

## ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 551.1/4; 62-501/-502

### ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УГЛЯ И ПОРОДЫ

С. М. Никитенко, Ю. Ф. Патраков, М. С. Никитенко,  
С. А. Кизилов, Ю. А. Харлампенкова

*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
E-mail: nsm.nis@mail.ru, Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

Представлены результаты исследования уровня накопления, закономерностей распределения и условий концентрирования радиоактивных элементов в исходном угле. Выявлено их распределение в добываемых углях с учетом марочного состава. Обоснована область использования радиационных свойств угля и породы для решения задачи определения границы “уголь – порода” при реализации технологии добычи с выпуском угля из подкровельной толщи на забойный конвейер. Экспериментальным путем доказана работоспособность метода ядерно-геофизических исследований при размещении чувствительного измерительного элемента за металлической защитой.

*Радиационные свойства, гамма-излучение, гамма-метод, ядерно-геофизический метод, уголь, вмещающие породы, технологии добычи, выпуск угля подкровельной толщи, выпуск на забойный конвейер, граница “уголь – порода”*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210617

Радиоактивные урановые аномалии повсеместно распространены в угольных месторождениях вплоть до формирования уран-угольных месторождений. По литературным данным, среднее содержание урана для бурых и каменных углей составляет  $2.9 \pm 0.3$  и  $3.5 \pm 0.1$  г/т, тория — 3.3 и 3.2 г/т соответственно [1]. Имеется большое количество научных исследований, посвященных радиоактивности углей различных месторождений. Особое внимание в них уделяется информации об аномальных источниках содержания тория и урана. Например, томские ученые выяснили, что содержание урана в углях месторождений и бассейнов Северной Азии изменяется в пределах 0.6 – 32.8 г/т, тория — 0.8 – 32.0 г/т (рис. 1) [2].

Согласно исследованиям, природный уран состоит из смеси трех изотопов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ . Последний изотоп не первичный, а радиогенный и входит в состав радиоактивного ряда  $^{238}\text{U}$ . Радиоактивность природного урана обусловлена в основном изотопами  $^{238}\text{U}$  и его дочерним нуклидом  $^{234}\text{U}$ . Изотопы урана  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  — родоначальники двух радиоактивных рядов, конечными элементами которых являются изотопы свинца  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$  [3].

