

*Л.Н. Бурмин, Ю.А. Степанов*

## **СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ГИС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Проблема обеспечения стабильной и безопасной высокопроизводительной работы комплексно-механизированных забоев на угольных предприятиях России на сегодняшний день остается одной из актуальных задач. Она может быть решена на основе компьютерного моделирования и прогнозирования динамики состояния углепородного массива при ведении очистных работ с использованием ГИС-технологий [1].

Существующая практика использования ГИС обычно сводится к реализации компьютерной модели в редакторе ГИС общего назначения для обработки картографических материалов. Такой подход не позволяет использовать все преимущества ГИС как информационно-аналитической системы, что не дает возможности осуществления достоверной информационной поддержки управленческих решений с учетом изменяющихся горно-геологических условий.

Для решения вопросов безопасности при ведении горных работ необходимо проводить мониторинг состояния горного массива. Современные исследования в области геомеханики, изучающие законы изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива не позволяют учесть всех особенностей конкретной выработки [2]. Это связано с несколькими причинами: во-первых, при разведке горного массива для моделирования предоставляется ограниченный набор данных, полученный с помощью разведочных скважин. Бурение большого количества скважин, безусловно, делает модель более адекватной, однако такой подход применяется не часто в связи с высокими экономическими затратами на его реализацию. Во-вторых, по мере прохождения очистного комплекса данные о массиве могут меняться. Например, в горном массиве могут быть выявлены тектонические нарушения (пустоты, подземные воды и т.п.), которые осложняют процесс экстраполяции данных и прогнозирования.

Для решения вышеизложенных проблем предлагается создать специализированную геоинформационную систему, которая позволит проводить анализ напряженно-деформированного состояния горного массива при ведении очистных работ в различных зонах по длине выемочного столба. В системе

должна существовать возможность оперативного изменения данных о состоянии горного массива или добавления новых условий проведения горных работ. Основной задачей предлагаемой ГИС является выявление зон повышенного горного давления (ЗПГД), для последующего качественного управления технологическими процессами и предотвращения аварийных и чрезвычайных ситуаций в очистных забоях угольных шахт. Структура предлагаемой специализированной ГИС для выявления зон повышенного горного давления представлена на рис. 1. Несмотря на последовательную обработку данных, результаты геоинформационного моделирования могут быть представлены двумя независимыми друг от друга способами: в форме аналитического отчета либо в форме трехмерного изображения.

Процедура компьютерного моделирования геомеханических ситуаций с учетом положения секции механизированной крепи по длине выемочного столба состоит из нескольких этапов. На первом этапе осуществляется накопление исходных данных. Под исходными данными в предлагаемой геоинформационной системе понимаются:

- данные, необходимые для построения полной модели шахты угольного предприятия;
- данные геологической разведки об углепородном массиве, полученные путем зондирования;
- электронные растровые карты местности с пространственными данными, полученные преобразованием аналоговых (бумажных карт) с помощью специализированных устройств и программного обеспечения.

Стоит отметить, что сбор этих данных не входит в задачи специализированной ГИС. Разрабатываемая система осуществляет накопление, кластеризацию и преобразование данных в удобную для дальнейшего использования структуру, которое в данном исследовании, получило название «препроцессинг исходных данных».

В связи с тем, что каждый пункт исходных данных требует особого подхода (собственных методов обработки, собственных алгоритмов структуризации) необходимо создать отдельный модуль,

