

УДК: 622.83, 550.3

В.В. Бодин, Я.И. Липин

ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

В окрестности тектонических нарушений, пересекающих горные выработки, установлены два типа аномальных колебаний – высокочастотные (F_v) и низкочастотные (F_n). Показано, что отношение частот (F_v/F_n) является параметром, определяющим характер деформирования породного массива и позволяющим оценивать его напряжённое состояние.

Ключевые слова: сейсмические волны, тектонический массив, геодинамические явления.

Система тектонических нарушений, развитая в пределах шахтных полей, существенно осложняет его напряженно-деформированное состояние. Являясь концентратором напряжений, тектонические нарушения в большинстве случаев служат причиной горных ударов и внезапных вывалов горной породы, приводящих к разрушениям горных выработок и представляющих угрозу для жизни людей. В зависимости от горно-геологических условий, с тектоническими нарушениями связывают от 50 до 90% количества геодинамических явлений различного энергетического уровня [1, 2].

Для понимания механизма геодинамических явлений, связанных с тектоническими нарушениями, рядом авторов были выполнены исследования по изучению напряжённого состояния породного массива в окрестности тектонических нарушений [3, 4, 5]. Анализ результатов этих исследований показал, что, несмотря на различие геологических условий, в которых проводились натурные эксперименты,

характер напряжённого состояния породного массива в окрестности тектонических нарушений имеет ряд общих закономерностей. Прежде всего, отмечается наличие локальных зон повышенных напряжений, приуроченных к плоскости сместителя, концентрация напряжения в пределах которых, по разным оценкам, составляет 1.5-5.0 γH . В зависимости от морфологии нарушения выделяется несколько типов пространственного распределения напряжения относительно плоскости сместителя [3, 6]. Наиболее часто встречаемый тип, характеризуется ассиметричным распределением двух локальных зон повышенного напряжения в крыльях тектонического нарушения. В лежащем крыле зона повышенных напряжений примыкает к плоскости сместителя, в висячем крыле – удалена от сместителя на расстояние равное мощности зоны повышенной трещиноватости. [7]. Геометрические параметры локальных зон пропорциональны амплитуде тектонического нарушения, характерной чертой зон

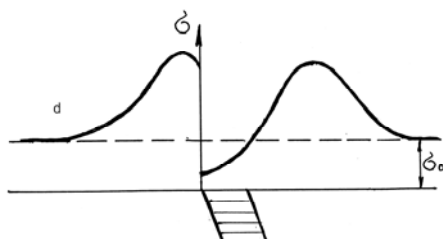


Рис. 1. Обобщенная модель распределения напряжений в окрестности тектонического нарушения по данным [3, 4, 5, 6, 7]: σ_0 – фоновый уровень напряжения; d – зона повышенной трещиноватости

повышенных напряжений является также их временная и пространственная неустойчивость [3, 8].

Обобщенная модель распределения напряжений в окрестности тектонических нарушений, составленная по литературным источникам, показана на рис. 1.

Зону повышенной трещиноватости, которая является одним из структурных элементов тектонического нарушения [9], можно рассматривать как мягкое включение, в окрестности которого под действием внешнего источника силы образуются локальные зоны повышенных напряжений [10]. В работах посвященных исследованию деформирования среды, содержащей структурные неоднородности показано, что на границах неоднородностей образуются полевые динамические структуры способные к накоплению упругой энергии [11, 12]. В [5] приведен расчёт возрастания упругой энергии в тектонически напряжённой зоне, в котором показано, что при двукратной концентрации напряжения, уровень накопленной энергии может в 6 раз превышать энергию вмещающего породного массива.

Таким образом, причиной горного удара может быть внезапный сброс

упругой энергии, накопленной в окрестности тектонического нарушения.

В связи с чем, для прогнозной оценки удароопасности, актуальной является задача по обнаружению и контролю состояния локальных зон с аномально высоким напряжением в окрестности «активных» тектонических нарушений, которые могут быть подвержены воздействию техногенных напряжений. Решение данной задачи возможно с помощью достаточно широкого спектра известных способов оценки напряженного состояния. Однако, более оптимальным является сейсмический метод исследования, который дает возможность не только установить местоположение зоны концентрации напряжения, но и определить ее параметры.