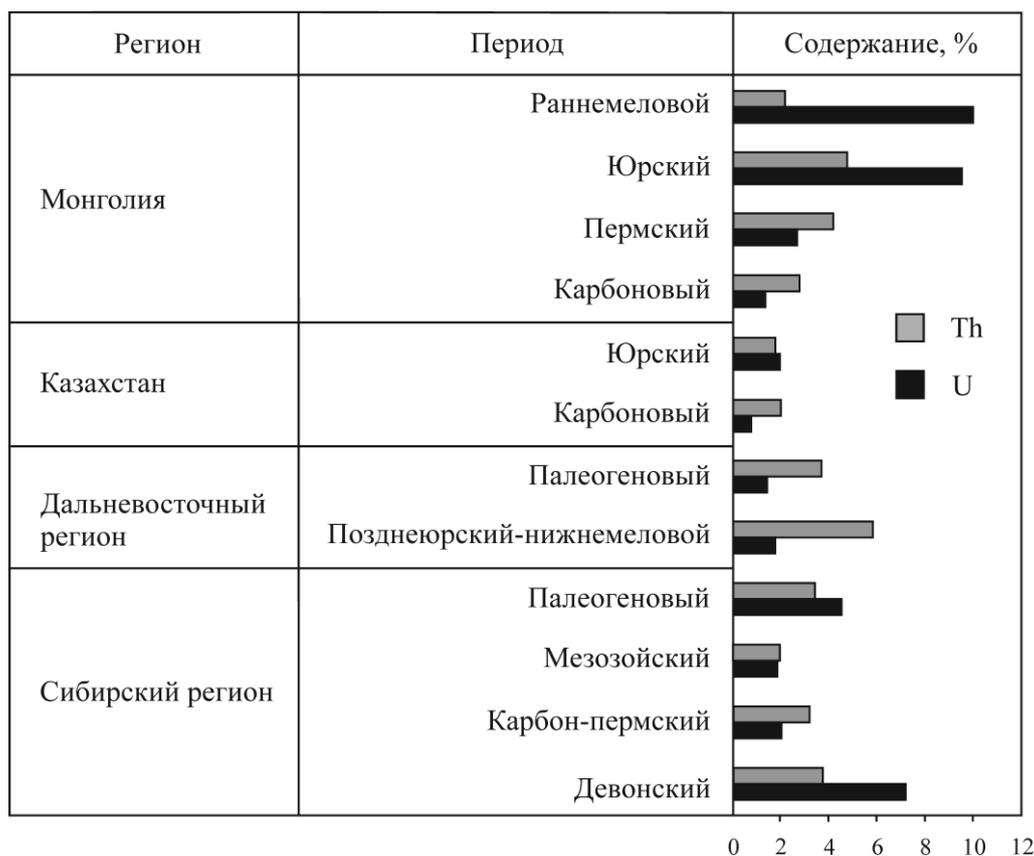


Рис. 1. Содержание тория Th и урана U в углях бассейнов Северной Азии по периодам углеобразования

Содержание тория в земной коре составляет 8–13 г/т, в морской воде — 0.05 мкг/л; урана в земной коре — 0.00027% (вес.), концентрация в морской воде — 3.2 мкг/л. Торий в земной коре содержится в 3–4 раза больше, чем урана, что делает его более доступным. Установлены основные закономерности их накопления в различных геологических образованиях. Торий и уран относятся к литофильным элементам. Они концентрируются в верхней части земной коры, легко растворимы с образованием истинных и коллоидных растворов, транспортируются водными потоками эндогенного или гипергенного происхождения. Уран чаще всего находится в расплавах магм и в твердых вулканических породах, торий — в виде основной составной части уран-ториевых либо изоморфных примесей в акцессорных минералах. Основная масса урана сосредоточена в кислых породах с высоким содержанием кремния. Наименьшая концентрация урана наблюдается в ультраосновных породах, максимальная в осадочных фосфоритах и углистых сланцах. В больших количествах, как примесь, уран присутствует в ториевых и редкоземельных минералах [4, 5].

Одни из основных источников поступления радиоактивных элементов в угли — месторождения-спутники. Это угольные бассейны, образовавшиеся в обрамлениях и складчатостях метаморфических и магматических горных пород, обогащенных радиоактивными элементами. Миграция урана и тория в осадочные толщи угольного бассейна обеспечивает обогащение углей и вмещающих пород до промышленных масштабов. Причем наблюдается миграция элементов-примесей от краевых частей бассейна к его центральной части. В настоящее время влияние состава пород на накопление примесей в углях считается аксиомой [6].

Аномальное содержание урана и тория для некоторых месторождений связано с наличием вулканического материала в углеобразующих периодах (карбонный, пермский, мезозойский). При формировании тонштейнов в результате выветривания пеплового материала освобождались элементы-примеси, в том числе и уран с торием, которые поглощались прилежащими слоями торфа. Это происходило особенно эффективно, если исходный материал имел кислый или щелочной состав. Гидролиз вулканогенного материала приводил к выносу тория и редкоземельных материалов из тонштейнов и накоплению их в органической массе угольного пласта [2].

Со временем прослеживается тенденция трансформации  $\text{Th(U)}_{\text{органич}} \Rightarrow \text{Th(U)}_{\text{минерал}}$ . В низко- и среднезольных углях уран содержится в основном в органической массе. В высокозольных углях и углях с околокларковым содержанием урана преобладает минеральная форма урана. В торфах и бурых углях рассеянный уран находится в сорбированной форме, в зрелых углях до 50 % урана связано с микровключениями акцессорных минералов. В бурых неокисленных углях уран представлен настураном  $\text{UO}_2$  и урановой чернью; в зоне вторичного обогащения присутствуют гуматы уранила; в окисленных — фосфаты, карбонаты, арсенаты и ванадаты урана. В каменных углях присутствует уранилит, коффинит, а также настуран и урановая чернь [6]. Уран концентрируется в более тяжелых фракциях угля ( $1.7 - 1.9 \text{ г/см}^3$ ).

