

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКРЕСТНОСТИ УГОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Н. С. Густова^{a,1}, С. П. Каплина^a, М. В. Густова^a, Н. Балжинням^b

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^b Центральная геологическая лаборатория, Улан-Батор

Представлены результаты анализа радиоэкологической обстановки в районе ТЭС-4 г. Улан-Батора (Монголия). Определено содержание радиоизотопов (U- и Th-рядов, ^{40}K , ^{137}Cs) в образцах углей, шлака, золы уноса, а также пробах почвы и растительности гамма-активационным и гамма-спектрометрическим методами анализа. Рассчитана удельная эффективная активность ($A_{\text{эф}}$) золошлаковых отходов.

The results of the analysis of the radioecological situation near the TPP-4, Ulaanbaatar, Mongolia, are presented in this work. Content of radioisotopes (U and Th series, ^{40}K , ^{137}Cs) was determined at the coal, bottom ash, fly ash samples, as well as soil and plants using gamma-activation analysis and gamma spectrometry. Specific effective activity (A_{eff}) of ash wastes was calculated.

PACS: 87.23.–n

АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время считается, что основными источниками поступления радионуклидов в окружающую среду являются атомные электростанции (АЭС). Во многом этому способствовали аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима», которые привели к формированию негативного общественного мнения относительно атомных электростанций [1]. Однако тепловые электростанции (ТЭС) также являются источниками поступления радионуклидов в окружающую среду [2–5] и могут представлять опасность для здоровья населения, проживающего на прилегающих территориях. Уголь в своем составе помимо углерода содержит большое количество различных элементов. Кроме того, бурые угли намного более обогащены ураном и торием, чем каменные [6]. При сжигании угля микроэлементы могут выбрасываться в окружающую среду и представлять опасность для здоровья человека. Одним из наиболее опасных радионуклидов ряда ^{238}U является ^{210}Pb . Он относится к группе изотопов, обладающих особо высокой степенью радиотоксичности. ^{210}Pb , являясь ярко выраженным остеотропным радионуклидом, становится источником накопления равновесных количеств бета-излучающего ^{210}Bi и альфа-излучающего ^{210}Po [7]. Количество радионуклидов зависит от их содержания в угле, а также от технологии его приготовления и

¹E-mail: nataliagust@jinr.ru

сжигания. Обогащенная летучими частицами мелкая зольная фракция не полностью улавливается промышленными фильтрами. Загрязняющие вещества, выброшенные в атмосферный воздух, постепенно оседают на поверхности почв и растительности. Почва является индикатором геохимической обстановки. Самый верхний почвенный горизонт несет основную информацию о техногенном воздействии. В наземные растения тяжелые металлы поступают через корни и поверхность листьев. Следовательно, химический состав растений отражает элементный состав почв и аэрозольных загрязнений.

Большая часть населения Монголии (1,4 млн человек) сосредоточена в ее столице г. Улан-Баторе, территория которого вместе с включенными в его административные границы аймаками составляет 4704,4 км². Геоклиматические условия Улан-Батора способствуют накоплению загрязняющих веществ в воздухе [8].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования была выбрана тепловая электростанция ТЭС-4, расположенная в г. Улан-Баторе, — одна из крупнейших в Монголии. Данная электростанция работает на буром угле, который поставляется из близлежащих монгольских месторождений Багануур и Шивэ-Ово. В год на станции используется примерно 2,4 млн т угля.

Уголь содержит природные радионуклиды U- и Th-рядов, а также долгоживущий радиоактивный изотоп ⁴⁰K. При сжигании угля помимо шлака образуется летучая зола уноса. Несмотря на то, что для очистки отходящих газов на ТЭС-4 применяется электростатический осадитель типа ЭГА-2-58-12-6-4, со степенью очистки до 99%, мелкодисперсная часть летучей золы выбрасывается в атмосферный воздух в составе дымовых газов.

Таким образом, тепловая электростанция может быть источником поступления радионуклидов в окружающую среду и стать даже более опасной для здоровья местного населения, чем атомные электростанции.