Традиционно применяемый сейсмический метод опирается на выявленные ранее зависимости скорости упругих волн от величины действующих напряжений, однако, относительно небольшой диапазон изменения скорости волн при изменении напряженного состояния ограничивает его применение для оценки напряженного состояния окрестности тектонических нарушений.

Одним из вариантов повышения информативности сейсмического метода является использование динамических параметров сейсмического волнового поля, которые на порядок и более чувствительны к изменению состояния породного массива, чем его кинематические параметры.

Анализ данных, полученных на 10-ти подземных рудниках Урала и Сибири, позволил установить аномальный эффект наблюдаемый в волновом сейсмическом поле [13]. Суть которого заключается в том, что сейсмическая волна, распространяясь в окрестности тектонического нарушения, порождает колебания, параметры

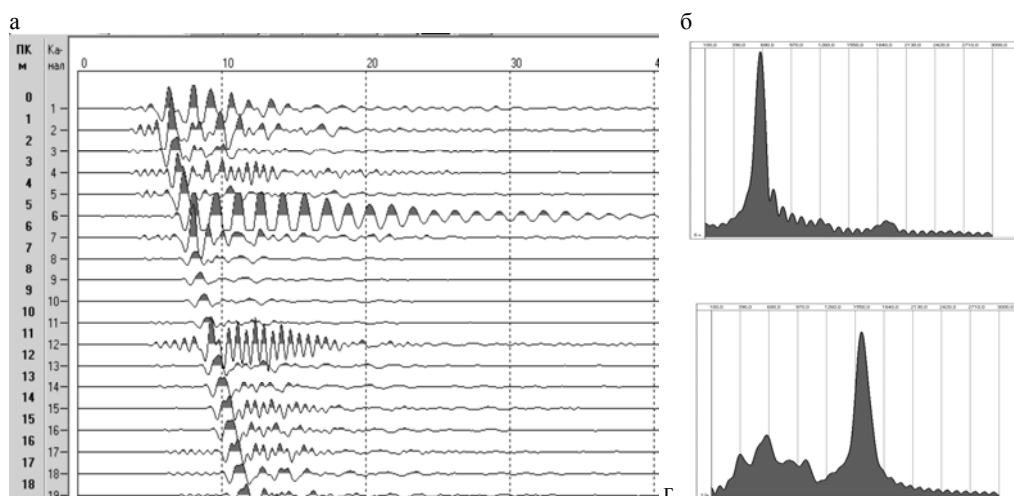


Рис. 2. Сейсмограмма с записью аномальных колебаний (а), амплитудно-частотные спектры: (б)- «низкочастотного» (г) - «высокочастотного» колебаний

которых значительно отличаются от колебаний сейсмических волн, зарегистрированных до и после нарушения. Амплитуда и длительность этих колебаний в 3 – 10 раз превышает аналогичные параметры «нормальных» колебаний. По спектральному составу аномальные колебания делятся на две группы – высокочастотные (Fв) и низкочастотные (Fн). Высокочастотные колебания, как правило, порождаются продольной волной, частота амплитудного максимума близка к частоте Р-волны, Низкочастотные аномальные колебания инициируются только поперечной волной, частота амплитудного максимума колебаний ниже частоты S-волны. Особенностью аномальных колебаний является их пространственная приуроченность к структурным элементам тектонического нарушения. Так, в породном массиве лежащего крыла генерируются высокочастотные колебания, в породах висячего крыла – низкочастотные.

Примером аномальных колебаний могут служить сейсмотрассы 6 и 12

сейсмограммы, зарегистрированной в горной выработке, пересекаемой тектоническим нарушением (рис. 2).

