

УДК 539.3

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД И КРЕПИ
ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ**

В. Е. Миренков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: mirenkov@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, Новосибирск, Россия*

Предложен новый метод аналитического описания статической, кинематической и динамической составляющих процесса взаимодействия вмещающих пород и крепи при ведении очистных работ. Рассмотрение статической составляющей предполагает известный классический подход к построению возможной линии разрушения. Кинематический аспект проблемы предполагает учитывать влияние собственного веса пород на процесс разрушения. Динамика процесса подготовки разрушения при увеличении выработанного пространства показана на примере анализа влияния единичного подвигания забоя. Эти составляющие процесса накопления повреждений в массиве позволяют более точно контролировать деструктивные проявления горного давления.

Выработка, очистные работы, напряжения, смещения, накопление повреждений, разрушение, вес пород, крепление, процесс взаимодействия

DOI: 10.15372/FTPRPI20170502

При ведении очистных работ на угольных пластах возникают вопросы управления горным давлением. Трудности эксплуатации месторождений связаны прежде всего с увеличением горного давления за счет отработки более глубоких горизонтов. Наиболее значительные из них — увеличение аварийности в очистных забоях, ухудшение устойчивости бортов лавы; увеличение затрат на перекрепление подготовительных выработок в связи с их сдавливанием; возникновение динамических явлений, внезапных выбросов угля и газа, горных ударов, прорывов глины и т. п. Труднообрушаемые кровли выработки рассматриваются как частный случай ситуации, возникающей в процессе добычи полезных ископаемых, но достаточно характерный и не всегда эффективно решаемый в практических приложениях.

При отработке угольного пласта движение забоя складывается из двух направлений: по длине лавы и перпендикулярно к длине. Вопрос с труднообрушаемыми кровлями решается в рамках правил, предполагающих при определенном пролете очистного пространства проведение нагнетания раствора в кровлю с целью ее обрушения [1, 2]. В процессе добычи угля в таких условиях передвижная крепь в лаве перемещается последовательно отдельными секциями.

При классическом подходе к описанию разрушения прогноз динамических проявлений горного давления в очистных забоях основывается на упруго-пластическом или реологическом решении соответствующей задачи [1]. Такие решения дают существенно отличающиеся от действительности значения момента разрушения, поэтому вводятся разные поправочные

коэффициенты. Так, в работе [1] соответствующий прогноз основан на установлении момента перехода окружающего массива в окрестности нескольких соседних секций крепи из стабильного состояния в нестабильное вследствие ускорения ползучести горных пород. Анализируется конвергенция забоя лавы в течение рабочего цикла.

Будем считать, что расчет напряженно-деформированного состояния выполнен и соответствующая предельная поверхность возможного разрушения переделена согласно выбранной теории прочности. При этом предполагается подвигать забой до тех пор, пока напряжения на этих поверхностях не будут превосходить предельно допустимые. Назовем такой подход к оценке разрушения статическим.

Движение забоя по длине лавы образует уступ, создаваемый при передвижении секции крепи. На рис. 1 приведена поверхность приращений смещений кровли от единичного подвигания очистного забоя l в направлении оси x , сопровождаемого динамическим ударом пород кровли по соседней секции [2]. Подвигание забоя L в направлении оси y приводит к возрастанию смещений от последующих единичных перемещений секций крепи, а значит, к дальнейшему росту нагрузки на секции, т. е. определяет динамику процесса отработки пласта.

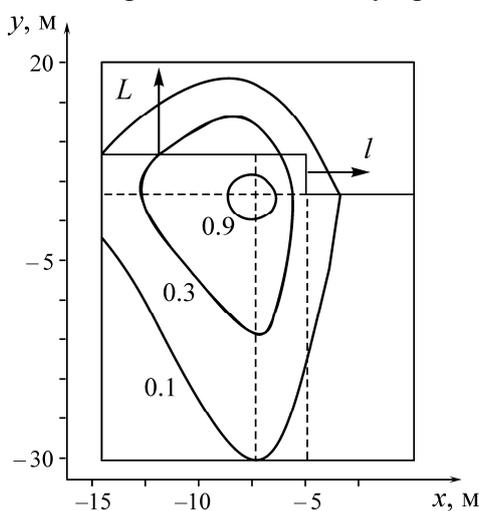


Рис. 1. Несимметричная поверхность приращений смещений от единичного подвигания очистного забоя (в мм)