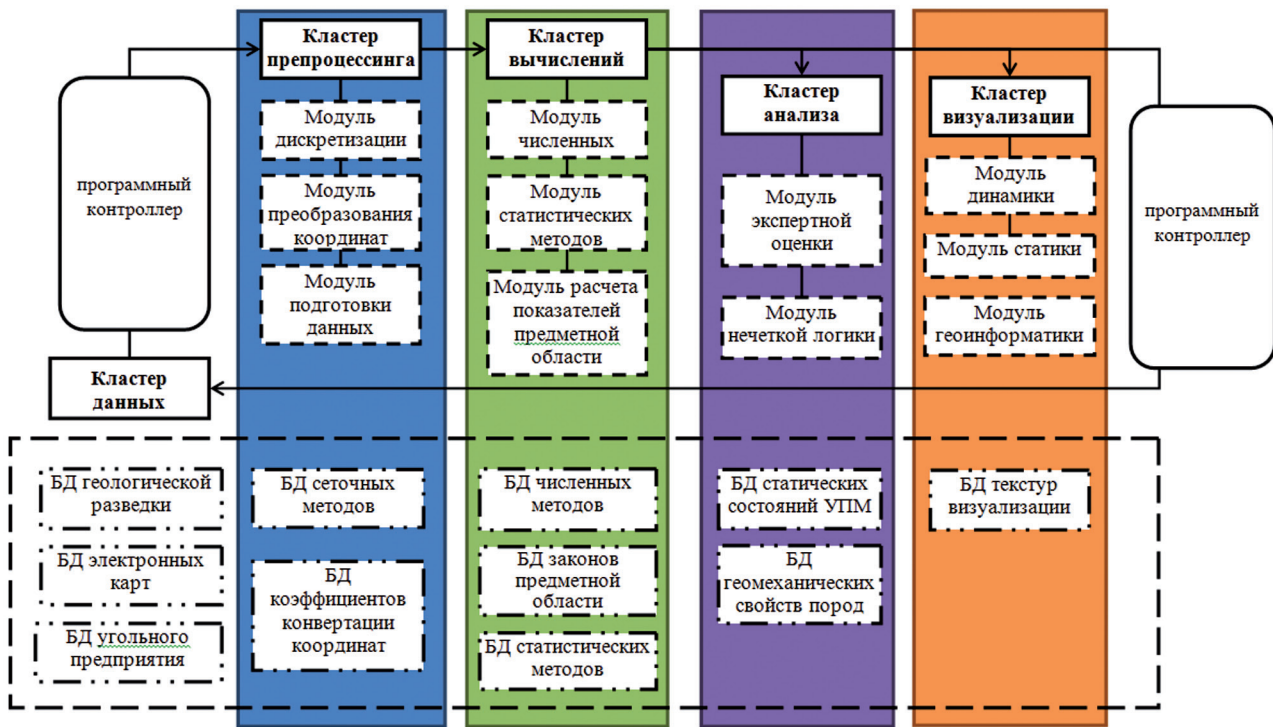


Рис. 1. Структура специализированной ГИС для выявления зон повышенного горного давления

отвечающий за каждую категорию исходных данных. Совокупность модулей на каждом этапе в данном исследовании получила название «кластер». Кластер – это набор из тематических заменяемых модулей, скомпонованных в одну автономную систему с унифицированным интерфейсом ввода и вывода данных.

Кластер «Исходных данных» отвечает за хранение сведений о состоянии модели горного предприятия. После выполнения всех манипуляций над исходными данными сведения о состоянии модели снова помещаются в банк данных и дополняются хронологической меткой.

**Кластер исходных данных** объединяет единым интерфейсом все узкоспециализированные базы данных, перечень которых представлен на рис. 1, в банк данных с жесткой структурой. Все остальные кластеры (и их модули) получают доступ к хранилищу данных через разработанный программный контроллер.

Данный кластер включает в себя три модуля, а также обеспечивает работу модулей других кластеров, связанных с хранением данных.

Модуль «Электронные карты» отвечает за импорт электронной карты в виде растрового изображения. Дополнительно импортируется текстовый файл с указанием глобальных географических координат, соответствующих узловым точкам (пикселям) на изображении. Промежуточные значения глобальных координат интерполируются непосредственно информационной системой в соответствии с географическим масштабом изображения (количество

метров в одном пикселе) и масштабом пикселя (это поможет рассчитать пространственные данные при существовании необходимости в пропорциональном увеличении картографического изображения).

Модуль «Геологическая разведка» отвечает за построение геометрической модели углепородного массива. Исходными данными для этого модуля являются обработанные сведения о разведочных скважинах (каротажные данные):

- координаты скважины на карте (x, y);
- высотная отметка устья (уровень земной поверхности, где началось бурение разведочной скважины);
- глубина скважины;
- пары высотных отметок (почва и кровля) залегающих пластов;
- тип породы.