Торий связан с органической массой угля в низкзольных и незрелых углях, в зрелых углях преобладает минеральная аутигенная форма. В торфах и бурых углях торий концентрируется главным образом в органических комплексах. Минеральная форма тория характерна для каменных углей.

Важную роль в накоплении радиоактивных элементов играют гидродинамические условия питания торфяников, а в дальнейшем и угольных образований. Накопление урана и тория для верхних и нижних торфяников различны. Концентрация радиоактивных элементов в верхних торфяниках, питание которых происходило в основном за счет атмосферных осадков, ниже, чем в низинных торфяниках.

Кузнецкий угольный бассейн отличается низкой радиоактивностью, а угли Канско-Ачинского угольного бассейна — высоким содержанием радона. В этом бассейне прослеживаются аномалии с накоплениями урана (среднее значение  $4.9 \text{ г/т}$ ) за счет обрамления месторождения горными породами, насыщенными кислыми и щелочными гранитоидами. Содержание урана в бурых окисленных углях пласта Итатский превышает характерные значения для Кузбасса, варьируя от 6 до  $139 \text{ г/т}$ . На шахте “им. Шевякова” содержание тория  $3.75 - 85.5 \text{ г/т}$ . В южной части Кузбасса отмечается относительно большее содержание урана ( $3 - 5 \text{ г/т}$ ) и тория ( $4 - 6 \text{ г/т}$ ), по сравнению с северной частью, из-за близкого нахождения к складчатому обрамлению. В южной и юго-восточной части бассейна распространены обогащенные ураном гранитоиды, кислые вулканыты, фосфатоносные толщи и имеются гидротермальные месторождения урана (Лабышское, Барзасское). Для северо-восточной части Кузбасса характерно распространение пород торий-редкоземельной специализации и гидротермальных месторождений тория (Богатырское). Максимум накопления тория в каменноугольных отложениях Кузнецкого бассейна приходится на кольчугинскую серию казанково-маркинской свиты пластов. Для урана максимум приходится на тайлуганскую и ленинскую свиты пластов кольчугинской серии [7–9]. Данные по распределению урана и тория в добываемых углях Кузбасса с учетом марочного состава представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Присутствие урана и тория в марках углей Кузбасса

Каменный уголь	Марка	Уран	Торий
Энергетический	Д	+	—
	Г	+	—
	СС	+	+
	Т	+	+
Коксующийся	ГЖО	+	—
	ГЖ	+	—
	Ж	+	—
	К	+	+
	КСН	+	—
	ОС	+	+
Антрацит	—	—	+

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения задачи определения границы “уголь – порода” при реализации технологии добычи с выпуском угля из подкровельной толщи на забойный конвейер рассмотрен метод ядерно-геофизических исследований, основанный на изучении естественной радиоактивности пород. Он применяется при каротаже скважин и называется гамма-каротаж. При его использовании фиксируются только естественное излучение гамма-квантов от исследуемых веществ, и по количеству излучаемых гамма-квантов за единицу времени от определенного объема вещества можно судить о химическом составе образца породы. В определенных условиях метод позволяет с высокой точностью оценивать зольность угля как в полевых условиях на складах, так и в потоке угля на конвейере.

