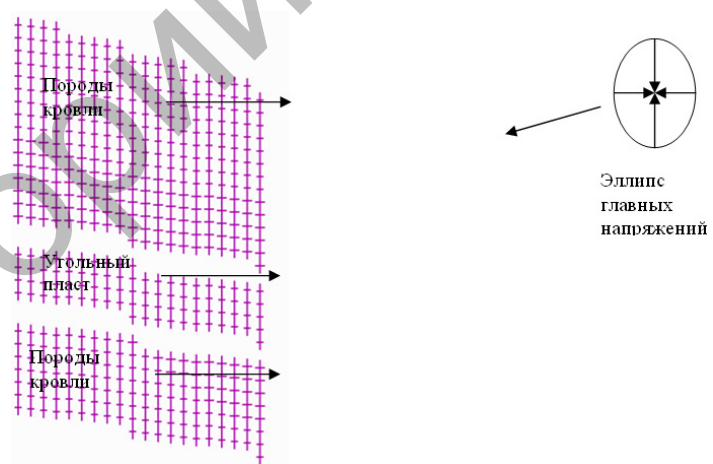


Рис. 10. Распределение главных напряжений в нетронутом массиве

Затем произошло первое техногенное вмешательство в НДС массива — очистные работы на выше-лежащем пласте Дб, в результате которых в рассматриваемой области образовалось пустое пространство, т.е. σ_v под пустотой определяется теперь только расстоянием между пластами (180 м), а не как раньше — расстоянием до земной поверхности (545 м). В то же время σ_v под оставленным целиком осталось прежним. Учитывая локальность техногенного вмешательства, σ_r осталось прежним для всей области. Расчетная схема дана на рисунке 10.1. Как видно из расчетной схемы, изменилось только распределение напряжений на границе рассматриваемой области.

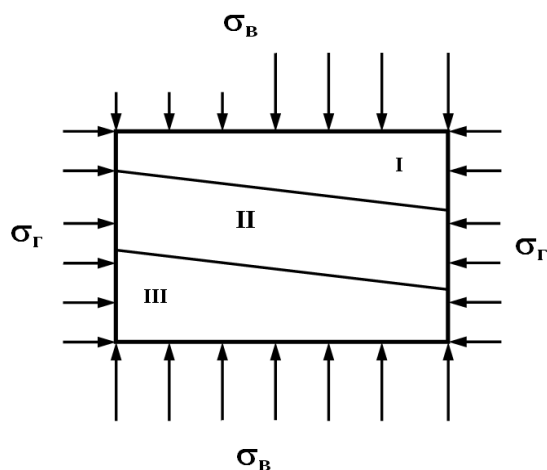


Рис. 11.1. Расчетная схема для учета влияния первого техногенного вмешательства

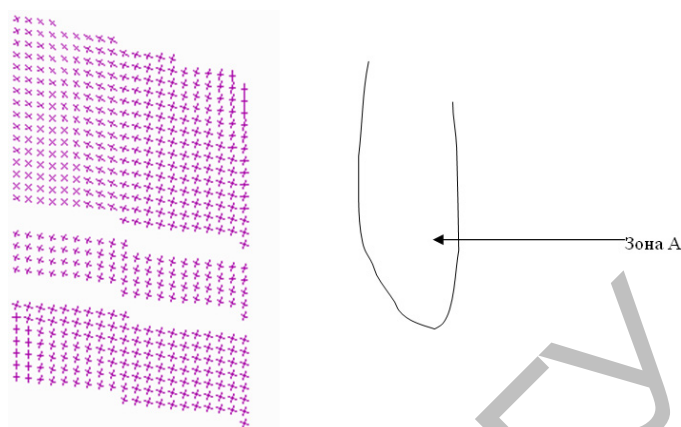


Рис. 11. Распределение главных напряжений для случая первого техногенного вмешательства.

