



Радиационные характеристики углей разных степеней метаморфизма

Н.Л.Алукер✉, Б.П.Адуев, Д.Р.Нурмухаметов

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия

Как цитировать эту статью: Алукер Н.Л., Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р. Радиационные характеристики углей разных степеней метаморфизма // Записки Горного института. 2025. Т. 271. № 16332. С. 131-140. [EDN GYZHWV](#)

Аннотация

Формирование залежей и последующие процессы метаморфизма концентрации радиоактивных элементов в углях могут являться индикаторами протекающих процессов, поэтому анализ тенденций изменения радиационных характеристик углей в ряду метаморфизма актуален. Цель работы – экспериментально оценить радиационные характеристики углей разных марок (стадий метаморфизма) методами термолюминесцентной (ТЛ) дозиметрии и определения бета-активности и выявить корреляции полученных данных с данными технического, элементного и термогравиметрических анализов, масс-спектрометрических и ЭПР-исследований. Для дозиметрических измерений, косвенно характеризующих содержания радионуклидов в углях, использовался модифицированный дозиметрический комплекс и оригинальные почво-эквивалентные термолюминесцентные детекторы на основе SiO₂. Анализ полученных результатов обосновывает возможность применения ТЛ-исследований для определения зольности углей низких и средних степеней метаморфизма (ряд Б→Г) и отсутствие такой возможности для углей более высоких степеней. Совокупность корреляционных зависимостей в ряду метаморфизма свидетельствует о значительном изменении условий формирования угля в диапазоне времен формирования марок Г→Ж→К при резкой смене условий формирования (преобразования) в этот временной период. Резкие изменения условий регионального метаморфизма (времени, температуры, давления, окислительно-восстановительных условий) приурочены к границе пермского и триасового периодов (~250 млн лет назад), в которых происходили как преобразование существующих отложений угля, так и формирование новых залежей.

Ключевые слова

уголь; метаморфизм; зольность; термолюминесценция; поглощенная доза; радиоактивность

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (проект 121031500513-4) на оборудовании ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН.

Поступила: 28.10.2023

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 17.01.2025

Опубликована: 25.02.2025

Введение

Радиоактивность угля, как и других природных объектов, определяется содержанием в нем природных урана и тория в равновесии с продуктами их распада, а также содержанием ряда бета-излучающих долгоживущих изотопов (⁴⁰K, ⁵⁰V, ⁸⁷Rb, ¹¹⁵In, ¹²³Te, ¹³⁸La, ¹⁷⁶Lu, ¹⁸⁷Re), основным из которых благодаря большому содержанию является ⁴⁰K [1-3].

Содержание ²³⁸U и равновесного количества ²²⁶Ra в твердой породе угля в среднем примерно соответствует их содержанию в почвах и находится на уровне безопасных концентраций. В силу хорошей растворимости ²²⁶Ra равновесное распределение может нарушаться. Распад ²²⁶Ra приводит к появлению газообразного короткоживущего продукта распада (²²²Rn), возможность выхода которого в межпоровое пространство из твердой матрицы практически всегда приводит к нарушению естественного радиоактивного равновесия в ряду ²³⁸U [3-5].

В равновесии с ближайшими короткоживущими продуктами своего распада при отсутствии нового источника поступления ²²²Rn быстро распадается по экспоненциальному закону, поэтому зафиксировать эманацию можно лишь в месте нахождения постоянного источника выделения радона [3]. Короткоживущие продукты распада ²²²Rn производят α-, β- и γ-излучения.



Радиоактивные примеси содержатся как в органической, так и в зольной частях угля. Торий в основном содержится в минералах-фосфатах (монацит, апатит), уран как в минеральных включениях – уран-торий-содержащие минералы (цирконий, пирохлор, монацит или собственные минералы), так и в органической фракции в виде металлоорганических соединений. Органическая часть обычно содержит на порядок меньше урана, чем неорганическая (обуславливающая зольность), поэтому после сжигания угля большая часть урана, тория и их продуктов распада сохраняется в твердых отходах (удельная концентрация радиоактивных элементов в золе в 5-7 раз выше, чем в исходном угле) [2, 6-8]. Повышенное содержание урана и тория в углях часто сопровождается накоплением сумм редких земель, циркония, гафния, других редких элементов [6-8].

В общем содержание радионуклидов в углях Кузнецкого бассейна не высокое и сравнимо с содержанием в почвах [3, 9]. Худшие показатели радиации в Кузбассе имеют бурые угли Канско-Ачинского бассейна, добываемые в Кемеровской области на Итатском разрезе [3, 6-9]. Содержание урана в углях и вмещающих породах Итатского месторождения в несколько раз превышает значения, характерные для Кузбасса (уран, среднее – 56,9 г/т, вариации – 6-139 г/т) [3, 7]. Распределение урана по площади разреза носит очаговый характер, участки повышенного содержания занимают ~20 % площади [3, 7]. В золошлаковом материале, образующемся при сжигании такого угля, содержание урана доходит до 900 г/т, и этот материал относится по мировой классификации к рядовым урановым рудам (диапазон содержания урана 0,05-0,1 %) [9-11].

Так как радионуклиды сосредоточены в 10-20 % минеральной части угля, радиоактивность может отражать содержание минеральной составляющей угля и находиться в корреляции с зольностью проб [12-14].

В работе исследованы радиационные характеристики углей Кузнецкого бассейна в ряду метаморфизма и проведена корреляция полученных данных с данными технического анализа [15-17] и другими физико-химическими исследованиями (элементный и термогравиметрический анализы, масс-спектрометрические и ЭПР-исследования) [18-21] с целью определения возможности использования радиационных характеристик угля для определения зольности и анализа изменения радиационных характеристик в ряду метаморфизма.

Методы

Образцы и методика исследования. Исследовались угли (табл.1) в ряду метаморфизма с размерами частиц ≤ 3 мм [13-15, 19]. Рабочая проба углей переносилась в пластиковую тару (1 л), заполняя ее на 2/3, внутрь которой закладывались термолюминесцентные детекторы. Таким образом детекторы были окружены со всех сторон слоем угля и выдерживались в пробе в течение 20 дней.

