

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 544.546+552.578+536.46

**ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ КАК МЕРА
ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ УГЛЕДОБЫЧИ**

© 2022 г. Н. Л. Алукер^{a,*}, А. С. Артамонов^{b,**}, М. Herrmann^{c,***}

^a Кемеровский государственный университет
Россия, 650000, Кемерово, ул. Красная, 6

^b Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

^c Department of Meteorology and Atmospheric Science, The Pennsylvania State University University Park,
PA, 16802 United States

*e-mail: naluker@gmail.com

**e-mail: asartamonov1@mephi.ru

***e-mail: maria.herrmann@psu.edu

Поступила в редакцию 17.01.2022 г.

После доработки 29.01.2022 г.

Принята к публикации 01.02.2022 г.

Обоснована необходимость проведения дозиметрического контроля на объектах угледобычи для выявления высокой ионизации газопылевой смеси в воздушной среде шахт. Предлагается оценка шахтных полей по поверхностной дозиметрии для выявления возможных утечек газа при нарушении целостности массивов (разломы, изменение проницаемости пород при ведении работ). Приводятся примеры, иллюстрирующие применение дозиметрии в рассмотренных ситуациях.

DOI: 10.31857/S0032816222040012

1. ВВЕДЕНИЕ

Современная шахта является сложным инженерно-техническим сооружением, при проектировании которого рассчитывается и учитывается множество процессов и факторов, влияющих на безопасность добычи [1–7]. Чаще всего причиной экстренных ситуаций в шахтах является горение метана, приводящее к взрыву пылегазовоздушной смеси при инициировании процесса воспламенения неучтенными факторами. Для предотвращения разрушительного взрыва угольной пыли необходимы поддержание концентрации метана на безопасном уровне, ограничение уровня запыленности и надежное электроснабжение. Предупреждение взрывов на практике обеспечивается неукоснительным соблюдением нормативов по газовому составу шахтного воздуха, оснащением шахт датчиками, срабатывающими при возникновении опасной ситуации [1–7].

Тем не менее, в шахтах с пугающей периодичностью происходят чрезвычайные ситуации с гибелью людей. Это означает, что технология добычи учитывает не все факторы, которые могут приводить к изменению условий безопасного ведения работ. Случайные события, например горные удары, при угледобыче конкретных пластов приводят к повышению ионизации воздушной среды

и являются фактором, учет которого, на наш взгляд, необходим. Повышенная степень ионизации шахтной атмосферы может увеличить вероятность развития пожара и взрыва газа. Однако обеспечению радиационной безопасности при подземной добыче угля должного внимания не уделяется.

В данной работе акцентируется внимание на необходимости изучения радиационной обстановки при угледобыче и приводятся примеры выполненных исследований, демонстрирующих необходимость их стимулирования. Воздействие ионизирующей радиации, обуславливающее снижение энергетического барьера активации инициирования взрыва метана, рассматривается как фактор повышения риска угледобычи. Предлагается использование дозиметрии в шахте и на поверхности шахтных полей для оценки целостности пластов и массива в целом.

2. ОБЗОРАЯ ИНФОРМАЦИЯ

2.1. Основные источники радиационной опасности при добыче угля подземным способом

Основной причиной повышения радиационной опасности при разработке месторождений угля является появление в шахтной атмосфере и в

окружающей среде в процессе добычи угля естественных источников радиации, техногенно усиливающих природный радиационный фон.

Радиоактивность угля определяется в основном содержанием урана (в меньшей степени тория) в равновесии с продуктом его распада радием [8, 9]. Общая активность энергетических углей обычно ниже активности почвы из-за отсутствия в углях ^{40}K . Содержание ^{238}U и равновесного количества ^{226}Ra в твердой породе угля в среднем примерно соответствует (или несколько выше) их содержанию в почвах и находится на уровне безопасных концентраций [9]. Однако α -распад ^{226}Ra приводит к появлению газообразного короткоживущего продукта распада ^{222}Rn , который нарушает равновесие в твердой матрице в связи с возможностью его выхода в межпорковое пространство. Эманлирующая способность радона (выход из породы) обусловлена процессом отдачи при α -распаде материнского изотопа ^{226}Ra , процессами диффузии и адсорбции и зависит от свойств породы, ее дефектности, дисперсности и др. [8–10]. Выход ^{222}Rn в шахтную воздушную среду усиливается в газообильных породах при их дроблении за счет конвекционного переноса газом [11].

