

**Механизмы разрушения горных пород вокруг подземных выработок
и в очаговых зонах катастрофических событий**

УДК 551.243:553.94(477.5)

В.А. Баранов

БАРАНОВ ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ – доктор геологических наук, заведующий лабораторией (Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины), ул. Симферопольская, 2а, г. Днепропетровск, Украина, 49005. E-mail: baranov-va@rambler.ru

Анизотропные зоны в напряженном массиве

В последние десятилетия существенно увеличилась глубина горных работ (до 2, 3 и даже 4 км), глубина бурения скважин достигла 10 и более километров. С каждым шагом углубления горных работ изменяется характер проявлений горного давления: наряду с обрушением и сдвижением пород учащаются их стреляние, шелушение, горные удары, внезапные выбросы, раздавливание целиков, выдавливание конструктивных элементов выработок и т.д. Данные о распределении напряженного состояния в горных породах имеют три основных варианта. Превалирующее вертикальное напряжение; превалирующее горизонтальное напряжение и примерный паритет горизонтального и вертикального напряжений. Основные причины и условия возникновения аномальных горизонтальных и вертикальных напряжений рассмотрены в данной публикации.

Представление о напряжениях массива горных пород, обуславливаемых гравитацией и боковым распором, является верным лишь в отдельных случаях. В реальных условиях напряженное состояние формируется не только гравитационными силами, но и тектоническими процессами, вызывающими локальные концентрации напряжений или разгрузку, температурными и химическими изменениями, связанными также с историей образования и нагружения пород, их выветриванием. Определенную роль играют релаксация напряжений, вероятное расширение морского дна, дрейф континентов под действием конвекционных процессов и другие причины.

В целом отмечается закономерное увеличение плотности и напряженного состояния пород с глубиной. Но результаты измерений показывают, что на некоторых участках, на глубинах нескольких сот метров, горизонтальные напряжения существенно превышают литостатические нагрузки, и такие сжимающие усилия трудно объяснить только весом вышележащей толщи горных пород. Фактические измерения напряженного состояния в разных типах горных пород на глубинах до нескольких тысяч метров показали существенные изменения горизонтальных напряжений от 0 до 150–200 МПа. Интересным представляются факты приуроченности избыточных напряжений к кристаллическим породам фундамента, тогда как для осадочных пород и зон гипергенеза значительные горизонтальные напряжения не характерны.

Ключевые слова: анизотропные зоны, формирование, массив горных пород.

Ухудшение горно-геологических условий отработки полезных ископаемых с глубиной факт давно известный [4, 7, 8, 12, 14 и др.]. Проблема прогнозирования изменения этих условий, управления горным давлением и учета существующих закономерностей для последующей оптимизации проектирования горных выработок и их крепления является актуальной как в

научном, так и в прикладном плане. В Институте геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины исследования указанного направления выполняются с 60-х годов прошлого века. Следует отметить многофакторность таких исследований, поскольку горно-геологические условия работ в осадочных и кристаллических породах существенно отличаются.

К настоящему времени в различных точках земной коры замерены фактические напряжения в различных типах горных пород, в основном до глубины 5–6 км. При этом величина сжимающих горизонтальных напряжений изменялась в широком диапазоне от 0 до 170 МПа. Эмпирические замеры показали, что уже на глубине 100–200 м сжимающие горизонтальные напряжения зачастую превышают величину литостатического давления, рассчитанного по весу вышележащей толщи пород. Избыточные напряжения порядка 10–45 МПа обнаружены главным образом в кристаллическом фундаменте и в складчатых поясах разного возраста. В осадочных породах и в сильно трещиноватых кристаллических массивах повышенные горизонтальные напряжения на глубинах до 500–700 м незначительны или отсутствуют. Статистическая обработка результатов замеров показывает близкий к линейному характер зависимости напряжений от глубины.

По данным экспериментальных измерений поля напряжений в рудниках Хибинского массива Кольского полуострова, выполненных под руководством И.А. Турчанинова, Г.А. Маркова и других исследований, тектоническая составляющая напряжений до глубины 600 м изменялась от 12 до 65 МПа и превышала в 5–10, а в некоторых случаях – в 20 раз гравитационное (вертикальное) напряжение γH .