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Остановимся на возможности управления горным давлением исходя из физики явления единичного подвигания забоя. Любая физическая проблема должна исследоваться в совокупности независимых статической, динамической и кинетической задач, позволяющих понять процесс с разных сторон. Формулировка динамической задачи, как и кинематический подход в геомеханике, в силу сложности строения массива пород не представляется рациональной. По этой же причине статический подход к решению такой проблемы маловероятен [3, 4].

Учет напряженного состояния (статика) и собственного веса пород (кинематика) требует численного расчета напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки. Если рассматривать в этом процессе обратные задачи [5], сводящие интерпретации натурных замеров смещений к формулировке класса труднорешаемых задач, то единственно возможным методом расчета будет использование уравнений, связывающих граничные значения компонент напряжений и смещений [6]:

$$f(t_0) + 2\mu g(t_0) = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0} dt,$$

$$\overline{\kappa f(t_0)} - 2\overline{\mu g(t_0)} = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\overline{\kappa f(t)} - 2\overline{\mu g(t)}}{t - t_0} dt - \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} [f(t) + 2\mu g(t)] d \frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0}, \quad (1)$$

где $\kappa = 3 - 4\theta$; $\mu = E[2(1 + \theta)]^{-1}$, E — модуль Юнга, θ — коэффициент Пуассона;

$$f(t) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds, \quad (2)$$

X_n, Y_n — компоненты усилий в направлении осей x и y ; $g = u + iv$, u, v — компоненты смещений в направлении осей x и y ; i — мнимая единица; черта над функцией обозначает комплексно сопряженное значение; Γ — граница области; t_0 — аффикс точки границы Γ .

Эта система уравнений справедлива для трех основных задач теории упругости и позволяет выписать их решение аналитически в квадратурах, что даст возможность исключить процесс регуляризации и предложить метод последовательных приближений, сходящийся к точному при решении обратных задач.

Будем рассматривать систему “отрабатываемый пласт – вмещающие породы”, в которой крепь выполняет функцию управляющего органа, регулярно нагружаемого и сбрасывающего давления, т. е. цикл заключается в нагружении от нуля до максимального давления и сбрасывание его до нуля. В момент передвижения крепи происходит динамический удар пород кровли по крепи с силой, равной максимальному распору крепи. Так как контакт “отрабатываемый пласт – породы” не нарушался, то можно считать, что тело (породы кровли) падает с нулевой высоты на крепь. Эти динамические удары не только регулярно повторяются, но и увеличиваются с подвиганием забоя. Необходимо оценить давление на породы кровли при подвигании забоя, имея единственную силовую характеристику — отпор крепи.

Существенно, что каждое подвигание забоя создает повреждаемость пород кровли, которая растет по мере увеличения выработанного пространства, пока не достигнет предельного значения, приводящего к обрушению. Если крепь передвигать последовательно по секциям (как это делается на практике), то локальные повреждаемости возникают не синхронно, но возрастают. Если собственный вес пород впереди забоя уравновешен, то в выработанном пространстве при передвижении крепи он реализуется, увеличивая силу динамического удара.

Для описания процесса “удара” пород кровли по преграде примем, что удар осуществляется большим весом Q (формирующим породы кровли) по крепи, моделируемой одномерным телом (стержнем). При этом масса стержня много меньше массы ударяющих пород кровли. В этих предположениях, учитывая, что единственной характеристикой взаимодействия будет отпор крепи, оценим динамические усилия, возникающие при ударе по соседней секции крепи в момент передвижения рассматриваемой секции.

ДИНАМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ЗАДАЧИ

Упругое тело при деформации является аккумулятором энергии, затрачиваемой на деформацию. При “устранении” действующих сил эта энергия отдается упругим телом в том или ином виде. В общем случае внешние силы, прикладываемые к упругому телу, производят работу A , которая идет, с одной стороны, на сообщение скорости частицам тела, т. е. переходит в кинетическую энергию T , с другой — накапливается в виде потенциальной энергии деформации U .