Для выбранных рабочих проб из ряда метаморфизма имелись исчерпывающая привязка к разрезам, данные технического анализа (табл.1) и результаты расширенных физико-химических исследований, которые были проведены в ЦКП Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН [13-15].

Таблица 1

Результаты технического анализа проб углей

Аналитическая проба	Марка угля	A_d , %	V_{daf} , %	W_a , %
№ 27, разрез «Кайчакский»	Б	10	53,1	11,8
№ 72, разрез «Камышанский»	Д	6,2	44,5	7,6
№ 64, шахта «им. В.Д.Ялевского», пласт 52	ДГ	4,7	42,6	5,7
№ 40, шахта «им. С.М.Кирова», пласт Поленовский	Г	3,3	40,4	1,2
№ 15, шахта «им. С.Д.Тихова», пласт 23	Ж	7,8	33,3	0,8
№ 10, ООО «Участок Коксовый», пласт II внутренний	К	4,9	21,3	0,6
№ 34, разрез «Томусинский»	ОС	6,7	19,8	0,1
№ 45, разрез «Бачатский»	СС	4,7	19	1,3
№ 81, АО «Кузнецкинвестстрой», пласт 19а	Т	6,2	14,4	0,5

Примечания: A_d – зольность; V_{daf} – выход летучих веществ; W_a – влажность аналитическая.

Аппаратура. Изучение поглощенных доз, которые накапливаются в углях за счет содержания в них радиоактивных элементов, проводилось методом термолюминесцентной дозиметрии [3, 22, 23].



Использовался модифицированный дозиметрический комплекс ДТУ-01М, обеспечивающий регистрацию сигнала в температурном диапазоне до 450 °С с возможностью изменения скорости нагрева от 1 до 20 °С/с. Дозиметрический прибор ДТУ-01М откалиброван совместно с детекторами ТЛД-К на основе SiO₂, которые помещались в анализируемую пробу на определенный срок экспозиции и по показаниям которых рассчитывались поглощенные дозы, обусловленные содержанием радионуклидов в угле [3, 24]. Благодаря близости эффективного атомного номера $Z_{эфф}$ детектора и четвертичных отложений детекторами корректно измеряется поглощенная доза [3, 23, 24].

После экспозиции детекторы устанавливались на нагревательный элемент комплекса ДТУ-01М по градуировке установки непосредственно для данных детекторов, поглощенная доза определялась в сантигреях (сГр). Для регистрации фонового облучения детекторы помещались в аналогичную тару без угля. Рассчитывалась мощность годовой дозы за вычетом фонового излучения, т.е. дополнительная к фоновой годовая доза, обусловленная содержанием радионуклидов в угле.

В связи с отсутствием гигроскопичности детекторы ТЛД-К могут использоваться для дозиметрии водных сред, т.е. для изучения характеристик шахтных вод, отстойников, сбросов и питьевых поверхностных и скважинных вод [3].

Для определения бета-активности углей (Бк/кг) применялся радиометр КРВП-3Б с большой свинцовой камерой. В качестве эталонного образца измерялась активность высушенного порошка хлорида калия, обладающего, за счет содержания в нем ⁴⁰K, эталонной бета-активностью.

ЭПР-измерения проводились с использованием спектрометра Bruker EMX 6/1 micro в X-диапазоне (9,5 ГГц) при параметрах настройки:

- диапазон развертки магнитного поля $\Delta H = 1300-5600$ Гс;
- коэффициент усиления сигнала $2,24 \cdot 10^2$;
- затухание СВЧ мощностью 20 дБ;
- время преобразования сигнала 15 мс;
- время развертки сигнала 31 с.

Результаты исследования

Результаты дозиметрии и определения бета-активности проб углей приведены в табл.2. В каждую пробу закладывалось не менее пяти детекторов, в табл.2 приведены средние значения и отклонение по пробам. Величина среднего отклонения ни для одной из проб не превысила 3 %. Результаты проведенных исследований показывают, что удельные бета-активности и дополнительные к фону поглощенные дозы имеют коррелируемые значения, падают при росте метаморфизма углей в ряду Б→Ж, а высокометаморфизованные угли более радиоактивны, чем средне-метаморфизованные.

Таблица 2

Результаты дозиметрии и определения бета-активности проб угля

Марка угля	Доза за время контроля D , сГр	Среднее отклонение ΔD , сГр	Годовая поглощенная доза, сГр/год	Годовая поглощенная доза за вычетом фона, сГр/год	Удельная бета-активность A , Бк/кг
Б	0,0225	0,0005	0,411	0,081	75
Д	0,0208	0,0004	0,380	0,050	46
ДГ	0,0202	0,0004	0,369	0,039	37
Г	0,0196	0,0004	0,358	0,028	27
Ж	0,0190	0,0004	0,346	0,016	16
К	0,0221	0,0005	0,404	0,074	72
ОС	0,0235	0,0007	0,428	0,098	84
СС	0,0225	0,0006	0,410	0,080	60
Т	0,0241	0,0007	0,440	0,110	62

Поиск корреляции радиационных характеристик углей в ряду метаморфизма с другими физико-химическими характеристиками. На рис.1 приведены зависимости поглощенных доз от влажности и выхода летучих веществ с приведением коэффициентов корреляции при аппроксимации данных линейной зависимостью.

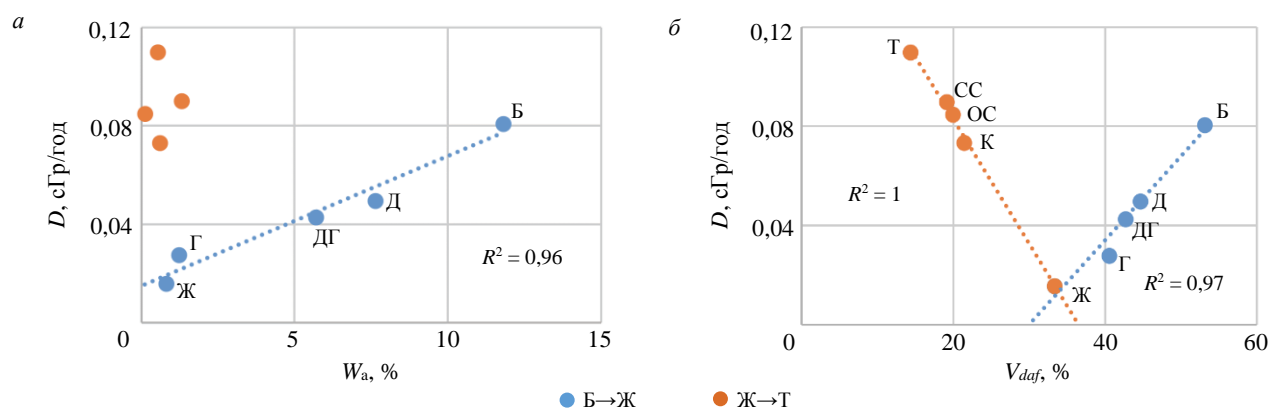


Рис.1. Зависимость поглощенной дозы, формирующейся в углях за счет радиоактивных элементов, от влажности (а) и выхода летучих веществ (б)

