

УДК 622.41:533.17

*Г.Я. Полевщиков, Е.Н. Козырева, Т.А. Киряева*

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОСНОВА ВНЕЗАПНОСТИ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ  
В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ\***

**О**бщими признаками всех типов динамических газопроявлений от высыпаний угля с повышенным газовыделением до собственно выбросов угля и газа является внезапность, лавинообразность, очаговый характер и приуроченность к пластам средней стадии метаморфизма. Основным показателем газодинамической активности углеметанового пласта или его зоны служит изменчивость свойств по трассе проведения выработки. Известно, что при входе выработки в зону влияния даже небольшого тектонического нарушения, вероятность внезапного выброса выше, чем при выходе из нее.

Отмеченные особенности газодинамической активности углеметановых пластов заставляют более подробно проанализировать физико-химические свойства углей, в первую очередь с позиций устойчивости связи уголь-метан.

Основываясь на представлениях об углеметановом пласте, как системе «сорбент – сорбат» во второй половине прошлого века в СССР и за рубежом были проведены широкомасштабные исследования этих свойств. В результате получены эмпирические зависимости для расчета сорбционной метаноемкости, служащие и в настоящее время значимым показателем при оценке, например кинетики газоистощения пластов и отбитого угля в процессе ведения горных работ. Не затрагивая вопроса адекватности этой физико-химической модели природным свойствам и состояниям углеметановых геоматериалов, представляет интерес более подробно рассмотреть особенности сорбционной способности проб углей, отобранных на пластах существенно различных стратиграфических групп. Информационной базой этих

исследований может служить изданный ВостНИИ в 1968 г. каталог [1], который содержит данные по 728 пробам угля, отобраным на основных месторождениях Кузбасса.

На целесообразность подробного анализа экспериментального материала указывает принятое в тот период исследователями ограничение результатов установлением связи констант сорбции (1) только с выходом летучих веществ (рис. 1)

$$S_{л} = \frac{a\bar{b}P}{1 + \bar{b}P}, \quad (1)$$

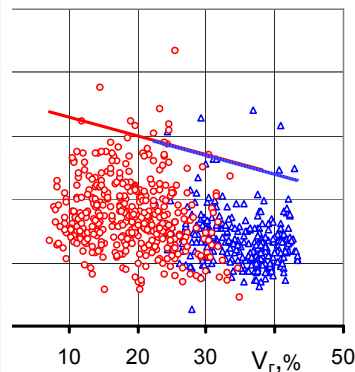
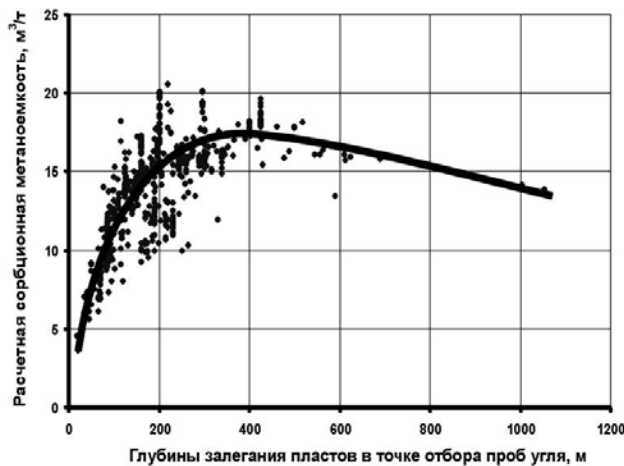
где  $S_{л}$  - сорбционная метаноемкость,  $\text{см}^3/\text{г}$ ;  $a$  - предельная сорбционная метаноемкость,  $\text{см}^3/\text{г}$ ;  $\bar{b}$  - интенсивность сорбционной метаноемкости,  $1/\text{МПа}$ ;  $P$  - давление сорбционного равновесия, МПа.

На рис. 1 и далее приняты обозначения проб угля:  $\Delta$ - кольчугинской серии; о- балахонской серии.

Для приближения рассчитываемых подобным образом значений показателей сорбционной способности угля к реальным газокинетическим характеристикам угольных пластов разработчиками метода были введены видимые на рисунках изменения расчетных величин констант, которые включены во все и ныне действующие в угольной промышленности России нормативные документы. Причиной столь сильных изменений является ограниченность методических и вычислительных возможностей того периода.