На рисунке 10 можно видеть, как повлияло на НДС массива изменение граничных условий, вызванное техногенным вмешательством. Как видно из рисунка (и при анализе численных значений), абсолютные значения главных напряжений мало изменились. Причем произошло «выравнивание» главных напряжений, т.е. напряжения, которые были больше, уменьшились, а напряжения, которые были меньше, увеличились. Изменения составили в среднем 25–30%. Зато направления действия векторов главных напряжений значительно изменились. Эти изменения привели к дополнительному растрескиванию угольного пласта, что, в свою очередь, обуславливает десорбцию газа метана. Особенно интенсивному изменению подверглась зона А (см. рис. 11). Напряжения в этой зоне изменились по абсолютным значениям более чем на 40%, а направления действия векторов — приблизительно на 20–25°.

Следующее техногенное вмешательство произошло через 10 лет: проведение двух параллельных выработок под пластом. Расстояние от выработок до угольного пласта по нормали составляет около 22 м.

На рисунке 12.1 приведена расчетная схема. На рисунке 12 приведено распределение главных напряжений для этого случая. Как видно из рисунка (зона В), пройденные выработки сильно повлияли на ориентацию векторов главных напряжений.

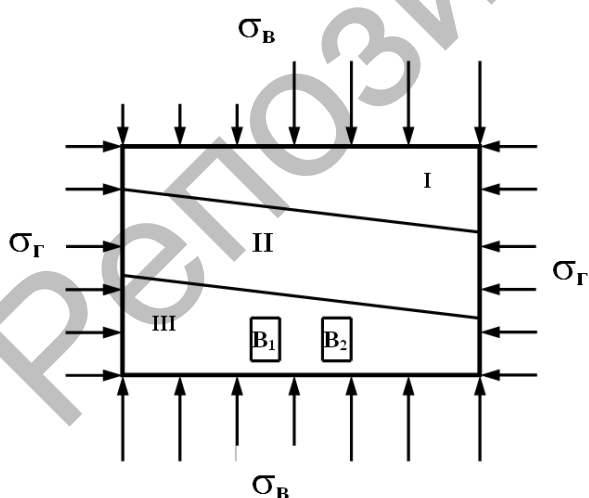


Рис. 12.1. Расчетная схема для второго техногенного вмешательства

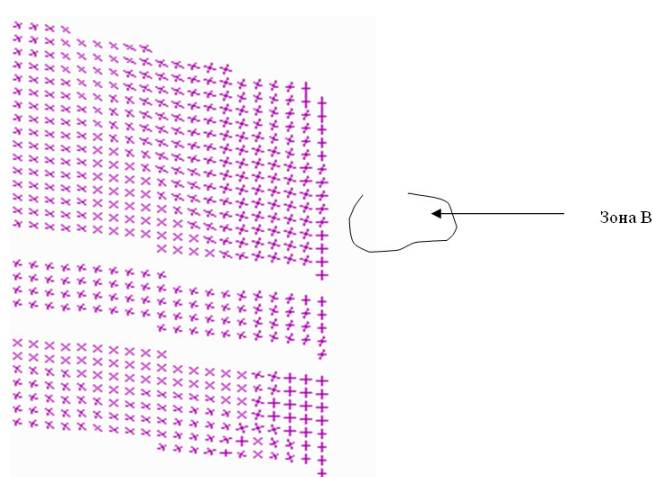


Рис. 12. Распределение напряжений для случая второго техногенного вмешательства

Их влияние особенно ощутимо в почве пласта. Абсолютные значения напряжений изменились в зоне В на 10–15 %. Изменение ориентации и значений векторов главных напряжений должно привести к очередному дополнительному растрескиванию пласта, что обязательно повлечет за собой дополнительную десорбцию газа метана.

Таким образом, пласт в области будущего выброса был дважды подвергнут изменению напряженного состояния в локальной зоне (зона В на рис. 12). Так как между воздействиями были большие промежутки времени, то свободного газа в зоне В, скорее всего, не осталось — он должен был дренировать по трещинам в массив, но пласт в зоне В остался интенсивно растресканным — эндогенные плюс экзогенные трещины. В результате образовался техногенный коллектор свободного газа.

Наконец, еще через пять лет, во время проведения выработки по верхней части пласта Дб, при подходе к зоне В, произошел внезапный выброс угля и газа. Расчетная схема изображена на рисунке 13.1, результаты расчета — на рисунке 13.