Для идентификации пород можно использовать только гамма-излучение, так как альфа- и бета-излучения будут полностью поглощены корпусом измерительной аппаратуры и защитным кожухом. В зависимости от физико-химических условий, в которых происходило формирование горных пород, будет изменяться содержание в них радиоактивных веществ. В осадочные отложения радиоактивные элементы попадают двумя путями: растворенными в водных растворах и переносом изверженных пород после их раздробления. Содержание радиоактивных элементов в различных осадочных породах неодинаково, что дает возможность различать их по степени радиоактивности. Согласно таблице радиоактивности горных пород [10], радиоактивность каменного угля в среднем менее 1 мкмкг Ra-экв/г, радиоактивность вмещающих пород, которые наиболее часто встречаются с каменным углем, обычно 1–8 мкмкг Ra-экв/г, т. е. радиоактивность каменного угля меньше радиоактивности вмещающих его пород. Но на некоторых месторождениях встречаются другие условия, когда угли более радиоактивны, чем вмещающие породы. В редких случаях встречаются месторождения, где естественная радиоактивность углей и вмещающих пород одинакова.

В [11, 12] предложено использовать метод фиксирования естественной радиоактивности с помощью зомера/радиометра для решения задачи определения границы “уголь – порода” при реализации технологии добычи с выпуском угля из подкровельной толщи на забойный конвейер. Плюсы данного метода: не требует отдельных источников ионизирующего излучения, возможен монтаж чувствительных элементов внутри силовой конструкции секции механизированной крепи в районе выпускного окна, что снимает вопросы по защите от внешнего

воздействия (рис. 2). Монтаж чувствительного элемента в верхней части выпускного окна дает возможность контролировать подход породы еще до попадания ее на питатель, соответственно в момент начала следующего процесса выпуска после передвижки на питатель попадет минимальное количество пустой породы, а к чувствительным элементам поступит уже дезинтегрированный уголь. Данное решение имеет и свои минусы: малая (до 500 мм) глубина анализа, что при ширине выпускного окна 800 мм может потребовать установки второго чувствительного элемента с противоположной стороны выпускного окна. Требуемое время на каждый анализ не менее 1 с, чем больше времени проводится экспозиция, тем точнее будет получаемый результат анализа.

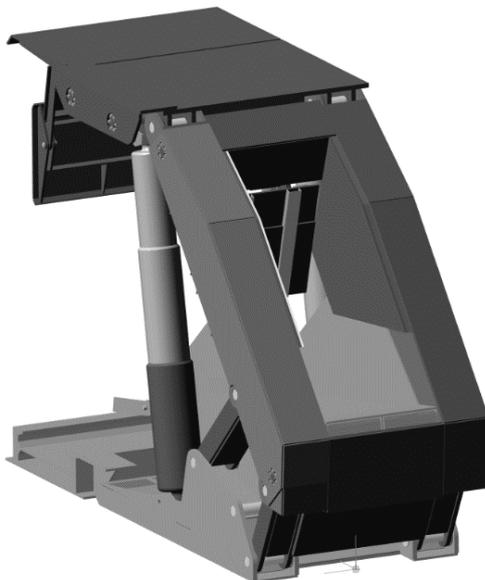


Рис. 2. Механизованная крепь с питателем для выпуска угля на забойный конвейер со стороны выпускного окна

Предлагаемое решение проблемы низкой чувствительности основано на особенностях назначения устройства. Предлагается отказаться от точного анализа радиоактивности, а за точку отсчета установить измеренную лабораторно естественную радиоактивность угля. Зная естественную радиоактивность добываемого угля и вмещающих его пород, можно настроить работу автоматики по отклонению от заданного значения измеряемого уровня естественного гамма-излучения. При этом не имеет значения что больше, радиоактивность вмещающих пород или радиоактивность угля.

Алгоритм определения границы “уголь – порода” для вмещающих пород с более высокой радиоактивностью, чем у пласта угля, будет выглядеть следующим образом: если отклонения от заданного уровня естественной радиоактивности в пределах, экспериментально определенных для каждого месторождения, — выпуск продолжается, если это отклонение возрастает, значит к выпускному окну стало подходить больше породы, чем угля, — происходит прекращение выпуска из соответствующей секции. Для случая, когда радиоактивность вмещающих пород меньше, чем радиоактивность угля, снижение уровня естественной радиоактивности соответствует подходу к выпускному окну пустой породы. Упрощенный алгоритм работы автоматического определения границы “порода – уголь” на основе золомера/радиометра как чувствительных элементов показан на рис. 3.