Низкочастотные колебания (Fн) сейсмотрассы № 6 зарегистрированы в висячем крыле нарушения, зона трещиноватости которого, выделяется повышенным поглощением сейсмического сигнала. Амплитудный максимум на частоте 660 Гц составляет 210 у.е. (рис. 2, б) и в 10 раз превышает амплитуду поперечной волны, зарегистрированной на соседних трассах. Высокочастотное колебание (Fв) трассы №12 (рис. 2, г), зарегистрированное в лежащем крыле нарушения, также на порядок превышает амплитуду близкой ей по частоте продольной волны.

При сопоставлении средних значений частоты аномальных колебаний со средними значениями горизонтальных напряжений, ранее определенными в местах проведения сейсмических исследований, была установлена корреляционная связь между этими параметрами [14]. Наличие статистической связи показало перспек-

тивность применения частоты аномальных колебаний для оценки напряженного состояния породного массива.

Исследования, выполненные в лабораторных условиях, показали, что частота колебаний акустического сигнала возрастает при упругом деформировании среды и понижается при запредельном деформировании [15, 16].

Экспериментальные данные об изменении частоты колебаний на разных стадиях деформирования подтверждаются теоретическими исследованиями. Так, в работе [17] показано, что на этапе предразрушения, период колебаний (T) в среде неограниченно увеличивается. Принимая во внимание результаты указанных исследований, высокочастотные колебания F_v можно отнести к характеристике упругого деформирования, т.е. к модулю упругости (E), низкочастотные F_n – к характеристике запредельного деформирования, т.е. к модулю спада (M). Следуя работе [18], можно записать: $M/E = T_n/T_v = F_v/F_n = \alpha$, где T_n и T_v – периоды низкочастотных и высокочастотных аномальных колебаний, α – параметр, определяющий характер деформирования среды.

В качестве примера использования динамических параметров аномальных колебаний для оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности тектонических нарушений можно рассмотреть результаты исследований, выполненных на ш. Естюнинская.

Натурные наблюдения были выполнены в июне и декабре 2009 года на горизонтах –180 м и –240 м (300 м и 360 м от поверхности Земли). На горизонте –180 м сейсмические наблюдения проводились в районе автоматической деформационной стан-

ции «Массив II», на горизонте –240 м в полевом штреке и квершлага к лифтоподъемнику, на участках ранее выполненных оценок действующих напряжений методом шелевой разгрузки [19].

Средние значения горизонтальных напряжений, действующих по оси горных выработок, составляют –115 МПа на гор. –180 м, на гор. –240 м в полевом штреке –111 МПа и –89.5 МПа в квершлага. Величина главного нормального напряжения составляет –144 МПа, азимут –150°.

В пределах исследуемых участков развита структура тектонических нарушений, которая представлена тремя системами.

Система 2-го ранга (относительно тектонической структуры шахтного поля) имеет северо-восточное простирание, азимут которого 50°, юго-восточное падение под углом 85°. Две системы 3-го ранга, одна из которых имеет северо-западное простирание – азимут 325°, юго-западное падение под углом 60°, другая – субширотного простирания, угол падения 42° на юго-восток.

Массив горных пород представлен пироксен плагиоклазовыми порфиритами, плотность (ρ) которых равна 3000 кг/м³, статический модуль упругости (E) изменяется в небольшом диапазоне от $7.5 \cdot 10^4$ МПа до $8.1 \cdot 10^4$ МПа.

Для регистрации сейсмического волнового поля использовалась цифровая 24-х канальная сейсмостанция «Синус-24», частотный диапазон регистрирующего канала составлял 5 – 3000 Гц. В качестве приемных устройств применялись горизонтальные сейсмоприемники электродинамического типа GS 20 – DX, которые с шагом 1 м жестко крепились к стенке исследуемых выработок на высоте 1.5 м от почвы.

