

УДК 556.3

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ ЦРД

Дрибан В. А., Грищенко Н. Н., Ходырев Е. Д.,
Дуброва Н. А.

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Встановлено, що в умовах Центрального району Донбасу довгострокова багатократна підробка призводить до утворення у масиві гірських порід квазірегулярної мережі вертикально орієнтованих техногенних колекторів, що у багато разів збільшує фільтраційні властивості вмщувальних гірських порід.

Its is determined that in conditions of the Central region of the Donets Coal Basin long-time repeated undermining results in formation of quasiregular network of vertically-aligned man-induced reservoirs that gives manifold increase in filtration properties of enclosing rocks.

Центральный геолого-промышленный район Донбасса – старейший горнодобывающий регион Украины, разработка которого началась в конце 19 столетия и послужила базой для развития металлургических, химический и машиностроительных предприятий. На его территории расположены горные отводы 28 шахт, крупное производственное объединение «Стирол», Горловский химзавод, Никитовский ртутный комбинат и целый ряд других крупных промышленных объектов.

Высокая степень техногенной нагрузки территории привела к аварийной ситуации отравления шахтной атмосферы летально опасными концентрациями вредных загрязняющих веществ (ВЗВ) [1] в 1989-1990 гг. на шахтах Углегорская и Александр-Запад, что показало необходимость как изучения путей поступ-

ления ВЗВ в массив горных пород, так и оценки состояния вмещающих пород, подвергшихся воздействию многолетней отработки.

Изучение и прогнозирование распространения загрязнителей в массиве горных пород является весьма сложной комплексной задачей с необходимостью учета многочисленных техногенных и эндогенных факторов влияния (тектонических, гидрогеологических, геохимических, геодинамических, геомеханических), особенно в условиях долгосрочной многократной систематической подработки горного массива, сложного геологического строения и высокой степени тектонической нарушенности исследуемой территории.

Подчеркнем, что именно многократная подработка массивов в условиях ЦРД, ведущаяся более 130 лет является одним из наиболее значимых факторов, определяющих кардинальное изменение фильтрационных характеристик вмещающих пород. Поэтому, целью данной работы является оценка степени нарушенности массива горных пород вследствие многократного поэтапного воздействия знакопеременных разнонаправленных деформаций, возникающих в процессе эксплуатации месторождения, для дальнейшего прогноза изменения его фильтрационных свойств.

В качестве объекта исследования (рис. 1, а) выбраны горные отводы шахты Александр-Запад (где произошло отравление шахтной атмосферы) и двух прилегающих шахт им. Калинина и Кондратьевка общей площадью более 45 км². Горные предприятия работают с начала прошлого столетия и отрабатывают до 20 пластов на глубинах до 750-1000 м.

Следует отметить, что масштаб изучаемого массива, количество отрабатываемых угольных пластов, количество очистных выработок (несколько тысяч по каждому объекту), отсутствие полных данных являются факторами, чрезвычайно затрудняющими определение пространственно-временного распределения деформационных параметров. Поэтому, в качестве тестовой модели для получения оценочных характеристик полей деформаций в произвольной точке массива горных пород, были выбраны три угольных пласта (k_5^2 , k_7 , k_7^1) шахты им. Калинина.