Целью данной работы был анализ радиоэкологической ситуации в окружающей среде действующей угольной электростанции. В 2018 г. были отобраны образцы угля, шлака, золы уноса на ТЭС-4, а также образцы почвы и растительности на различных расстояниях от объекта. Все образцы были высушены до воздушно-сухого состояния при температуре 105 °С, измельчены, гомогенизированы в агатовой ступке и подготовлены для дальнейшего анализа согласно методике [9]. Анализ всех образцов проводился в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ, Дубна) с применением гамма-активационного метода анализа (ГАА) для определения содержания U и Th и гамма-спектрометрии — для регистрации удельной естественной активности. Исследуемые образцы и стандарт (СП-1) облучали тормозным излучением 22 МэВ (средний ток электронов 10 А) в течение 4 ч на микротроне МТ-25. Затем облученные образцы были измерены с использованием детектора HPGe Canberra с разрешением 1,5 кэВ и эффективностью регистрации гамма-излучения порядка 1% на линии 1332,5 кэВ (⁶⁰Co) (диапазон энергий до 3000 кэВ). Время измерения составляло 300, 900 и 3600 с. Для определения тория каждый облученный образец также измерялся полупроводниковым

Si(Li)-детектором XRF-спектрометра с разрешением 145 эВ на линии Fe (6,4 кэВ). Гамма-спектрометрические измерения образцов для определения содержания естественных радионуклидов и ^{137}Cs проводили с использованием HPGe-детектора, а также тонкого Ge-детектора с разрешением 0,55 кэВ и эффективностью регистрации гамма-излучения порядка 7 % на линии 122 кэВ (диапазон энергий до 300 кэВ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из состава угля и характеристик системы газоочистки на ТЭС-4, было рассчитано, что ежегодно от наблюдаемого объекта в атмосферу выбрасывается около 2,4 тыс. тонн различных веществ. Результаты определения содержания урана и тория в образцах угля, используемого на ТЭС-4, шлака и золы уноса представлены в табл. 1.

Таблица 1. Содержание урана и тория в образцах угля, шлака и золы уноса (г/т)

Образец	U	Th
Уголь	$5,2 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,1$
Шлак	$19,3 \pm 0,3$	$10,6 \pm 0,3$
Зола уноса	$22,5 \pm 0,4$	$14,6 \pm 0,4$
Шлак/уголь	3,7	4,2
Зола уноса/уголь	4,3	5,8

Анализ данных показал, что используемые угли значительно обогащены ураном, содержание которого в 2 раза превышает принятое среднемировое значение для бурых углей ($(2,7 \pm 0,3)$ г/т). Содержание тория в угле оказалось ниже кларкового значения ($(3,8 \pm 0,2)$ г/т). При сжигании угля уран и торий концентрируются в золошлаковых отходах. Уран обнаруживается в концентрациях, в 1,5 раза превышающих среднемировое значение, принятое для зол бурых углей ((15 ± 1) г/т), при этом 54 % урана концентрируется в золе уноса. Содержание тория в отходах сгорания угля ниже кларка ((19 ± 1) г/т), в золе уноса концентрируется 58 % [10]. Следует отметить, что содержание урана и тория в шлаке и золе уноса ТЭС-4 имеет тот же порядок, что и в работе [2]. Так как данные о фоновых и предельно допустимых концентрациях урана и тория для почв Монголии отсутствуют, в качестве эталона сравнения были использованы кларки для почв по Виноградову [11]: для U — 1 мг/кг, для Th — 6 мг/кг. Анализ данных показал, что в районе действия электростанции содержание урана в почве выше принятого кларка в 2,4–3 раза, тория — в 1,3–1,9 раз. Максимальная концентрация в почве урана ($(3,0 \pm 0,2)$ мг/кг) и тория ($(11,4 \pm 0,5)$ мг/кг) отмечается в непосредственной близости от электростанции, с увеличением расстояния происходит снижение концентрации.