Как видно из рисунка, в зоне В характер распределения главных напряжений и их абсолютные значения снова сильно изменились. Особенно большим изменениям подверглась почва пласта. На этот раз у образовавшегося свободного метана не было времени для постепенного дренирования в массив. Вместо этого образовался мощный газовый коллектор. Его объем в непосредственной близости от забоя составил приблизительно 340 м^3 . Если учесть, что в 1 м^3 угля содержится 1000 м^3 газа в связанном состоянии, то при разрушении угля, которое происходит под действием перераспределения напряжений, в пласте может выделиться около 340000 м^3 газа. Понятно, что эта цифра берется из теоретических предположений, к тому же не учитывается объем газа, который выделился ранее — после первых двух техногенных вмешательств. В любом случае, в результате проведенных техногенных вмешательств образовался мощный коллектор свободного газа, который не смогли обнаружить, используя применяемые на шахтах методы. Дальнейшее проведение работ привело к внезапному выбросу угля и газа. Во время выброса в выработку было выброшено 150 т угля и $10\,000 \text{ м}^3$ газа.

Результаты численного эксперимента подтверждаются реальными событиями. Таким образом, используя этот подход, мы получаем возможность отслеживать изменение НДС неоднородного массива, без привлечения каких-либо гипотез о его строении, а используя прямые геологические данные и сведения о ведении работ.

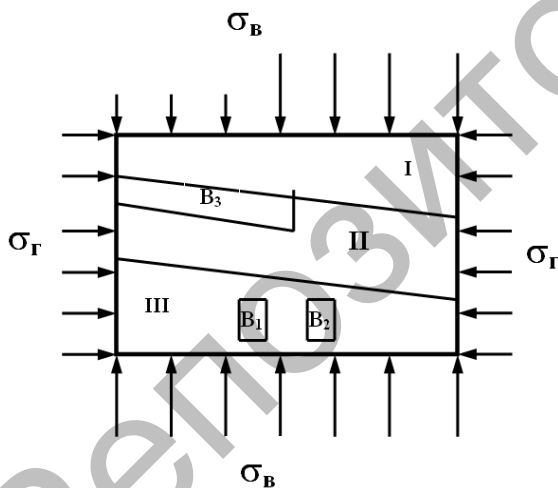


Рис. 13.1. Расчетная схема для последнего техногенного вмешательства

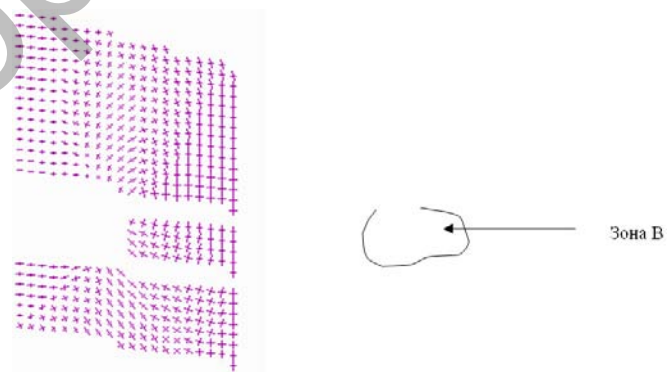


Рис. 13. Распределение главных напряжений для случая последнего техногенного вмешательства

На основе исследований [4–11] и анализа строения вмещающих пород угольного пласта в местах проявления газодинамических явлений разработаны архитектура и главные программные модули экспертной системы (ЭС), предназначенной для визуального сканирования геологического массива и обнаружения в нем критических зон по сочетанию признаков. ЭС обладает возможностью приобретать и уточнять знания об объекте при получении новых данных. Исходными данными ЭС являются данные геологоразведки (разрезы, пробы), маркшейдерские данные, описания физико-механических свойств массива, описания уже известных зон в массиве, аналоги которых предстоит обнаружить ЭС,

представленные в виде реляционных таблиц. В системе предусмотрена возможность построения и работы с различными сетками геологических данных.

На основе программных модулей ЭС создан АРМ «Геолог», предназначенный для мониторинга геологической обстановки и прогноза техногенных ситуаций. АРМ «Геолог» включает в себя: модули для построения регулярной сетки на основе геологических и геомеханических данных, модули графического интерфейса, модуль «VERSTA» выдвижения и проверки правдоподобных гипотез на реляционных данных, модуль «STATIST» нахождения функциональных зависимостей на реляционных данных.