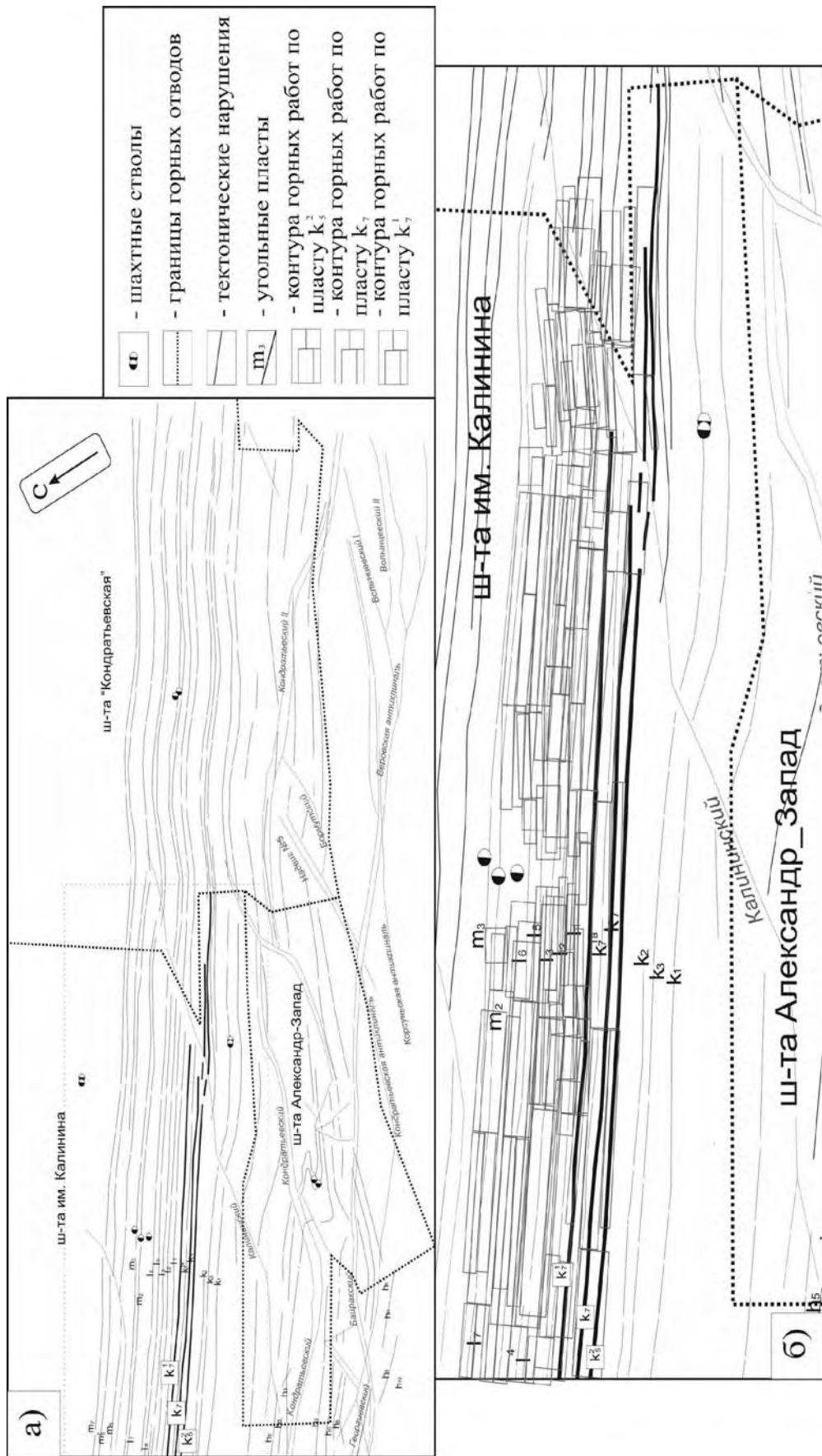


Рис. 1. а) Горные отводы шахт им. Калинина, Кондратьевка и Александр-Запад [1];
 б) Проекция аппроксимированных по временному параметру контуру очистных горных выработок

Пласты k_5^2 , k_7 , k_7^1 отработывались на протяжении 80 лет с 20 по 90 гг. прошлого столетия и имеют углы падения от 52° до 56° .

Для проведения расчетов был использован следующий подход. Все лавы в пределах каждого пласта были объединены по временным периодам отработки. В качестве шага был установлен интервал 10 лет. В результате аппроксимации около 1000 лав выделено 125 контуров горных работ по трем угольным пластам, которые разбиты на группы, соответствующие восьми временным интервалам отработки – 20-е, 30-е, 40-е, 50-е, 60-е, 70-е, 80-е и 90-е годы (см. рис. 1, б). Для определения значений деформаций в произвольной точке массива, исходные данные о глубине отработки всех аппроксимированных контуров очистных горных выработок на горизонте «0» приведены к значениям, соответствующим горизонтам «-250», «-450» и «-650» метров. Из расчета исключены контуры, которые фактически расположены выше обозначенного горизонта.

Горно-геологические условия отработки исследуемой территории - большое количество отработываемых пластов, крутое падение и малое межпластовое расстояние – требуют учета многократности подработки для получения достоверной оценки напряженно-деформированного состояния массива. Поэтому, при расчете параметров деформаций точки массива необходимо учитывать влияние множественных вышележащих старых горных работ на каждом этапе последующей отработки. Согласно «Правилам подработки» [2], максимальное оседание земной поверхности η_m определяется по формуле (1):

$$\eta_m = q_0 m \cos \alpha N_1 N_2, \quad (1)$$

где N_1 , N_2 – условные коэффициенты, характеризующие степень подработанности земной поверхности; q_0 – относительная величина максимального оседания, вычисляется по формуле (2):

$$q_0 = q'_0 - 0,0017\alpha, \quad (2)$$

где α – угол падения пласта.

Максимальное оседание от старой выработки $\eta_m^{сб}$ определяется по формуле (3):

$$\eta_m^{сб} = \Delta q m \cos \alpha N_1 N_2, \quad (3)$$

где Δq – разность между относительными максимальными оседаниями при повторной и первичной подработках, которую принимают для условий Донбасса равной 0,15.

Для расчета максимальных оседаний от текущих горных работ с учетом влияния старых выработок, использовано рекуррентное соотношение вида (4):

$$\eta_{t_n}^{общ} = \eta_{t_n}^{нов} + \frac{\Delta q}{q_0} \eta_{t_{n-1}}^{общ}, \quad (4)$$

где t_n – расчетный период; n – количество расчетных периодов.

В качестве примера, приведем расчет максимального оседания $\eta_{общ}^{90}$ от горных работ по самому глубокому горизонту, соответствующему 90 гг. отработки.

$$q_0 = q'_0 - 0,0017\alpha = 0,8 - 0,0017 \times 53 = 0,71,$$

$$\frac{\Delta q}{q_0} = \frac{0,15}{0,71} = 0,21,$$

$$\eta_{90}^{общ} = \eta_{90}^{нов} + 0,21 \left(\eta_{80}^{нов} + 0,21 \left(\eta_{70}^{нов} + 0,21 \left(\eta_{60}^{нов} + 0,21 \left(\eta_{50}^{нов} + 0,21 \left(\eta_{40}^{нов} + 0,21 \left(\eta_{30}^{нов} + 0,21 \eta_{20}^{нов} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right),$$

где $\eta_t^{нов}$ – максимальные оседания при первичной подработке; $\eta_t^{общ}$ – суммарные максимальные оседания с учетом влияния старых выработок.

Расчет и построение мульд (рис. 2) выполнены с помощью программы «Подработка» (версия 2.1), разработанной в УкрНИИ-МИ на основе методики, изложенной в действующих «Правилах подработки» [2].