Имеем $A = T + U$. Величина U представляет собой ту часть работы, которая тратится на формирование тела и, если тело упруго, остается в нем до тех пор, пока нагрузка не изменится. Для подсчета U предполагается, что внешняя сила прикладывается таким образом, что ки-

нетическая энергия T равна нулю. Для этого нужно, чтобы сила Q возрастала от нуля до максимума так медленно, что можно считать скорость деформации практически отсутствующей и пренебречь силами инерции. Только в этом случае внутренние силы упругости в каждый момент процесса уравновешиваются внешними силами: $A = U$.

Сила Q связана с удлинением стержня Δl по закону Гука:

$$Q = \frac{EF\Delta l}{l}, \quad (3)$$

где E — модуль Юнга; F — площадь сечения стержня; l — длина стержня. Приращению удлинения $d(\Delta l)$ соответствует элементарная работа

$$dA = Qd(\Delta l). \quad (4)$$

Интегрируя (4) от $\Delta l = 0$ до конечного значения Δl , получим

$$U = \int_0^{\Delta l} Qd(\Delta l). \quad (5)$$

Учитывая (3), имеем

$$U = \frac{EF(\Delta l)^2}{2l}. \quad (6)$$

Исследуем вопрос о напряжениях и деформациях при ударе. В теоретической механике соударение предполагается мгновенным, вследствие чего силы, возникающие при соударении абсолютно твердых тел, бесконечно велики, поэтому в рассмотрение вводятся лишь энергии и импульсы. Для упругого тела продолжительность удара всегда конечна и величина силы может быть определена. Задача о соударении упругих тел в точной постановке представляет значительные трудности ввиду волнового характера распространения деформации в упругом теле.

Приведем приближенное решение вопроса о сжимающем ударе по стержню тела большой массы, которое будем считать абсолютно твердым. Если масса стержня мала по сравнению с массой ударяющего тела, то первую можно не учитывать, а при отсутствии массы деформации в теле распространяются мгновенно. Основная гипотеза приближенной теории удара состоит в том, что деформация предполагается возникающей мгновенно во всех сечениях стержня, тогда как на самом деле она распространяется от конца, на котором происходит удар, со скоростью звука. Гипотеза означает, что большая масса ударяет о стержень со скоростью весьма малой по сравнению со скоростью звука, а продолжительность соударения значительно больше времени, необходимого для прохождения упругой волны по стержню.

Пусть груз массой M , движущийся со скоростью V_0 , ударяет о стержень и деформирует его. В течение процесса деформации в каждый момент сумма кинетической и потенциальной энергии системы “груз – стержень” равна той кинетической энергии, которой обладал груз до удара:

$$T + U = T_0 = \frac{MV_0^2}{2}. \quad (7)$$

По мере роста деформации скорость груза убывает и становится равной нулю в тот момент, когда деформация максимальна. При этом $T = 0$ и из (8) следует, что

$$U = T_0 = \frac{MV_0^2}{2}.$$

Учитывая (6), находим

$$(\Delta l)_{\max} = \sqrt{\frac{2T_0 l}{EF}}. \quad (8)$$

Если груз весом Q падает с высоты h , то $T_0 = Qh$ и $(\Delta l)_{\max} = \sqrt{(2Qh)/(EF)}$. При этом $(\Delta l)_{\text{ст}} = Ql/EF$, где $(\Delta l)_{\text{ст}}$ — деформация от груза Q , приложенного статически. Тогда

$$(\Delta l)_{\max} = \sqrt{2h(\Delta l)_{\text{ст}}} . \quad (9)$$

Если груз Q велик, а высота h небольшая, то нельзя пренебрегать той дополнительной работой, которую производит груз Q на перемещении Δl . Когда $\Delta l = (\Delta l)_{\max}$, уравнение работ будет следующим:

$$Q[h + (\Delta l)_{\max}] = \frac{EF}{2l} (\Delta l)_{\max}^2 ,$$

где $Q = EF(\Delta l)_{\text{ст}}/l$, т. е. прикладывается статически. Отсюда получаем квадратное уравнение

$$(\Delta l)_{\max}^2 - 2(\Delta l)_{\text{ст}}(\Delta l)_{\max} - 2h(\Delta l)_{\text{ст}} = 0 ,$$

