

УДК 622.833.5

Потапчук Марина Игоревна

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: potapchuk-igd@mail.ru

Рассказов Игорь Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
директор,
Институт горного дела ДВО РАН,
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

Сидляр Александр Владимирович

научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: alex-igd@mail.ru

Терешкин Андрей Александрович

научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Курсакин Геннадий Андреевич

ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

**ОЦЕНКА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОГО ПОЛЯ
НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ «АЙХАЛ»***Аннотация:*

Алмазное месторождение трубки «Айхал» характеризуется сложными геологическими и геомеханическими условиями отработки. Для обеспечения безопасных условий освоения глубоких горизонтов месторождения возникла необходимость специальных дополнительных исследований. Был выполнен детальный анализ геологических и горнотехнических особенностей освоения месторождения. Лабораторные испытания позволили уточнить физико-механические свойства горных пород слагающего комплекса на нижних горизонтах. В результате изучения тектонической структуры и современной геодинамики района месторождения были получены данные, указывающие на юго-восточное направление вектора максимальных горизонтальных напряжений в верхней части земной коры, что согласуется с результатами прецизионных GPS-наблюдений. Результаты исследований состояния массива горных пород на отдельных участках рудничного поля геоакустическим методом позволили определить параметры и выявить относительно низкую акустическую активность горного массива на момент проведения измерений. Результаты выполненных исследований были использованы при обосновании граничных условий для моделирования массива и оценки изменения природно-техногенного поля напряжений горного массива по мере углубления горных работ. Разработка и реализация моделей МКЭ позволили проследить изменение природно-техногенного поля напряжений по мере последовательной выемки запасов, закладки выработанного пространства твердеющими смесями с переходом на более глубокие горизонты.

Ключевые слова: месторождение, подземная отработка, горизонты, геологические особенности, природно-техногенное поле напряжений, геомеханическая оценка, моделирование

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.091

Potapchuk Marina I.

Candidate of Engineering Sciences,
Senior Researcher, Institute of Mining,
Far East Branch of RAS,
680000, Khabarovsk, 51 Turgenev Str.
e-mail: potapchuk-igd@mail.ru

Rasskazov Igor Yu.

Doctor of Engineering Sciences,
Professor, Director
of the Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

Sidlyar Alexander V.

Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: alex-igd@mail.ru

Tereshkin Andrey A.

Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

Kursakin Gennady A.

Leading Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

**EVALUATION OF NATURAL-TECHNOGENIC
STRESS FIELD DURING DEVELOPMENT
OF DEEP HORIZONS OF AYKHAL DEPOSIT***Abstract:*

The Aykhal diamondiferous deposit is characterized by difficult geological and geomechanical mining conditions. In order to ensure safe conditions for the development of deep horizons of the deposit, there is a need for special additional research. A detailed analysis of geological and mining features of the field development was performed. Laboratory tests have allowed to specify physical and mechanical properties of rocks of a compound complex on the bottom horizons. As a result of the study of the tectonic structure and current geodynamics of the field area, the authors have obtained the data indicating the southeastern direction of the vector of maximum horizontal stresses in the Earth's upper crust, which is consistent with the results of precision GPS-observations. The results of the geo-acoustic study of the state of the rock mass in some areas of the mine field have allowed the parameters to be determined and the relatively low acoustic activity of the rock mass to be detected at the time of the measurements. The results of the performed researches have been used at justification of boundary conditions for modeling the rock mass and evaluation of change in the natural-technogenic stress field of the rock mass in deepening of mining operations. Development and implementation of the FEM models have allowed to trace the change in the natural-technogenic stress field as the reserves were successively extracted and the mined out area was filled with hardening mixtures followed by transition to the deeper horizons.

Key words: deposit, underground mining, horizons, geological features, natural-technogenic stress field, geomechanical evaluation, modeling.

Введение (постановка проблемы)

Алмазоносное месторождение трубки «Айхал» расположено на территории Республики Саха (Якутия), в 395 км к северу от г. Мирный. К настоящему времени верхняя часть месторождения была отработана открытым способом. Перспективная часть запасов связана с подземным освоением, и с каждым годом горные работы переходят на глубокие горизонты. Углубление горных работ, как правило, связано с усложнением геодинамической и геомеханической ситуации на месторождении из-за наличия действия высоких тектонических напряжений, изменения геолого-структурных особенностей и физико-механических свойств пород горного массива. В связи с вышесказанным для безопасного освоения подземных запасов месторождения «Айхал» на глубоких горизонтах возникла необходимость предварительной оценки природно-тектонического поля напряжений по мере углубления горных работ [1, 2].