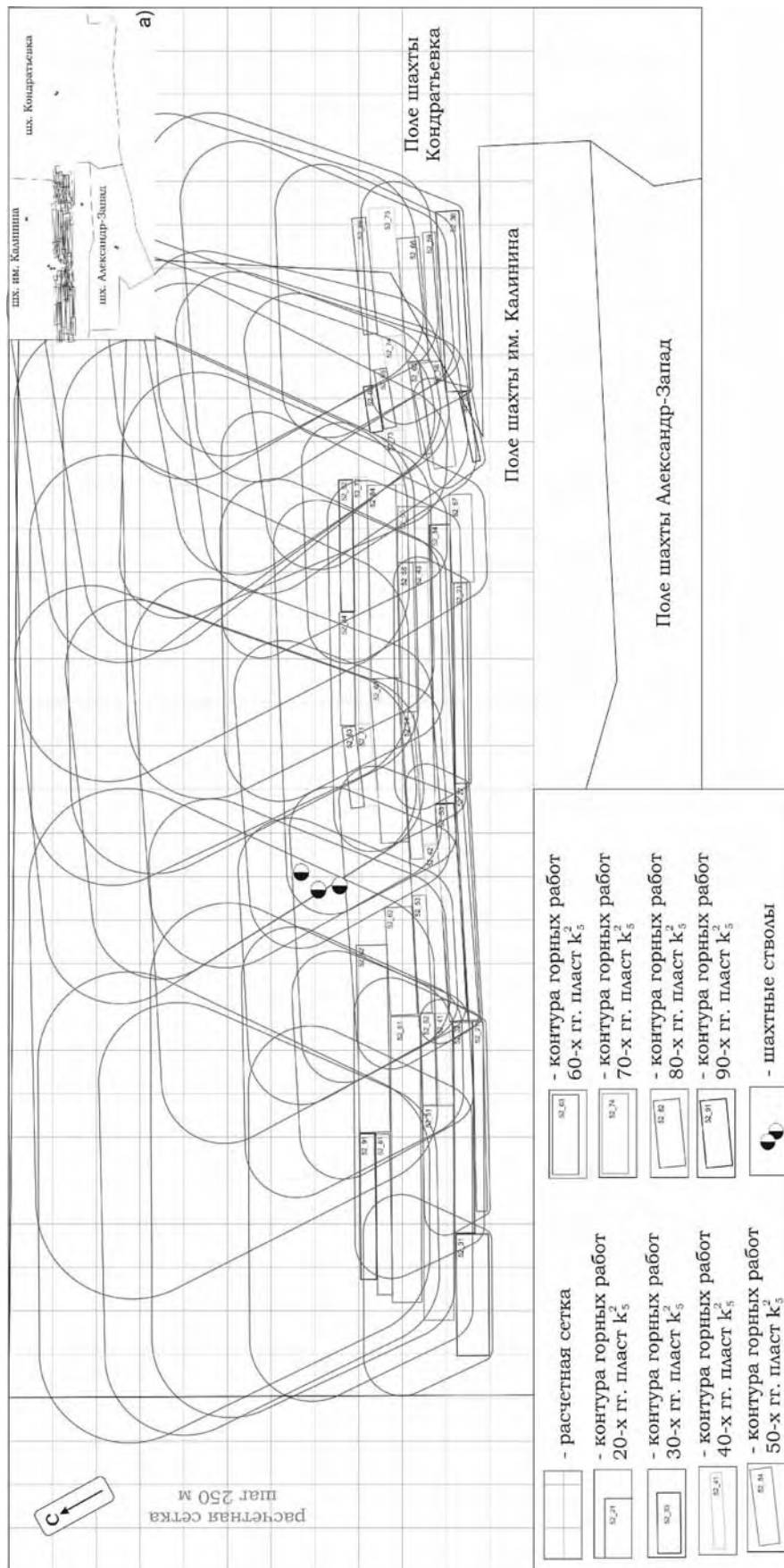


Рис. 2. Зоны влияния контуров горных работ по пласту K_5^2

Расчет деформаций массива горных пород от каждой группы контуров позволяет отобразить динамику изменения напряженно-деформированного состояния массива с шагом в десять лет для произвольной точки массива. В качестве примера, на рисунке 3 приведены карты распределения значений горизонтальных деформаций E_p в направлении простирания горных пород в пределах исследуемого участка по десятилетиям. Распределение значений горизонтальных деформаций в пределах исследуемой площади характеризуется чередующимися пространственно-сопряженными зонами сжатия и растяжения, которые прослеживаются на всех этапах отработки. Зоны сжатий и растяжений, представляют собой приблизительно равные по площади области, характеризующиеся близкими по абсолютной величине значениями и приблизительно равным пространственным шагом чередования в пределах каждого рассматриваемого временного периода. Так расстояния между чередующимися максимумами и минимумами значений: для 20 -50 гг. в среднем 350 м, 60-90 гг. около 1000 м.

Из рисунка 3 видно, что области массива (например, интервал 4000-5000 м), испытывают деформации растяжения на протяжении двух первых десятилетий отработки, которые затем трансформируются в зоны сжатия, что наблюдается во всех областях исследуемого массива. Это говорит о том, что в процессе ведения горных работ, массив горных пород находился под воздействием горизонтальных знакопеременные деформаций с многократным поэтапным замещением зон сжатия зонами растяжения и наоборот. Подобное чередование зон сжатия и растяжения выявлено и на горизонтах «-250», «-450» и «-650» метров, что позволяет говорить о подверженности всего массива влиянию знакопеременных деформаций, которые, в процессе многократных смен зон сжатия и растяжения, приводят к увеличению их трещиноватости и, соответственно, к значительному изменению фильтрационных характеристик массива в целом.