решение которого

$$(\Delta l)_{\max} = (\Delta l)_{\text{ст}} + \sqrt{(\Delta l)_{\text{ст}}^2 + 2h(\Delta l)_{\text{ст}}} . \quad (10)$$

В (10) выбран знак “плюс”, чтобы получить наибольшую деформацию. Решение со знаком “минус” приобретает смысл, когда груз остается после удара связанным со стержнем и совершает колебания около состояния статического равновесия. Важный частный случай соотношения (10) — внезапное приложение груза при $h = 0$, тогда

$$(\Delta l)_{\max} = 2(\Delta l)_{\text{ст}} . \quad (11)$$

При расчете на ударную нагрузку напряжения, полученные при статическом расчете, следует умножить на динамический коэффициент, равный $(\Delta l)_{\max}/(\Delta l)_{\text{ст}}$. Отсюда следует соотношение (11).

Забой движется вдоль лавы, так что всегда (за исключением последнего подвигания секции крепи по длине лавы) образуется уступ (см. рис. 1) и связанная с ним секция, на которую падает удар от разгружаемой крепи. В окрестности начала и конца лавы удар пород кровли приходится еще на массив пласта, в результате чего повреждаемость кровли минимальна, так как отпор распространяется на большую площадь. Подвигание секции крепи обеспечивает удар по породам кровли, согласно (11), минимум в 2 раза превосходящий нагрузку на секцию, вызывая повреждаемость пород. На начальный момент отработки пласта повреждаемость кровли локальна и незначительна (например, в виде шелушения или небольшого осыпания).

С увеличением выработанного пространства нагрузка на крепь растет и, следовательно, увеличивается повреждаемость пород кровли при каждом единичном подвигании секции. Образовавшиеся при этом трещины не закрываются и увеличиваются при следующем подвигании. Удар по кровле может сопровождаться вдавливанием секции в почву и смятием верхняков, что характеризует повреждаемость кровли. Чем меньше мощность непосредственной кровли, тем раньше динамический удар разрушит слой и произойдут обрушения, т. е. одного динамического удара достаточно, чтобы разрушить слой по всей его мощности. Удар по кровле происходит при подвигании забоя, а образовавшиеся трещины не закрываются и несколько увеличиваются при следующем подвигании крепи (смещения растут и трещины тоже).

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПРОБЛЕМЫ

Предположим, что для прямоугольной горизонтальной выработки в каждой точке i имеем замеры смещений в кровле V_{ki} и почве V_{pi} . Тогда $V_{ki}/V_{pi} = \kappa_i$ [5], так что по длине выработки $\kappa_i = \kappa_i(x)$. Если V_{1i} — смещения из классического решения, сформулированного на контуре выработки в виде

$$\sigma_y = \gamma H, \quad \sigma_x = \lambda \gamma H, \quad (12)$$

где γ — удельный вес пород; H — глубина заложения выработки; λ — боковой распор; V_i — смещения от собственного веса пород, то в точке i

$$V_{ki} = V_{1i} + V_i, \quad V_{pi} = V_{1i} - V_i, \quad (13)$$

так как направление γH и веса пород в кровле совпадают, а в почве противоположны (рис. 2).

Подставляя (13) в $V_{ki}/V_{pi} = \kappa_i$, получим

$$V_{1i} = \frac{\kappa_i + 1}{\kappa_i - 1} V_i. \quad (14)$$

Из (13) с учетом (14) имеем:

$$V_{ki} = \frac{2\kappa_i}{\kappa_i + 1} V_{1i}, \quad V_{pi} = \frac{2}{\kappa_i + 1} V_{1i}, \quad (15)$$

откуда

$$V_{ki} + V_{pi} = 2V_{1i}. \quad (16)$$

Полученные соотношения не зависят от точки i и могут использоваться для анализа. Величина V_{1i} находится из решения задачи, сформулированной в виде (12). Для любого выделенного волокна при $x = x_0$ строятся эпюры σ_x и τ , которые при интегрировании по длине волокна определяют добавку к результату от γ [5].