Изменение напряженного состояния горных пород до глубины 700 м на некоторых рудниках Урала показало, что поле упругих напряжений неоднородно и изменяется по величине от нескольких до 50 МПа. При этом вкрест простирания уральских структур, как правило, действуют сжимающие напряжения, а в направлении простирания наблюдаются как сжатие, так и растяжение пород. Выяснение ориентировки осей главных напряжений позволило объяснить случаи аномального проявления горного давления в выработках ряда рудников. Так, с сильным сжатием пород в меридиональном направлении, вероятно, связаны наблюдаемые в шахтах Кочкарского рудника стреляние и шелушение пород в кровле выработок широтной ориентации, а также срезывание зерна плагиогранитов при бурении скважин в сильно напряженных участках массива.

Экспериментальные исследования напряженного состояния массива горных пород на Хайдарканском, Терексайском, Кадамджайском и Курусайском месторождениях Средней Азии показали неоднородность исходного поля напряжений, изменяющегося по величине и направлению. Значения вертикальных и горизонтальных напряжений на некоторых участках в несколько раз больше веса вышележащих пород.

Избыточные напряжения зарегистрированы и на других рудниках Средней Азии, что свидетельствует о действии значительных тектонических сил в данном районе. Зарубежные исследователи также приводят ряд зависимостей изменения напряжений с глубиной для условий Скандинавского массива, территории Северной Америки и других регионов. Полученные зависимости различаются по разным регионам, но главный результат заключается в том, что избыточные горизонтальные напряжения в этих массивах составляют 15–34 МПа, а в отдельных случаях и 59–78 МПа.

На базе большого количества данных по измерениям напряжений установлена зависимость вертикальных и горизонтальных напряжений в земной коре от глубины в различных частях мира [15]. Вертикальные напряжения, увеличиваясь пропорционально глубине, мало различаются между собой в различных частях планеты и характеризуются прямолинейными графиками, выходящими практически из начала координат.

Горизонтальные напряжения в зависимости от глубины в различных местах Земли неодинаковы. К примеру, на территории «Канадского щита» наблюдается превышение горизонтальных напряжений над вертикальными уже возле поверхности.

Практическую пользу следует ожидать от проведения соответствующих исследований на территории любой страны, особенно в районах, перспективных по разработке полезных ископаемых. Составление карт, характеризующих величину и направление главных напряжений и

их связь с тектоникой района, будет способствовать созданию эффективных вариантов систем разработки, определению оптимальных параметров конструктивных элементов, выбору порядка выемки полезных ископаемых, безопасному ведению горных работ. В настоящее время разные авторы и организации создают частные и общие методики получения информации о массиве, пытаются разрабатывать 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.

Поскольку мне в большей степени приходилось изучать осадочные породы, ниже будут представлены результаты исследований формирования зон изотропных и анизотропных полей напряжений под действием литостатических и тектонических факторов. Известно [7, 12], что в середине 1950-х годов к явлениям выбросоопасности углей в Донском угольном бассейне добавилось явление выбросоопасности вмещающих карбоновые угли песчаников. Если учесть газодинамические явления соли в Соликамске, можно отметить, что три основных типа пород – угли, песчаники и соль – при благоприятных условиях могут продуцировать выбросы. Общим для этих пород является присутствие значительных объемов газа. Без газа выбросы в указанных породах происходить не могут.

В 1960–1980-х годах был выполнен значительный объем исследований газодинамических явлений в песчаниках, разработаны методики прогноза и предотвращения этого явления, но некоторые результаты, полученные тогда, нашли свое объяснение только в последние годы.

Явление деления керна на диски при бурении скважин в выработках глубоких шахт и рудников, в частности в кварцитах на рудниках ЮАР, на соляных шахтах Германии, было установлено в 1950-х годах, и высказано предположение, что оно связано с повышенным горным давлением. При проходке выработок в зонах деления керна на диски наблюдались выбросы пород и газа. Это позволило ученым Фрайбергской горной академии использовать дискообразование для прогнозирования выбросов. Метод под названием «Фрайбергский прогноз по керну» получил распространение на ряде калийных рудников Германии [6].