Краткая геологическая и горнотехническая характеристика месторождения

В районе алмазоносного месторождения «Айхал» развит пологоувалистый рельеф плато с абсолютными отметками 400 – 500 м и относительными превышениями 100 – 250 м. Район месторождения находится в зоне развития многолетнемерзлых пород.

Кимберлитовая трубка «Айхал» представляет собой крутопадающее сплюснуто-трубчатое тело, которое на уровне современного эрозионного среза (до начала отработки месторождения) имело в поперечном сечении дайкообразную форму с неправильными очертаниями образующего контура и соотношение в плане короткой и длинной осей 1,0:6,4 (по материалам Амакинской экспедиции и Айхальского ГОКа). Простирается кимберлитового тела – северо-восточное 63° . Протяженность тела на поверхности по длинной оси составляла 510 м, ширина – от 50 до 120 м, в среднем – 82,5 м.

На отм. +374 м трубка разделяется массивом карбонатных пород на два рудных тела: юго-западное и северо-восточное. Мощность перемычки карбонатных пород возрастает от 22 м на отметке +225 абс. м до 105 м на отметке - 400 абс. м. В верхней части трубки карбонатные отложения, разделяющие рудные тела, дезинтегрированы, а ниже породы залегают горизонтально. На юго-западном фланге между горизонтами +330 и +150 абс. м трубка расширяется, на северо-восточном сужается. Ниже горизонтов +150 и +100 абс. м рудное тело постепенно сужается, на отметке 10 абс. м оно разделяется на два рудных столба – западный и восточный. В процессе подземных горных работ в интервале абс. отм. +205 ÷ +172 м обнаружено ответвляющееся от трубки "слепое рудное тело" мощностью до 30 м [3].

Открытая отработка трубки «Айхал» началась в 1961 г. В 1997 г. была достигнута проектная отметка дна карьера, отметка дна отработанного карьера составила +235 м абс. на юго-западе и +195 м абс. на северо-востоке, на этом открытые работы на месторождении были завершены. Подземные горные работы на месторождении трубки «Айхал» были начаты в 1997 г., а в 2012 г.

рудник вышел на проектную мощность 0,5 млн т в год. Подкарьерные запасы вскрыты вертикальными стволами и наклонным съездом. Под дном карьера (отм. +192 м) оставлен предохранительный целик мощностью 25 м. В настоящее время горные работы достигли глубины 600 м (абс. отм. -100 м).

Отработка запасов месторождения в отм. – 100 м / – 250 м принимается камерной системой разработки ромбовидными камерами с буровзрывным способом отбойки руды и закладкой выработанного пространства (РКШЗ). Высота выемочного подэтажа составляет 10 м. Высота камеры составляет 20 м. Камеры в смежных подэтажах расположены относительно друг друга со смещением на половину высоты камеры (в «шахматном» порядке). Применяемая технология позволяет обеспечить прочность закладочного массива вышерасположенных отработанных слоевых заходов и устойчивость вышерасположенной закладки в кровле камеры, и, соответственно, снижает разубоживание отбиваемой руды. Сам закладочный массив кровли в целом представлял собой устойчивую плиту, без образования в ней каких-либо значительных вывалов [4].