Ядра радона при распаде испускают α -частицу, превращаясь в ядра полония (^{218}Po – тоже α -излучатель), который уже может быть связан с аэрозолями воздуха и пыли. Имея небольшой период полураспада, ^{218}Po быстро распадается с образованием свинца (^{214}Pb , $E_{\gamma} \sim 352$ кэВ) и висмута (^{214}Bi , $E_{\gamma} \sim 609$ кэВ), что обеспечивает объемную ионизацию воздушной загазованной и запыленной среды [8, 9]. Выделившийся радон в равновесии с ближайшими короткоживущими продуктами своего распада распадается с периодом полураспада 3.8 сут, т.е. при отсутствии нового источника поступления активность падает по экспоненциальному закону (за 12 сут в 10 раз).

Интенсификация добычи, способствующая появлению мелкодисперсных фракций угля и пыли, может значительно увеличить выход радона и продуктов его распада в шахтную среду. Кроме того, при добыче (особенно газообильных углей) в процессе измельчения угля в шахтной воздушной среде, помимо радона, появляются легкие газы (водород и метан), а также более тяжелые углеводородные газы. Наблюдается корреляция эмиссии радона с водородсодержащими газами H_2 и CH_4 [8, 11–15].

Разрушение угольных пластов в процессе добычи прогнозируется и, при соблюдении нормативов по газовой атмосфере в шахте и основных норм безопасности ведения работ, не должно приводить к возникновению пожаров [1–7]. Основная причина чрезвычайных ситуаций при добыче угля – это внезапные выбросы газов и пыли.

Этот процесс должен оцениваться с учетом характеристик добываемого угля, в том числе и его радиоактивности. Однако повышение степени ионизации за счет распада радона как фактор, увеличивающий опасность добычи углеводородов, обычно не учитывается. Хорошо известно, что при ионизации атмосферные газы, в том числе и кислород, приобретают высокую реакционную способность [6, 16]. Ионизация обеспечивает взаимодействие газов и угольной пыли с синглетным кислородом во всем облучаемом объеме. В связи с этим, на наш взгляд, необходимо изучение влияния ионизации на возможное снижение порогов зажигания смеси и безопасные содержания пыли и газа в шахтной атмосфере.

Важную информацию о степени ионизации в шахтах можно было бы получить при осуществлении дозиметрического контроля в шахтах.

Для шахтеров угольных шахт и разрезов установлен предел дозы за календарный год, равный 5 мЗв. Дозы облучения горняков разных шахт различаются, поскольку определяются особенностями добываемых углей, вмещающих угольные пласты пород, типом выполняемых работ и технологией процесса добычи. Нормы радиационной безопасности предполагают проведение индивидуального контроля на тех объектах, где работники облучаются природными источниками излучения дозами, превышающими региональный радиационный фон на 1 мЗв/год, что реализуется при угледобыче. Однако, как показывает опыт, такой контроль в угольной отрасли не проводится, хотя его организация является не простой, но реальной задачей. Следует отметить, что квартальный дозиметрический контроль с использованием детекторов на основе LiF не позволяет надежно оценить кратковременное, даже десятикратное, повышение степени ионизации при увеличении эмиссии радона (вклад такого выброса в квартальную дозу увеличит дозу не более чем на 15%). Необходимо использовать такие средства дозиметрического контроля, которые позволят сократить периодичность контроля до 10–15 дней. В данной работе предложено и проиллюстрировано использование термолюминесцентных детекторов ТЛД-К в качестве средств такого контроля [17–19].

2.2. Условия возникновения пожаров и взрывов при добыче угля подземным способом

При обеспечении нормативов по состоянию газовой атмосферы, притоку кислорода, отсутствию источников искры пожар в шахте не может возникнуть [1, 5, 7, 20, 21]. Воспламеняемость и взрывоопасность горючих газов находится в зависимости от их концентраций в смеси, давления и температуры. При содержании их в воздухе вне пределов взрываемости, указанных на рис. 1а,