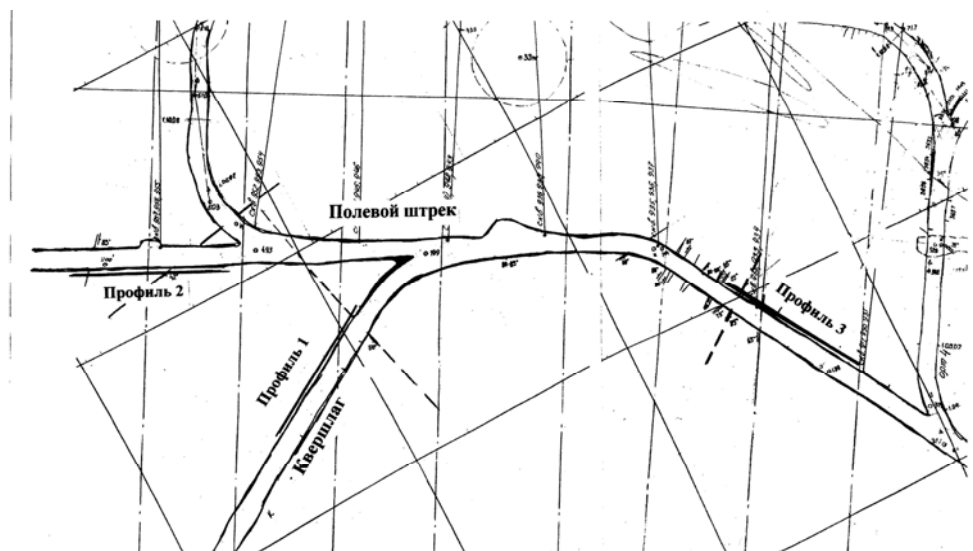


Рис. 3. Схема расположения сейсмических профилей на горизонте -240 м шахты «Естюнинская»

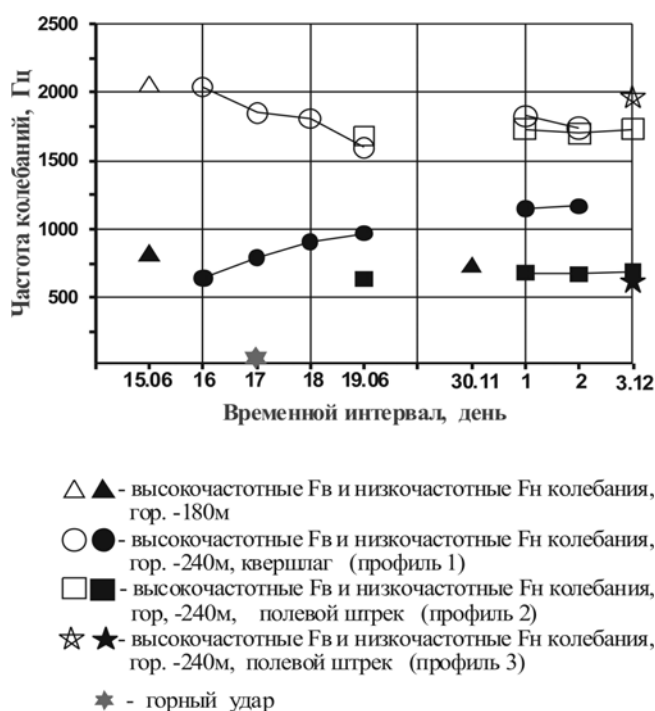


Рис. 4. Графики частоты аномальных колебаний, зарегистрированных в периоды с 15.06.09 по 19.06.09 и с 30.11.09 по 3.11.09 на горизонтах -180 м и -240 м шахты «Естюнинская»

Схема расположения сейсмических профилей на горизонте - 240 м приведена на рис. 3.