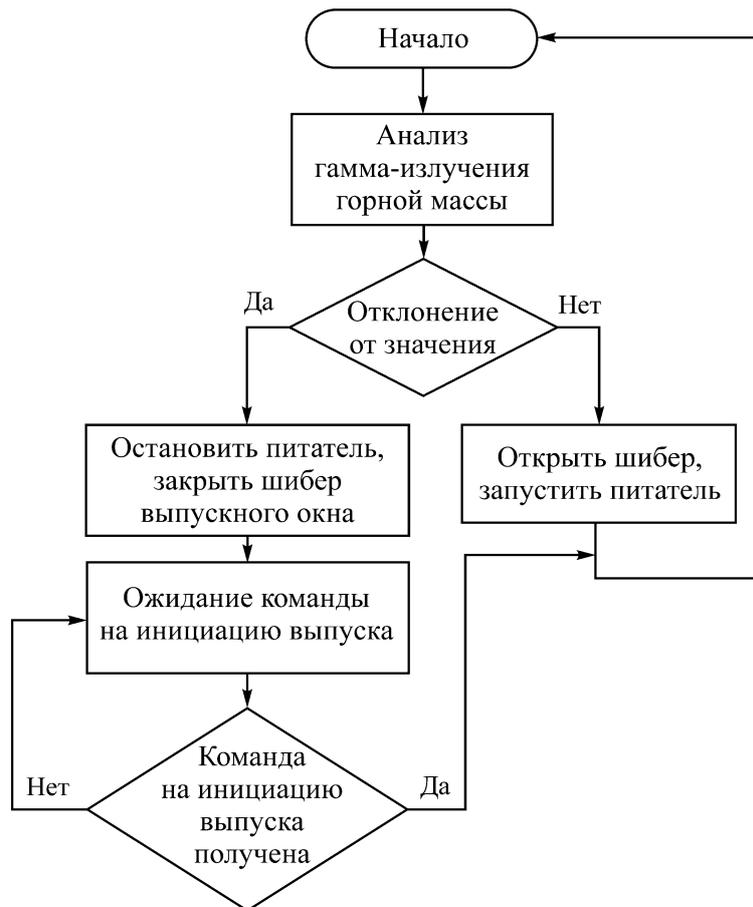


Рис. 3. Упрощенный алгоритм определения границы “порода – уголь”

Данный алгоритм решает основную задачу: прекращение поступления горной массы из выпускного окна на питатель в случае изменения естественного гамма-излучения горной массы, расположенной в створе выпускного окна за шиберной заслонкой. Выпуск угля будет прекращаться на этапе разубоживания угля породой до полного замещения, что положительно скажется на качестве добываемого угля и эффективности лавного очистного комплекса.

Определенный недостаток предлагаемого варианта, основанного на естественной радиоактивности горных пород, — низкая радиоактивность этих пород и возможное влияние на результат естественной фоновой радиоактивности. С таким явлением сталкиваются производители пассивных золомеров, устанавливаемых на конвейерах обогатительных фабрик. Для устранения данного явления применяются чувствительные радиометры, измеряющие уровень фоновой радиации, затем система АСУ делает пересчет на основе дополнительного измерения. В случае применения технологии добычи угля с выпуском подкровельной толщи дополнительным изолятором от внешнего естественного радиационного фона выступит сама конструкция крепи, так как чувствительные элементы расположены в стальных боковинах. Анализируемая горная масса будет находиться в своеобразной емкости, образованной шиберной заслонкой со стороны забоя и боковинами выпускного окна, где располагаются чувствительные элементы. Поскольку основанные на анализе гамма-излучения методы имеют небольшую чувствительность в глубину породы, датчики смогут анализировать только ту часть горной массы, которая окажется в емкости, что должно минимизировать исследования прибором горной массы вне зоны выпускного окна.