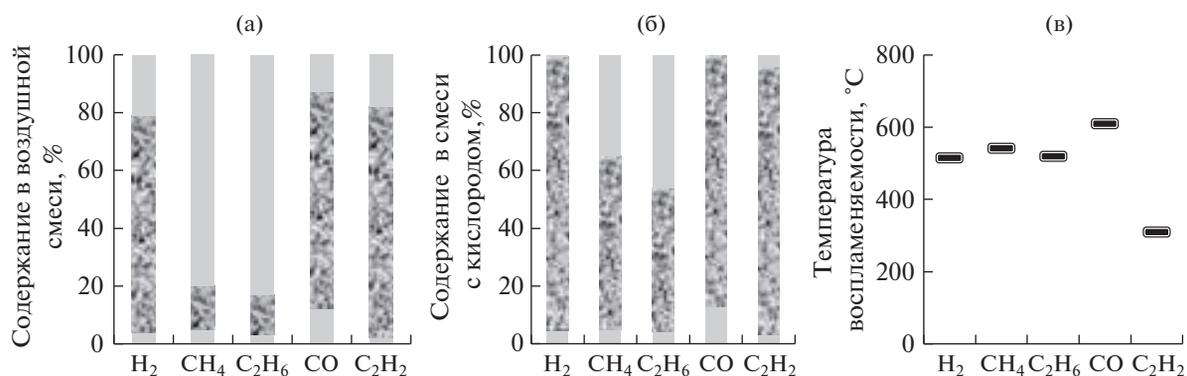


Рис. 1. Диапазоны взрываемости (выделены текстурой) газовых смесей с воздухом и кислородом при атмосферном давлении и температуре 20°C (а, б), температуры воспламенения газов (в).

взрыва при нормальной температуре и давлении не произойдет, даже при наличии локального источника воспламенения. Углеводороды при повышенной концентрации кислорода в смеси имеют более широкие диапазоны взрываемости (см. рис. 1б). Процесс воспламенения обеспечивается достижением смеси определенной температуры (см. рис. 1в), по сути характеризующей активационный барьер инициирования взрыва.

Согласно нормативам [1, 5, 7, 20, 21], равновесная концентрация метана на рабочем месте не должна превышать 2%, а взрывные работы запрещается выполнять при концентрации метана $\geq 1\%$, что с запасом обеспечивает безопасность воздушной среды шахты.

Взрыв газозвушной смеси осуществляется при следующих условиях: наличие горючих газов (восстановителей в реакции) во взрывоопасных концентрациях (см. рис. 1); наличие кислорода в концентрации $\geq 20\%$ (окислитель); образование при высоких температурах ($\geq 500^\circ\text{C}$) и/или других инициирующих воздействиях (например, короткое замыкание) необходимой для развития реакции концентрации свободных радикалов (иницирование реакции). Таким образом, для запуска реакции необходимо преодоление определенного энергетического порога. В отсутствие этих условий появление инициирующего импульса не должно приводить к развитию реакции, поскольку даже взрывные работы в шахте при соблюдении техники безопасности не приводят к активации горения метана. Важен состав газовой смеси (восстановителей), так как высшие гомологи метана снижают температуру воспламенения, индукционный период и нижний предел взрываемости [4–6, 16]. Внезапный выброс метана и его локальное воспламенение (при соответствующих соотношениях газовой среды и инициировании реакции) при неблагоприятном развитии событий приводят к взрыву, образованию детонационной волны, разрушающей горный массив. По-

явление и воспламенение облака мелкодисперсной угольной пыли, инициирует разрушительный взрыв пылегазовой смеси [4–6, 16].

Причиной пылевыведения в шахте являются взрывные работы, природные и техногенные газодинамические процессы, которые происходят при ведении работ в забоях горных выработок газоносных пластов (пород). В результате таких процессов происходит быстротекущее разрушение призабойной части угольного или породного массива, сопровождающееся отбросом или смещением угля (породы) в горную выработку и повышенным газовыделением [1, 4, 6, 7]. Образовавшаяся угольная пыль некоторое время находится в воздухе во взвешенном состоянии, а затем оседает на почву, кровлю и борта горных выработок. Осевшая пыль вместе с адсорбированными на ней газами может переходить вновь во взвешенное состояние при работе людей и техники под действием гидродинамического удара или ударной волны при взрыве метана. Для осуществления разрушительного взрыва необходимо, чтобы пыль была мелкодисперсной ($\leq 100 \mu\text{м}$) и плотность ее достигала 50 г/м^3 . Для зажигания пыль должна быть нагрета до температуры $\sim 600^\circ\text{C}$. Таким образом, борьба с пылевыведением необходима, чтобы работа современной проходческой техники не создавала взрывоопасные концентрации пыли на рабочем месте. Избыток кислорода также приводит к повышению способности газовой смеси к горению: снижается порог первоначальной энергии, необходимой для вспышки, увеличивается скорость горения, затрудняется тушение пламени. При увеличении концентрации кислорода $\geq 20\%$ пределы взрывоопасности метана расширяются. В зимний период концентрация кислорода в закачиваемом атмосферном воздухе может превосходить указанную величину. Утечка кислорода на линии подачи кислорода может создать аварийную ситуацию, однако метан – устойчивый углеводород и способен детони-