Настройка АРМ на объект предполагает создание базы данных объекта (данные по геологоразведке) в виде реляционных таблиц, выявление критериев зоны с помощью модулей «VERSTA» и «STATIST», создание 3-мерной геологической сетки модулями преобразования для графического интерфейса.

С помощью опций графического интерфейса АРМ можно просканировать выбранный участок горного массива на предмет выполнения имеющихся критериев, описывающих свойства критической зоны и проклассифицировать дискретные зоны участка согласно выполняющимся критериям.

Равномерная (регулярная) сетка является исходной базой для графического интерфейса и рассчитывается по базе геологических данных с помощью интерполяционных методов.

Каждый критерий представляет собой набор условий на значения исходных и расчетных факторов, представимых на SQL-подобном языке. Критерии можно задавать заранее, а также используя модуль «VERSTA» выдвижения и проверки правдоподобных гипотез на реляционных данных [3]. «VERSTA» обладает своим языком запросов, позволяющим давать директивы на поиск и проверку гипотез заданных требований. При работе АРМ позволяет в заданной зоне сравнивать ее набор данных с критериями на основе методов анализа сходства и различия данных. Набор считается критическим, если максимальная мера его сходства и минимальная мера его отличия от критериев удовлетворяют определенным условиям.

Для нахождения функциональной зависимости между факторами может быть использован модуль «STATIST», с помощью которого можно найти наилучшую регрессионную зависимость в классе полиномов для рассматриваемых факторов. Работа модуля основана на методе наименьших квадратов.

Опции графического интерфейса АРМ позволяют:

- наносить на выбранном участке (на плане) выработки линии и точки;
- получать для произвольного отрезка на плане вертикальный срез пород;
- вращать такой срез вокруг выбранной вертикальной оси;
- передвигать этот срез вдоль выбранной горизонтальной оси;
- строить цветные изокарты для исходных и расчетных факторов;
- классифицировать зоны согласно имеющимся критериям;
- локализовывать выявляемые геологические нарушения.

Обеспечена многозадачность в том смысле, что каждая опция меню доступна своей комбинацией клавиш и, значит, можно мгновенно переходить к плану горного массива, к вертикальным разрезам пород, к изокартам. Шаги сетки по вертикали и горизонтали задаются при ее расчете. Размер дискретной зоны (прямоугольника), угол поворота и шаг перемещения вертикального среза можно изменять в ходе работы. Рабочая версия АРМ разработана на Borland Pascal и предполагает среду DOS. Проект ЭС и АРМ для WINDOWS разрабатывается на DELPHI.

Разработанная методика была использована для прогноза ГДЯ на шахтах Карагандинского угольного бассейна. На основе анализа с помощью «VERSTA» данных по проявлению ГДЯ были получены некоторые критерии ГДЯ и построен классификатор зон массива. Для каждой такой зоны была получена оценка НДС.

Анализ данных обучающей выборки выявил зависимость опасности по ГДЯ по убыванию от глубины залегания пласта, расположения ближайших к пласту Д6 песчаников сверху и снизу, мощности аргиллита, лежащего на пласте Д6 (зависимость обратная). Оценкой влияния ближайших к пласту Д6 песчаников сверху и снизу на возможность проявления ГДЯ может служить величина модуля градиента мощности песчаника, сама мощность и расстояние до песчаника. Чем больше две первых величины и чем меньше последняя, тем больше опасность. Модуль градиента мощности пес-

чанника становится значимо больше нуля при приближении к краю линзы песчаника и под линзой песчаника.

Следует отметить, что в результате анализа данных по проявлению ГДЯ влияние песчаника в почве оказалось не менее значимо, чем влияние песчаника в кровле. Полученные гипотезы были использованы для прогноза возможного проявления ГДЯ с помощью АРМ.

Наиболее удобным является наличие критериальной функции от имеющихся параметров, значения которой служат оценкой выполнения критерия.

Для прогноза степени газоносности (газопотенциала) зоны угольного пласта с помощью модуля «STATIST» была найдена регрессионная зависимость газопотенциала в виде полинома от рассматриваемых геологических и расчетных факторов, представленных в таблице. Обучающей выборкой для модуля были проявления ГДЯ в виде поддутия почвы, для которых достаточно точно можно было оценить весь объем выделившегося при ГДЯ газа метана.