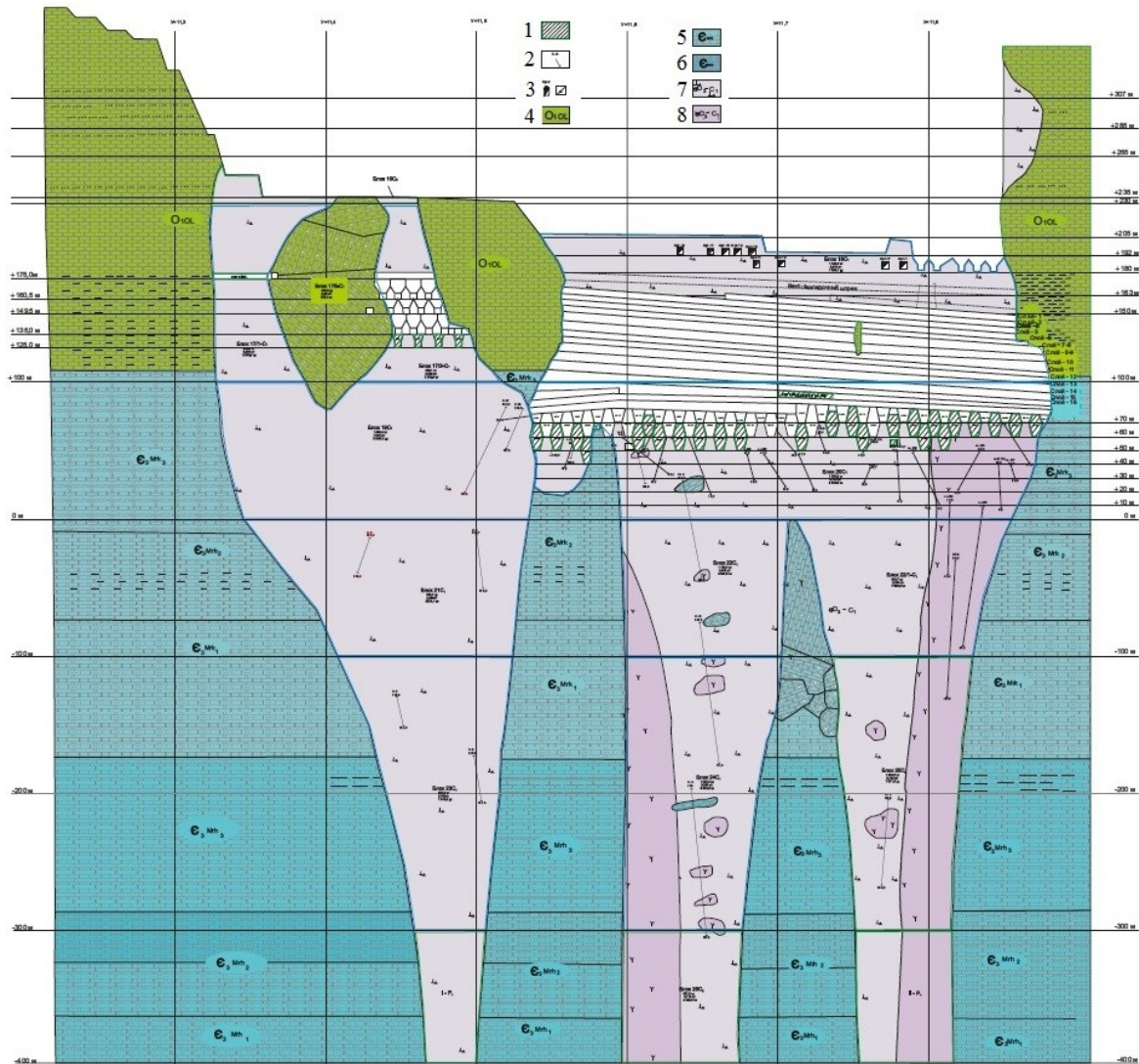


Рис. 1 – Разрез месторождения «Айхал»

1 – отработка 2017 г.; 2 – скважины колонкового бурения; 3 – подземные горные выработки; 4 – нижний отдел. Олдондинская свита. Известняки, доломиты, известковые песчаник, мергели, алевролиты; 5 – кембрийская система. Верхний отдел. Моркокинская свита. Доломит глинистый; 6 – кембрийская система. Верхний отдел. Мархинская свита. Доломит глинистый; 7 – кимберлитовая брекчия; 8 – порфировый кимберлит

Методика исследования

Для исследования изменения природно-техногенного поля напряжений при углублении горных работ было выполнено численное моделирование с применением программного комплекса FEM [5, 6]. При обосновании граничных условий для моделирования горного массива, включающего месторождение «Айхал», были выполнены комплексные исследования, включающие геодинамическое районирование, анализ и изучение геолого-структурных особенностей массива, уточнение физико-механических свойств литологического комплекса.

В основе геодинамического районирования месторождения лежит анализ блочной структуры массива горных пород и оценка взаимодействия тектонических блоков, которые определяют параметры и характер природного поля напряжений [7]. Региональная неотектоническая структура района месторождения и анализ данных GPS-

наблюдений указывают на юго-восточное направление действия наибольшего сжатия в районе месторождения «Айхал», что согласуется с данными натурных наблюдений [8, 9].