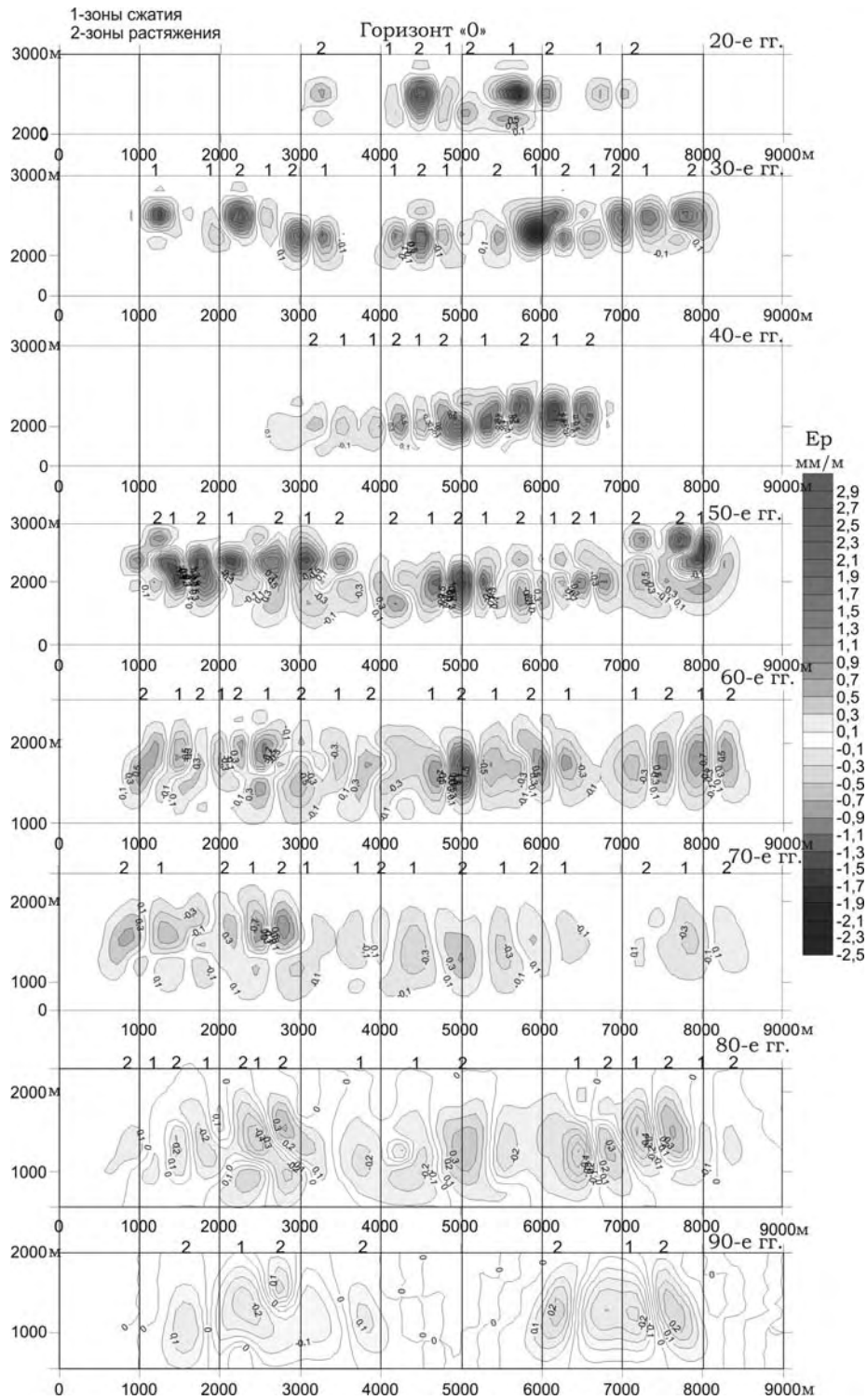


Рис. 3. Динамика изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород на горизонте «0» по десятилетиям

Поэтапное (по периодам ведения очистных работ) рассмотрение деформаций массива дает возможность отследить транс-

формации деформированного состояния массива во времени. На рисунке 4 представлены векторные диаграммы пошагового изменения деформированного состояния подрабатываемого массива во времени.

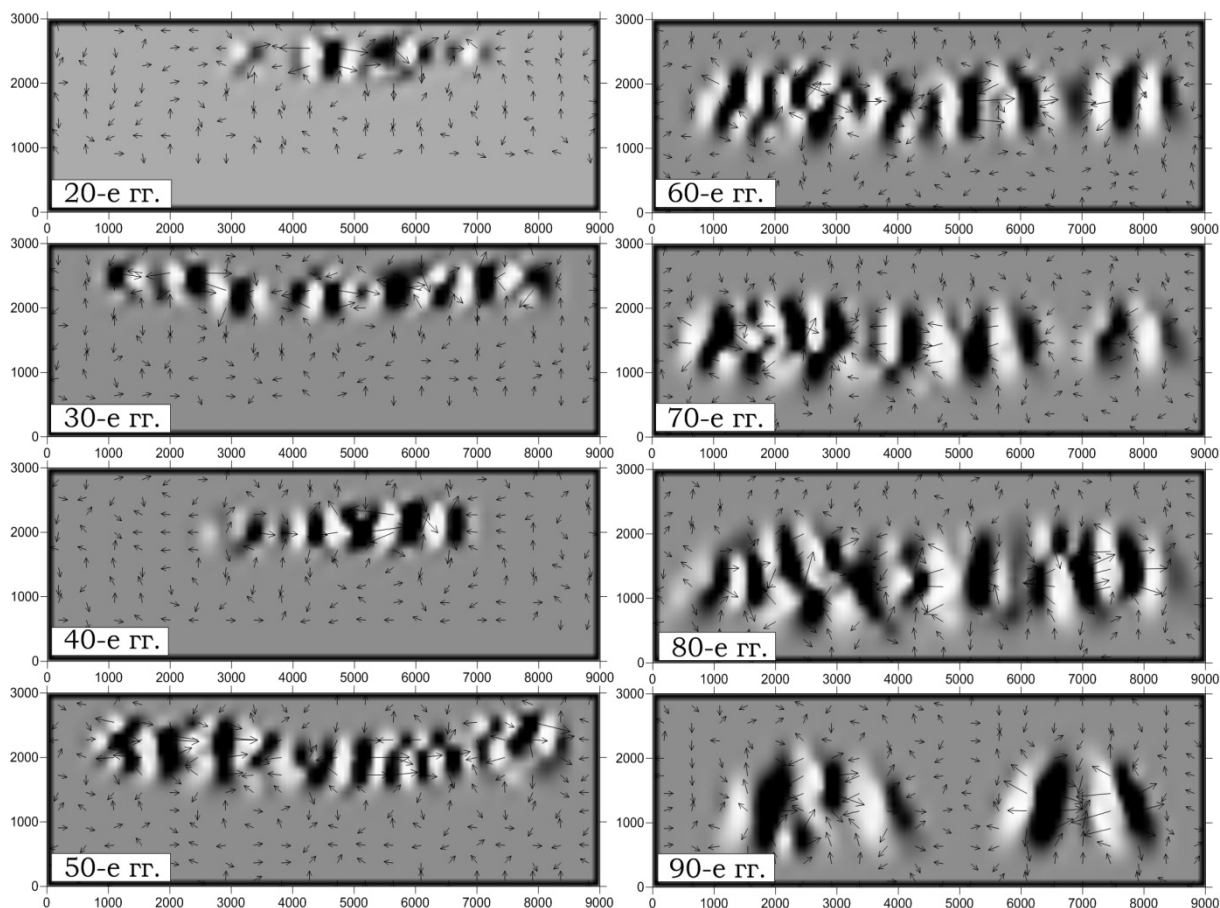


Рис. 4. Динамика изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород на горизонте «0» по десятилетиям, с векторной составляющей изменения горизонтальных деформаций E_p

Совместное рассмотрение деформаций произвольной точки массива горных пород на протяжении всего периода отработки, представленных в виде векторов, позволяет визуализировать разнонаправленность и варьирование значений испытываемых деформаций (рис. 5).