Т а б л и ц а

Список исследуемых переменных

Переменные	
1.	Ms — масса выброса угля (т)
2.	Hglub — глубина от дневной поверх. (м)
3.	H — абсолютная отметка (м)
4.	h — нормальная мощность пласта (м)
5.	grad H
6.	grad h
7.	Dk — расстояние от пласта до песчаника в кровле (м)
8.	grad Dk
9.	Dn — расстояние от пласта до песчаника в почве (м)
10.	grad Dn
11.	Pk — полная мощность песчаника в кровле (м)
12.	Pn — полная мощность песчаника в почве (м)
13.	Metan — объём метана (тыс. м куб.)

Зависимость 13-й переменной от 1–12: $Metan = 3.79 - 0.04 Hglub + 0.0001 Hglub^2 - 1.02 h + 0.13 h^2 + 14.4|grad Dk| - 11.3|grad Dk|^2 - 24.5|grad Dn| + 55.61|grad Dn|^2 + 0.41Pk - 0.009Pk^2$.

Средняя относительная ошибка составила 32.58 %.

На рисунке 14 представлен участок шахты им. Ленина УД АО «Испат-Кармет» с прогнозом зон, опасных по ГДЯ. Цифры 1–5 определяют зону согласно классификатору. На рисунке 15 отмечены 18 контрольных точек.

Значения газопотенциала даны в тыс. куб. м., прямые линии — трассы выработок, координаты указаны маркшейдерские.

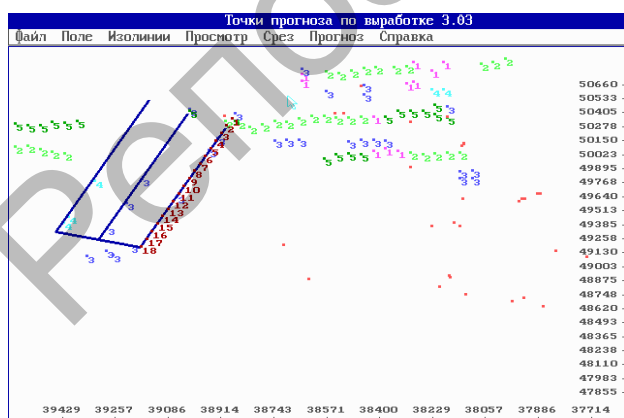


Рис. 14. Прогноз зон ГДЯ. Цифры 1–5 классифицируют зону на возможность проявления ГДЯ согласно сочетанию признаков, 1–18 — контрольные точки

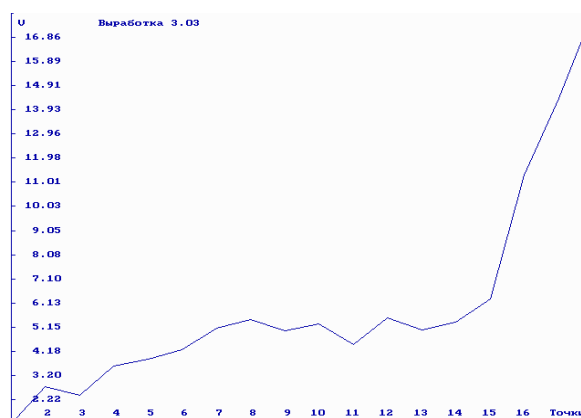


Рис. 15. Прогноз газопотенциала для выработки 3.03

На рисунке 15 представлены расчетные значения газопотенциала для выработки 3.03 в контрольных точках 1–18.

С помощью АРМ «Геолог» был дан региональный прогноз зон угольного пласта, опасных по ГДЯ на базе геологических данных на нескольких участках шахты «Казахстанская» УД АО «ИСПАТ-КАРМЕТ». В частности, с помощью АРМ был дан прогноз участка шахты «Казахстанская» У1 с координатами (39900,40900):(51000,52000) с запланированными выработками: АВ — людской ходок 2.12-Д6-1-з и ВС — конвейерный штрек 2.12-Д6-1-з (рис. 16).