Исследование параметров напряженно-деформированного состояния выполнялось в разные годы Иргиредметом, ИрГТУ и ОАО «Уралмеханобр». По результатам инструментальных измерений методом щелевой разгрузки и методом частичной разгрузки на больших базах, выполненных в 2015 г. в горных выработках на отметке +70 м, установлены следующие параметры поля напряжений массива верхней части месторождения (до глубины 600 м): $\sigma_1=21,5$ МПа, $\sigma_2=18,2$ МПа, $\sigma_3=16,2$ МПа. Приведенные результаты показывают наличие в тензоре напряжений тектонической составляющей, то есть превышение горизонтальных напряжений над вертикальными, обусловленных весом налегающей толщи пород. В зоне опорного давления, в целиках, в местах сопряжений, на контактах пород и вблизи геодинамически активных тектонических нарушений, как правило, формируются области повышенных напряжений, которые могут в 2 и более раз превышать первоначальный (in-situ) уровень. Под влиянием горных работ в этих зонах напряжения по величине могут приближаться к пределу прочности руд и вмещающих пород, что влечет за собой разрушение горных конструкций.

В апреле 2018 г. на месторождении дополнительно были выполнены натурные исследования, включая оценку состояния массива горных пород геоакустическим методом с применением прибора локального контроля удароопасности «Prognoz-L» [10], который позволяет регистрировать большое число параметров АЭ и осуществлять обработку и детальный анализ полученной информации. Для оценки состояния горного массива прибором локального контроля «Prognoz-L» используется методика, в которой в качестве критериев выступают интенсивность АЭ без видимого влияния технологических процессов $N_{АЭ}$ и показатель амплитудного распределения b [11, 12]. Показатель интенсивности $N_{АЭ}$ позволяет судить о достижении предельных нагрузок в горных породах краевой части массива. Показатель амплитудного распределения b характеризует неустойчивость процесса деформирования, нарастание количества импульсов высокой энергии. Измерения были проведены на отдельных участках рудничного поля: в камере перегрузки на гор. +60 м; в забое Северного полевого штрека (гор. +30 м); в камере перегрузки Северного полевого штрека (гор. +20 м). Но в целом на момент проведения измерений была выявлена низкая акустическая активность горного массива, соответствующая категории «неопасно». При этом выявленные по результатам визуальных шахтных наблюдений разрушения контура горных выработок в основном приурочены к зонам повышенной трещиноватости и структурной ослабленности пород и руды и происходят в статической форме.

Прочностные свойства кимберлитов, слагающих рудный массив месторождения, были определены в лабораторных условиях силами различных организаций. Средняя прочность кимберлита на одноосное сжатие на глубоких горизонтах составила 21 МПа. По результатам всех ранее выполненных исследований кимберлиты не были отнесены к породам, склонным к разрушению в динамической форме. Физико-механические свойства вмещающих горных пород до горизонта -400 м были изучены по кернам двух скважин (скв. № 2 и скв. № 3), пробуренных в центральной части рудничного поля. Скважинами вскрыты следующие разновидности вмещающих пород: доломиты; известняки; мергели; брекчии; переслаивающиеся породы. Все породы характеризуются относительно невысоким модулем Юнга (до 15 – 31 ГПа). Наиболее прочными вмещающими породами являются доломиты и известняки (их прочность на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ в среднем составляет, соответственно, 49,7 и 39,5 МПа), самые слабые породы – мергели – их $\sigma_{сж}$ изменяется от 13,5 до 41,2 МПа (в среднем 24,5 МПа). Принятые при моделировании значения физико-механических свойств горных пород приведены в табл. 1 [13, 14].

Таблица 1

Свойства разновидностей горных пород, используемые при моделировании

Наименование пород	Плотность, кг/м ³	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа
Известняки, доломиты, терригенно-карбонатные породы						
+200 м / +100 м	2,64	43,1	0,23	4,3	34,2	11,2
+100 м / ±0 м	2,63	33,0	0,21	4,0	31,0	9,0
±0 м / -100 м	2,66	56,4	0,24	5,6	32,8	10,4
-100/-400 м	2,66	25,0	0,23	3,0	38	6,18
Кимберлитовая брекчия, порфиновый кимберлит						
+200/-400 м	2,40	12	0,25	1,16	37	1,94
Закладка						
+200 м / -400 м	2,50	10	0,23	2,0	30,5	3,5

Для оценки изменения геомеханического состояния рудо-породного массива по мере увеличения глубины отработки месторождения «Айхал» было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов в несколько этапов: до отметки +50 м (существующее положение горных работ), до отм. -100 м и до отм. -250 м.

Результаты исследования

В результате выполненного моделирования было установлено, что отработка рудных запасов приводит к формированию сложного техногенного поля напряжений, характеризующегося наличием как областей разгрузки (преимущественно в бортах отработанного карьера и на отдельных участках под дном карьера), так и появлением зон повышенных концентраций напряжений в кровле и почве формируемых при выемке запасов камер, и на отдельных участках в глубинной части горного массива.