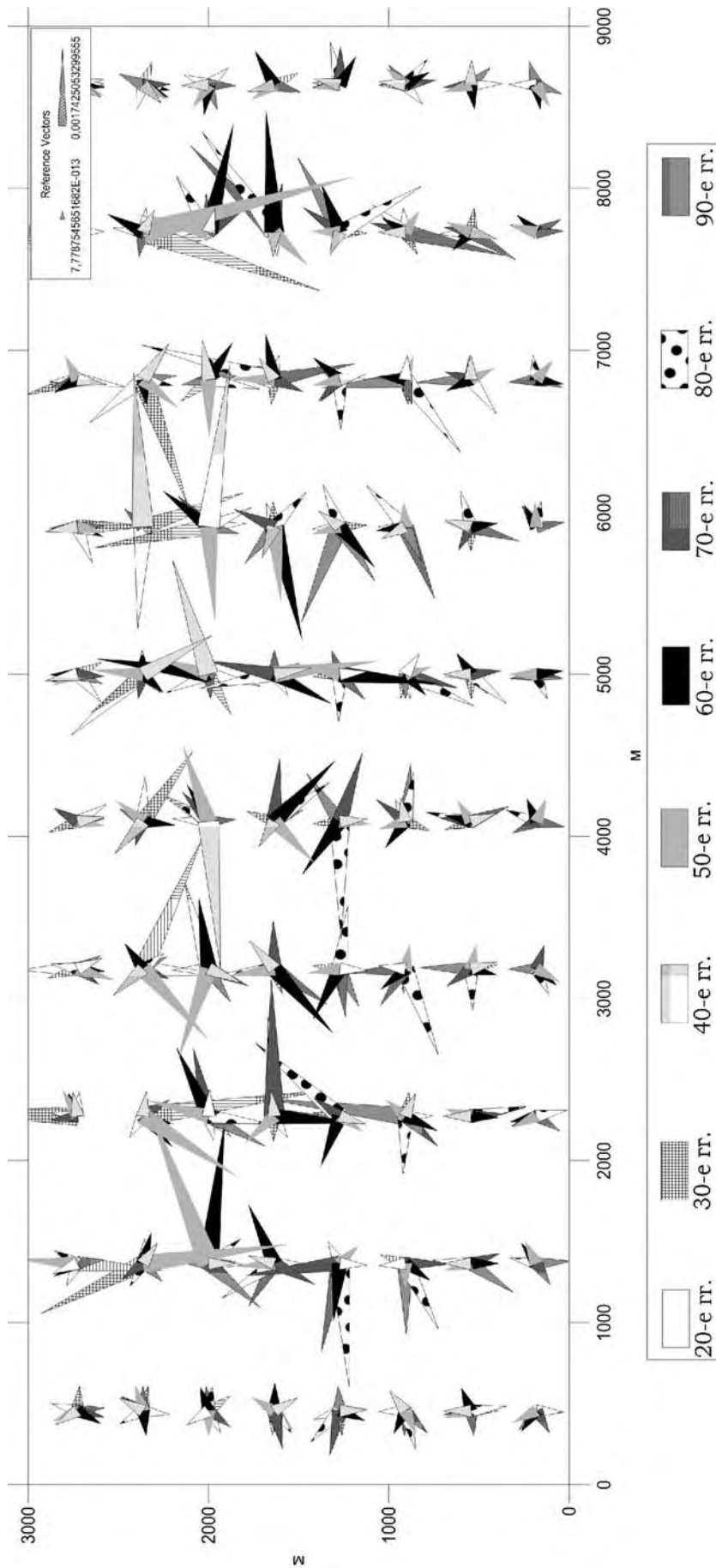


Рис. 5. Векторы изменения направления направления горизонтальных деформаций E_r в некоторых точках расчетной сетки на горизонте «0»

Учет многократности подработки при расчете деформаций позволил построить карты суммарного погоризонтного распределения показателей горизонтальных деформаций по простиранию (E_p) и вкрест простирания (E_q) пласта. На рисунках 6, 7 приведены карты погоризонтного распределения суммарных горизонтальных деформаций E_p и E_q от влияния горных работ по пластам k_5^2 , k_7 , k_7^1 .

Распределение суммарных горизонтальных деформаций в массиве, отраженное на рисунке 6, носит более "спокойный характер", по сравнению с поэтапным распределением по временному параметру, что связано с обнулением значений знакопеременных деформаций вследствие многократного наложения зон сжатия и растяжения. Однако общая тенденция образования зон повышенной проницаемости сохраняется с увеличением шага знакопеременных изменений в среднем до 800 м.

Увеличение значений горизонтальных деформаций растяжения, достигающих на некоторых участках $5\div 7$ мм/м, превышающих предельные значения в $20\div 30$ раз, свидетельствует о кардинальном изменении естественного состояния вмещающих пород вследствие подработки.