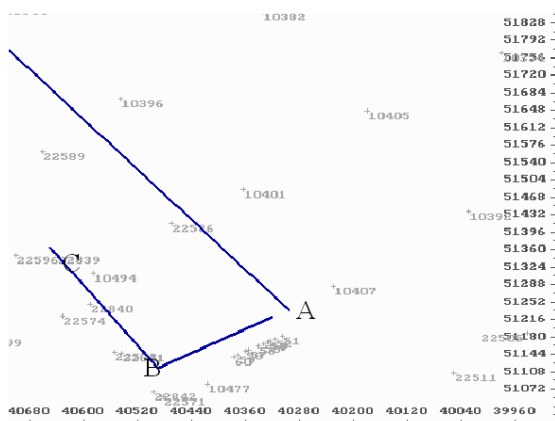


Рис. 16. План участка У1 шахты «Казахстанская»: АВ — людской ходок 2.12-Д6-1-з, ВС — конвейерный штрек 2.12-Д6-1-з. Координаты точек: А (40297,51233), В (40492,51113), С (40650,51362)

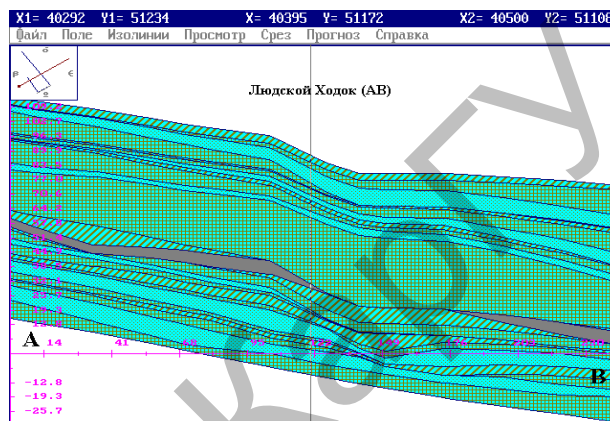


Рис. 17. Вертикальный срез по людскому ходку 2.12-Д6-1-з. Вертикальная линия-бегунок в центре экрана локализует точку с координатами (40395,51172), через которую проходит возможное нарушение

Сканирование участка в районе планируемых выработок заключалось в последовательном перемещении вертикального среза, полученного первоначально по отрезку АВ с шагом 5 м, и вращении среза с углом 30°. Просканировав подобным образом весь участок, были отмечены в качестве контрольных точки, представляющие интерес. С помощью контрольных точек с номером 6 было примерно локализовано возможное нарушение.

Возможное нарушение характеризуется на вертикальном срезе согласованным изменением в сторону понижения отметок пород, включая пласт Д6. Для проверки правильности обнаружения массив был просканирован во всех направлениях от места обнаружения. Обнаруженные точки нарушения зафиксированы на рисунке 18 с помощью цифры 6. В результате получена линия нарушения (см. рис. 17), на краях которой нарушение должно затухать. С помощью вертикальной шкалы на вертикальном срезе можно оценить амплитуду нарушения. На рисунке 17 амплитуда «скачка» отметок примерно 5–7 м. Нарушение пересекает людской ходок примерно в 210–250 м от начала выработки и затухает при приближении к конвейерному штреку.

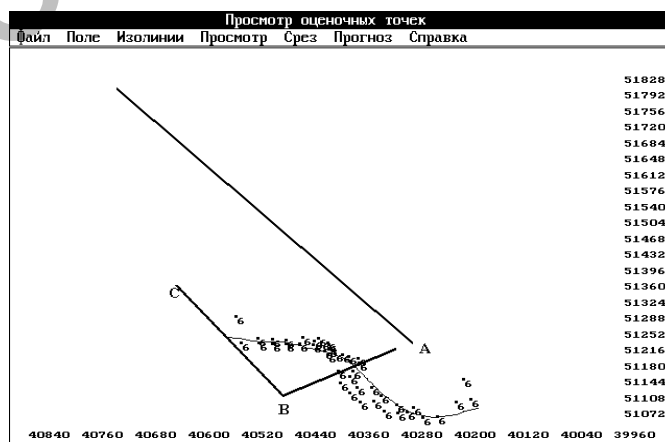


Рис. 18. Линия возможного нарушения на участке У1. Цифра 6 выставлена с помощью «бегунка» при сканировании участка для локализации нарушения

И наконец, разработан программный продукт, который позволяет визуализацию рудного тела с учетом процентного содержания полезного ископаемого с возможностью поворота вокруг вертикальной оси. На рисунке 19 дан трехмерный фрагмент рудного тела с представлением содержания в нем меди, полученный по данным Центрказгеологии.