В начале 1960-х годов для изучения природы выбросоопасности пород и существующих в горном массиве напряжений специалисты Киевского политехнического института бурили опережающие скважины на шахте им. К.И. Печенкова (ПО «Макеевуголь»), где происходили газодинамические явления (кern делился на выпукло-вогнутые диски и цилиндры разной длины). Установили, что напряжения в зонах дискообразования в несколько раз выше литостатического. Предполагалось, что образование дисков – следствие повышенных напряжений, связанных с выбросами песчаников. На основании результатов исследований был разработан метод прогноза выбросоопасности песчаника по характеру деления керна скважин на выпукло-вогнутые диски, который применяется в качестве текущего прогноза на шахтах [9, 10].

В настоящее время деление керна на диски широко используется в практике прогноза выбросоопасности песчаников, однако не во всех случаях выбросы пород происходят в тех местах, где наблюдалось деление; полного соответствия мест выбросов и дискообразования не наблюдается [6]. Это подтверждено анализом опережающего бурения при проведении полевых выработок на шахтах Донбасса. На некоторых шахтах («Южнодонбасская» № 3 и «Красноармейская-Западная» № 1, глубина залегания углевмещающих пород более 600–700 м), где зарегистрировано деление керна опережающих скважин на диски, выбросы пород и газа не отмечены.

Установлен ряд особенностей, взаимосвязанных с напряженным состоянием пород, дискообразованием и выбросоопасностью. Так, при бурении скважины строго в одном прослое песчаника kern может делиться на диски не по всей ее длине, а только на отдельных участках или по всей длине скважины [9].

Исследования, выполненные в конце 1960-х годов, позволяют утверждать, что чешуеобразные пластины во всех случаях оконтуривают полость выброса, а песчаник там разбит на пластины или «пятаки», причем в разных песчаниках и местах выбросов эти «пятаки» имеют различные размеры.

Плоскости дисков при любом направлении бурения в одном и том же забое параллельны забою скважины [10].

Исследования зависимости образования дисков от напряжений выполнялись и в лабораторных условиях. Экспериментально доказано разрушение пород в момент снятия нагрузок при испытаниях в условиях трехосного сжатия. При извлечении неразгруженные образцы цилиндрической формы иногда разрушались на пластины с плоскостями, нормальными оси образца [3].

Подобные исследования выполнялись с известняком, мрамором, песчаником, гранитом, мелом, туфом. С помощью установки объемного сжатия обнаружено, что практически любая порода, даже с прочностью гранита, может делиться на диски при напряжениях, сопоставимых с таковыми в глубоких шахтах [6]. Установлена линейная зависимость между осевыми и радиальными напряжениями, необходимыми для дискообразования, согласно которой при повышении радиальных напряжений интенсивность дискообразования возрастает, а при увеличении осевых, наоборот, падает. Кроме того, впервые эмпирическим путем доказано получение дисков при равенстве осевых и радиальных напряжений, а также то, что для любой породы характерны минимальные и максимальные радиальные напряжения, при определенных осевых. Таким образом, диски керна скважин могут образовываться как в равнокомпонентном поле напряжений, так и в не равнокомпонентном. Для образования дисков **при превалирующем осевом давлении нужна существенно меньшая степень напряжений – очень важный вывод, полученный экспериментально.** Исследования ранее выполнялись без разделения радиальных напряжений на составляющие σ_x и σ_y , а при бурении вертикальных скважин с поверхности земли радиальные напряжения априори называются горизонтальными.

Результаты натуральных исследований дискообразования на шахтах свидетельствуют, что составляющие радиальных напряжений не всегда бывают равны. Так, при бурении опережающих скважин в подготовительных выработках шахты «Красноармейская-Западная» № 1 на гор. 593 м по направлению продвижения забоя в том же прослое песчаника в одном случае керна делился на диски, в другом нет. Отмечена следующая закономерность. Дискообразование происходило в кернах скважин, буримых горизонтально субширотно, азимуты осей скважин 30–60°, при бурении субмеридионально дискообразование не наблюдалось.

Диски в кернах скважин образовывались как в определенных интервалах, так и на всю длину скважин, до 30 и более метров. Согласно экспериментальным и аналитическим исследованиям [7–12] условие деления керна на выпукло-вогнутые диски для случая бурения вертикальных скважин выражается зависимостью

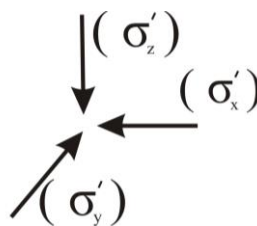
$$\sigma_z < (\sigma_x + \sigma_y),$$

где σ_z – осевое напряжение; σ_x и σ_y – составляющие радиального напряжения, они по данным [7] равновелики.