Максимальное содержание урана в растительности ($(1,1 \pm 0,3)$ мг/кг) обнаружено в образцах, отобранных в непосредственной близости от ТЭС-4, затем происходит снижение концентрации. Максимальное содержание тория ($(4,3 \pm 0,8)$ мг/кг), обнаруживается на расстоянии 10 км от электростанции, минимальное — на расстоянии 5 км.

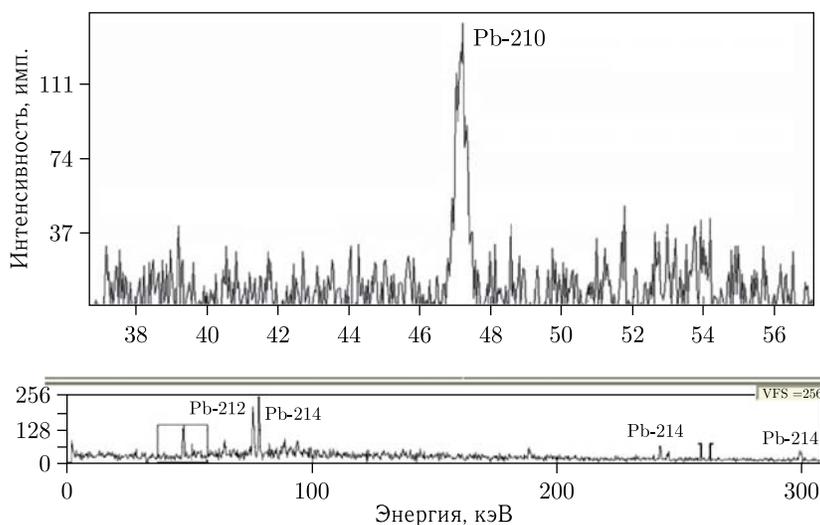
В исследуемых образцах были рассчитаны удельные активности (Бк/кг) U и Th, исходя из определенного содержания (г/т) этих элементов в образцах (см. табл. 1). Расчеты были сделаны для изотопов ^{238}U , содержание которого в природном уране составляет 99,3 %, и ^{232}Th , изотопная распространенность которого практически 100 %. Результаты расчетов удельной активности радионуклидов и измерений естественной

Таблица 2. Удельная активность радионуклидов в образцах угля, шлака, золы уноса, а также почвы и растительности на различных расстояниях от ТЭС-4 (Бк/кг)

Образец	Радионуклид					
	Расчет		γ-спектрометрия			
	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
Уголь	62,5 ± 12,5	8 ± 4	39 ± 4	10 ± 2	38 ± 5	0,5 ± 0,1
Шлак	237,5 ± 12,5	45 ± 4	305 ± 15	31 ± 4	170 ± 14	≤ 0,1
Зола уноса	275,0 ± 12,5	53 ± 4	317 ± 18	118 ± 4	172 ± 15	≤ 0,1
Почва:						
1 км	37,5 ± 12,5	45 ± 4	18 ± 5	14 ± 3	696 ± 16	1,5 ± 0,2
5 км	37,5 ± 12,5	33 ± 4	21 ± 6	5 ± 3	567 ± 18	1,8 ± 0,2
10 км	37,5 ± 12,5	37 ± 4	36 ± 2	14 ± 3	559 ± 11	2,1 ± 0,2
Растительность:						
1 км	7,5 ± 3,8	≤ 4	20,0 ± 0,5	34 ± 4	212 ± 14	≤ 0,1
5 км	10,0 ± 3,8	8 ± 4	≤ 0,5	28 ± 6	138 ± 18	≤ 0,1
10 км	≤ 3,8	16 ± 4	≤ 0,5	6 ± 4	479 ± 12	≤ 0,1

активности образцов угля, шлака, золы уноса, а также почвы и растительности на различных расстояниях от ТЭС-4 представлены в табл. 2.

Обращает на себя внимание, что в золе уноса обнаружено значительное содержание долгоживущих изотопов уранового ряда (²²⁶Ra и ²¹⁰Pb). Удельная активность ²²⁶Ra в золе уноса в 7,8 раз превышает его содержание в исходном угле, а ²¹⁰Pb — в 12 раз. На рисунке представлен гамма-спектр естественной активности в образце золы уноса.