По этим отметкам происходит геометрическое моделирование пласта. Построение геометрической модели состоит из нескольких этапов. На первом этапе в заготовленную структуру данных считываются каротажные данные. Для ускорения вычислений используются динамические массивы типизированных данных (GenericList, также известные как List<T>) [7]. В результате считывания данных формируется трехмерное облако точек, на основе которых возможно построение геометрии залегающих пластов. На втором этапе рассчитывается глубина залегания и границы простираения каждого типа пласта, а также устанавливается их последовательность залегания в углепородном массиве на уровне всего шахтного

поля. Область шахтного поля разбивается на подобласти, соответствующие выемочным участкам. Соответственно и общее облако точек, формирующее пласт, разбивается на подгруппы (соответствующие размерам выемочного участка), из которых возможно построить выпуклые оболочки. Таким образом, общая геометрия пласта строится из набора выпуклых многогранников.

Третий этап выполняется индивидуально для каждого залегающего слоя. Здесь среди облака точек одного пласта находятся «тройки дискрет», образующие грань выпуклого многогранника. Для того чтобы узнать, образует ли тройка точек грань, нужно определить положение всех остальных точек относительно плоскости, образованной текущей тройкой. Для этого находятся знаки смешанных произведений векторов, где два вектора определяют плоскость, а третий зависит от точки, у которой и находится положение относительно плоскости. Смешанное произведение вычисляется как определитель матрицы, строки которой являются координатами векторов. Если знаки всех смешанных произведений одинаковы, то все точки находятся по одну сторону от выбранной тройки и эта тройка образует грань. После построения всех выпуклых оболочек одного выемочного участка проводится «межслойный анализ», с помощью которого отыскиваются пересечения выпуклых оболочек пластов – коллизий, свидетельствующих о нарушении геометрии пластов. В случае нахождения коллизии геометрия выпуклых оболочек корректируется до неправильных оболочек с помощью методов интерполяции.

На четвертой и заключительной стадии модуля геологической разведки осуществляется визуализация поверхности пластов. Все вершины последовательно анализируются по алгоритму, реализующему обход нерегулярного графа. Если очередная тройка точек при переборе образует правую тройку относительно нормали грани, образованной этой тройкой точки, то ее можно использовать для визуализации. Это связано с аппаратной особенностью видеокарт и используемого инструмента для реализации, в которых условлено, что грань визуализируется, только в том случае, если ее вершины соединены по часовой стрелке. Соединение против часовой стрелки считается внутренней стороной грани и игнорируется при визуализации поверхности.

*Модуль «Угольное предприятие»* кластера исходных данных отвечает за построение геометрической модели подземных выработок (рис. 2).

Считается, что в шахте уже были проведены вскрытие и подготовка запасов к очистной выемке, а работа находится на стадии начала ведения очистных работ, т.е. имеются данные о расположении

и направлении выработок и узловых соединений. Выработки в горном массиве визуализируются с помощью технологии «префабов». Ее идея заключается в инстанцировании копии заранее заготовленного объекта вместо постоянного создания нового – таким образом, происходит оптимизация отрисовки большого количества объектов с одинаковой структурой. Однако каждый инстанцируемый объект может обладать модифицированной масштабной геометрией и положением в пространстве. Программно каждая выработка состоит из двух «узлов» и одной «ветви», данные о которых выгружаются в ГИС с помощью файла табличного процессора (MS Excel или OpenOffice Calc). Данные о каждом узле включают в себя пространственные данные, номер узла и логическую переменную, оговаривающую, является ли узел выходом на поверхность. Сведения о ветвях включают в себя номера начального и конечного узлов, название выработки, площадь сечения, периметр сечения, высоту и ширину выработки. Трехмерный угол в пространстве рассчитывается с помощью линейной интерполяции между узлами и кватернионов. На этом кластер подготовки исходных данных завершает свою работу и передает управление кластеру математического аппарата.

**Кластер «Препроцессинг»** предоставляет пользователю возможность визуальной оценки построенной модели. Пользователь может в ручном режиме отредактировать положения скважин, структуру горного массива, изменить цветовую гамму пород, положения крепей.

