

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА НА ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В регионах, сложенных скальными горными породами, вблизи поверхности земли практически повсеместно развита зона региональной приповерхностной трещиноватости. Фильтрационные свойства и структура этой зоны определяют гидрогеологическое значение приповерхностного водоносного горизонта. Давно замечено, что мощность зоны региональной трещиноватости увеличивается в речных долинах и уменьшается на водоразделах. Кроме того, фильтрационные свойства пород под дном и вблизи бортов долин значительно превышают проницаемость тех же пород, слагающих возвышенности и водораздельные пространства.

Данная закономерность неоднократно обсуждалась в научных публикациях. Указанная связь фильтрационной структуры водоносного горизонта и рельефа местности очень сильно противоречила представлениям об экзогенном генезисе зоны региональной приповерхностной трещиноватости, господствовавшим в предыдущие годы (смотри предыдущую статью в данном сборнике). Поэтому исследователи объясняли рассматриваемые закономерности разгрузкой напряжений, существовавших в скальных массивах, или увязывали наличие под долинами водоносных зон с тектоническими нарушениями [4].

Результаты гидрогеологических исследований, выполненных в последние годы в районах глубоких карьеров (Высокогорское и Гороблагодатское месторождения), позволяют утверждать, что вблизи техногенных выемок формируются зоны повышенной трещиноватости, фильтрационная структура которых значительно отличается от исходного состояния скальных массивов. Глубина развития активной трещиноватости, например, увеличилась до тысячи метров. Мощность зоны приповерхностной трещиноватости в естественных условиях составляет 300 – 400 м. Эти данные заставляют считать, что геологическая среда очень активно реагирует на изменения рельефа поверхности земли. Кроме того, можно предполагать, что реакция геологической среды на естественные и техногенные изменения формы рельефа имеет одинаковый механизм [7].

В настоящее время большинство специалистов, связанных с исследованиями геологической среды, признает, что породные массивы горноскладчатых регионов находятся под воздействием тектонических напряжений. Максимальное главное напряжение имеет субгоризонтальную ориентировку и в несколько раз превышает вертикальное напряжение от веса столба горных пород. Массивы горных пород чаще всего находятся в предельно напряженном состоянии, т.е. максимальные значения напряжений ограничиваются прочностными характеристиками породных массивов. Состояние предельного равновесия поддерживается разгрузкой напряжений при развитии в массивах процессов хрупкой и хрупкопластичной деформации [3]. В результате деформаций образуются тектонические структуры разрушения и предразрушения.

Массовые трещины предразрушения развиваются в приповерхностной зоне хрупкой деформации. Мощность этой зоны в скальных массивах составляет 300÷400 м. Сеть взаимосвязанных открытых трещин предразрушения определяет существование вблизи земной поверхности водоносного комплекса приповерхностной трещиноватости. Геомеханические закономерности развития процессов хрупкой деформации определяют формирование вертикальной трещинной зональности и, соответственно, фильтрационной стратификации скальных массивов [6].

В самой верхней части скальных массивов, средней мощностью около 50 м, развивается запредельная деформация, массив горных пород теряет сплошность и разделяется на отдельные блоки. В этой части скальных массивов происходит полная разгрузка тектонических напряжений и устанавливается литостатическое напряженное состояние. Преобладание вертикальных напряжений способствует проникновению поверхностных вод и развитию в этой части разреза процессов физико-химического выветривания. Активное проявление процессов выветривания является одной из причин широкого применения термина “экзогенная трещиноватость”.

При анализе структуры скальных массивов следует учитывать наличие вертикальной и плановой зональности, которая возникает и сохраняется вследствие постоянного воздействия тектонических напряжений. Необходимо различать естественное состояние, и соответственно

естественные тектонические структуры скальных массивов, и техногенные тектонические структуры, возникающие как реакция геологической среды на различные виды техногенных воздействий. Геологическая среда, находясь в предельно напряжённом состоянии (состоянии предельного равновесия), очень чутко реагирует на воздействия, изменяющие равновесное состояние. Активная реакция геологической среды на техногенное воздействие приводит к формированию техногенных тектонических структур [7].