Развитие методов математической статистики в прошедшие десятилетия и современные вычислительные средства обеспечивают более глубокий, по сравнению с шестидесятыми годами, анализ экспериментальных данных с уточнением известных и выявлением новых

\*С поддержкой гранта Лаврентьевского конкурса молодежных проектов СО РАН.



закономерностей.

В качестве методической основы настоящей работы использован аппарат условных вероятностей и метод рандомизации [2-4], позволяющие проводить поэлементное рассмотрение влияния факторов с последующим нормированием их значений относительно соответствующих линий регрессии.

Диапазоны изменения значений достаточно полно охватывают свойства каменных углей Кузнецкого бассейна:  $0,7\% \leq W \leq 9\%$ ;  $1,3\% \leq \Pi \leq 32\%$ ;  $7\% \leq V \leq 45\%$ ;  $30 \text{ м} \leq H \leq 1050 \text{ м}$  ( $W$  – аналитическая влажность, %;  $\Pi$  – пористость, %;  $V$  – выход летучих, %;  $H$  – глубина залегания пласта в точке отбора пробы, м). Сорбционная метаноёмкость измерялась в диапазоне установившихся давлений метана  $0 \div 4 \text{ МПа}$  (абс.) с шагом  $0,5 \text{ МПа}$ .

Обработка данных показала резкий перелом функции отклонений замеренных значений сорбционных констант при давлении газа  $0,1 \text{ МПа}$  от среднестатистической линии, определяемой уравнением (1). Этот известный в сорбции углей факт до настоящего времени, как отмечено выше, нивелируется путем искусственных изменений констант сорбционной способности (рис.1). Однако процесс сорбции при давлениях газа ниже и многократно выше атмосферного может протекать существенно иначе. К тому же на практике достаточно часто возникает необходимость определения и самостоятельного использования величины сорбционной метаноёмкости при атмосферном давлении. В связи с этим она нами выделена в самостоятельную характеристику свойств угля, а изменение метаноёмкости при избыточном

давлении оценивалось с учетом первой в виде соответствующей

разности.

Получено выражение для расчета сорбционной метаноёмкости при абсолютном давлении  $0,1 \text{ МПа}$

$$S_o = 1,19\Pi^{-0,1} (-0,00011H + 1,0) \times \text{м}^3/\text{т} \quad (2) \\ \times (-0,0051V + 1,01) \cdot 5,53e^{-0,4W},$$

Тогда коэффициенты в известном выражении Ленгмюра (1) для аппроксимации данных о сорбционной метаноёмкости при давлении большем атмосферного определяются следующим образом:

$$\text{предельная сорбционная метаноёмкость} \\ A = -0,00085V^3 + 0,064V^2 - 1,55V + 24,7, \text{ м}^3/\text{т} \quad (3)$$

интенсивность сорбционной метаноёмкости

$$B = (-0,012V + 1,3)(0,0618\Pi + 0,67), 1/\text{МПа} \quad (4)$$

Однако сопоставление расчетных и замеренных значений сорбционной метаноёмкости углей в указанном диапазоне давлений газа выявило систематические отклонения, что потребовало дополнить уравнение (1) экспоненциальной функцией с соответствующими эмпирическими коэффициентами. В итоге получена следующая формула для расчета сорбционной метаноёмкости углей

$$S = S_o + \frac{1,383ABP}{1 + BP} \exp(-0,0258P), \text{ м}^3/\text{т} \quad (5)$$

Интересен анализ ее тенденции с ростом глубины залегания пласта в точке отбора пробы угля (рис. 2), если принять давление газа равным гидростатическому, а температуру

среды постоянной ( $15^{\circ}\text{C}$ ). Из рисунка видим, что среднее значение сорбционной метаноемкости углей Кузбасса на глубинах 200–400 м достигает предела, а затем снижается. Введение поправки на рост температуры с глубиной эту особенность усугубляет. Возможное, на наш взгляд, объяснение лежит в области истории формирования бассейна, поскольку средние глубины отбора проб углей в использованной при анализе выборке [1] распределяются по геологическим сериям следующим образом: кольчугинская – 186 м; балахонская – 250 м. Следовательно, рассматриваемая тенденция отражает не только глубину, как определяющую литологическое давление и, соответственно, формирование твердых углеметановых растворов [5, 6], но и может служить объективной характеристикой особенностей свойств угленосных залежей, имеющих различные геологические условия возникновения и преобразования. Убедительным свидетельством этому являются результаты сопоставления сорбционных констант и стратиграфии бассейна (табл. 1).