*Модуль «Дискретизация»* позволяет осуществить предварительное разбиение на элементы. Пользователь может изменить положение узлов и добавить новые элементы для более подробного разбиения. Это позволит увеличить точность расчетов, но замедлит скорость вычисления [3].

*Модуль «Преобразование координат»* отвечает за конвертирование локальных координат рабочего пространства (в трехмерной виртуальной среде) в глобальные географические координаты. Пользователь может скорректировать стороны света, отрегулировать масштаб и ограничить предел точности глобальных координат.

*Модуль «Подготовка данных»* осуществляет валидацию построенной модели, проверяет наличие «дыр» в карте, запрашивает у пользователя недостающие данные для окончательного построения модели. После того как модель завершила проверку заданных условий, а пользователь подтвердил ее необходимую полноту, модель считается «валидной». Валидная модель сохраняется в специальную структуру, образуя в итоге сжатый бинарный файл. Этот файл позволит загрузить готовую модель

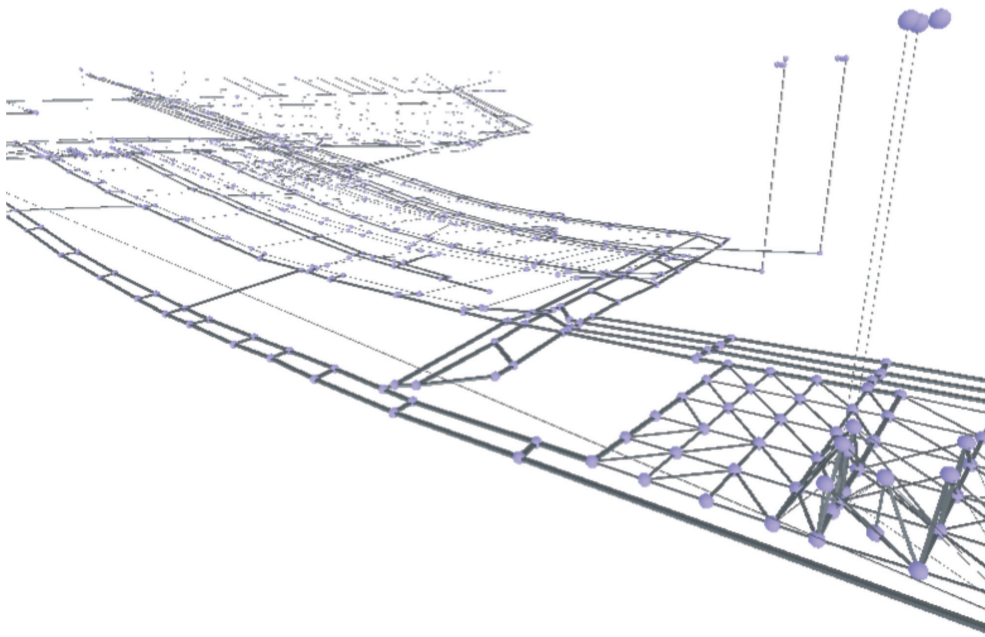


Рис. 2. Пример построения геометрической модели выработок

в геоинформационную систему, не выполняя каждый раз этапы работы кластера исходных данных и кластера препроцессинга.

**Кластер «Вычисления»** отвечает за алгоритмическую составляющую работы системы. В этом кластере осуществляются все вычисления, необходимые для получения конечного результата. Модули этого кластера работают параллельно, так для получения качественного результата необходим симбиоз математических и статистических методов, применяемых в рамках законов предметной области [4].

Известно, что любая модель может только приближенно отображать свойства моделируемого объекта и процессы, протекающие в нем. Для обеспечения требуемой адекватности модели и повышения точности результатов моделирования модель (алгоритм ее работы) необходимо настраивать. В связи с этим архитектура ГИС подразумевает возможность замены и калибровки численных и статистических методов. Учитывая сложный механизм взаимодействия в системе «механизованная крепь – углеродный массив» был выбран экспериментально-аналитический метод, сущность которого состоит в решении системы дифференциальных уравнений механики горных пород методом конечных элементов [5].