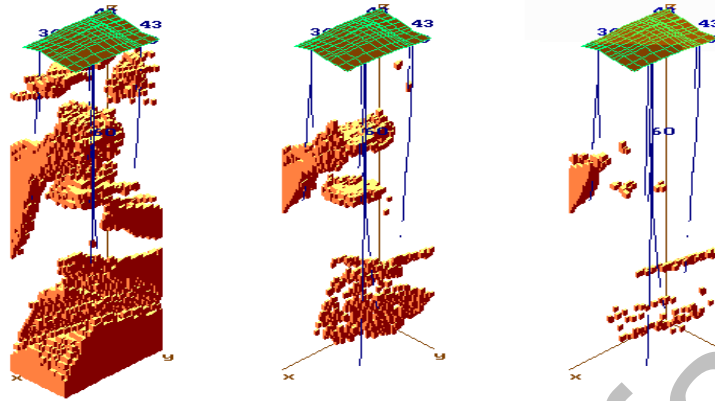


Рис. 19. Фрагмент рудного тела с представлением содержания в нем меди

Таким образом, созданный на основе программных модулей ЭС АРМ предназначен в первую очередь для геологической и прогнозной служб угольных шахт с целью мониторинга геологической обстановки и прогноза техногенных ситуаций. Его универсальность заключается в том, что визуализацию в виде цветных изокарт и анализ можно проводить для любых данных о массиве. Единственным препятствием для этого может служить сбор таких данных.

References

1. Babaliev A.M. Some characteristic and ways of the choice weights of one interpolating multivariable function // Bulletin KazGNU. — 1998. — № 12. — Almaty — P. 3–13.
2. Babaliev A.M. About one method of interpolation of multivariable functions with normalized weights // The Material of III republican scientific conference on theories of approaching and embedding functional spaces, devoted to memory of T.I.Amanova. P. 1. — Karaganda, 1998. — P. 41–50.
3. Krauch S., Starfild A. Methods border elements in mechanical engineers of the hard body. — M.: World, 1987. — 325 p.
4. Momynov M.K. Syntheses of the hypothesizes on base relational data // Bulletin NTI. — № 107. — Karaganda, 1996.
5. Baymuhametov S.K., Halmanov H.Zh. et al. Geomechanical model of the generation of the zones, which potentially dangerous by gas-dynamic phenomenon // Efficient and safe underground coal mining on the base modern achievement geomechanics. — S-Peterburg, 1996. — P. 44–50.
6. Baymuhametov S.K., Halmanov H.Zh. et al. The methods of the prior forecast of the zones, which dangerous by gas-dynamic phenomenon of the stratum and containing thick masses // Mountain geophysics: The Material to international conference. — S-Peterburg, 1998. — P. 27–33.
7. Halmanov H.Zh., Babaliev A.M. et al. The methods of modeling natural and anthropogenic situation at development stratum deposits // The Automation. Informatics. — Karaganda, 1998. — P. 1–8.
8. Baymuhametov S.K., Ioschenko S.M. et al. ARM «Geologist» with elements of the forecast to safety at development high-gas-bearing stratum of coal // Mountain information-analytical bulletin (GIAB). — M., 2000. — № 3 — P. 138–143.
9. Cherepanov G.P. Mechanics of the frail destruction. — M.: Science, 1974. — 640 p.
10. Bezuhov N.I. Theory of bounce and plasticity. — M.: Stat. tech. pub., 1953. — 254 p.
11. Baymuhametov S.K., Halmanov H.Zh., Mityuhin D.G. Shaping the gas collector in a stratum of coal at conduct of the mountain work on example of the sudden surge on the stratum D6 of mine named by V.I.Lenin // Mountain information-analytical bulletin (GIAB). — M., 2000. — № 3. — P. 148–150.