Прежде всего, отчетливо видна общая закономерность изменения констант согласно стратиграфическому возрасту структур. Увеличивается как предельная сорбционная метаноемкость, так и начальная интенсивность сорбции. Последний для удобства анализа представлен в виде расчетной величины удельного газосодержания при давлении газа в 1 МПа и интенсивности роста, равной ее начальному значению.

Рассматривая экспериментальные данные по стратиграфическим структурам, видим, что при закономерном изменении средних значений сорбционных констант диапазоны изменения для каждой структуры не имеют столь же выраженной закономерности. Эта особенность наиболее отчетливо прослеживается в графическом виде (рис. 3). Обобщение табличных и графических данных позволяет заключить, что экспериментально установлена бифуркация

*Рис. 2. Зависимость сорбционной метаноемкости угля от глубины залегания пластов в точке отбора пробы угля*

параметров сорбционной метаноемкости углей Кузбасса, заключающаяся в смене по мере роста предельной сорбционной метаноемкости углей ( $7 \text{ см}^3/\text{г} \leq A \leq 17 \text{ см}^3/\text{г}$ ) градиента устойчивых изменений начальной интенсивности сорбционной метаноемкости ( $8 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{МПа} \leq G \leq 28 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{МПа}$ ) с  $\psi_1=1,5 \text{ 1/МПа}$  на  $\psi_2=2,0 \text{ 1/МПа}$  в интервале  $10,5 \text{ см}^3/\text{г} \leq A \leq 13,0 \text{ см}^3/\text{г}$ . В точке бифуркации  $A_{кр}=12,5 \text{ см}^3/\text{г}$  начальная интенсивность имеет значения от  $G_1=17 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{МПа}$  до  $G_2=25 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{МПа}$ .

В правой части рис. 2 и в таблице 1 представлены сведения о минимальных значениях выбросоопасных глубин, зарегистрированных горной практикой и принятым в промышленности экспертным оценкам НЦ ВостНИИ. Видим, что интервалу бифуркации соответствуют свойства углей геологических структур бассейна, включающих пласты, опасные по внезапным выбросам угля и газа. Их наибольшая газодинамическая активность наблюдается вблизи критической точки при  $A = 12,5 \text{ см}^3/\text{г}$ ;  $\psi = 1,5 \text{ 1/МПа}$  и  $G = 21 \text{ см}^3/\text{г}\cdot\text{МПа}$ . В этих условиях горной практикой установлено снижение выбросоопасной глубины подземных горных работ до 150 м. Вне интервала смены градиента устойчивых изменений параметров сорбционной метаноемкости выбросоопасная глубина в 2 и более раз больше.

Минимальное значение газоносности угольных пластов, при которой [7] зарегистрирован внезапный выброс ( $10,5 \text{ м}^3/\text{т}$ ) и установлена граница ее выбросоопасных значений ( $\geq 12 \text{ м}^3/\text{т}$ ), соответствуют началу интервала смены градиента устойчивых изменений параметров сорбционной метаноемкости ( $10,5 \text{ см}^3/\text{г}$ ) и точке бифуркации ( $12,5 \text{ см}^3/\text{г}$ ).