Сопоставление радиационных характеристик с результатами технического анализа проб углей в ряду Б→Т показывает:

- зависимость поглощенной дозы от степени метаморфизма углей в ряду Б→Т имеет сложный характер. От Б→Ж радиоактивность падает до минимальных значений в пробе Ж, а затем при увеличении степени метаморфизма наблюдается рост радиоактивности от Ж→Т (рис.1);
- угли с большим содержанием влаги в ряду Ж→Б (уменьшение степени метаморфизма) более радиоактивны, это позволяет предположить, что часть радионуклидов находится в водорастворимых соединениях;
- радиоактивность углей с ростом выхода летучих веществ более 35 % (в ряду Ж→Б) растет, для высокометаморфизованных углей (в ряду Т→Ж) при росте выхода летучих в диапазоне от 15 до 35 % наблюдается падение радиоактивности. Такой ход зависимости позволяет предположить, что часть радионуклидов связана с органической фракцией угля.

Так как радионуклиды преимущественно сосредоточены в зольной части угля, рассмотрим зависимость поглощенной дозы D от зольности A_d (рис.2).

Для проб углей в ряду Г→Б зольность проб растет от 3 до 10 %, и в этом ряду наблюдается линейный рост поглощенных доз (рис.2, а). При расширении диапазона зольности до 25 % (дополнение к выборке углей марок Г и Д с высокими зольностями, шахта «Заречная») образцы с большей зольностью хорошо укладываются в линейную зависимость дозы от зольности (рис.2, б). Это позволяет сделать предварительное заключение о возможности определения зольности проб углей низких и средних степеней метаморфизма по их радиационным характеристикам. Дополнительным доводом, подтверждающим возможность применения дозиметрических исследований углей для определения зольности, является постоянство нормированных на зольность доз в ряду Б→Г. Слабое изменение поглощенных доз единичной зольности в ряду метаморфизованных углей Б→Г может вносить минимальный вклад в погрешность при определении зольности по радиоактивности.

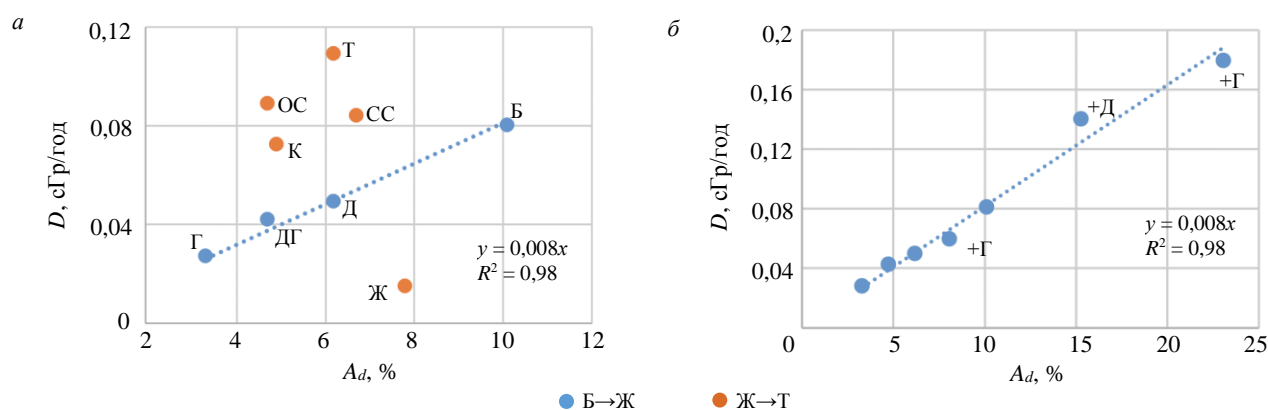


Рис.2. Зависимость поглощенной дозы от зольности проб угля $A_d = 3-10\%$ (а) и до 25 % (б)



Для проб Ж→Т логичной зависимости дозы от зольности не выявляется (рис.2, а). Следует отметить, что доза единичной зольности для углей К→Т при сильном разбросе значений почти вдвое выше, чем для низко- и среднеметаморфизованных. Это может свидетельствовать о наличии радионуклидов в органической матрице высокометаморфизованных углей. Проба угля марки Ж выделяется низким значением нормированной на зольность поглощенной дозы.

При сопоставлении радиационных характеристик углей в ряду метаморфизма с результатами элементного анализа органических элементов в пробах углей в ряду Б→Ж наблюдаются закономерности (рис.3):

- уменьшение радиоактивности проб с увеличением содержания углерода, азота и водорода (увеличение степени метаморфизма);
- рост поглощенных доз при росте содержания кислорода (уменьшение степени метаморфизма);
- угли с более высокими степенями метаморфизма обнаруживают изменение хода зависимостей и выявляют иные тенденции в ряду метаморфизма Ж→Т;
- с ростом степени метаморфизма в ряду Ж→Т поглощенные дозы после прохождения минимума для углей Ж возрастают.

Падение поглощенных доз при росте концентрации азота в ряду Б→Ж (повышении степени метаморфизма) при переходе к маркам более высоких степеней метаморфизма Ж→Т сменяется ростом дозы при падении содержания азота. Точкой перелома является проба угля марки Ж.