В ходе работ по изучению возможности использовать метод, основанный на исследовании естественной радиоактивности для оценки границы “уголь – порода”, возник вопрос работоспособности метода при установке чувствительного элемента золомера под защитой металлической конструкции. Для нормальной работы в зоне выпускного окна датчик не должен иметь прямого контакта с исследуемой горной массой, а только через металлическую защиту, иначе он быстро выйдет из строя. Согласно предварительно разработанной конструкции крепи, толщина стенки, служащая защитой датчика в районе выпускного окна, составляет ~5 мм. Для предварительного подтверждения работоспособности метода проведен эксперимент на разрезе “Черниговец”. Эксперимент должен был дать ответ на три основных вопроса: фиксирует ли золомер отличие угля от породы; продолжает ли золомер фиксировать естественную радиоактивность угля, если он расположен внутри металлического кожуха; насколько сильно падает чувствительность золомера при работе в защитном металлическом кожухе. Эксперимент выполнен с помощью переносного золомера AshCheck, проводящего измерения с использованием сцинтилляционного кристалла. Результаты измерений представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Регистрация CPS золомером в ходе эксперимента

Эксперимент	Уголь, CPS	Уголь через защиту, CPS	Порода, CPS
1	133	85	71
2	129	91	64
3	130	86	68

Проведение замеров естественной радиоактивности угля и породы показано на рис. 4. Установлено, что метод работоспособен даже при размещении чувствительного элемента за металлической защитой и при взаимодействии с углем в одной полусфере. Показана только теоретическая работоспособность предложенного метода определения границы “уголь – порода”.

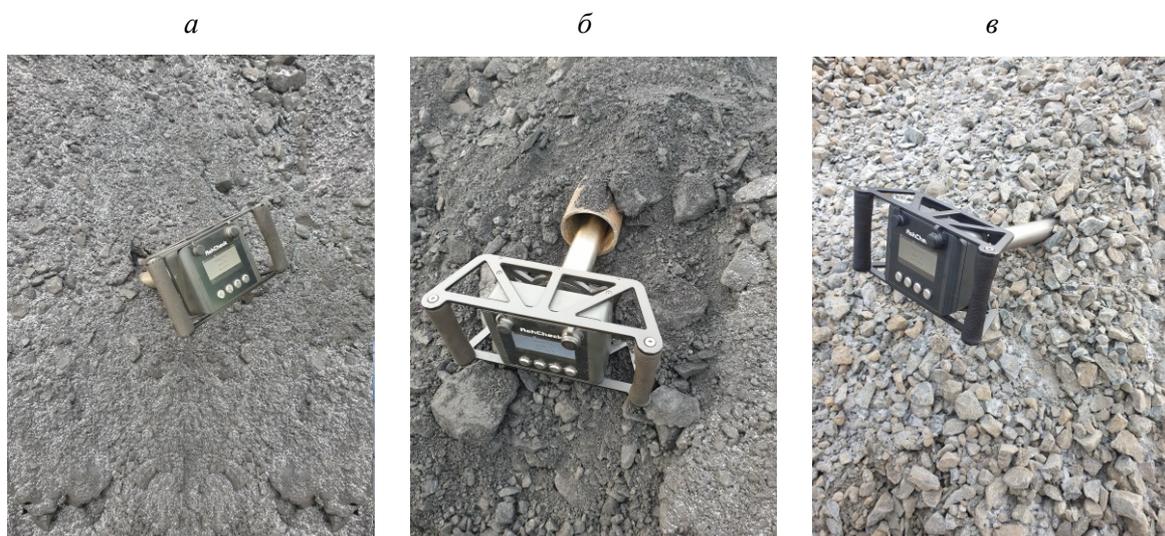


Рис. 4. Проведение замеров естественного гама-излучения угля и породы прибором AshCheck: *а* — забор проб из склада необогащенного угля; *б* — то же через металлическую защиту; *в* — забор проб из отвала породы