*Сорбционная способность углей и выбросоопасность углеметановых пластов Кузнецкого бассейна*

Стратиграфические структуры			Предельная сорбционная метаноемкость, см <sup>3</sup> /г <u>min;max</u> сред.	Начальный градиент сорбции G, см <sup>3</sup> /г·МПа <u>min;max</u> сред.	Глубина проявления внезапных выбросов угля и газа, м <u>прогноз</u> факт
серия	подсерия	свита			
Кольчугинская			<u>8,01;12,59</u> 11,13	<u>8,29;25,26</u> 13,96	<u>300-620</u> 320
	Ерунаковская		<u>8,01;12,38</u> 10,53	<u>8,29;16,83</u> 12,36	>700
		Тайлуганская	<u>9,52;12,28</u> 10,95	<u>10,52;16,07</u> 13,12	>700
		Грамотеинская	<u>8,01;12,27</u> 9,91	<u>8,29; 15,98</u> 11,27	>700
		Ленинская	<u>8,01;12,38</u> 10,74	<u>8,39;16,83</u> 12,69	>700
	Ильинская		<u>8,74;12,59</u> 12,03	<u>9,39;25,24</u> 16,35	<u>300-620</u> 320
		Ускацкая	<u>8,74;12,59</u> 11,81	<u>9,39;25,24</u> 15,80	<u>300-320</u> 320
		Козанково-Маркинская	<u>9,57;12,59</u> 12,24	<u>10,53;19,51</u> 16,91	<u>300-620</u> 320
	Балахонская			<u>11,09;16,50</u> 12,99	<u>13,04;28,05</u> 21,06
	Верхнебалахонская		<u>11,09;16,50</u> 12,96	<u>13,04;28,05</u> 20,88	<u>150-300</u> 150-250
		Усятская	<u>11,09;16,50</u> 12,88	<u>15,40;28,05</u> 20,39	<u>150</u> 150
		Кемеровская	<u>12,15;15,89</u> 12,75	<u>15,74;27,27</u> 20,27	<u>150-200</u> 150
		Ишановская	<u>11,09;15,73</u> 13,06	<u>13,04;26,98</u> 21,13	<u>150</u> 250
		Промежуточная	<u>12,36;13,89</u> 13,15	<u>19,59;23,45</u> 21,73	<u>300</u> ---
	Нижнебалахонская	Алыкаевская	<u>12,36;14,37</u> 13,12	<u>18,04;25,70</u> 21,76	<u>250-430</u> 250-750

Сходимость значений позволяет заключить, что углеметановый пласт можно рассматривать как систему элементов с существенно различными характеристиками физико-химической устойчивости. При внедрении выработки в зону с бифуркацией параметров связей уголь-метан система генетически способна сформировать возмущающий импульс, достаточный для развития ее саморазрушения. Эти качества объясняют внезапность, лавинообразность и очаговый характер грозных природно-технологических явлений в угольных шахтах.

Для углей различных подсерий и свит величина бифуркации начальной интенсивности сорбционной метаноемкости различна. Параметры сорбции молодых углей *ерунаковской* подсерии по мере метаморфизма устойчиво возрастают с градиентом изменения  $\psi_1 = 1,5$  1/МПа и весьма незначительно представлены в интервале смены градиента устойчивых изменений начальной интенсивности сорбционной метаноемкости (пунктирные линии на рис. 1 от наименований подсерий отражают среднестатистические величины начального градиента). Более метаморфизированные угли *ильинской*

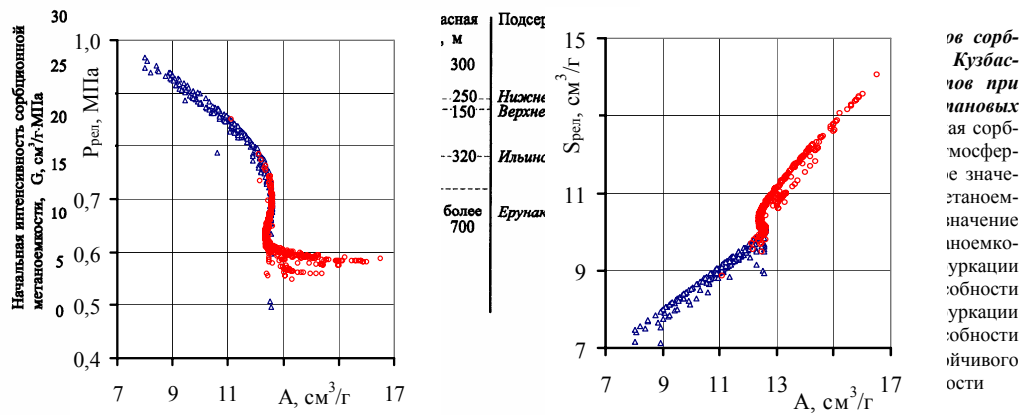


Рис. 4. Изменения давления релаксации  $P_{\text{рел}}$  с ростом предельной сорбционной метаноёмкости угля  $A$