Характерный излом характеристик при пересечении степени метаморфизма Ж наблюдается для содержания кислорода при концентрации ~15 %, углерода при концентрации ~78 % (рис.3) и для содержания летучих веществ при концентрации ~35 % в пробах угля (см. рис.1). Поглощенные дозы проходят через минимум при определенных концентрациях, и затем с увеличением степени метаморфизма наблюдается их рост. Такой характер зависимостей может прослеживаться только при резко меняющихся условиях формирования или преобразования угля (время, температура, давление и др.) в период формирования залежей углей марок Г→Ж→К.

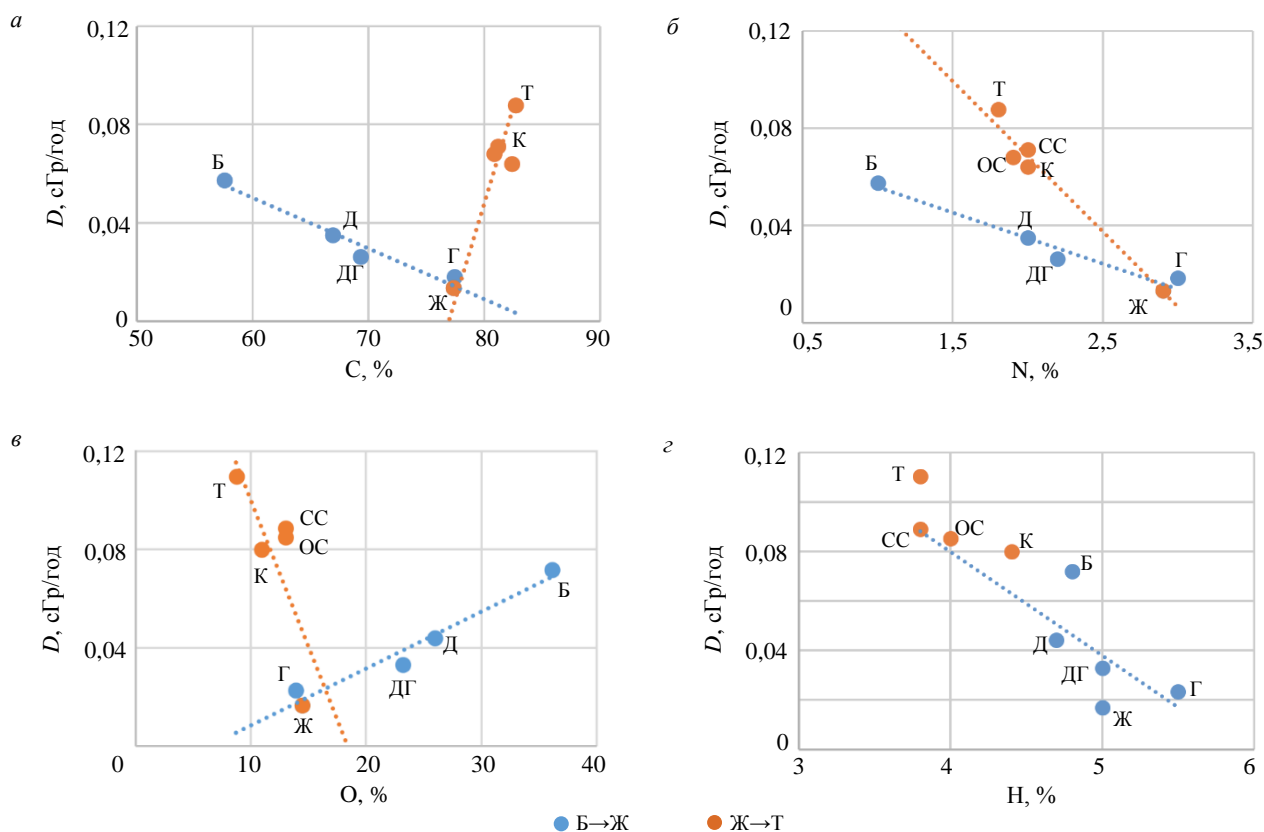


Рис.3. Зависимость поглощенной дозы от содержания углерода (а), азота (б), кислорода (в) и водорода (г) в ряду метаморфизма

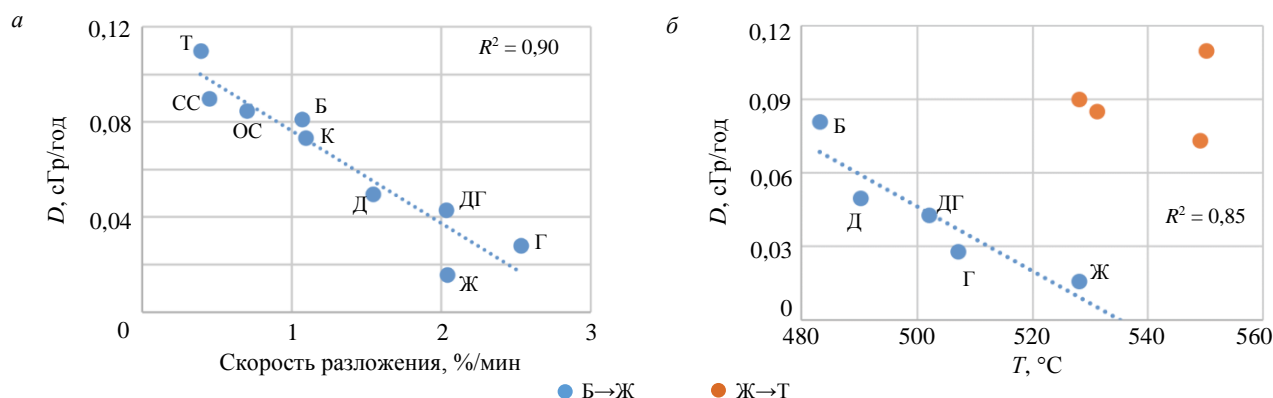


Рис.4. Корреляционные зависимости поглощенных доз и степеней метаморфизма от скоростей разложения углей (а) и температур максимального выделения H_2O в инертной среде (б)

Зависимость поглощенных доз и степеней метаморфизма от скоростей разложения углей и температур максимального выделения H_2O в инертной среде на рис.4 разнонаправленная. С ростом скорости разложения проб угля в инертной среде наблюдается уменьшение поглощенной дозы для углей Т→К (падение степени метаморфизма) и для Б→Ж (рост степени метаморфизма) с минимальными значениями дозы для проб стадии метаморфизма Г и Ж (рис.4). Аналогичный ход имеет зависимость поглощенной дозы от концентрации водорода (см. рис.3). Максимальные температуры выделения H_2O при разложении в инертной среде в ряду Б→Ж растут при падении поглощенных доз.