На 1 стадии отработки (положение горных работ на сегодняшний день) выделяются две области концентраций повышенных напряжений: в глубинной части месторождения (в районе дайки на отм. -215 м) и ниже горизонта - 400 м. Уровень максимальных сжимающих напряжений на этих участках превышает 26 и 35 МПа, соответственно, уровень касательных напряжений 9 и 6,5 МПа.

Вышеописанные участки с максимальной концентрацией напряжений расположены на значительном расстоянии от существующих очистных выработок, и при этом величина максимальных сжимающих и касательных напряжений в кровле (закладочный массив) и почве ромбовидных камер на отм. + 50 м не превышает 16 МПа и разрушения их в динамической форме на данной стадии развития горных работ не прогнозируется. Зоны разгрузки наблюдаются преимущественно вдоль дна и бортов карьера, величина максимальных растягивающих напряжений здесь не превышает 1 МПа, что также указывает на достаточно спокойное геомеханическое состояние прибортового массива.

После выемки руды до отм. -100 м (2 этап) и закладки выработанного пространства вышележащих горизонтов твердеющими смесями происходит перераспределение напряжений преимущественно в кровлю и почву очистных выработок на гор. -100 м. Напряжение на этих участках возрастает несущественно, на 2 МПа (рис. 2).

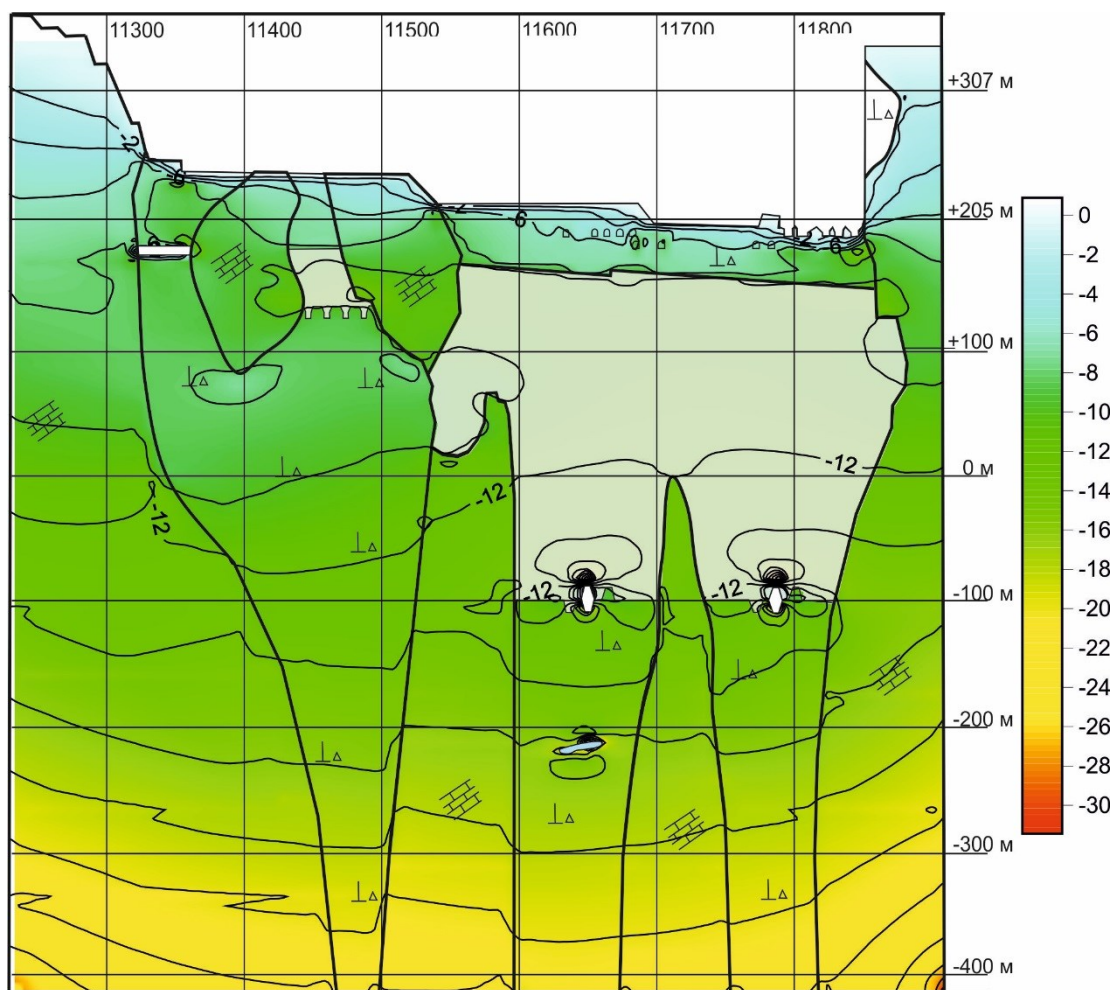


Рис. 2 – Распределение максимальных сжимающих напряжений σ_1 в массиве горных пород на 2 этапе отработки (до отм. -100 м) в продольной проекции рудного тела на вертикальную плоскость

Величина максимальных сжимающих и касательных напряжений в районе дайки на отм. -215 м и ниже горизонта - 400 м сохраняется на прежнем уровне. С ростом глубины отработки до горизонта -250 м (глубина от поверхности 750 м) значения максимальных горизонтальных сжимающих напряжений σ_1 в кровле ромбовидных камер возрастают до 25 МПа, что указывает на возможный риск разрушения данных участков.

Выполненная оценка устойчивости наиболее напряженных участков в массиве (кровля ромбовидной очистной камеры, дайка на отм. – 215 м) (см. рис. 2) по критериям хрупкого и сдвигового разрушения [15] показала, что значения действующих напряжений не превышают предельные расчетные величины, что позволяет сделать вывод о сохранении устойчивости горных конструкций на всех этапах отработки.

Литература

1. Geomechanical assessment of deep-level mining conditions in the Yzhnoe complex ore deposit / Rasskazov I.Yu., Kursakin G.A., Potapchuk M.I., Miroshnikov V.I., Freidin A.M., Osadchy S.P. Journal of Mining Science. 2012. Т. 48. № 5. С. 874-881.