подсерии распределяются своей большей частью в пределах этого интервала, а некоторая их часть характеризуется бифуркацией параметров сорбции. Средне метаморфизированные угли *верхнебалахонской* подсерии практически полностью имеют бифуркацию параметров. Угли *нижнебалахонской* подсерии своей большей частью характеризуются устойчивым градиентом изменения сорбционных свойств, но уже равным  $\psi_2 = 2,0$  1/МПа.

Установленные особенности заставляют более подробно проанализировать характеристики базовой функции (5). Для этого из нее получена зависимость для расчета давления сорбционного равновесия, при котором линия начальной интенсивности сорбции достигает значения константы предельной сорбционной метаноёмкости, -давление релаксации ( $P_{\text{рел}}$ ). А также выражение для расчета сорбционной метаноёмкости при давлении сорбционного равновесия, равном давлению релаксации - ёмкости релаксации ( $S_{\text{рел}}$ ). Графическое отображение результатов расчетов приведено на рис. 4 и 5.

Величина давления релаксации сорбционной метаноёмкости с ростом сорбционной способности углей снижается с формированием интервала бифуркации, после которого значения давления практически стабилизируются. Минимизация давления релаксации указывает, что с ростом предельной сорбционной метаноёмкости с  $8 \text{ см}^3/\text{г}$  до  $17 \text{ см}^3/\text{г}$  устойчивость сорбционной системы уголь-метан снижается примерно в 1,5 раза. Причем основная часть снижения приходится на точку бифуркации.

Значения ёмкости релаксации изменяются не менее динамично (рис. 5). Имея определенную плавность увеличения до и после интервала бифуркации они практически вертикально возрастают при критической метаноёмкости.

Столь существенное несоответствие динамики функций (рис. 4, 5) заставляет перейти к их комплексной оценке. Для этого удобно допустить: произведение давления и ёмкости релаксации сорбции углем метана (рис. 6) может служить показателем энергетической устойчивости системы уголь-метан. Справедливость этого допущения подтверждается более явным разделением углей на группы по этому признаку, чем во всех ранее известных случаях. Однако, ввиду близости систем точек с близкими качественными связями, но отличающимися значениями координат в рассматриваемой плоскости. Эта особенность энергетического показателя позволяет устанавливать количественные различия в свойствах углей стратиграфических структур бассейна на уровне подсерий и даже отдельных свит. Следует обратить внимание на две нижние экспериментальные точки. Они отражают свойства углей пласта Е5 ильинской подсерии кольчугинской серии на глубине 1004 и 1050 м. Их строгое размещение на линии бифуркации свидетельствует не только об объективности результатов настоящего анализа, но акцентирует внимание на существенности влияния современной глубины залегания пластов на физико-химические свойства угля.

Обобщая результаты исследований можно заключить, что особенности условий и процессов формирования и геологического преобразования угольных месторождений, обуславливая единые

тенденции в изменениях физико-химических свойств углей, приводят к достаточно сложным закономерностям.

Выявление и количественное определение этих закономерностей возможно путем отражения их совокупного влияния с помощью показателей сорбции углем метана.

Изменение предельной сорбционной способности углей в процессе метаморфизма сопровождается значительными изменениями соответствующих величин начальной интенсивности, давления и емкости релаксации и показателя энергетической устойчивости, вплоть до бифуркации их параметров при величине предельной сорбционной метаноёмкости  $12,5 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Эффект согласуется с газодинамической активностью угольных пластов стратиграфических структур Кузбасса и свидетельствует о нелинейности геологических преобразований физико-химических свойств угля и влиянии современной глубины залегания пластов.