При создании крупных котлованов и отработке больших карьеров геомеханическое равновесие геологической среды нарушается, в первую очередь, за счет изъятия больших масс горных пород на достаточно больших площадях. Горные работы выполняют роль техногенной денудации. Геологическая среда восстанавливает геомеханическое равновесие путем развития деформации на глубину, значение которой пропорционально величине денудации, происходящей на значительной площади, и принципиально не отличается от процесса естественной денудации. Соответственно структура зоны хрупкой деформации, которая формируется при техногенной денудации, не должна иметь существенных отличий от характеристик естественной зоны хрупкой деформации, которая развивается вблизи речных долин.

Кроме техногенной денудации, большое значение имеет нарушение поля напряжений за счет изменения вблизи горных выработок структуры поля напряжений. Нарушение целостности массива горных пород инициирует развитие процессов техногенной разгрузки напряжений, при этом может изменяться ориентировка и взаимная роль главных напряжений. Изменение пространственной ориентировки осей главных напряжений должно вызывать перестройку геодинамической структуры верхней части земной коры. Изменения геодинамической структуры могут иметь различную глубинность и включать нарушение естественной геомеханической зональности и геодинамической этажности.

Геомеханическая модель, описывающая состояние скального массива, разработана для районов с относительно спокойным рельефом. В этих районах структура поля напряжений имеет простой характер. Линии равных напряжений параллельны поверхности земли. Вблизи элементов рельефа, которые существенно нарушают горизонтальный характер поверхности, должна происходить резкая деформация поля напряжений. Сложную структуру поля напряжений очень непросто описать с помощью аналитических зависимостей. Поэтому анализ и описание полей напряжений, отличающихся сложной структурой, можно выполнять, главным образом, с помощью математического моделирования.

Для решения изложенной задачи используется программный комплекс FEM (автор О.В.Зотеев). Данный программный комплекс предназначен для решения задач теорий упругости и пластичности методом конечных элементов и состоит из четырех крупных модулей [1, 2]. Модуль FEM1 предназначен для дискретизации области деформирования; FEM2 – для введения начальных упругих и прочностных свойств элементов, а также граничных и начальных условий для решаемой задачи; FEM3 – для решения собственно задачи, состоящего в расчете смещений узлов и деформации элементов; FEM4 – модуль оформления результатов расчетов.

Для каждого выделенного участка рассчитываемого пространства записываются упругие и прочностные характеристики среды: модуль деформации (МПа), коэффициент Пуассона, плотность среды ($\tau/\text{м}^3$), начальный угол внутреннего трения (град), начальный угол дилатансии (град.), начальная прочность на сжатие (МПа), начальное сцепление (МПа). Также вносятся остаточные прочностные характеристики: углы трения и дилатансии, прочность на сжатие, сцепление, минимально возможный модуль деформации этой среды и число (код), обозначающее этот тип сред. Всего 13 параметров.

Характеристики напряжённого состояния массива рассчитывались на основании уравнений, описывающих изменение значений главных напряжений по глубине [5]:

$$\sigma_x = R_C/2 + \gamma H/2\lambda, \quad (1)$$

$$\sigma_z = \gamma H - \lambda \sigma_x, \quad (2)$$

$$\lambda = \text{tg}^2(\pi/4 - \varphi/2), \quad (3)$$

где σ_x – главное максимальное (горизонтальное) напряжение; σ_z – главное минимальное (вертикальное в естественных условиях) напряжение; R_C – предел прочности на сжатие; γ – удельный

вес горных пород; H – глубина от поверхности земли; λ – коэффициент бокового отпора; φ – угол внутреннего трения.

При решении задачи были приняты параметры среды, которые можно считать характерными для скальных массивов: модуль деформации – 10000 МПа, коэффициент Пуассона – 0.3, плотность среды – 2.7 т/м³, начальный угол внутреннего трения – 35 град., начальный угол дилатансии – 0 град., начальная прочность на сжатие – 20 МПа, начальное сцепление – 5 МПа. Остаточные прочностные характеристики отличаются по следующим показателям: сцепление – 0.5 МПа, минимально возможный модуль деформации этой среды – 100 МПа.

Понижения рельефа рассматривались с различными линейными размерами. Глубина долин (карьеров) задавалась 50, 100, 200, 300 м, ширина по поверхности земли принималась пропорционально глубине, от 150 до 900 м. Возвышенности задавались с аналогичными размерами.