Рис. 2. Термолуминесцентный дозиметр с детектором ТЛД-К.

ровать в смеси с кислородом только при достаточной иницирующей энергии [1, 4–6, 16].

Одной из причин, приводящей к снижению устойчивости газовой смеси к зажиганию, уменьшению температуры воспламенения и преодолению активационного барьера для иницирования реакции, может быть высокая степень ионизации шахтного воздуха, т.е. радиационный фактор.

2.3. Радионуклиды, поступающие в окружающую среду при угледобыче

Радиоактивные элементы присутствуют в углях в виде металлоорганических соединений, связанных с углеродистым веществом, и в зольной части уран- и торийсодержащих минералов (монацит, апатит и др.) [9].

В процессе угледобычи газы и радионуклиды поступают в шахтную атмосферу от вентиляционных и дегазационных установок, участков дробления и погрузки угля, взрывных работ и др. Вентиляционные установки являются источниками взвешенных веществ, а дегазационные установки для метанообильных участков — мощными источниками метана, вместе с которым может поступать и радон. Газы и пластовая вода способствуют выносу радионуклидов на поверхность. Радионуклиды могут оседать в виде труднорастворимых отложений на оборудовании (трубопроводах, насосах, резервуарах, арматуре). При этом крупная фракция при пылевых выбросах достаточно быстро оседает, а мелкая распространяется вдоль потока, продолжая оседать на поверхность [5, 8, 20]. Источником пылевых выбросов в атмосферу являются отвалы и склады готовой продукции. Наиболее часто рассматривается роль радионуклидов при концентрировании их в продуктах переработки угля — шлаковых отходах [8, 20, 22]. Естественные радионуклиды, содержащиеся в углях, при их сжигании на теплоэлектростанциях и в быту попадают в газоаэрозольные

выбросы и концентрируются в золошлаковых отходах. Активность золы-уноса определяется в основном частицами, содержащими ^{226}Ra (~10 мкм), в сфере остеклованной летучей золы радиусом ~100 мкм.

Простая гамма-съемка не позволяет надежно оценить уровень радиационного воздействия, наиболее естественным является использование основного критерия — дозы облучения и сравнение этого параметра со средневзвешенным региональным фоновым значением.

3. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Предлагаемый метод оценки радиационных нагрузок при угледобыче и использовании угля

Для индивидуального дозиметрического контроля персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения, в настоящее время используются твердотельные термолуминесцентные детекторы [14, 17–19, 23]. В связи с тем, что авторами разработаны эффективные термолуминесцентные детекторы ТЛД-К, изготавливаемые в достаточном количестве, предлагается использовать их для обследования радиационной ситуации на объектах угледобычи [17]. На рис. 2 приведена дозиметрическая кассета с детектором ТЛД-К.

Высокая однородность детекторов в партии позволяет не проводить их отбор по чувствительности, что существенно снижает трудозатраты и себестоимость ТЛД-К по сравнению с монокристаллическими детекторами отечественного и зарубежного производства, применяемыми для контроля персонала в медицине и ядерной энергетике. Кроме того, важно, что с помощью ТЛД-К можно сократить сроки проведения контроля до 15–20 дней [14, 17–19]. Детекторы ТЛД-К почвоэквивалентны, что позволяет широко применять их для дозиметрического контроля окружающей среды. Благодаря простой технологии изготовления была выпущена большая партия детекторов ТЛД-К, что определило возможность их использования для территориального радиоэкологического мониторинга [17].