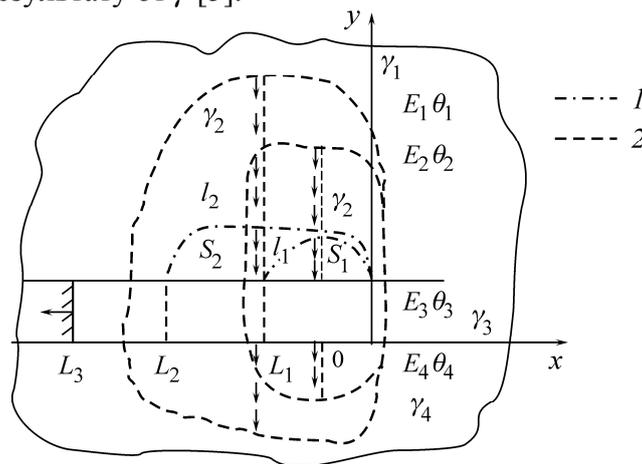


Рис. 2. Расчетная схема очистной выработки: 1 — линия возможного разрушения; 2 — граница области влияния выработки

Кинематическая составляющая разрушения пород в окрестности очистной выработки связана со статическим анализом, так как не дает однозначной зависимости смещений и напряжений [5]. В процессе ведения очистных работ рост напряженного состояния, определяемого для каждого положение забоя, позволяет судить о потенциально предельной поверхности будущего разрушения, которое с учетом собственного веса пород и динамических ударов по кровле выработки приближается к предельно допустимым. На рис. 2 в плоской постановке задачи представлены различные положения очистного забоя, которым соответствуют линии l_1, l_2 максимальных касательных напряжений, значения которых не превышают предельных сдвиговых напряжений. На каждое такое положение забоя вычисляется длина линии l_1, l_2 и площади S_1, S_2 , ограниченные этими линиями и выработками. Вес выделенных таким образом пород кровли $P_i = \gamma_2 S_i$ ($i = 1, 2$) распределяется как равномерная добавка к максимальным касательным напряжениям, приближая их значения к предельно допустимым.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

Рассмотрены статический, кинематический и динамический аспекты, которые определяют процесс разрушения кровли выработок. Объединим их в систему. Для любого положения забоя (кратного единичному подвиганию) рассчитывается напряженно-деформированное состояние в окрестности выработки, что позволяет, выбрав подходящую теорию деформирования, контролировать процесс накопления повреждений. Параметры физические, механические и геометрические в таком расчете задаются априори. Натурные замеры смещений V_k и V_n дают возможность уточнить эти параметры и вычислить смещения от собственного веса пород. На этом этапе для каждого положения забоя имеем соответствующую предельную “линию” (например, максимальных касательных напряжений) и значения на ней сравниваем с допустимыми для данных пород разрушающими нагрузками. Одновременно рассчитываем объем пород, заключенный между выработкой и “предельной линией”, т. е. их вес уравнивается равномерно распределенными касательными напряжениями, которые прибавляются к значениям на этой линии.

Динамический аспект связан с накоплением повреждений в кровле выработки в виде смятий и трещин, которые с увеличением выработанного пространства раскрываются. При этом уменьшается эффективная мощность непосредственного слоя, что учитывается при расчете нового напряженно-деформированного состояния. На этом первый шаг приближения к расчету разрушения кровли выработки заканчивается. Дальнейшие численные приближения связаны с подвиганием забоя. Отметим, что достижение приемлемой точности переводит предлагаемый метод в класс труднорешаемых задач.

Итак, учитывая три аспекта проблемы, приходим при расчете напряженно-деформированного состояния и разрушения в окрестности очистной выработки к математически более точным результатам. Если увеличить длину секции, то смещения и удары по кровле возрастут, возможность обрушения будет более “управляемой”, но повысится нагрузка на крепь. Аналогично можно увеличить длину вынимаемого под секцию пространства, что приведет к увеличению удара и поверхность возможного обрушения оставит за крепью после ее подвигания (см. рис. 1). Это приведет к более широким возможностям управления горным давлением. Статический подход, используемый до сих пор, и подход, предлагаемый в настоящей работе, в определенном смысле аналогичны, но учет собственного веса пород (кинематический аспект) уточняет напряженное состояние нетронутого массива и механические характеристики пород, приводя их к натурным замерам смещений.