Анализ результатов моделирования возвышенностей показал, что положительные элементы рельефа находятся выше зоны воздействия максимальных горизонтальных (сжимающих) напряжений. В связи с отсутствием значительных напряжений в этих элементах рельефа не развиваются существенные деформации. Данное обстоятельство объясняет, почему горные породы, слагающие возвышенные элементы рельефа, отличаются слабой трещиноватостью и низкими фильтрационными свойствами.

Результаты моделирования отрицательных элементов рельефа (долин, карьеров) требуют детального рассмотрения. Процесс решения задачи завершается построением разрезов, на которых отражается распределение значений главных нормальных и касательных напряжений, а также значений относительных деформаций. Программа позволяет построить графики, показывающие изменение любого показателя по глубине на выбранной вертикали. В качестве примера рассмотрим результаты моделирования выемки глубиной 200 м.

Поля главных нормальных напряжений вблизи выемки претерпевают значительные изменения. Поле максимальных сжимающих напряжений деформируется на глубину примерно 800 м (рис.1). Под дном выемки значения сжимающих напряжений значительно возрастают и по своей величине существенно превосходят значение предела прочности на сжатие. Следует полагать, что под дном выемки на значительную глубину, должна развиваться зона разгрузки.

Поле минимальных напряжений изменяется вблизи выемки очень значительно (рис.2). Вне зоны влияния выемки линии равных напряжений расположены горизонтально, с одинаковым шагом. В спокойных условиях, вблизи поверхности земли до глубины примерно 250 м, эти напряжения являются растягивающими, а глубже – сжимающими. Вблизи выемки линии равных напряжений резко деформируются и сгущаются. В этих зонах следует ожидать развитие в горных породах значительных деформаций. Существенные изменения поля минимальных напряжений развиваются на глубину более 1200 м.

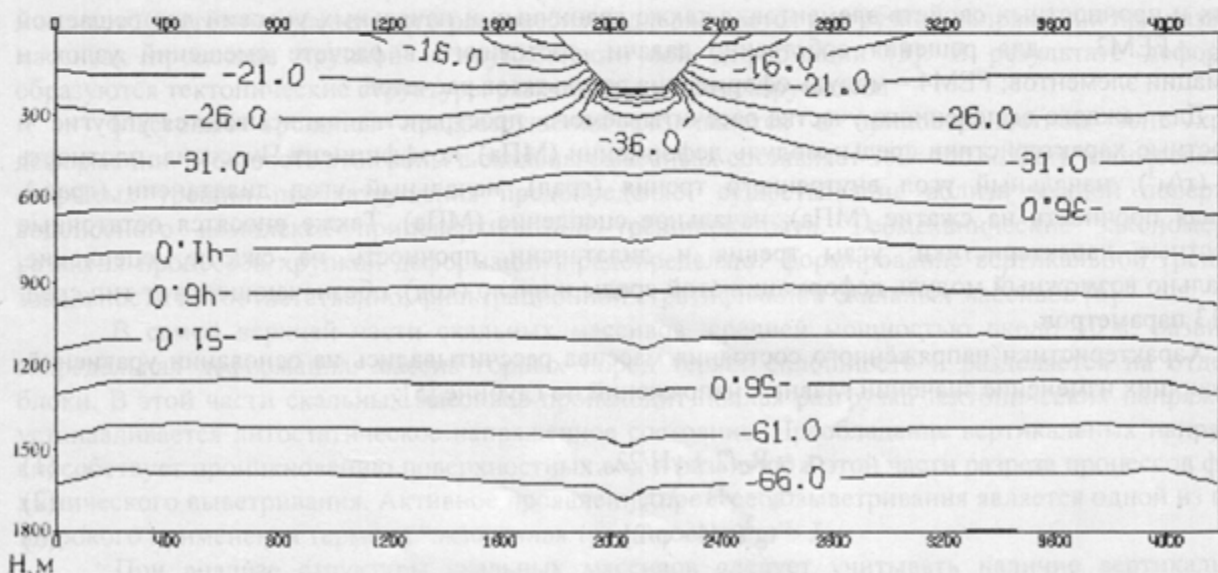


Рис. 1. Изменение поля главных максимальных напряжений в зоне влияния выемки глубиной 200 м