Золомер AshCheck — высокочувствительный аналитический прибор с длительным временем экспозиции для получения результата анализа. Возможность работы прибора при коротких выдержках 1–2 с производитель не подтвердил. Кроме того, золомер не показывает эквивалент-

ный уровень излучения для сравнительного анализа показаний с замером, сделанным другими приборами, отображается только количество отсчетов в секунду, зафиксированных на сцинтиляционном кристалле. При проведении эксперимента не учитывалось место добычи угля и породы. В ходе эксперимента достигнуто подтверждение работоспособности метода.

Для подтверждения полученных данных и ответа на вопрос об отличии природного гамма-излучения угля и породы на одном участке месторождения проведена вторая серия замеров. Для этого были приглашены специалисты аккредитованной для радиологических замеров организации, имеющей сертифицированные приборы. Цель исследования — подтвердить данные первого опыта, измерив эквивалентную дозу гамма-излучения угля и вмещающей породы в рамках одного участка месторождения. Замеры осуществлялись на складе готового угля и на породном отвале разреза “Черниговец” (АО ХК “СДС-Уголь”) при погодных условиях, максимально приближенных к подземным: температура воздуха +13 °С, ветрено, незначительные осадки, сильная облачность. Применялись два типа дозиметров: дозиметр радиометрический поисковый МКС/СРП-08А; дозиметр гамма-излучения ДКГ-02У “Арбитр”. Оба имеют действующие свидетельства о прохождении поверки. Поисковый дозиметр, как и золомер AshCHECK, проводит измерения, основываясь на количестве гамма-квантов, зафиксированных на сцинтиляционном кристалле. В отличие от золомера, примененного в первой серии замеров, поисковый дозиметр выводит результат измерений после экспозиции в 1 с (единица измерения мкЗв/ч — микрозиверт в час). Такой вид анализа максимально приближен к реальным условиям анализа состава горной массы в процессе ее выпуска из подкровельной толщи. Так как показания поискового дозиметра не фиксируются, а только отображаются на дисплее, постоянно сменяясь новыми, можно говорить только о некотором диапазоне измерений или среднем значении за временной интервал, но не о точном зафиксированном значении излучения.

Для получения точного значения эквивалентной дозы гамма-излучения использовался второй прибор — дозиметр гамма-излучения “Арбитр”. Он имеет два газоразрядных счетчика Гейгера–Мюллера (грубый и более точный), время экспозиции 35 с. Замеры проводились в двух локациях одного участка разреза: на складе готового угля и на отвале породы. Выполнено по десять замеров в пяти точках каждой локации, всего 20 замеров. Предварительно каждое место замера проверялось с помощью поискового дозиметра, определялось максимальное и минимальное значение каждой локации. По результатам исследования составлен протокол лабораторных испытаний с указанием минимальных и максимальных показаний поискового дозиметра для каждой локации, а также результат каждого из измерений дозиметром “Арбитр”. Данные измерений эквивалентной дозы гамма-излучения дозиметром “Арбитр” приведены на рис. 5, где по оси абсцисс отображены номера точек замеров, по оси ординат — результат замера.

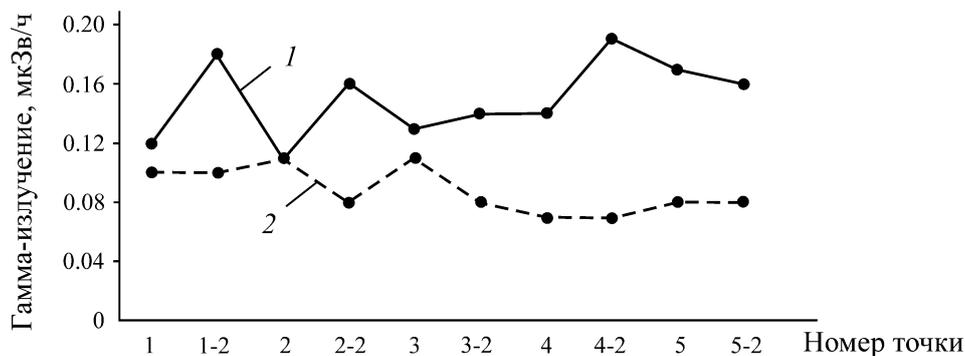


Рис. 5. Результаты измерений эквивалентной дозы гамма-излучения: 1 — отвал; 2 — склад угля