Сопоставление полученной зависимости с конкретными случаями в шахтных условиях дает два ее варианта.

1. При бурении горизонтальных скважин в подготовительных выработках субширотно по направлению падения пород с дискообразованием (условно по оси y):

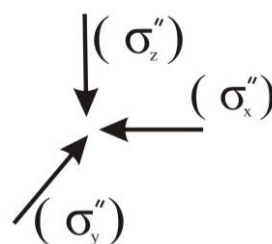
$$\begin{aligned} \sigma'_y &\cong \sigma_z \\ \sigma'_x &\cong \sigma_x(\sigma_y) \\ \sigma'_z &\cong \sigma_y(\sigma_x) \end{aligned}$$



где σ'_y – осевое напряжение; σ'_x и σ'_z – составляющие радиального напряжения.

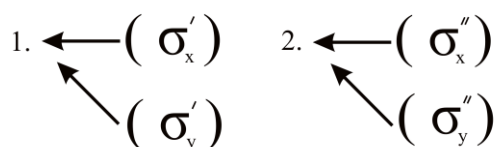
2. При бурении горизонтальных скважин по простиранию пород субмеридионально без дискообразования (условно по оси x):

$$\begin{aligned}\sigma''_x &\cong \sigma_z \\ \sigma''_y &\cong \sigma_x(\sigma_y) \\ \sigma''_z &\cong \sigma_y(\sigma_x)\end{aligned}$$



где σ''_x – осевое напряжение; σ''_y и σ''_z – составляющие радиального напряжения.

Поскольку в обоих случаях бурения горизонтальных скважин в забое вертикальная составляющая одна и та же ($\sigma'_z = \sigma''_z$), можно рассматривать распределение напряжений в плоскости:



Дискообразование происходило только в первом случае и, согласно экспериментально полученной зависимости, приведенной выше, должно соблюдаться условие $\sigma'_y > \sigma'_x$, показывающее, что осевое напряжение больше радиального. Тогда для второго случая отсутствие дискообразования легко объяснимо: $\sigma''_x < \sigma''_y$, что совпадает с экспериментальными данными [7], а также указывает на то, что субширотные напряжения в горном массиве на участке шахты больше, чем субмеридиональные напряжения.

Исследуя распределение напряжений в массиве, необходимо учитывать данные, приведенные в работе [14], а именно, наибольшее сжатие ориентировано по нормали к простиранию сейсмогенетических зон и действует параллельно простиранию флексур или зон трещиноватости; в некоторых местах ось наибольшего сжатия располагается по нормали к простиранию рудной залежи; в отдельных районах ориентация максимальных касательных напряжений совпадает с направлением речной сети; по отношению к рельефу наибольшее сжатие часто направлено по нормали к сети эрозионных долин; в вытянутых гористых массивах выше местного базиса эрозии наибольшее сжатие направлено вдоль вытянутых гор.

Не отрицая мнения приведенных авторов о распределении напряжений в разных направлениях, приведу данные по отложениям Донбасса, полученные в последнее время. В 2000–2001 гг. на профиле Старобешево–Шахтерск–Луганск (профиль ДОБРЕ), были выполнены сейсмостратиграфические исследования, которые определили глубину фундамента в 23 км и наличие мантийного диапира на северо-востоке Донецкого складчатого сооружения (ДСС). В работе [13] представлена обобщающая модель строения Донбасса. Если принять эту модель, то внедрение данного тела в осадочную толщу объясняет многие дискуссионные проблемы. Становится понятной асимметрия Главной антиклинали, повышенное количество надвигов в северо-восточной части Донбасса и сбросов в юго-западной, повышенная плотность пород и пониженная пористость. С этих позиций объясняется повышенное субширотное напряжение отложений угольных шахт юго-запада Донбасса, имеющих субширотное расположение относительно выделенного мантийного диапира. Песчаники достаточно жесткие пластообразные тела, на значительные удаления передающие тектонические подвижки земной коры. Поэтому разгрузка напряженного состояния в виде дисков в керне при бурении опережающих скважин в сторону источника напряжений вполне логична. На тех участках, где осевые и радиальные напряжения соизмеримы, формируются изотропные поля напряжений – диски образуются в любом направлении, и в этих зонах обычно происходят выбросы песчаников при прочих равных условиях.