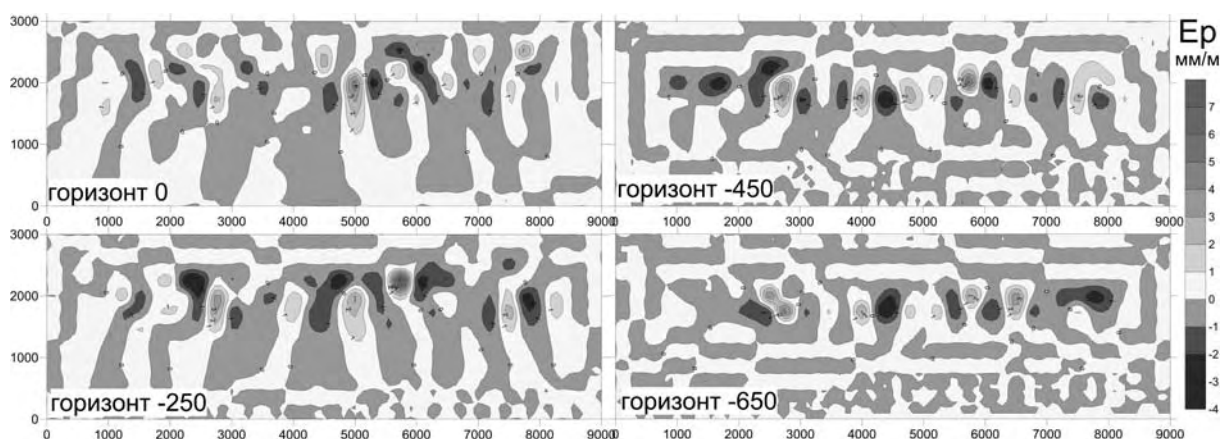


Рис. 6. Погоризонтное распределение суммарных горизонтальных деформаций E_p от влияния горных работ по пластам k_5^2 , k_7 , k_7^1 (по простиранию)

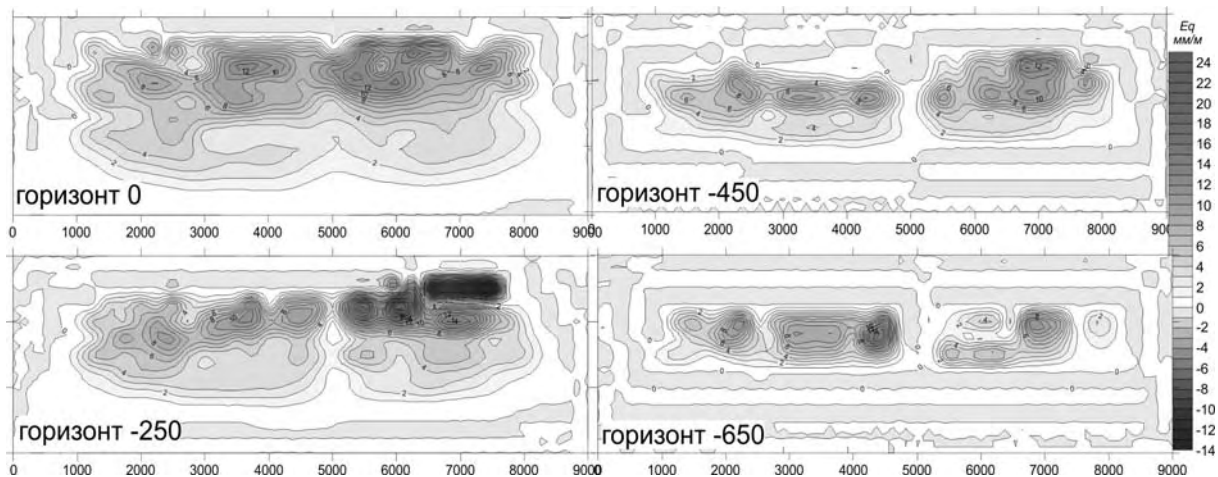


Рис. 7. Погоризонтное распределение суммарных горизонтальных деформаций E_q от влияния горных работ по пластам k_5^2 , k_7 , k_7^1 (вкрест простирания)

На основе методики, изложенной в [3], выполнен расчет вертикальных деформаций (E_z) точек массива горных пород. Шаг расчетной сетки и расчетные горизонты идентичны модели расчета горизонтальных деформаций. Погоризонтное изменение полей вертикальных деформаций представлено на рисунке 8. Таким образом, мы имеем значения горизонтальных деформаций по простиранию, горизонтальных деформаций вкрест простирания горных пород и вертикальных деформаций для произвольных точек массива, что дает возможность получить оценку изменения полей проницаемости подработанного массива.

Перед тем, как перейти к расчетам, необходимо сделать ряд замечаний. Прежде всего, для адекватного описания накопления поврежденности массива горных пород в процессе подработки, следует учитывать тот факт, что породы различным образом реагируют на различные виды деформаций. Наиболее устойчивы горные породы к деформациям сжатия, в то время как прочность на растяжение составляет, как правило, не более 10 % от прочности на сжатие [4]. Предельные значения деформаций растяжения, для пород исследуемого района, при которых происходит разрушение и образование трещин колеблются в пределах 0,05 – 0,25 мм/м, а сжатия – 2 мм/м [5, 6]. Полученные значения (только по трем пластам) деформаций растяжения, превышают предельные значения в более чем 10 раз, а деформации сжатия соиз-

меримы с предельными. Вторым важным обстоятельством является именно необратимость состояния массива, претерпевшего предельное деформирование. То есть, если после прохождения цикла растяжение-сжатие, суммарные деформации близки к нулю, то это отнюдь не означает отсутствие поврежденности, поскольку трещины после появления не «залечиваются». С точки зрения оценки фильтрационных характеристик массива, в этом случае можно говорить лишь о некоторой временной их пассивности. Таким образом, исключительно важным является именно динамический анализ напряженно-деформированного состояния массива.