Следует учесть, что измерения проводились в случайных местах отвала и склада готового угля и там могли быть примеси разных элементов. Поскольку измеряемые величины малы и возможны отклонения значений результатов измерений от истинных на сотые доли, то в каждой точке замер выполнялся дважды. Данные, полученные в результате первого опыта, подтвердили: существует инструментально измеримое различие в значениях эквивалентной дозы гамма-излучения угля и вмещающей породы в рамках одного месторождения. Поисковый дозиметр показал видимые отличия этого параметра — 0.11 мкЗв/ч в среднем для склада угля и 0.16 мкЗв/ч для отвала породы.

#### ВЫВОДЫ

Природные радиационные свойства угля и вмещающих пород могут быть использованы для разработки новых способов автоматизации сложных технологических процессов добычи угля из мощных пластов. Правильно построив систему измерения естественной радиоактивности выпускаемой горной массы, можно решить задачу определения границы “уголь – порода”, значительно снизив потери угля при выпуске, уменьшить количество транспортируемой на поверхность пустой породы при общем повышении качества добываемого угля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Ценные элементы-примеси в углях. — Екатеринбург: Ин-т геологии УрО РАН, 2006. — 538 с.
2. Арбузов С. И., Машенькин В. С. Радиоактивные элементы в каустобиолитах Северной Азии // Материалы V Междунар. конф. “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”. — Томск, 2016. — С. 67–74.
3. Ишханов Б. И., Третьякова Т. Ю. Путь к сверхтяжелым элементам // ВМУ, Сер. 3. Физика. Астрономия. — 2017. — № 3. — С. 3–20.
4. Audi G., Bersillon O., Blachot J., and Wapstra A. H. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties, Nuclear Physics A, 2003, Vol. 729. — P. 3–128.
5. The element uranium. Thomas Jefferson national accelerator facility — office of science education. Дата обращения 15.03.2018.
6. Скурский М. Д. Недра Земли. Месторождения, металлогения. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2014. — 511 с.
7. Нифантов Б. Ф., Артемьев В. Б., Ясученя С. В., Анферов Б. А., Кузнецова Л. В. Геохимическое и геотехнологическое обоснование новых направлений освоения угольных месторождений Кузбасса. Т. 1, кн. 4. — М.: Горн. дело, 2014. — 536 с.
8. Крылов Д. А., Сидорова Г. П. Оценка содержания радиоактивных элементов в углях и продуктах их сжигания // ГИАБ. — 2015. — № 7. — С. 369–376.
9. Овчаренко Н. В. Оценка влияния добычи углей с повышенным содержанием естественных радионуклидов на качество угольной продукции и экологическое состояние окружающей сред: дис. ... канд. техн. наук. — М.: МИСиС, 2020. — 111 с.
10. Гречухин В. В. Геофизические методы исследования угольных скважин. — М.: Недра, 1965. — 469 с.
11. Клишин В. И., Шундулиди И. А., Ермаков А. Ю., Соловьев А. С. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля. — Новосибирск: Наука, 2013. — 248 с.
12. Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Варфоломеев Е. Л., Борисов И. Л. Взаимодействие механизированных крепей с межслоевой толщей в системах с выпуском угля // ГИАБ. — 2018. — № 11 (спец. выпуск 48). — С. 87–94.

*Поступила в редакцию 31/VIII 2021*

*После доработки 10/IX 2021*

*Принята к публикации 11/XI 2021*