Таким образом, диски керна скважин могут образовываться в равно- и в неравнокомпонентном поле сжатий. Причем в последнем для образования дисков требуется существенно меньшая степень напряжений. Согласно экспериментальным данным [6], диски

образуются в неравнокомпонентном поле осевых (20–40 МПа) и радиальных (10–70 МПа) напряжений в зависимости от вещественного состава исследуемых пород, их газонасыщенности, физико-механических и коллекторских свойств. Равнокомпонентное (изотропное) поле напряжений, при котором образуются диски в разных направлениях, достигают для песчаников значений 110–130 МПа. Как указывалось выше, порода, отслаиваясь от стенок полостей выбросов, в основном повторяет форму полости, а керн скважин, пробуренных в выбросоопасных зонах, делится на выпукло-вогнутые диски с плоскостями, направленными нормально к оси скважины [1, 2].

Приняв, что для выброса требуется равнокомпонентное поле (изотропное), выходим на необходимость учета распределения полей напряжения в горном массиве, определяемое как минимум двумя скважинами, пробуренными в одном и том же прослое песчаника под углом примерно от 60° до 90° одна относительно другой. Поскольку устанавливается изотропность (или анизотропность) распределения напряжений, пространственная направленность скважин особой роли не играет.

Для осуществления надежного и достоверного прогнозирования выбросоопасности по делению керна на диски следует пробурить опережающую скважину в направлении подвигания забоя и при появлении дисков пробурить дополнительную скважину в зоне их максимального образования в том же прослое песчаника под углом примерно от 60° до 90° к основной скважине. В таком случае, если в дополнительной скважине дисков и кольцевых трещин нет, то это неравнокомпонентное (анизотропное) поле напряжений, и диски образуются в скважинах, направленных только по простиранию основной оси сжатия пород. Появление дисков в дополнительной скважине свидетельствует о больших напряжениях, изотропном (или близком к нему) распределении напряжений и о выбросоопасной ситуации [11].

Необходимо остановиться еще на одной проблеме. В литературе специалисты применяют термин «литостатическая» и «геостатическая» нагрузка. В их представлении эти термины – синонимы, но в Геологическом словаре (1978) второго термина нет, и некоторые редакторы меняют или просят авторов менять термин «геостатические» напряжения на «литостатические». Поскольку наука в основе своей условна, базируется на десятичной шкале и существующих представлениях, периодически меняющихся под влиянием полученных новых результатов, предлагаю за термином «литостатические» напряжения оставить расчетные напряжения, а за термином «геостатические» напряжения – измеренные. Зная примерный разрез исследуемых пород, мы можем рассчитать давление налегающей толщи с определенной погрешностью, например, на глубине 1 км. Но если на этой же площади в горной выработке мы сделаем 10 или 100 замеров на указанной глубине, но в разных местах – получим 10 или 100 разных значений, порой существенно отличающихся. Такие замеры стали делать не очень давно, обычно горняки для определения горного давления и расчетов нагрузок на крепь. Подобное разделение давно назрело и необходимо для структурирования терминологии. Данной проблеме были посвящены отдельные публикации (см., например, [5]), но этому нужно уделять постоянное внимание, дабы не допускать путаницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.А. Дифференциация напряженного состояния горных пород Донбасса // Уголь Украины. 2000. № 2. С. 24–25.
2. Баранов В.А. Метод экспрессной оценки выбросоопасности песчаников Донбасса // Уголь Украины. 1999. № 11/12. С. 60–62.
3. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд.-во иностр. лит., 1955. 280 с.
4. Бронников Д.М., Замесов Н.Ф., Богданов Г.И. Разработка руд на больших глубинах. М.: Недра, 1982. 292 с.
5. Вассоевич Н.Б. О терминологии, применяемой для обозначения стадий и этапов литогенеза // Геология и геохимия. Л.: Гостоптехиздат, 1957. С. 156–176.