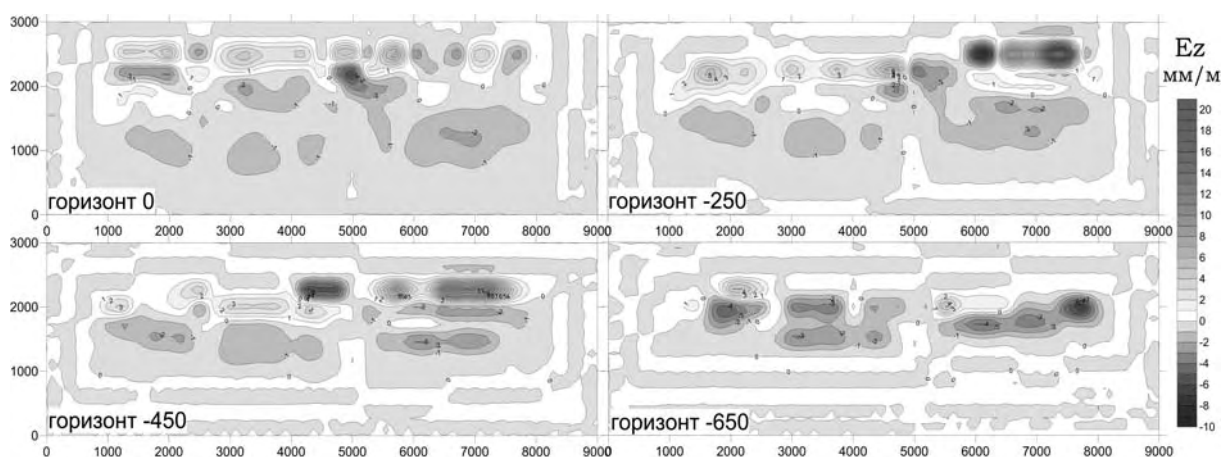


Рис. 8. Погоризонтное распределение суммарных вертикальных деформаций E_z от влияния горных работ по пластам k_5^2 , k_7 , k_7^1

При отработке каждой из лав различные области массива горных пород претерпевают знакопеременные деформации порядка $\pm 10^{-3}$. Если учитывать многократность и долго-временность воздействия очистных работ при которых суммарная мощность отработанных угольных пластов в некоторых точках достигает 8 – 10 м, то можно утверждать следующее. Многократная подработка в условиях ЦРД приводит к развитию множественных различным образом ориентированных систем техногенных трещин и, как следствие, образованию зон повышенной трещиноватости и, следовательно к существенному из-

менению проницаемости массива горных пород и его фильтрационных свойств.

Подчеркнем также, что изучаемая территория характеризуется сложным строением, где имеют место многочисленные тектонические разрывы продольного (Осевой, Продольный и др.) и широтного (Калининский, Байракский, Кондратьевский) простираний, сопровождающиеся развитой малоамплитудной нарушенностью, что обуславливает образование региональных и локальных зон повышенных напряжений и разгрузки.

Как отмечалось выше, анализ полученных результатов свидетельствует о деформациях массива, превышающих предельные в десятки раз. То есть имеют место необратимые деформации, которые не ограничиваются лишь раскрытием уже существующих трещин. В процессе необратимого деформирования наряду с раскрытием первоначальных трещин происходит рост и образование новых систем трещин.

Полученные данные позволяют оценить степень изменения проницаемости вмещающих пород в результате воздействия запредельных деформаций.

Вопрос изучения влияния необратимых деформаций на изменение проницаемости горных пород рассмотрен в работе [7]. Авторами введено понятие трещинной проницаемости, ограниченное лишь системами сообщающихся между собой пор и трещин или так называемыми транспортными каналами, включающими в себя обширный класс различного рода пустот. Указанные пустоты характеризуются большими по сравнению с размерами молекул фильтрующихся веществ величинами свободного просвета и обеспечивают значительный расход флюида. Под термином структуры порового пространства понимаются геометрические характеристики транспортных каналов (форма, густотность, ориентация, раскрытие и т.д.).

Авторами [7] получены определяющие соотношения, отражающие влияние необратимых деформаций на изменения проницаемости K^P деформируемых горных пород, которые в случае конечного числа трещин имеют вид (5).

$$\overline{\overline{K^P}} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^r L_i^2 (\varepsilon_{nn}^P)^3 (I - \overline{nn}), \quad (5)$$

где ε_{nn}^P – нормальная к плоскости трещины деформация;
 L_i – расстояние между стенками смежных трещин в i -той системе;

$\overline{\overline{K^P}}$ – тензор проницаемости;

\overline{I} – единичный тензор;

\overline{nn} – векторная диада.

Соотношение (5) может быть использовано для предварительных оценок изменений проницаемости с рядом оговорок относительно условий деформирования горных пород.

Будем считать, что условия сжатия и растяжения в пределах одного горизонта не влияют на величину остаточных изменений объема горных пород. Такое допущение вполне приемлемо для участков с большой степенью усреднения результатов по площади.

Ниже приведены результаты расчетов нормированной составляющей тензора проницаемости Kn по нормали к напластованию пород для горизонтов «0», «-250», «-450», «-650» (рис. 9), полученные в соответствии с (5) для двух ортогональных систем трещин.

Следует отметить, что на рисунке 9 необратимые деформации образуются в области от 0 до 1, а отрицательные значения следует отнести к области упругих деформаций.

Анализ полученных оценочных значений нормированной составляющей тензора проницаемости по нормали к напластованию горных пород позволяет сделать вывод о многократном увеличении пропускной способности вмещающих пород под действием запредельных деформаций, вызванных многократной подработкой. Максимальные значения Kn приурочены к зонам ведения горных работ на разных глубинах и варьируются в зависимости от их интенсивности (количества отработанных лав, их размера в плане).