При продуманном использовании детекторы позволяют определять топографию радиационных полей на местности (такой подход чрезвычайно перспективен в поисковой геологии), проводить аттестацию рабочих мест и продукции, оценивать влияние производства на проживающее вблизи население. Следует подчеркнуть, что ТЛД-К могут быть использованы в подземных условиях, т.е. непосредственно в шахтах для определения индивидуальных дозовых нагрузок шахтеров и оценки радиационных характеристик выработок, поскольку они абсолютно пожаробезопасны. В связи с отсутствием гигроскопичности они могут использоваться для дозиметрии вод-

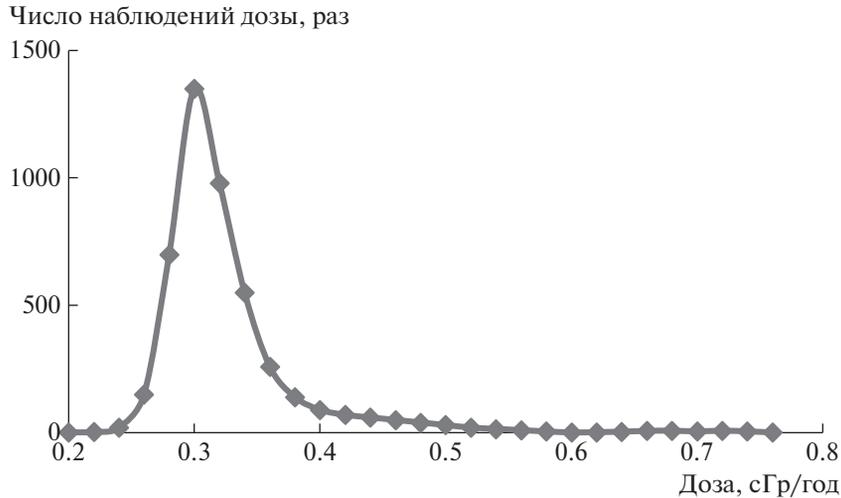


Рис. 3. Дозовое распределение по результатам индивидуальной дозиметрии в Кемеровской области.

ных сред, т.е. для изучения характеристик шахтных вод, отстойников, сбросов и питьевых поверхностных и скважинных вод.

В качестве средства оценки загрязнений атмосферного воздуха за счет выбросов предприятий и проведения взрывных работ применение ТЛД-К целесообразно для анализа снежного покрова, поскольку снег является надежным индикатором интенсивности загрязнения, в том числе и обусловленного радиацией.

3.2. Методика выполнения работ

Дозиметрический контроль осуществлялся на ряде промышленных объектов при проведении ин-

женерно-экологических изысканий. ТЛД-К размещали в отобранных пробах с последующим получением информации о содержании радионуклидов в пробе. Ряд работ был выполнен при размещении дозиметров непосредственно в почвах и породах на территории обследования. В этом случае опосредованно добавлялась информация об эсхалации радона в точке контроля. Минимальная продолжительность размещения детекторов в пробах для получения надежного сигнала при фоновых уровнях облучения составляла ~15 дней. Реальные сроки варьировались от 0.5 до 2 месяцев. Для нормирования по срокам эксплуатации детектора при всех исследованиях выполнялся перерасчет дозы на годовую дозовую нагрузку.

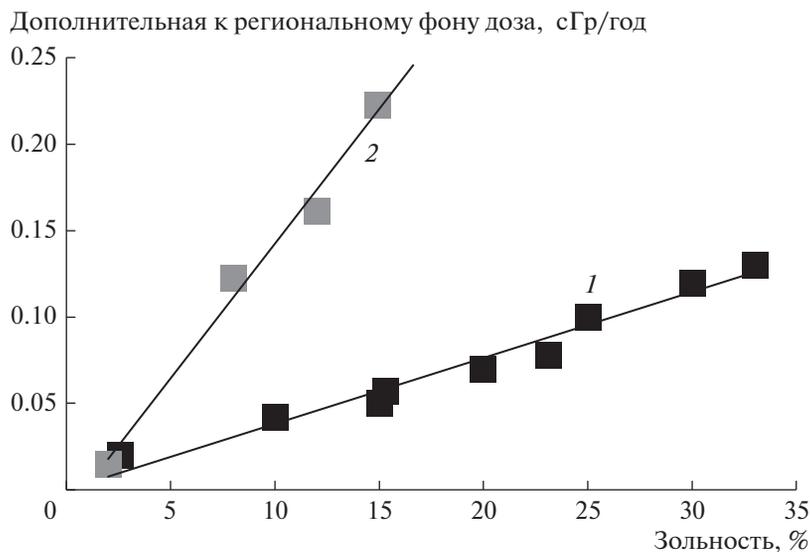


Рис. 4. Зависимость поглощенной дозы (дополнительной к региональному фону 0.3 сГр) от зольности угля: 1 — для каменных углей средней степени метаморфизма; 2 — для бурых углей Итатского месторождения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫБОРОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ТЛД-К