6. Забигаило В.Е., Белый И.С. Геологические факторы разрушения керна при бурении напряженных горных пород Донбасса. Киев: Наукова думка, 1981. 179 с.
7. Забигаило В.Е., Николин В.И. Влияние катагенеза горных пород и метаморфизма углей на их выбросоопасность. Киев: Наукова думка, 1990. 168 с.
8. Любимов Н.И., Носенко Л.И. Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов. М.: Недра, 1978. 285 с.
9. Николин В.И., Лысиков Б.А., Ткач В.Я. Прогноз выбросоопасности угольных и породных пластов. Донецк: Донбасс, 1972. 127 с.
10. Николин В.И., Меликсетов С.С., Беркович И.М. Выбросы породы и газа. М.: Недра, 1967. 81с.
11. Пат. № 4835 Украины, МКИ⁵ E 21 F 5/00. Способ определения выбросоопасности горных пород.
12. Потураев В.Н., Зорин В.Н., Забигаило В.Е. и др. Прогноз и предотвращение выбросов пород и газа. Киев: Наукова думка, 1986. 160 с.
13. Старостенко В.И., Лукин А.Е., Коболев В.П. и др. Модель глубинного строения Донецкого складчатого сооружения и прилегающих структур по данным региональных геофизических наблюдений // Геофизический журнал. 2009. Т. 31, № 4. С. 44–64.
14. Турчинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И. и др. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. Л.: Наука, 1978. 256 с.
15. Herget G. Ground stress determination in Canada. *Rock Mechanics*. 1974;6:53-64.

Rock failure mechanisms in the surrounding rock masses with deep level tunnels and in the source areas of disastrous events

Baranov V.A.

VLADIMIR A. BARANOV, Doctor of Geological Sciences, Head, a Laboratory of the Institute of Geotechnical Mechanics, Dnepropetrovsk, Ukraine. St. Simferopol, 2a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005, E-mail: baranov-va@rambler.ru

Anisotropy zones of the stressed rock massifs

In the last decades, the depth of mountain works has considerably increased (up to two, three and even four km) and the depth of mine hole drilling has attained ten and more km. The mountain pressure changes with every step as the mountain works deepen: together with the fall and displacement of rocks, more frequently occur bouncing, shelling, mountain blows, sudden outbursts, pillar crushes, squeezing out of the structural elements of the working, etc. The stressed state in mountain rocks has three basic variants: the predominating vertical stress; the predominating horizontal stress, and about the same horizontal and vertical stresses. The principal causes and conditions for anomalous horizontal and vertical stresses have been considered in this paper.

The opinion that the stresses in rock massifs are caused by gravitation and horizontal stress may be right only in specific cases. In actual practice, the stressed state is caused not only by gravitational forces but tectonic processes as well involving local concentration of stresses or relief. It may be caused also by temperature changes and chemical variations conditioned by the history of rock formation and stressing as well as rock weathering. The relaxations of stresses, the presumable widening of the sea bottom, the drift of continents caused by convectional processes and other factors play their part in it, too.

In general, one can recognise that the solidity and the stressed state of rocks increase with increasing depth. However, the results of researches testify that, in some places, at a depth of several hundred metres, the horizontal stresses exceed significantly the lithostatic loads, so the pressure may hardly be attributed to the weight of the over-laid rocks. Real measurements of the stressed state taken in the mountain rocks of various types at a depth of several thousand metres brought out significant changes in horizontal stresses varying between 0 and 150–200 MPa. Notable are the facts that the excessive stresses are connected with the crystalline rocks of the foundation, whereas considerable horizontal stresses are not characteristic of sedimentary rocks and hypergenesis areas.

Key words: anisotropy zones, stresses, rock massifs.

REFERENCES

1. Baranov V.A. Differentiation of stress state of rock Donbass. Ugol Ukrainy. 2000. № 2. S. 24-25. (in Russ.). [Baranov V.A. Differenciacija naprjazhennogo sostojanija gornyh porod Donbassa // Ugol' Ukrainy. 2000. № 2. S. 24–25].
2. Baranov V.A. Method for rapid assessment of outburst sandstones Donbass. Coal of Ukraine. 1999; 11/12:60-62. (in Russ.). [Baranov V.A. Metod jekspressnoj ocenki vybrosoopasnosti peschanikov Donbassa // Ugol' Ukrainy. 1999. № 11/12. S. 60–62].
3. Bridgman P.V. Study of large plastic deformation and fracture. M., Izd. of foreign. Lit., 1955. 280 p. (in Russ.). [Bridzhmen P.V. Issledovanie bol'shijh plasticheskijh deformacij i razryva. M.: Izd.-vo inostr. lit., 1955. 280 s.].
4. Bronnikov D.M., Zamesov N.F., Bogdanov G.I. Development of ore at greater depths. M., Nedra, 1982. 292 p. (in Russ.). [Bronnikov D.M., Zamesov N.F., Bogdanov G.I. Razrabotka rud na bol'shijh glubinah. M.: Nedra, 1982. 292 s.].
5. Vassoevich N.B. About the terminology used to describe the stages and phases lithogenesis. Geology and Geochemistry, L., Gostoptekhizdat, 1957, pp. 156-176. (in Russ.). [Vassoevich N.B. O