Распределение углерода по структурным фрагментам – карбонильным ($C=O$); карбоксильным ($COOH$); ароматическим атомам углерода ($C_{ар}$); ароматическим атомам углерода, связанным с атомами кислорода ($C_{ар}-O$); протонированным ароматическим атомам углерода ($C_{ар}-H$); метоксильным фрагментам ($OSCH_3$); атомам углерода алкильных фрагментов (CH_2) – выполненное методом моделирования по результатам ЯМР-исследований в инертной среде, показывает разноплановое поведение фрагментов от поглощенных доз (степеней метаморфизма проб) (рис.5).

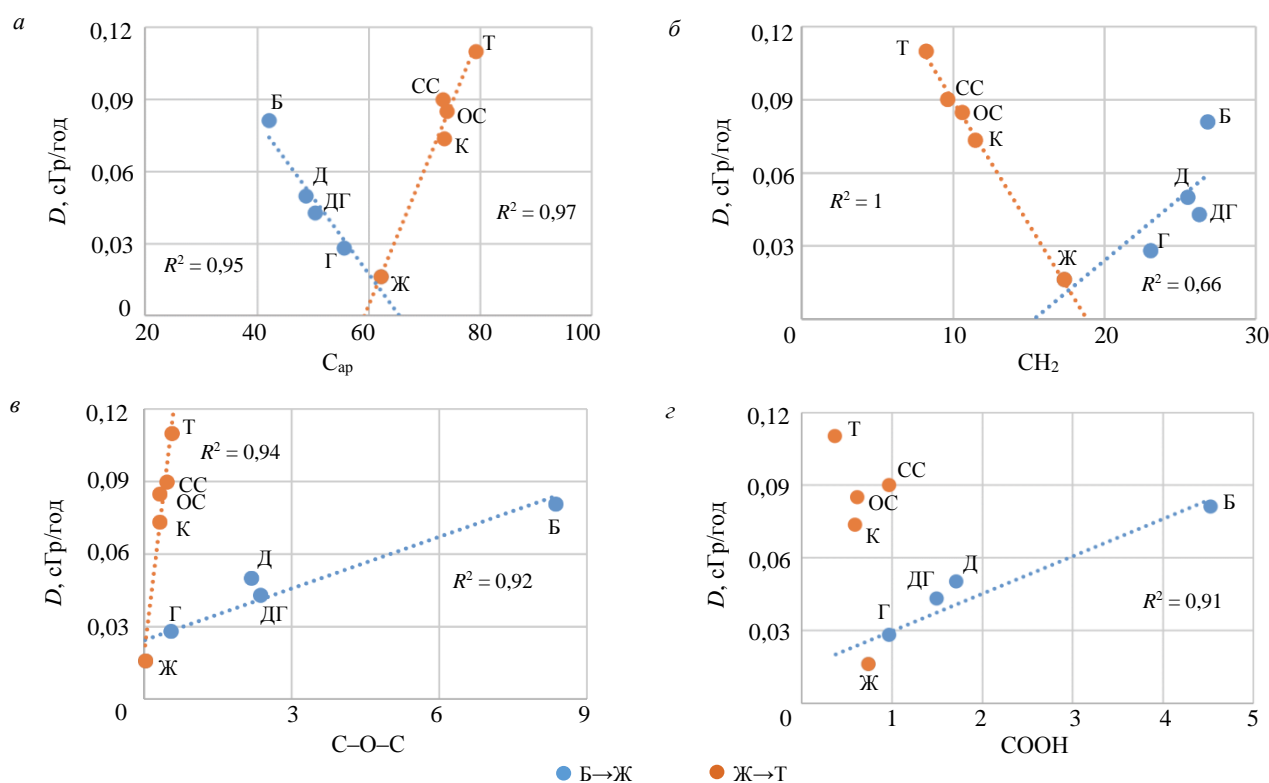


Рис.5. Корреляционные зависимости поглощенных доз и степеней метаморфизма от структурных фрагментов углерода в ряду Б→Т: $C_{ар}$ (а); CH_2 (б); C-O-C (в) и $COOH$ (г)



С ростом степени метаморфизма и падением поглощенных доз в ряду Б→Ж наблюдается рост содержания C_{ap} , а также фрагментов CH_3 и $OSCH_3$ и падение количества $C_{ap}-H$, $C_{ap}-O$, фрагментов CH_2 , $C-O-C$, $COOH$ и $C=O$. Корреляционные зависимости C_{ap} , CH_2 , $C-O-C$ и $COOH$ от поглощенной дозы для всего исследованного ряда метаморфизма приведены на рис.5.

Так же, как на рис.1 и 4, наблюдается характерный излом зависимостей при проходе углями степеней метаморфизма Г→Ж→К с точкой перелома в стадии Ж. Для углей высоких стадий метаморфизма прослеживается рост дозы с увеличением степени метаморфизма при росте содержаний C_{ap} , $C-O-C$ и падении содержания CH_2 .

На рис.6 приведена зависимость числа парамагнитных центров от нормированной на зольность поглощенной дозы, т.е. дозы единичной зольности. Угли обладают парамагнетизмом за счет содержания различных типов парамагнитных центров (дефектов) [25-27]. Парамагнитные центры могут накапливаться в угле за счет длительного облучения содержащимися в них альфа-излучающими радионуклидами [28, 29].

С увеличением степени метаморфизма происходит рост нормированной поглощенной дозы и рост числа парамагнитных центров. Роль в наблюдаемой зависимости, наряду с радиоактивностью углей, играет временной фактор. Чем моложе уголь, тем меньше времени он подвергается радиационному воздействию содержащихся в пробе или вмещающих породах радионуклидов и тем меньше парамагнитных центров он содержит. Чем древнее уголь, тем выше время воздействия и накапливаемое число парамагнитных центров.

Из логичной зависимости выпадает проба угля Ж, которая при минимальной поглощенной дозе и среднем возрасте обладает высоким числом парамагнитных центров. Можно предположить, что за их создание, кроме рассматриваемого радиационного фактора, ответственны более сложные специфические условия формирования дефектов (температура, давление и др.).