По данным 1-го и 2-го циклов наблюдений были выделены тектонические структуры, и с помощью спектрального анализа определены соответствующие им частоты F_v и F_n аномальных колебаний (рис. 2) и их отношение F_v / F_n (α). В тех случаях, когда в пределах базы наблюдения находилось несколько тектонических структур, определялись средние значения параметров. Графики изменения частот F_v , F_n и α приведены на рисунках 4 и 5. Рассматривая отношение $T_n/T_v = F_v/F_n = \alpha$ как параметр, отражающий характер деформирования породного массива по

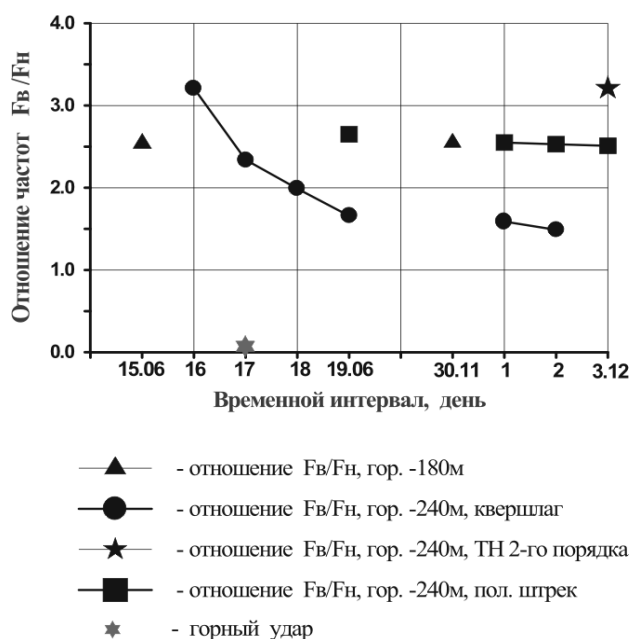


Рис. 5. График отношения частот аномальных колебаний (F_v/F_n) зарегистрированных на горизонтах -80м и -240м ш. «Естюнинская»

трехкратным наблюдениям, выполненным практически одновременно в горных выработках с различным уровнем горизонтальных напряжений, было определено, что приращению $\Delta\alpha = 1.0$ соответствует приращение $\Delta\delta = 21.5$ МПа.

Данное соотношение позволяет определить приращение напряжения в первом цикле наблюдений, вызванное волной деформации, возникшей после массового взрыва, произведенного накануне 1-го цикла сейсмических наблюдений. Взрыв заряда ВВ весом 18 тонн был произведен 12.06 на расстоянии 150 м. от сейсмических профилей на гор. -240 м и 800 м от деформационной станции на гор. -180 м.

На рис. 6 приведены графики изменения деформации вертикальным (рисунок 6а) и продольным (рисунок 6б) датчиками. Максимальный при-

рост напряжения сжатия $\Delta\delta$ на горизонте -180 м в районе деформационной станции составил - 70 МПа, суммарное напряжение в момент прохождения волны деформации достигло 185 МПа. Симметричное изменение двух компонент вертикальной и горизонтальной указывает на объемную деформацию породного массива, что дает основание предполагать одинаковое изменение напряженного состояния в исследуемых выработках.

Отклонение параметра α , определенного 16.06, от фонового значения, составило 1.63, что соответствует приращению напряжения в 35 МПа или суммарному значению на-

пряжения в квершлаг - 124.5 МПа и - 146 МПа в полевом штреке. Если принять скорость основного максимума волны деформации равной 100 м/сут, а амплитуду деформации постоянной, то 16.06 прирост напряжения в исследуемых выработках, определённый по приращению деформации (рис. 6), составил 30 - 35 МПа.

В период 2-го цикла измерений - с 30.11 по 3.12.09 аномальных отклонений параметра α в исследуемых выработках не установлено. На деформационной станции за период до 30.11.09 зарегистрированы незначительные флуктуации деформации, которым соответствует изменение напряжения не более 5 МПа.