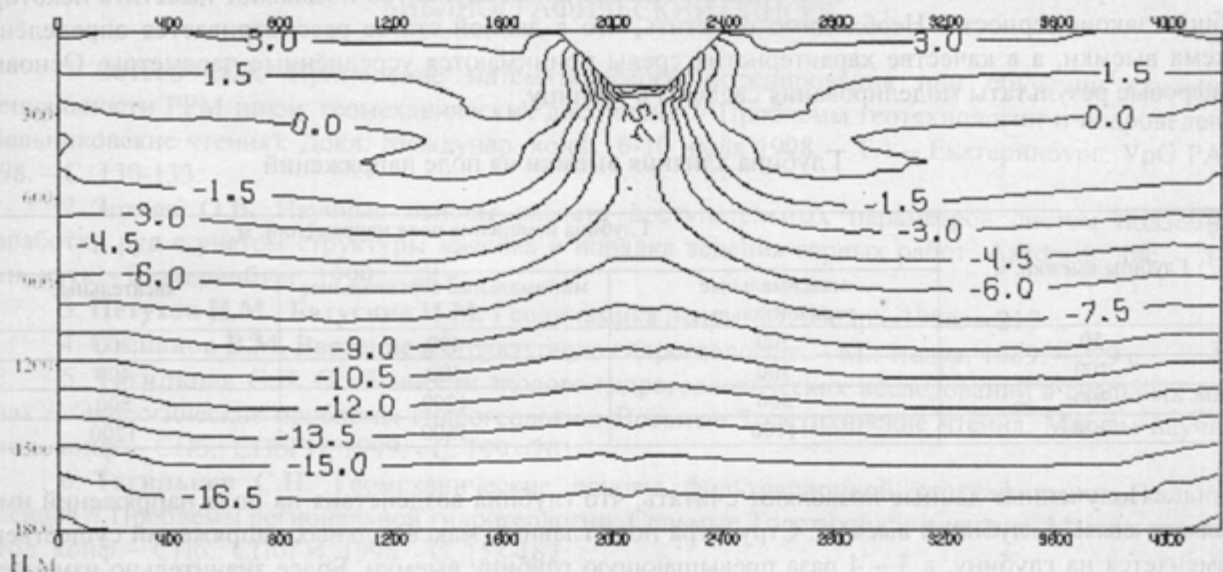


Рис. 2. Изменение поля главных максимальных напряжений в зоне влияния выемки глубиной 200 м

Основным показателем, позволяющим судить о глубине развития существенных деформаций, связанных с влиянием выемки, является изменение поля касательных напряжений. Информативность поля касательных напряжений связана с тем, что именно они, главным образом, определяют развитие трещиноватости. Кроме того, вне зоны влияния выемок значения касательных напряжений изменяются относительно мало. Поэтому наиболее наглядно изменение поля касательных напряжений с глубиной отражается на графиках, построенных по вертикали, проходящей по оси выемки.

В случае выемки глубиной 200 м значительное увеличение касательных напряжений прослеживается до глубины примерно 800 м (рис.3,а). Под выемкой глубиной 50 м увеличение касательных напряжений выявляется до глубины около 200 м (рис.3,б).