Обсуждение результатов

Зависимости изменения радиоактивности в ряду метаморфизма углей при низких и средних степенях метаморфизма в целом предсказуемы и определяются временными рамками формирования углей и периодами полураспада основных содержащихся в них радионуклидов [1-3]. Возраст наиболее древних углей оценивается в $3,5 \cdot 10^8$ лет, и периоды полураспада основных радионуклидов имеют сравнимые с этим возрастом величины (табл.3).

Таблица 3

Характеристики распадов и оценка активностей основных радионуклидов, содержащихся в угле

Радионуклид	Период полураспада, возраст угля (лет)	Удельная активность, радионуклида, Бк/г	Содержание радионуклида в природной смеси элемента, %	Среднее содержание радионуклида в угле, г/т	Средняя активность радионуклида в угле, Бк/кг
^{40}K	1,25E+09	2,65E+05	0,0119	0,1	29,3
^{238}U	4,5E+09	1,2E+04	99,3	1,9	23,4
^{235}U	7,1E+08	7,9E+04	0,7	1,2E-02	0,96
^{234}U	2,45E+05	2,3E+8	0,0055	0,0	0,0
^{232}Th	1,4E+10	3,1E+03	100	6,9	21,4
Уголь	3,5E+08	0,075			Σ75

После формирования радионуклидного состава угля с течением времени его активность закономерно уменьшается, что может объяснять снижение активности углей в ряду Б→К при сравнимых концентрациях радионуклидов в период формирования. При увеличении степени метаморфизма за счет более длительного облучения массы угля содержащимися в пробе

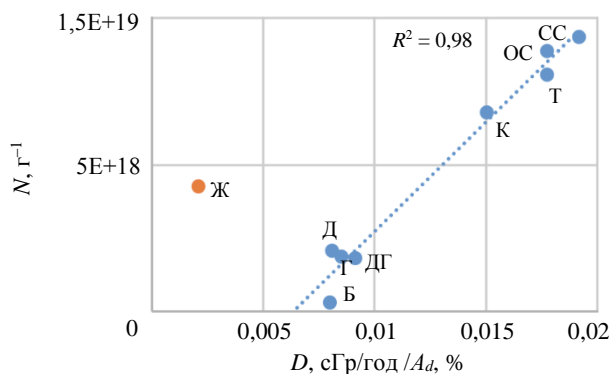


Рис.6. Зависимость числа парамагнитных центров в грамме угля от нормированной на зольность поглощенной дозы (для угля единичной зольности)



радионуклидами должно увеличиваться число радиационных дефектов, что наблюдается экспериментально в ЭПР-исследованиях. Таким образом, временной фактор метаморфизации объясняет наблюдаемую зависимость изменения радиоактивности проб в ряду слабометаморфизованных проб. Для высокометаморфизованных проб необходимо предположить наличие радионуклидов как в минеральной, так и в органической составляющих углей с более высоким содержанием радионуклидов в биосфере в период их формирования.

Линейная зависимость радиоактивности от зольности зафиксирована при средних и низких степенях метаморфизма ($\Gamma \rightarrow Б$), может быть использована для определения зольности пробы по радиоактивности. При переходе к более высоким степеням метаморфизма зависимость существенно усложняется.

Приведенные на рис. 1, 3, 5 зависимости поглощенной дозы от выхода летучих, концентраций углерода, кислорода, азота и структурных фрагментов углерода демонстрируют резкое изменение поглощенных доз при переходе от углей марки Ж к маркам более высоких степеней метаморфизма. Все зависимости претерпевают резкое изменение хода с тенденцией к росту поглощенных доз в ряду метаморфизма $К \rightarrow Т$ в противовес тому, что наблюдается при низких степенях метаморфизма. Резкое изменение хода зависимостей можно объяснить только привлекая гипотезу о существенном изменении условий формирования или преобразования массивов (температур, глубин, давления, газовой среды, минерализации, окислительно-восстановительных условий) [26-29]. Смена условий накопления в углях радионуклидов происходит при прохождении стадий метаморфизма $\Gamma \rightarrow Ж \rightarrow К$ и, вероятно, связана с глобальными процессами во временной период их формирования при более интенсивном поступлении радионуклидов в объекты биосферы при формировании высокометаморфизованных углей.

Изменения в ходе зависимостей на границе метаморфизма $\Gamma \rightarrow Ж \rightarrow К$ можно проследить и без привлечения радиационных измерений, если принять в качестве показателя степени метаморфизма содержание в угле летучих веществ (рис.7). Наблюдается резкое изменение скоростей накопления углерода и кислорода, а также наличие максимумов в содержании водорода и азота при прохождении углями стадии метаморфизма Ж.

Совокупность выявленных факторов может свидетельствовать как об изменении радиационных условий, так и об окислительно-восстановительных условиях в биосфере во временной период формирования углей $Ж \rightarrow \Gamma$ [30-32].

Заключение

Анализ совокупности результатов обосновывает возможность применения термолюминесцентных исследований угля с определением поглощенных доз, формирующихся за счет содержания в нем радионуклидов, для определения зольности угля низких и средних степеней метаморфизма ($Б \rightarrow \Gamma$).

Полученные корреляционные зависимости поглощенных доз с данными технического, элементного и термогравиметрических анализов, результатами ЭПР и масс-спектрометрических