- terminologii, primenjaemoj dlja oboznachenija stadij i jetapov litogeneza // Geologija i geohimija. L.: Gostoptehizdat, 1957. S. 156–176].
6. Zabigaylo V.E., Belyj I.S. Geological factors of destruction of the core during drilling strained rocks of Donbass. Kiev, Naukova Dumka, 1981. 179 p. (in Russ.). [Zabigajlo V.E., Belyj I.S. Geologicheskie faktory razrushenija kerna pri bureanii naprjazhennyh gornyh porod Donbassa. Kiev: Naukova dumka, 1981. 179 s.].
 7. Zabigaylo V.E., Nicolin V.I. Influence katagenesis rocks and coal metamorphism on their outburst. Kiev, Naukova Dumka, 1990. 168 p. (in Russ.). [Zabigajlo V.E., Nikolin V.I. Vlijanie katageneza gornyh porod i metamorfizma uglej na ih vybrosoopasnost'. Kiev: Naukova dumka, 1990. 168 s.].
 8. Lyubimov N.I., Nosenko L.I. Handbook of physical and mechanical parameters of rock ore districts. M., Nedra, 1978. 285 p. (in Russ.). [Ljubimov N.I., Nosenko L.I. Spravochnik po fiziko-mehaničeskim parametram gornyh porod rudnyh rajonov. M.: Nedra, 1978. 285 s.].
 9. Nicolin V.I., Lysikov B.A., Tkach V.Y. Forecast outburst coal and rock formations. Donetsk, Donbass, 1972. 127 p. (in Russ.). [Nikolin V.I., Lysikov B.A., Tkach V.Ja. Prognoz vybrosoopasnosti ugol'nyh i porodnyh plastov. Doneck: Donbass, 1972. 127 s.].
 10. Nicolin V.I., Meliksetov S.S., Berkowitz I.M. Emissions of rock and gas. M., Nedra, 1967. 81 p. [Nikolin V.I., Meliksetov S.S., Berkovich I.M. Vybrosoopasnost' i gaza. M.: Nedra, 1967. 81 s.].
 11. Pat. Number 4835 Ukraine MKI5 E 21 F 5/00. A method for determining rock outburst. (in Russ.). [Pat. № 4835 Ukrainy, MKI5 E 21 F 5/00. Sposob opredelenija vybrosoopasnosti gornyh porod].
 12. Poturaev V.N., Zorin V.N., Zabigaylo V.E. et al. Prediction and prevention of emissions of rocks and gas. Kiev, Naukova Dumka, 1986. 160 p. (in Russ.). [Poturaev V.N., Zorin V.N., Zabigajlo V.E. i dr. Prognoz i predotvrashhenie vybrosov porod i gaza. Kiev: Naukova dumka, 1986. 160 s.].
 13. Starostenko V.I., Lukin A.E., Kobolev V.P. et al. Model of the deep structure of the Donetsk folded structure and adjacent structures according to regional geophysical observations. Geophysical Journal. 2009;(31)4:44-64. (in Russ.). [Starostenko V.I., Lukin A.E., Kobolev V.P. i dr. Model' glubinnogo stroenija Doneckogo skladchatogo sooruzhenija i prilegajushhih struktur po dannym regional'nyh geofizicheskij nabljudenij // Geofizicheskij zhurnal. 2009. № 4, t. 31. S. 44–64].
 14. Turchinov I.A., Markov G.A., Ivanov V.I. et al. Tectonic stresses in the earth's crust and the stability of mine workings. L., Science, 1978. 256 p. (in Russ.). [Turchinov I.A., Markov G.A., Ivanov V.I. i dr. Tektonicheskie naprjazhenija v zemnoj kore i ustojčivost' gornyh vyrabotok. L.: Nauka, 1978. 256 s.].
 15. Herget G. Ground stress determination in Canada. Rock Mechanics. 1974;6:53-64.