2. Прогнозная оценка удароопасности массива горных пород при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения / Рассказов И.Ю., Потапчук М.И., Курсакин Г.А., Болотин Ю.И., Сидляр А.В., Рассказов М.И. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 4. С. 96-102.

3. Оценка структурно-тектонического строения глубоких горизонтов трубки «Айхал» для постановки гидрогеомеханического мониторинга / А.С. Гладков, А.В. Дроздов, Д.А. Кошкарев, И.А. Потехина, А.М. Афонькин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2015. – № 2 (51) – С. 46-56.
4. Обоснование технологических схем и параметров подземной разработки законтурных запасов кимберлитовой трубки "Айхал" на стадии завершения работы карьера / Николаев Ю.И. // Автореферат диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Новосибирск – 2006.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике, М.: Недра, 1987.
6. Зотеев О.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами // Известия вузов. Горный журнал. – 2003. – № 5. – С. 108-115.
7. Петухов И.М., Батугина И.М. Геодинамика недр. М.: Недра коммюникейшн ЛТД, 1999. - 256 с.
8. Усиков В.И. Динамика и строение тектонических потоков. Анализ 3D – моделей рельефа / Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: VII Косыгинские чтения: Материалы всероссийской конференции. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2011. – С. 328–331
9. Усиков В.И. 3D-модели рельефа и строение верхней части земной коры Приамурья // Тихокеанская геология. – 2011. – № 6. – С. 14-32.
10. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород / Рассказов И.Ю., Мигунов Д.С., Аникин П.А., Гладырь А.В., Терешкин А.А., Желнин Д.О. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3. С. 169-179.
11. Результаты применения геоакустического метода локального контроля удароопасности на рудниках Дальнего Востока / Терешкин А.А., Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Мигунов Д.С. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S24. С. 338-347.
12. Методические указания по сейсмоакустическим и электромагнитным методам получения критериев степени удароопасности. – Л.: ВНИМИ, 1986.
13. Геомеханические условия отработки разрезных слоев при слоевой нисходящей системе разработки с твердеющей закладкой / Барышников В.Д., Гахова Л.Н., Латынин В.В // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 7. С. 11-16.
14. Разработка рудника «Айхал» выработками с увеличенными параметрами при слоевой системе разработки / Марков В.С., Павлов А.А., Петрова Л.В., Скрыбин Е.П. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 8. С. 373-378.
15. Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Филиппов П.А. Устойчивость горных выработок при системах поэтажного обрушения // ФТПРПИ. 2008. № 1. С. 90 - 100.