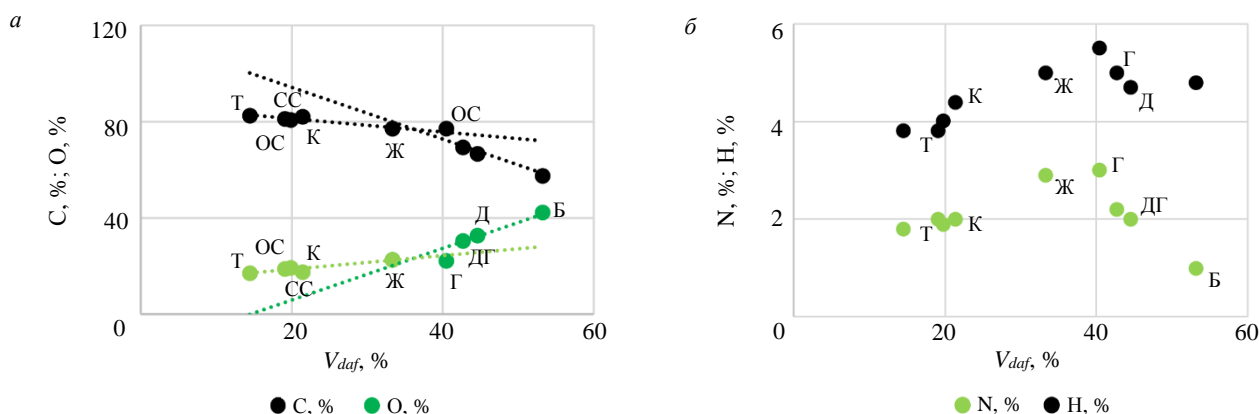


Рис.7. Зависимость концентраций основных органических элементов угля от содержания летучих веществ в углях разных стадий метаморфизма: а – углерода, кислорода; б – азота, водорода



исследований в ряду метаморфизма свидетельствуют об изменении условий формирования угля в диапазоне времен формирования углей Г→Ж→К при резкой смене условий формирования (преобразования) в этот временной период.

На основании анализа результатов можно предположить, что процесс формирования и метаморфизации углей К→Т растянут во временном диапазоне каменноугольного и пермского периодов, а угли более низких степеней метаморфизма формировались после грандиозной вспышки вулканической активности в конце перми – начале триаса, радикально изменившей структуру земной биосферы. Этот период характеризуется выбросами в атмосферу огромного количества «легкого» углерода в результате сгорания поверхностных залежей каменного угля, сквозь которые прорывалась поднимающаяся из недр магма [33-35].

Изменение в условиях формирования связано с резким изменением условий регионального метаморфизма (времени, температуры, давления, окислительно-восстановительных условий) на границе пермского и триасового периодов (~250 млн лет назад). Это время характеризуется проявлением вулканизма, сдвигом материковых плит, излиянием сибирских траппов, выбросом в атмосферу углерода, процессами горения с выпадением большого количества продуктов, быстрым захоронением осадков и катастрофическим вымиранием морских и наземных видов жизни на Земле [35-37].

ЛИТЕРАТУРА

1. Рихванов Л.П. Радиоактивность и радиоактивные элементы как фактор геологической среды и его использование в науках о Земле // Разведка и охрана недр. 2017. № 12. С. 55-61.
2. Пак Ю.Н., Пак Д.Ю., Пономарева М.В. и др. Радиоэкологические аспекты радиоактивности углей и золошлаковых отходов // Кокс и химия. 2018. № 5. С. 40-45.
3. Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Herrmann M. Дозиметрический контроль в угольных шахтах как мера повышения безопасности угледобычи // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 4. С. 98-105. DOI: [10.31857/S0032816222040012](https://doi.org/10.31857/S0032816222040012)
4. Кочкин Б.Т. Восстановительные новообразования на экзогенных инфильтрационных месторождениях урана и их связь с восходящими подземными водами // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 23-35. DOI: [10.31857/S0016777020010049](https://doi.org/10.31857/S0016777020010049)
5. Чекрыжов И.Ю., Попов Н.Ю., Арбузов С.И. Уран и торий в углях Кайнозойских впадин Приморья // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции, 20-24 сентября 2021, Томск, Россия: в 2 томах. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. Т. 1. С. 600-604.
6. Сидорова Г.П., Крылов Д.А. Проблемы радиационной опасности в угольной энергетике // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 11. С. 200-209. DOI: [10.25018/0236-1493-2017-11-0-200-209](https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-11-0-200-209)
7. Федорин В.А., Нифантов Б.Ф., Аникин М.В., Борисов И.Л. Ценные элементы-примеси в углях Кузбасса // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 85-88.
8. Вялов В.И., Наставкин А.В. Уровни содержания промышленно ценных микроэлементов в углях // Химия твердого топлива. 2019. № 5. С. 63-67.
9. Счастливцев Е.Л., Ковалев В.А., Потанов В.П. Мониторинг состояния природной среды угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск: СО РАН, 2013. 312 с.
10. Артемьев В.Б., Галкин В.А., Макаров А.М. и др. Механизм предотвращения реализации опасной производственной ситуации // Уголь. 2016. № 5. С. 73-77. DOI: [10.18796/0041-5790-2016-5-73-77](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2016-5-73-77)
11. Cheng-lin Miao, Meng-meng Duan, Xin-xiu Sun, Xin-yu Wu. Safety management efficiency of China's coal enterprises and its influencing factors – Based on the DEA-Tobit two-stage model // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 140. P. 79-85. DOI: [10.1016/j.psep.2020.04.020](https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.020)
12. Legnaioli S., Campanella B., Pagnotta S. et al. Determination of Ash Content of coal by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2019. Vol. 155. P. 123-126. DOI: [10.1016/j.sab.2019.03.012](https://doi.org/10.1016/j.sab.2019.03.012)
13. Камоза Е.С., Михайлова Е.С., Исмаилов З.Р. Исследование влияния физико-химических свойств органического и минерального состава рядовых углей мелких классов на эффективность обогащения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. № 6. С. 65-75. DOI: [10.21440/0536-1028-2021-6-65-75](https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-6-65-75)
14. Крафт Я.В., Гаврилюк О.М., Исмаилов З.Р. Продукты низкотемпературного пиролиза углей Кузбасса: компонентный состав // Кокс и химия. 2023. № 1. С. 21-26. DOI: [10.52351/00232815_2023_01_21](https://doi.org/10.52351/00232815_2023_01_21)
15. Журавлева Н.В., Хабибулина Е.Р., Исмаилов З.Р. и др. Изучение взаимосвязи строения ископаемых углей и содержания в них полициклических ароматических углеводородов // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. № 3. С. 355-361. DOI: [10.15372/KhUR20160310](https://doi.org/10.15372/KhUR20160310)
16. Jun Deng, Shuai-Jing Ren, Yang Xiao et al. Thermal properties of coals with different metamorphic levels in air atmosphere // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 143. P. 542-549. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2018.07.117](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.117)
17. Wessely S., Misch D., Issa I. et al. Nanoscale pore structure of Carboniferous coals from the Ukrainian Donets Basin: A combined HRTEM and gas sorption study // International Journal of Coal Geology. 2020. Vol. 224. № 103484. DOI: [10.1016/j.coal.2020.103484](https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103484)