Полученные в результате работы кластера вычислений данные сохраняются в базу данных статических состояний углеродного массива. В дальнейшем эти данные могут быть использованы кластером анализа данных или кластером визуализации данных. Эти кластеры не используют результаты друг друга, поэтому их работа может выполняться параллельно.

**Кластер «Анализ результатов»** осуществляет помощь в аспекте интерпретации полученных результатов. В этом кластере интерполируются недостающие данные и предлагаются рекомендации по проведению выемочных работ на шахте угольного предприятия.

*Модуль «Нечеткая логика»* позволяет компенсировать недостаточный объем сведений о работе в шахте. Это реализуется через систему статистических уравнений и условий конкретной предметной области. Например, при разведочных работах тип породы в пространстве между скважинами вычисляется на основе утверждения о том, что в данном районе залегающие пласты – пологие (не больше 30 градусов). Именно с помощью алгоритмов нечеткой логики вычисляется значение предельного давления в породе (потому как повышенное давление в различных породах может и не приводить к обрушению пород кровли).

*Модуль «Экспертная оценка»* предоставляет рекомендации на основе полученных сведений от модуля интеллектуальных алгоритмов и модуля нечеткой логики. Эти рекомендации обрабатываются модулем нечеткой логики, в результате чего классифицируются на «критические», «важные» и «рекомендуемые». Критические требования требуют срочного вмешательства специалиста, в то время как рекомендации носят необязательный характер, но могут повысить эффективность. Важные рекомендации предоставляют сведения о способах повышения безопасности в работе.

**Кластер «Визуализация»** обрабатывает полученные результаты, предоставляя пользователю

наглядное отображение сведений об изменении уровня выбранной характеристики. В процессе взаимодействия с горной информационной системой возникает необходимость анализа ряда поверхностей. Поэтому визуализация напряженно-деформированного состояния углепородного массива с учетом движения очистного забоя осуществляется с помощью картографической анимации [5]. Для этого выбирается глубина (для проецирования давления на карту) и пороговое значение, свыше которого давление будет считаться «повышенным». Проигрывание анимации осуществляется последовательно, т.е. модуль динамики не может выполнить свою работу, пока не будет завершена работа модуля статики. Однако оба модуля используют геоинформационный модуль для проецирования результатов на географическую карту. Это позволит создавать тематические карты ведения горных работ.

Модуль «Статика» считывает ключевые точки для построения изолинии в трехмерном пространстве по одинаковым значениям давления в породе. Данные считываются из базы данных статических состояний углепородного массива. В эту базу данных сведения попали в результате работы кластера вычислений. Таким образом, можно оценить и подробно рассмотреть каждый момент времени работы в очистном забое. В данном случае модуль геоинформатики проецирует ключевые точки на поверхность карты, визуализируя семейство изолиний на карте (рис. 3).

В результате использования выше описанного модуля, пользователям предоставляется возможность проведения детального анализа процессов выемки полезного ископаемого, делая при этом срезы полученных результатов математического моделирования в любом месте исследуемого выемочного блока.

Модуль «Динамика» интерполирует данные, полученные в статическом модуле. Результатом работы в данном случае является картографическая анимация [6] с возможностью облета местности. В качестве отдельного анимационного фильма можно получить вид географической карты с изменяющимися областями повышенного давления (рис. 4).

Отдельно стоит отметить факт наличия обратной связи в системе. После заключительной работы кластеров визуализации и кластера аналитик обновляется модуль данных. Это обновление уточняет данные, а модель делает более адекватной. Таким образом, предлагаемая информационная система способна решать вопрос безопасности при ведении горных работ с помощью предоставления рекомендаций, подкрепленных наглядным способом представления данных – визуализацией. Модульная архитектура системы подразумевает возможность замены или изменения составных частей системы.

Это делает ГИС расширяемой и масштабируемой, а так же позволяет учесть все специфические характеристики и нестандартные условия работы.