4.1. Региональный фон

Для получения регионального дозового распределения проводилась обработка 5000 измерений дозы. Получено, что дозовое распределение носит явно выраженный логнормальный характер (рис. 3). Средневзвешенное значение годовой дозы составило 0.3 ± 0.02 сГр; 66% всех измеренных доз находятся в этом диапазоне. Учитывая логнормальный характер распределения, при расширении диапазона в область более высоких доз ($0.28-0.38$ сГр/год) в него попадает 90% всех измерений. Примерно 3% дозиметров зарегистрировали дозы ≥ 0.5 сГр/год (норматив, установленный для природного радиационного воздействия на население), а 0.3% дозиметров – от 2 до 15 сГр/год (превышающие предельную допустимую дозу для персонала категории “А”, профессионально работающего с источниками ионизирующих излучений). Наиболее вероятной причиной регистрации высоких доз явилось, на наш взгляд, применение дозиметров для контроля доз при медицинском облучении (т.е. рентгеновскими источниками радиации, а не природным фоном).

При построении распределения весь массив данных разбивался на узкие дозовые поддиапазоны и фиксировалось число измерений в каждом из поддиапазонов.

При выборке из общего массива территорий с интенсивной добычей угля наблюдается смещение максимума, соответствующего наиболее вероятной дозе по области, в целом на $0.05-0.1$ сГр/год и увеличение процентного вклада доз, превышающих норматив, установленный для природного радиационного воздействия на население (0.5 сГр/год). В выборке территорий с использованием нецентрализованного отопления отчетливо проявляется смещение максимума распределения на 0.1 сГр/год.

4.2. Дозиметрический контроль на объектах угледобычи

При контроле на объектах угледобычи дозиметры помещались в отобранные пробы, отбор которых носил случайный характер. В ряде случаев удавалось установить марку и зольность проб. Перед измерением угли измельчались до дисперсности ≤ 0.1 мм.

На рис. 4 приведена выявленная, естественная на наш взгляд закономерность зависимости поглощенной дозы от зольности угля.

Поглощенная доза бурых углей, как следует из рис. 4, выше, чем энергетических, при одинако-

вой зольности. В основном это повышение связано с более высоким содержанием ^{40}K и ^{232}Th в зольной части молодых углей, а не с ураном. Для однотипных каменных углей с преимущественным содержанием в них урана дозиметрия могла бы быть использована для простого и быстрого способа оценки зольности угля.

На рис. 5 приведены дополнительные к региональному фону дозы, определенные в углях месторождений Междуреченска.

Для углей разных марок (см. рис. 5) и разной зольности (см. рис. 4) наблюдаются значительные вариации поглощенных дополнительно к фоновым доз, в частности, в ряде случаев дополнительные дозы могут быть более 0.1 сГр/год. Вмещающие породы, наряду с ураном, обычно имеют более высокие содержания ^{40}K и ^{232}Th , и радиационная обстановка в шахте при нормальных условиях определяется в первую очередь вмещающими породами (дозы могут быть примерно в 2 раза выше, чем у угля) (рис. 6). В шахтных водах, кроме радионуклидов, обнаружено многократное превышение предельно допустимых концентраций по нитратам и нитрит-ионам [24]. Немногочисленные результаты исследований при измерении непосредственно в шахтах свидетельствуют о том, что дозовые нагрузки превосходят фоновые на 0.1 сЗв и превышают допустимый уровень облучения от природных источников, составляющий 0.5 сГр/год, что является предпосылкой для проведения дозиметрического контроля шахтеров. Однако заинтересованность собственников в таком контроле отсутствует, а контролирующие органы не стимулируют данный процесс, хотя такой контроль в динамике мог бы давать информацию о развитии неблагоприятных процессов в выработках. Более того, с помощью поверхностной дозиметрической съемки территории шахтных полей в динамике можно прогнозировать устойчивость разрабатываемых пластов и обнаруживать утечки в местах нарушения проницаемости вмещаемых пород.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из основных задач работы, инициируемой аварией на шахте Листвяжная и анализом более ранних крупных аварий на шахтах Кузбасса, является акцентирование внимания на необходимости изучения радиационной обстановки в шахтах. Повышенная степень ионизации шахтной атмосферы может сильно изменить условия возникновения и развития пожара и взрыва газа с последующим катастрофическим ухудшением ситуации при появлении или наличии угольной пыли. Следует учитывать, что в нормальных условиях природный фон (без интенсификации радонного выделения) в шахтах ниже, чем на поверхности