18. Pengxiang Wang, Mingjun Liu, Tong Pei et al. Ultraviolet Raman spectra: The reasonable method of evaluating coal pyrolysis graphitization // AIP Advances. 2020. Vol. 10. Iss. 11. № 115007. DOI: [10.1063/5.0018691](https://doi.org/10.1063/5.0018691)
19. Нелюбина Н.В., Крафт Я.В., Лыричиков С.Ю., Исмагилов З.Р. Исследование корреляционной связи между энергетическим порогом лазерного зажигания углей и степенью их ароматичности // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29. № 5. С. 591-596. DOI: [10.15372/KhUR2021335](https://doi.org/10.15372/KhUR2021335)
20. Sheta S., Afgan M.S., Zongyu Hou et al. Coal analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a tutorial review // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2019. Vol. 34. Iss. 6. P. 1047-1082. DOI: [10.1039/C9JA00016J](https://doi.org/10.1039/C9JA00016J)
21. Wenbing Li, Jidong Lu, Meirong Dong et al. Quantitative Analysis of Calorific Value of Coal Based on Spectral Preprocessing by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) // Energy & Fuels. 2018. Vol. 32. Iss. 24-32. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.7b01718](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01718)
22. Соболев И.С., Орехов К.А., Орехов А.Н. Анализ фоновой и аномальной составляющих радиогеохимического поля при гамма-спектрометрических поисках месторождений полезных ископаемых // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции, 20-24 сентября 2021, Томск, Россия. В 2-х т. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. С. 536-541.
23. Алукер Н.Л., Суздальцева Я.М., Herrmann M.E., Дуленова А.С. Эффективные термолуминесцентные детекторы для регистрации поглощенных доз ионизирующего излучения в окружающей среде // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 115-122. DOI: [10.7868/S0032816216050025](https://doi.org/10.7868/S0032816216050025)
24. Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Гимадова Т.И., Зверев А.С. Термолуминесцентные дозиметры на основе керамики из оксида и нитрида алюминия // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 6. С. 75-83. DOI: [10.31857/S0032816221050177](https://doi.org/10.31857/S0032816221050177)
25. Nelyubina N.V., Nikitin A.P., Valnyukova A.S., Ismagilov Z.R. Study Of Fossil Coals In The Kuznetsk Basin By Epr Spectroscopy // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1749. № 012018. DOI: [10.1088/1742-6596/1749/1/012018](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1749/1/012018)
26. Фурега Р.И., Хабибулина Е.Р., Исмагилов З.Р. и др. ЭПР исследования углей средней степени метаморфизма, добытых в Кузбассе // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 51. № 9. С. 149-152.
27. Сорока Е.И., Галеев А.А., Петрова В.И. и др. Органическое вещество в породах Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2019. Т. 161. Кн. 2. С. 307-324. DOI: [10.26907/2542-064X.2019.2.307-324](https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.307-324)
28. Krasnovyd S.V., Konchits A.A., Shanina B.D. et al. Adsorption processes on a carbonaceous surface: Electron spin resonance study // Physica B: Condensed Matter. 2023. Vol. 651. № 414571. DOI: [10.1016/j.physb.2022.414571](https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.414571)
29. Konchits A.A., Shanina B.D., Valakh M.Ya. et al. Local structure, paramagnetic properties, and porosity of natural coals: Spectroscopic studies // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 112. Iss. 4. № 043504. DOI: [10.1063/1.4745015](https://doi.org/10.1063/1.4745015)
30. Burgess S.D., Bowring S.A. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction // Science Advances. 2015. Vol. 1. Iss. 7. № e1500470. DOI: [10.1126/sciadv.1500470](https://doi.org/10.1126/sciadv.1500470)
31. Pavlov V.E., Fluteau F., Latyshev A.V. et al. Geomagnetic Secular Variations at the Permian-Triassic Boundary and Pulsed Magmatism During Eruption of the Siberian Traps // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. Vol. 20. Iss. 2. P. 773-791. DOI: [10.1029/2018GC007950](https://doi.org/10.1029/2018GC007950)
32. Daoliang Chu, Grasby S.E., Haijun Song et al. Ecological disturbance in tropical peatlands prior to marine Permian-Triassic mass extinction // Geology. 2020. Vol. 48. № 3. P. 288-292. DOI: [10.1130/G46631.1](https://doi.org/10.1130/G46631.1)
33. Menghan Li, Grasby S.E., Shui-Jiong Wang et al. Nickel isotopes link Siberian Traps aerosol particles to the end-Permian mass extinction // Nature Communications. 2021. Vol. 12. № 2024. DOI: [10.1038/s41467-021-22066-7](https://doi.org/10.1038/s41467-021-22066-7)
34. Payne J.L., Clapham M.E. End-Permian Mass Extinction in the Oceans: An Ancient Analog for the Twenty-First Century? // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2012. Vol. 40. P. 89-111. DOI: [10.1146/annurev-earth-042711-105329](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105329)
35. Elkins-Tanton L.T., Grasby S.E., Black B.A. et al. Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption // Geology. 2020. Vol. 48. № 10. P. 986-991. DOI: [10.1130/G47365.1](https://doi.org/10.1130/G47365.1)
36. Валиулин С.В., Онищук А.А., Палеев Д.Ю. и др. Влияние органического аэрозоля в угольных шахтах на предел воспламенения метановоздушной смеси // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 4. С. 41-48. DOI: [10.31857/S0207401X21040130](https://doi.org/10.31857/S0207401X21040130)
37. Ribeiro J., Ania C.O., Suárez-Ruiz I., Flores D. Chapter 7 – The Spontaneous Combustion of Coal-Mine Waste and Stream Effects in the El Bierzo Coalfield, Spain // Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Elsevier, 2019. Vol. 5: Case Studies – Advances in Field and Laboratory Research. P. 97-124. DOI: [10.1016/B978-0-12-849885-9.00007-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849885-9.00007-X)

Авторы: Н.Л.Алукер, канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер, naluker@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6484-6617> (Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия), Б.П.Адуев, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1878-1071> (Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия), Д.Р.Нурмухаметов, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8301-9457> (Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.