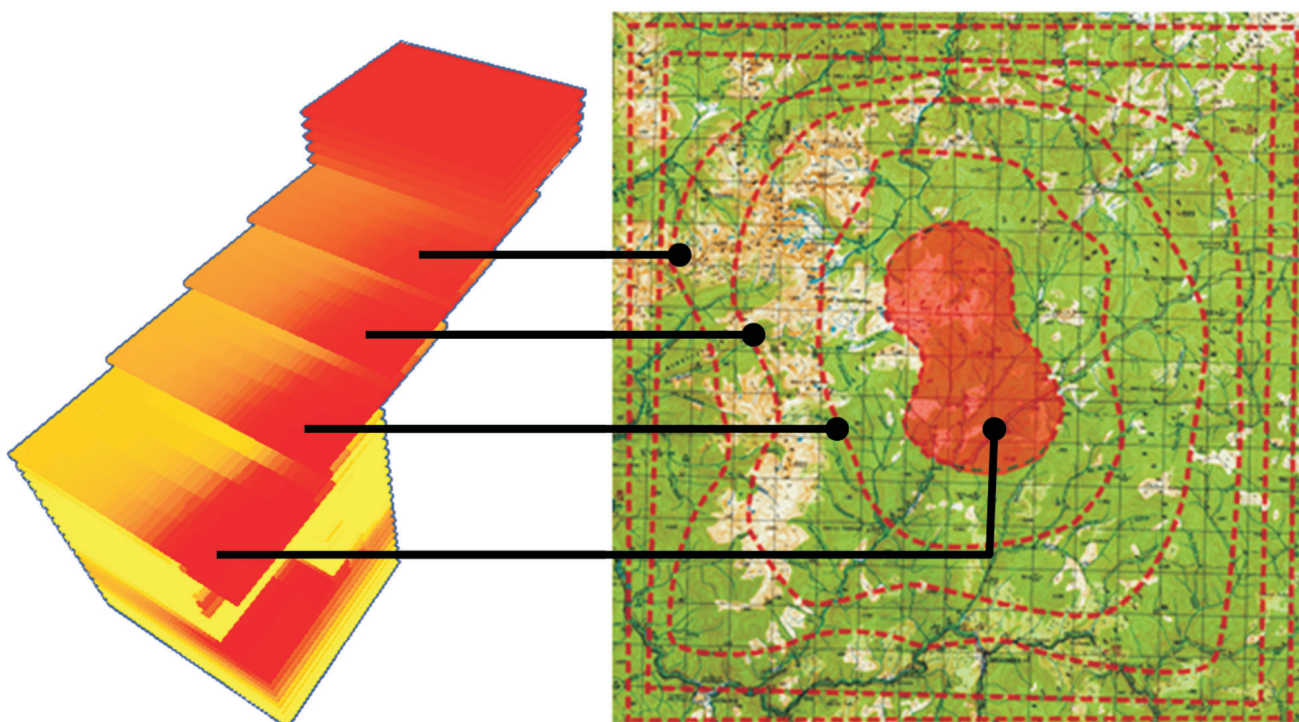


Рис. 3. Пример визуализации статического состояния модели

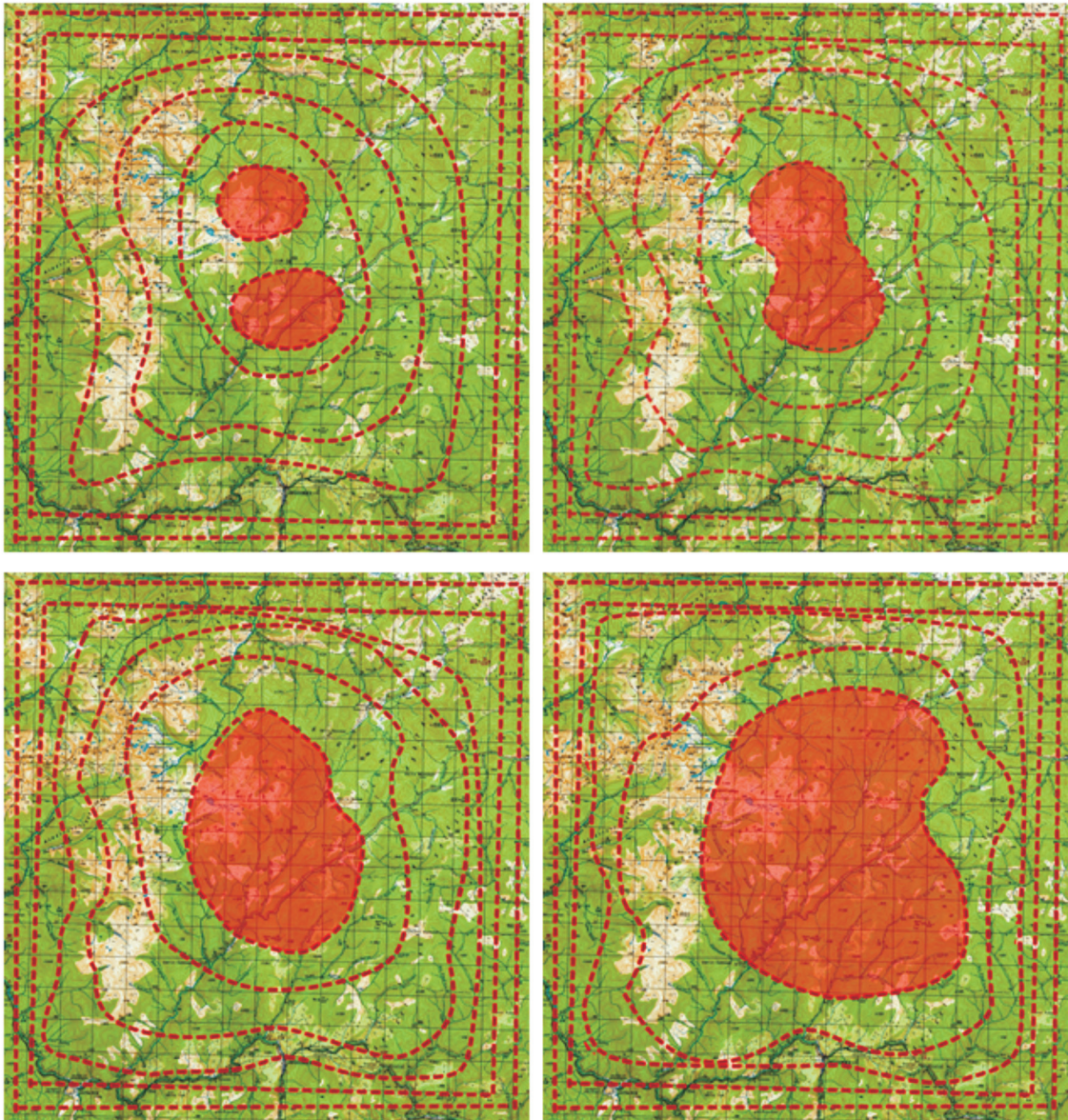


Рис. 4. Динамика изменения зон повышенного давления

**Ключевые слова:** ГИС, архитектура, горное предприятие, безопасность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Ю.А. Структура региональной геоинформационной системы при ведении выемочных работ угледобывающих предприятий // Геоинформатика. – 2012. – № 1. – С. 36-41.
2. Проблемы горного дела и экологии горного производства: мат-лы V Междунар. науч.-практ. конф. (14-15 мая 2010 г., г. Антрацит). – Донецк : Вебер (Донецкое отделение), 2010. – 225 с.
3. Степанов Ю.А. Способы автоматизации процесса дискретизации области исследования на конечные элементы // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. – 2011. – № 6. – С. 316-320.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
5. Степанов Ю.А. Адаптация и развитие метода конечных элементов для расчета параметров напряженно-деформированного состояния углеродного массива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – С. 31-34.
6. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др. Основы геоинформатики : учеб. пособие для студ. вузов : в 2 кн. / под ред. В.С. Тикунова. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – Кн. 1. – 352 с.
7. Which Kind Of Array Or Collection Should I Use? [Электронный ресурс] // Unity3D Community Wiki wiki.unity3d.com. – URL: <http://goo.gl/G692SP> (дата обращения: 18.02.2015).