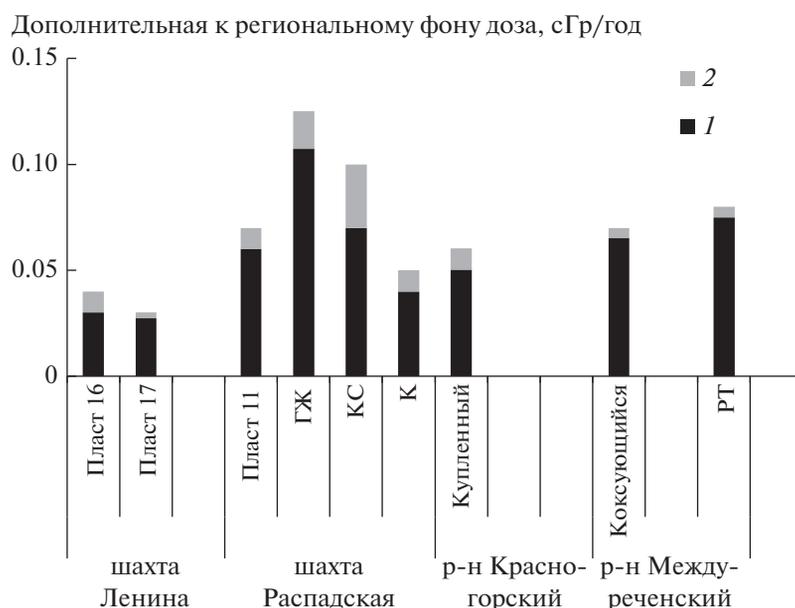


Рис. 5. Дополнительные к фону поглощенные дозы в углях разной степени метаморфизма, добываемых в Междуреченске (1), средние отклонения (2). ГЖ, КС, К, РТ – марки углей; купленный и коксующийся – угли неопределенных марок.



Рис. 6. Дополнительные к фону поглощенные дозы (1) и средние отклонения (2) в выборках углей, вмещающих пород и шахтной воды (до фильтрации) шахты “Березовская” Кемеровской области.

[9]. Исследования протяженных шахтных полей по поверхности с использованием термлюминесцентных детекторов, размещенных по сетке наблюдения, позволяют прогнозировать нарушение целостности массивов с обнаружением мест максимальной трещиноватости или разломов с выходом газов. Такие исследования могли бы помочь прогнозировать нарушения целостности пластов по поверхности [25, 26]. Проведение аналогичных исследований на новых площадях перспективно при поиске нефтегазоносного сырья [26].

Пыле- и газовыделение способствует увеличению ионизации шахтного воздуха и при определенных условиях может служить причиной развития аварийной ситуации. Для зарождения (иницирования) процесса окисления (горения, взрыва углеводородов) необходимо образование определенной концентрации активных центров. Рост степени ионизации воздушной среды, в принципе, может приводить к повышению концентрации активных радикалов до уровня, необходимого для дальнейшего развития реакции. Развитие реакции окисления углеводородов вначале происхо-