При входе выработки в зону с бифуркацией параметров сорбционной метаноёмкости угле-метановый пласт, как система элементов с существенно различной физико-химической устойчивостью, генетически способен сформировать возмущающий импульс, достаточный для развития саморазрушения. Эти качества объясняют внезапность, лавинообразность и очаговый характер внезапных выбросов угля и газа в шахтах, их приуроченность к пластам соответствующей стадии метаморфизма.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог метаноёмкости углей Кузбасса. - Кемерово, ВостНИИ. 1969. - 32 с.
2. Мостеллер Ф. Анализ данных и регрессия / Ф. Мостеллер, Дж.Тьюки; - М.: Финансы и статистика, 1982. - 319 с.
3. Йосс Ж. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций / Ж.Йосс, Д. Джозеф. - М.: Мир, 1983. - 301 с.
4. Логов А.Б. Математические модели диагностики уникальных объектов / А.Б. Логов, Р.Ю. Замараев. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. - 228 с.
5. Мальшиев Ю.Н. Научные основы методов прогноза и предотвращения опасных газопроявлений в шахтах / А.Т. Айруни, И.В. Зверев. // Препринт Метанового Центра Института угля СО РАН. - Кемерово, 1997. № 2. - С.1-4.
6. Полевщиков Г.Я. Особенности распределения газового потенциала участка углеметанового месторож-

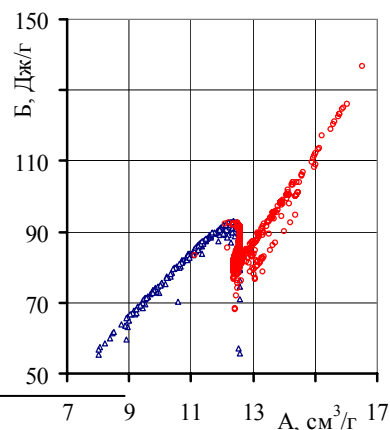
В зонах физико-химических свойств пласта с минимальной устойчивостью связей уголь-метан даже незначительное динамическое воздействие (отбойным молотком, обушком) способно спровоцировать саморазрушение. Для этих зон наиболее значимы показатели изменчивости начальной скорости газоотдачи [8] и эффект «гистерезиса сорбции» [9].

*Рис. 6. Зависимость энергетического показателя  $B$  от константы  $A$  предельной сорбционной способности угля*

Можно предположить, что величина энергетического показателя устойчивости связана с силой динамических газопроявлений, а ее изменчивость в пределах пласта с вероятностью их возникновения. Причем, движение выработки в направлении роста устойчивости системы

*Рис. 5. Изменения емкости релаксации  $S_{rel}$  с ростом предельной сорбционной метаноёмкости угля  $A$*

менее опасно, чем на снижение [10].



дения, разрабатываемого открытым способом. Г.Я. Полевщиков, Е.Н. Козырева, Т.А. Киряева. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2003. - № 9 - С.82-84.

7. Чернов О.И. Прогноз внезапных выбросов угля и газа / О.И. Чернов, В.Н. Пузырев. - М.: Недра, 1979. - 295 с.

8. Эттингер И.Л. Внезапные выбросы угля и газа и структура угля. - М.: Недра, 1969. - 160 с.

9. Пузырев В.Н. О возможном явлении «гистерезиса сорбции» метана выбросоопасным углем при возбуждении колебаний давления газа / В.Н. Пузырев, Т.А. Балашов, Д.В. Алексеев // Уголь. - 1993. - № 6. - С. 46-48.

10. Чернов О.И. О проблеме внезапных выбросов угля и газа // Уголь. - 1974. - № 12. - С. 35-38.

**Коротко об авторах**

Полевщиков Геннадий Яковлевич – доктор технических наук, зав. лабораторией,  
Козырева Елена Николаевна – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник,  
Киряева Татьяна Анатольевна – мл. научный сотрудник,  
Институт угля и углехимии СО РАН.

**ДИССЕРТАЦИИ**

**ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ  
ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ**

<i>Автор</i>	<i>Название работы</i>	<i>Специальность</i>	<i>Ученая степень</i>
<b>МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
ГРИГОРЬЕВ Александр Владимирович	Экономическое обоснование эффективности экспортных поставок Российских углей	08.00.05	к.э.н.
ГРИДИН Владимир Григорьевич	Эколого-экономическое обоснование выбора варианта увеличения добычи коксующихся углей в Кузнецком бассейне	08.00.05	к.э.н.