Таким образом, сейсмическими исследованиями выполненными в подземных горных выработках, установлено, что породный массив в окрестности

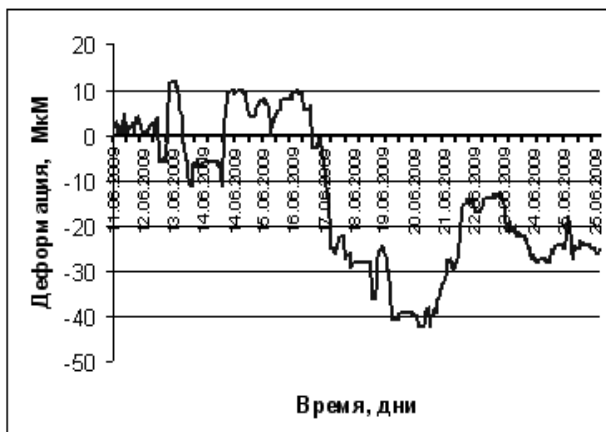


Рис. 6. Графики изменения деформации породного массива на горизонте -180м, произошедшего после массового взрыва с 11.06.09 по 25.06.09 по данным наблюдательной станции «Массив II»: (а) – по вертикальному датчику, (б) – по горизонтальному датчику

тектонических структур представляет собой нелинейную диссипативную структуру, которая порождает аномальные колебания. Параметры аномальных колебаний определяются напряжениями, действующими на массив. Отношение частот аномальных колебаний являются параметром, отражающим характер деформирования массива горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров П.В., Редькин В.А. Мониторинг горных ударов при разработке рудных залежей с блочной структурой. // Международная конференция «Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли» Новосибирск, 2-4 октября 2001. с 309-314
2. Еременко А.А., Курленя М.В. Разработка железорудных месторождений в зонах повышенной сейсмической активности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 2. С. 3-11.
3. Методические рекомендации и наказы по повышению безопасности ведения горных работ в удароопасных условиях у тектонических нарушений на шахтах СУБРа / Сост. А.А. Аксенов, Р.П. Потехин, В.С. Ломакин, А.Н. Шабаров. Североуральск, 1994. 82 с.
4. Шабаров А.Н. О формировании геодинамических зон, опасных по горно-тектоническим ударам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. № 2. С. 16-27.
5. Стоянов С.С. Механизм разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с., ил.
6. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
7. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. 295 с.
8. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон // Физика Земли. 2004. № 10. С. 95-111.
9. Шерман С. И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск. Сиб. Отделение. 1983. 111 с.
10. Эшелби Дж. Определение поля упругих напряжений, создаваемых эллип-

социальным включением и задачи, связанные с этой проблемой. // Континуальная теория дислокаций. М.: Изд-во иностр. литературы, 1963. 248 с.

11. Адушкин В.В., Спивак А.А. Особенности деформирования блочной среды при взрыве // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 2. с. 46-52.

12. Родионов В.Н., Сизов И.А., Багдасарьян А.Г. О структуре разрушения горного массива // Физика Земли. 1989. № 12. С. 48-56.

13. Бодин В.В. Исследование нелинейных эффектов сейсмического волнового поля, вызванных тектоническим нарушением. Информационно-аналитический бюллетень. Москва. 2006. №4. с. 93-97.

14. Бодин В.В. К проблеме геодинамического районирования шахтных полей. Материалы конференции «Пятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича» Екатеринбург. 2009. с. 43-45.

15. Шамина О.Г., Паленов А.М., Ткаченко В.С., Понятовская В.И. Амплитудно-частотные характеристики моделей сред с развивающейся трещиноватостью // Физика Земли. 1994. № 3. С. 56-62.

16. Векслер Ю.А. Инициирование геодинамических явлений и их сейсмоакустический контроль. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М. Наука. 1987. с 106-112.

17. Дубровский В.А., Сергеев В.Н. Универсальный предвестник геомеханических катастроф // Доклады Академии наук. 2004. Т. 395. № 4. С. 479-481.

18. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость горных выработок на больших глубинах. Москва. Недра. 1985. 271 с.

19. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург. УрО РАН. 2001. 335 с. **ГИАБ**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-05-00149-а

Коротко об авторах

Бодин В.В. – старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН.

Липин Я.И. – канд. тех. наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН, direct@igd.uran.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ			
ЯГУНОВА Ольга Анатольевна	Исследование гидро-, газо-, геомеханических процессов в техногенном массиве и выработанном пространстве ликвидируемых шахт Кузбасса	25.00.20	к.т.н.