дит по цепному механизму с последующим ускорением по общим кинетическим законам, при этом не столько в результате ветвления цепей, сколько вследствие саморазогрева реакционной среды, т.е. по тепловому механизму [27, 28]. Эксперименты по изучению воздействия ионизации и фотовозбуждения подтверждают стадийность развития реакции и возможность ее запуска фото- и ионизирующим воздействием [16, 29].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемов В.Б., Галкин В.А., Макаров А.М., Кравчук И.Л., Галкин А.В.* // Уголь. 2016. № 5. С. 73. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2016-5-73-7726>
2. *Miao C., Duan M., Sun X., Wu X.* // Process Safety Environmental Protection. 2020. V. 140. P. 79. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.020>
3. *Каледина Н.О., Малашкина В.А.* // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 553. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4>
4. *Мамаев В.И., Ибраев Ж.А., Лигай В.Н.* Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей. М.: Недра, 1990.
5. *Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С.* // Горный журнал. 2014. № 5. С. 12.
6. *Умнов А.Е., Голик А.С., Палеев Д.Ю., Шевцов Н.Р.* Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях. М.: Недра, 1990.
7. *Чмыхалова С.В.* // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 6–1. С. 146. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-146-153>
8. *Готтих Р.П.* Радиоактивные элементы в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 1980.
9. *Рихванов Л.П.* Общие и региональные проблемы радиоэкологии. Томск: Изд-во ТПУ, 1997.
10. *Ефимов В.И., Жабин А.Б., Стась Г.В.* // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 109. 115. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.109>
11. *Кияков А.В.* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2013. Т. 13. № 2. С. 57.
12. *Пинкензон Д.Б., Макаров М.С.* // Геология нефти и газа. 1991. № 4. С. 34.
13. *Соболев И.С., Рихванов Л.П., Лященко Н.Г., Паровинчак М.С.* // Геология нефти и газа. 1999. № 7–8. С. 19.
14. *Wang Z.* // Radiation Protection Dozimetry. 1993. V. 47. № 1–4. С. 323. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a081760>
15. *Петухов А.В., Капина И.С., Постельников С.А., Алукер Э.Д., Алукер Н.Л., Лурье А.М., Можжаев Б.Н., Фаррахов Е.Г., Кацков Н.К.* А.с. № SU 1631484 А1. МПК G 01 V9/00 // БИ. 1991. № 8.
16. *Пушкарев А.И., Новоселов Ю.Н., Ремнев Г.Е.* Цепные процессы в низкотемпературной плазме. Новосибирск: Наука, 2006.
17. *Алукер Н.Л., Суздальцева Я.М., Herrmann M.E., Дулепова А.С.* // ПТЭ. 2016. № 5. С. 115. <https://doi.org/10.7868/S0032816216050025>
18. *Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Herrmann M.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 98. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020269>
19. *Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Гимадова Т.И., Зверев А.С.* // ПТЭ. 2021. № 6. С. 75. <https://doi.org/10.31857/S0032816221050177>
20. *Диколенко Е.Я.* // Уголь. 2003. № 1. С. 25.
21. *Ермаков А.Ю., Качурин Н.М., Сенкус В.В.* // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 7. С. 212. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-212-218>
22. *Ribeiro J., Ania C.O., Suárez-Ruiz I., Flores D.* // Coal and peat fires: A global perspective. 2018. P. 98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849885-9.00007-X>
23. *Bi Z.X., Zheng Y.D., Zhang R., Gu S.L., Xiu X.Q., Zhou L.L., Shen B., Chen D.J., Shi Y.* // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2004. V. 15. P. 317. <https://doi.org/10.1023/B:Jmse.0000024233.82681.Dc>
24. *Aluker N.L., Herrmann M.E., Suzdaltseva Ya.M.* // Optics and Spectroscopy. 2019. V. 127. Iss. 6. P. 991. <https://doi.org/10.1134/S0030400X19120026>
25. *Соболев И.С.* // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов 2007. Т. 311. № 1. С. 34.
26. *Allen D.T., Torres V.M., Thomas J., Sullivan D.W., Harrison M., Hendler A., Herndon S.C., Kolb C.E., Fraser M.P., Hill A.D., Lamb B.K., Miskimins J., Sawyer R.F., Seinfeld J.H.* // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2013. V. 110. Iss. 44. P 17768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315099110>
27. *Batugin A.S., Kobylkin A.S., Musina V.* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 221. № 1. P. 012087. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.14>
28. *Deng J., Zhao J., Zhang Y., Huang A., Liu X., Zhaia X., Wang C.* // Process. Safety and Environmental Protection. 2016. V. 104. Part A. P. 218. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.09.00>
29. *Aduiev B.P., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R.* // Optics and Spectroscopy. 2020. V. 128. № 3. P. 442. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.03.49073.302-19>