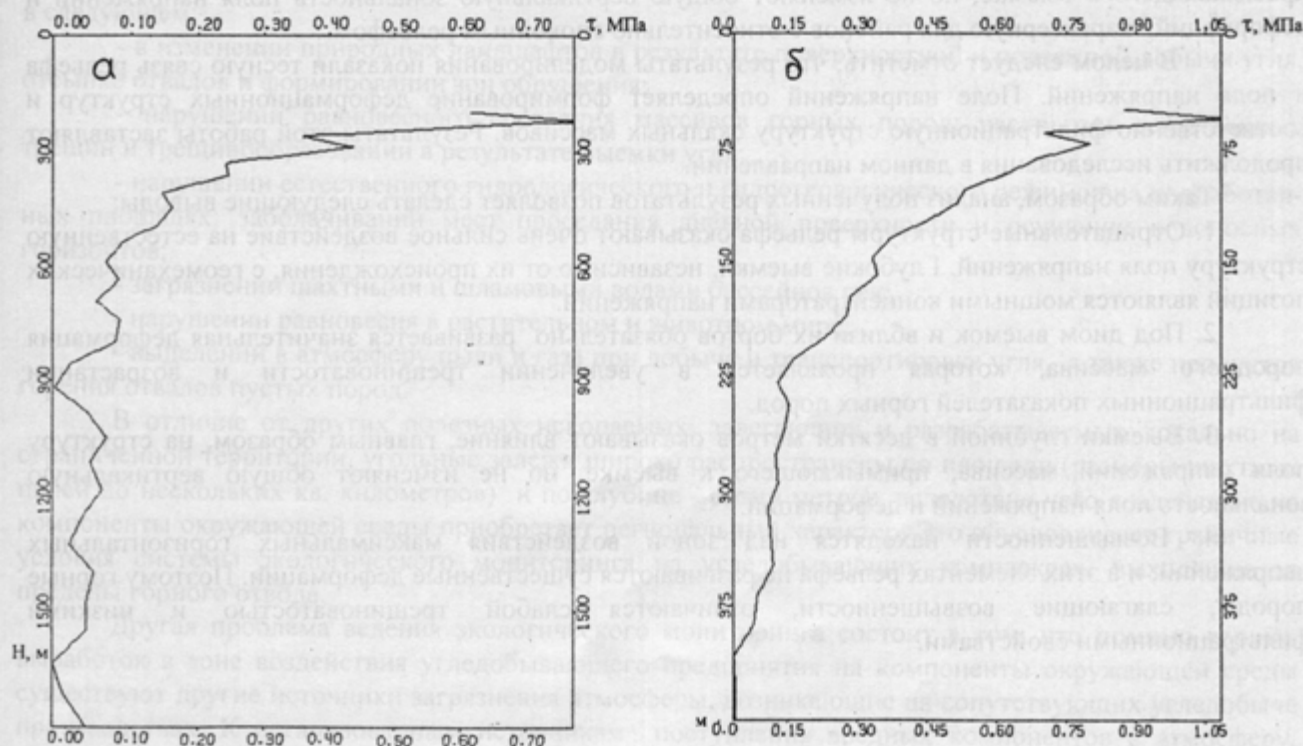


Рис. 3. Изменение касательных напряжений под дном выемки глубиной 200 м (а) и 50 м (б)

Результаты анализа всех выполненных модельных вариантов позволяют наметить некоторые общие закономерности. Необходимо отметить, что в данной статье рассматривается определённая схема выемки, а в качестве характеристик среды принимаются усреднённые параметры. Основные цифровые результаты моделирования сведены в таблицу.

Глубина влияния выемки на поле напряжений

Глубина выемки, м	Глубина изменения поля напряжений, м		
	максимальные горизонтальные	минимальные вертикальные	касательные
50	200	400	200
100	300	500	400
200	800	1200	800
300	1100	1500	1200

Полученные данные позволяют считать, что глубина воздействия на поле напряжений имеет прямую связь с глубиной выемки. Структура поля главных максимальных напряжений существенно изменяется на глубину, в 3 – 4 раза превышающую глубину выемки. Более значительно изменяется структура поля вертикальных напряжений. Глубина воздействия превышает глубину выемки в 5 – 8 раз. Значительное изменение поля касательных напряжений прослеживается на глубину, превышающую глубину выемки в 4 раза.

Приведённые выше результаты показывают, что отрицательные структуры рельефа оказывают очень сильное воздействие на естественную структуру поля напряжений. Глубокие выемки, независимо от их происхождения, с геомеханических позиций являются мощными концентраторами напряжений. Под дном выемок и вблизи их бортов обязательно развивается значительная деформация породного массива, которая проявляется в увеличении трещиноватости и возрастании фильтрационных показателей горных пород.

Следует отметить, что воздействие выемок глубиной до 100 м практически не превышает мощности зоны приповерхностной трещиноватости (мощность зоны приповерхностной трещиноватости обычно не превышает 400 м). Можно полагать, что выемки глубиной в десятки метров оказывают влияние, главным образом, на структуру поля напряжений массива, примыкающего к выемке, но не изменяют общую вертикальную зональность поля напряжений и деформаций, характерную для районов с относительно спокойным рельефом.

В целом следует отметить, что результаты моделирования показали тесную связь рельефа и поля напряжений. Поле напряжений определяет формирование деформационных структур и соответственно фильтрационную структуру скальных массивов. Результаты этой работы заставляют продолжить исследования в данном направлении.