Динамический аспект, связанный с единичным подвиганием секции крепи, позволяет управлять горным давлением, меняя направления движения и геометрию секции, обеспечивая возможность обрушения по линии максимальных смещений. Под этим подразумевается любая точка лавы, из которой можно начинать движение секций влево или вправо по одной, по две или более одновременно, добиваясь несимметрии деформирования боковых граней выработанного пространства (вызывая перенапряжение одной грани), что, как правило, быстрее приводит к разрушению, исключая зависание.

Реализовать несимметрию деформирования кровли можно, используя возможности технологии и учитывая особенности обрабатываемого участка шахты. Новые технологические решения требуют, с одной стороны, получения новых знаний о механизмах разрушения горных пород и структурных изменениях в них, с другой — развития математической теории интерпретации натурных экспериментов (методов решения обратных задач) и разработки технологических приемов реализации этих схем. Именно учет особенностей механических и физико-химических процессов в массиве горных пород обеспечит безопасную добычу полезных ископаемых на больших глубинах. Отметим, что новые технологические проблемы, возникающие в геомеханике в данном направлении, рассмотрены в теоретических работах [8 – 11].

ВЫВОДЫ

Впервые рассмотрены три этапа подготовки разрушения кровли очистной выработки: статический, кинематический и динамический. Поскольку они взаимосвязаны, их учет необходим.

Динамический аспект разрушения основан на управляющей роли секций крепи и ее несущей способности, которая фиксируется и является объективной информацией.

Учет собственного веса пород важен при деформационных критериях разрушения, но отсутствие в предложенной теории прямой связи между смещениями и напряжениями не позволяет строго сформулировать силовые критерии. Используется условие, что статический подход фиксирует определенное ослабление массива пород кровли (можно трактовать их как “натянутые” связи), которое усиливается за счет собственного веса, и, если будет разрыв, то уже в ослабленном месте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю.** Мониторинг геомеханического состояния очистного забоя угольной шахты в системе управления марко “Цифровая шахта” // Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2016. — С. 36–47.
2. **Грицко Г. И., Власенко Б. В., Посохов Г. Е., Миренков В. Е. и др.** Прогнозирование и расчет проявлений горного давления. — Новосибирск: Наука, 1980. — 159 с.
3. **Tarasov B. G., Randolph M. E.** Superbrittleness of rocks and earthquake activity, *Int. S. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2011, Vol. 48. — P. 890–905.
4. **Mosein Rafiai.** New empirical polyaxial criterion for rock strength, *Int. S. of Rock Mech. and Min. Sci.*, 2011, Vol. 48. — P. 922–931.
5. **Миренков В. Е.** Об одном методе расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг выработок с учетом весовых характеристик // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 20–26.
6. **Миренков В. Е.** Связь напряжений и смещений на контуре выработки // ФТПРПИ. — 1978. — № 3. — С. 19–23.
7. **Клишин В.И.** Адаптация механизированных крепей к условиям динамического нагружения. — Новосибирск: Наука, 2002. — 200 с.
8. **Mirenkov V. E.** Finite stress in fracture mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, 1994, Vol. 48, No. 1. — P. 63–67.
9. **Бычков И. В., Владимиров Д. Я., Опарин В. Н., Потапов В. П., Шокин Ю. И.** Горная информатика и проблема “больших данных” в построении комплексных мониторинговых систем безопасности недропользования // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 164–185.
10. **Опарин В. Н., Киряева Т. Н., Гаврилов В. Ю. и др.** О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 3–18.
11. **Опарин В. Н., Секисов А. Г., Трубачев А. И., Смоляницкий Б. Н., Селихов В. С., Зыков Н. В.** Перспективные технологии разработки золотороссыпных месторождений Забайкальского края // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 104–113.

Поступила в редакцию 26/V 2017