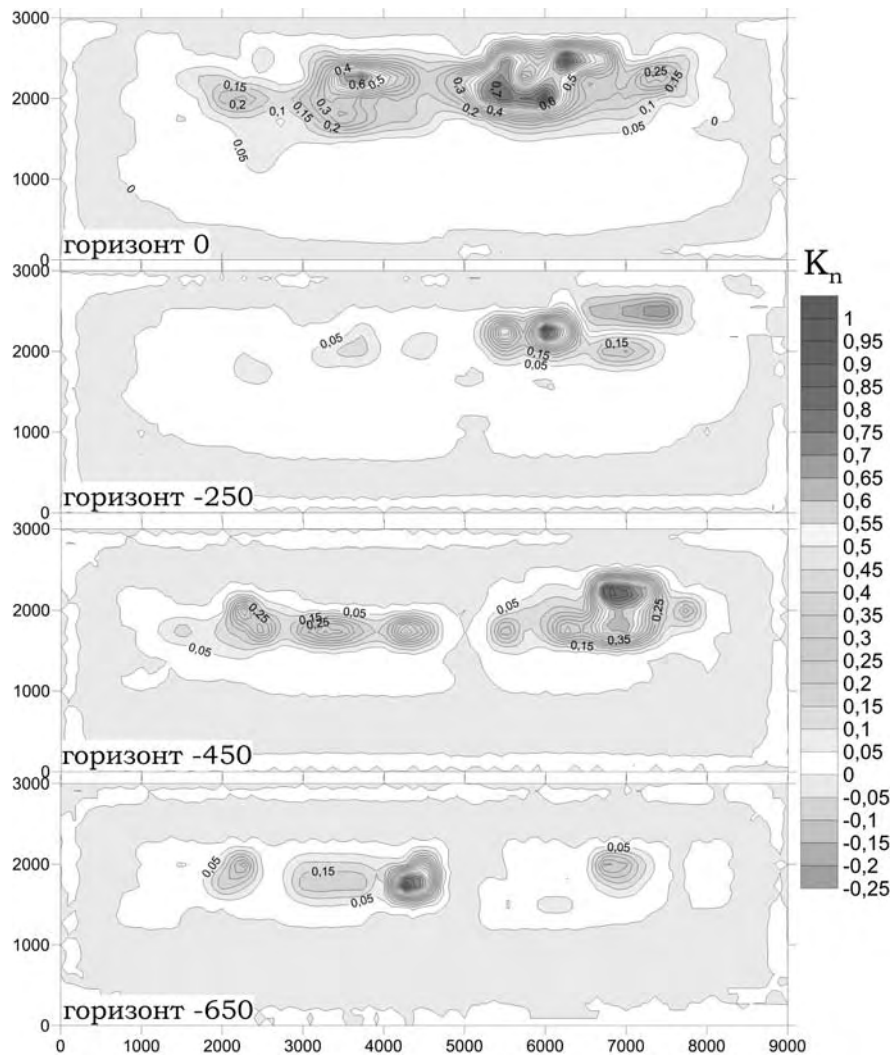


Рис. 9. Погоризонтное распределение значений нормированной составляющей тензора проницаемости K_n по нормали к напластованию пород

Необходимо отметить, что рассматриваемая модель, является укрупненной моделью происходящих в массиве процессов, т.к. при расчете использовались обобщенные данные о ведении горных работ и не рассматривалось влияние каждой отдельной лавы. Следовательно, изменения напряженно-деформированного состояния массива – образование зон сжатия и растяжения, а также их смена и, соответственно, трансформация в области повышенной трещиноватости и проницаемости, вероятно, происходила с меньшим пространственным шагом.

В работе [8] была выдвинута, и подтверждена обработкой экспериментальных данных распределений ВЗВ, гипотеза о

принципиальном изменении природной проницаемости массива и приобретении им квазиоднородных по фильтрационным параметрам свойств, вследствие многократной долгосрочной подработки, что подтверждается текущими исследованиями.

Установлено, что долгосрочная многократная подработка угольных пластов в условиях крутого падения приводит к образованию в массиве горных пород чередующихся пространственно-сопряженных зон сжатий и растяжений, замещающих друг друга в процессе ведения горных работ и генерирующих квазирегулярную сеть вертикально ориентированных техногенных коллекторов.

Анализ результатов расчета нормированной составляющей тензора проницаемости по нормали к напластованию пород K_n также свидетельствует о кардинальном изменении структуры вмещающих пород, произошедшем при необратимых деформациях с образованием новых систем трещин и локализацией необратимых деформаций в плоскостях сдвигов, что многократно увеличило проницаемость массива горных пород и его фильтрационные свойства.

Заметим, что приведенная модель является первым приближением действительного состояния массива. Поскольку в условиях крутого падения наличествует большое количество совместно разрабатываемых угольных пластов с весьма малым межпластовым расстоянием, что приводит к перекрытию зон влияния очистных работ и, как следствие, к более интенсивному изменению деформационных полей и составляющих тензора проницаемости.

По мнению авторов, разработанный инкрементальный подход, заключающийся в пошаговой временной оценке трансформаций полей напряжений, деформаций и проницаемости массива в процессе подработки, может служить базисом для решения задач прогноза развития контаминационных процессов в условиях многократной систематической подработки массивов горных пород.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Отчет о результатах разведки очагов загрязнения и созданию сети наблюдательных скважин на полях шахт Центрального района Донбасса: отчет о НИР (закл.) / Госуглепром Украины, ПО «Укруглегеология», ЦДГРЭ; рук. О. А. Куц; ГР 39-90; Инв. 743/Л. — Донецк, 1993. — 117 с.
2. ГСТУ 101.00159226.001-2003. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. Введ. 01.01.2004. — К., 2004. — 128 с.
3. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания : КД 12.01.01.201-98 : Утв. Минуглепромом Украины 25.06.98. — Донецк: УкрНИМИ, 1998. — 154 с.
4. Флоренский П. В., Милосердова Л. В., Балицкий В. П. Основы литологии : Учебное пособие. М., РГУ Нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003 — 105 с.
5. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород : Справочное пособие / М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер, Е. И. Ильницкая и др. М. : Недра, 1981. — 192 с.
6. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев, А. Б. Фадеев. М., Недра, 1979. — 269 с.
7. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов : Справочное пособие / И. М. Петухов, А. М. Линьков, В. С. Сидоров и др. — М. : Недра, 1992. — 256 с.
8. Дрибан В. А. Изучение количественных и пространственных параметров распределения вредных загрязняющих веществ в техногенно нарушенном массиве горных пород сложного строения / Дрибан В. А., Дуброва Н. А. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. — Донецьк : УкрНДМІ НАНУ, 2012. — № 11. — С. 306—318.