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Отрицательные структуры рельефа оказывают очень сильное воздействие на естественную структуру поля напряжений. Глубокие выемки, независимо от их происхождения, с геомеханических позиций являются мощными концентраторами напряжений.

2. Под дном выемок и вблизи их бортов обязательно развивается значительная деформация породного массива, которая проявляется в увеличении трещиноватости и возрастании фильтрационных показателей горных пород.

3. Выемки глубиной в десятки метров оказывают влияние, главным образом, на структуру поля напряжений массива, примыкающего к выемке, но не изменяют общую вертикальную зональность поля напряжений и деформаций.

4. Возвышенности находятся над зоной воздействия максимальных горизонтальных напряжений, и в этих элементах рельефа не развиваются существенные деформации. Поэтому горные породы, слагающие возвышенности, отличаются слабой трещиноватостью и низкими фильтрационными свойствами.

1. **Зотеев О.В.** Применение математического моделирования при обучении студентов специальности РРМ циклу геомеханических дисциплин // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): Докл. Междунар. конф., 6-10 июля 1998. – Т.1 – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – С. 130-133.
2. **Зотеев О.В.** Научные основы расчета поступательных параметров систем подземной разработки руд с учетом структуры массива и порядка ведения горных работ: Автореф. дис... д-ра техн. наук. - Екатеринбург, 1999. – 44 с.
3. **Петухов И.М., Батугина И.М.** Геодинамика недр. – М.: Недра, 1996. – 217 с.
4. **Степанов В.М.** Введение в структурную гидрогеологию. – М.: Недра, 1989. – 229 с.
5. **Тагильцев С.Н.** Особенности эколого-гидрогеологических исследований в скальных массивах // Экологические проблемы гидрогеологии: Восьмые Толстихинские чтения. Мат-лы научно-метод. конф. – СПб.: СПбГИ, 1999. - С. 199–201.
6. **Тагильцев С.Н.** Геомеханические основы фильтрационной стратификации скальных массивов // Проблемы региональной гидрогеологии: Седьмые Толстихинские чтения. Мат-лы научно-метод. конф. – СПб.: СПбГИ, 1998. - С. 158-162.
7. **Тагильцев С.Н.** Пределы линейаризации закона Кулона – Мора при расчетах НДС массивов горных пород // Мат-лы X межотрасл. координац. сов. по проблемам геодинамич. безопасности. - Екатеринбург: Изд-во УГГА, 1997. – С. 213 – 217.

УДК 624.131

О. М. Гуман, И. Г. Петрова, С. Э. Лапин

ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВБЛИЗИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ (на примере шахты “Центральная” Копейского района Челябинского угольного бассейна)

Наибольшее влияние на изменение состояния компонентов окружающей среды оказывает горнодобывающий комплекс, в том числе и угледобывающие предприятия. Это влияние проявляется в следующем:

- в изменении природных ландшафтов в результате поверхностной и подземной добычи угля, отсыпке отвалов и формировании зон обрушения;
- нарушении равновесного состояния массивов горных пород: раскрытии естественных трещин и трещинообразовании в результате выемки угля;
- нарушении естественного гидрологического и гидрогеологического режимов на подработанных площадях: заболачивании мест проседания дневной поверхности и осушении водоносных горизонтов;
- загрязнении шахтными и шламовыми водами бассейнов рек;
- нарушении равновесия в растительном и животном мире;
- выделении в атмосферу пыли и газа при добыче и транспортировке угля, а также продуктов горения отвалов пустых пород.

В отличие от других полезных ископаемых, залегающих и разрабатываемых локально на ограниченной территории, угольные залежи широко распространены по площади (размеры шахтных полей до нескольких кв. километров) и по глубине - сотни метров, вследствие чего воздействие на компоненты окружающей среды приобретает региональный характер. Это обуславливает граничные условия системы экологического мониторинга на угледобывающих комплексах, выходящие за пределы горного отвода.

Другая проблема ведения экологического мониторинга состоит в том, что помимо горных выработок в зоне воздействия угледобывающего предприятия на компоненты окружающей среды существуют другие источники загрязнения атмосферы, возникающие на сопутствующих угледобыче производствах. К организованным источникам поступления вредных компонентов в атмосферу,