Гамма-спектр естественной активности образца золы уноса, время измерения 15 ч (энергетический интервал до 300 кэВ)

Тонкодисперсные частицы с повышенным содержанием радионуклида ^{210}Pb про-скакивают через газоочистное оборудование ТЭС, что приводит к увеличению его концентрации в воздухе и, как следствие, к возможному загрязнению почв. Удельная активность ^{210}Pb в почве варьируется от 5 до 14 Бк/кг. В тех же точках в растительности удельная активность ^{210}Pb обнаружена на уровне 6–34 Бк/кг, что выше его удельной активности в почве. Данное обстоятельство позволяет предположить аэрогенный источник поступления ^{210}Pb в окружающую среду. Удельная активность ^{137}Cs в образцах угля, шлака, золы уноса и в образцах растительности — на уровне предела обнаружения. Удельная активность ^{137}Cs в почве была определена на уровне 1,5–2,1 Бк/кг. Содержание радионуклидов ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K в почве и растительности было аналогично данным схожих исследований. Почвы и растительность Монголии менее загрязнены ^{137}Cs , чем европейские [3–5]. Полученные результаты содержания ^{210}Pb в образцах почв меньше, чем в [3–5], однако в образцах растительности отмечено его превышение [4].

Для оценки возможности использования золошлаковых отходов (ЗШО), образующихся при работе ТЭС-4, в качестве вторичного сырья при строительстве была рассчитана удельная эффективная активность ($A_{эф}$) для золы уноса, шлака и их смеси 3 : 1 (ЗШО) [12]. Величина удельной эффективной активности для золы уноса составила 422,6 Бк/кг, для шлака — 325,4 Бк/кг и ЗШО — 398,3 Бк/кг. Зола уноса и ЗШО (смесь 3 : 1) относятся к классу II материалов, которые не могут применяться для всех типов строительства. На данный факт необходимо обращать внимание при использовании материалов золоотвалов в строительстве в пределах населенных пунктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для снижения радиационного воздействия от угольной ТЭС-4 г. Улан-Батора необходимо организовать тщательный контроль за содержанием естественных радионуклидов, таких как радионуклиды U- и Th-серии, ^{40}K , и техногенного радионуклида ^{137}Cs в используемых на станции бурых углях и продуктах их сжигания (шлаке и золе уноса), а также проведение мониторинга почвы и растительности. При использовании золошлаковых отходов в строительстве необходимо обращать внимание на содержание радионуклидов в шлаке и золе уноса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В. А., Брыкин С. Н., Кузин Р. Е., Серебряков И. С., Старкова М. В., Таиров Т. Н. Сравнительный анализ радиоактивного загрязнения, создаваемого АЭС и ТЭС, работающими на угле // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2012. Т. 67, № 1. С. 120–127.
2. Tadmor J. Radioactivity from Coal-Fired Power Plants // J. Environ. Radioactivity. 1986. No. 4. P. 177–204.
3. Charro E., Pardo R., Peña V. Statistical Analysis of the Spatial Distribution of Radionuclides in Soils around a Coal-Fired Power Plant in Spain // J. Environ. Radioactivity. 2013. V. 124. P. 84–92.

4. *Čujić M., Dragović S.* Assessment of Dose Rate to Terrestrial Biota in the Area around Coal Fired Power Plant Applying ERICA Tool and RESRAD BIOTA Code // *J. Environ. Radioactivity*. 2018. V. 188. P. 108–114.
5. *Sarap N., Krneta-Nikolić J., Meseldžija S., Janković-Mandić L., Janković M.* Quantification of Radioisotopic Pollution of Soil from Coal Fired Power Plant Surrounding // *Rom. J. Phys.* 2020. V. 65, No. 802. P. 1–9.
6. *Юдович Я. Э., Кемпис М. П.* Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 655 с.
7. *Bakhur A. E., Manuilova L. I., Ovsyannikova T. M.* Po-210 and Pb-210 in the Objects of the Environment. Methods of Determination // *ANRI*. 2009. No. 1(56). P. 29–40.
8. *Кошелева Н. Е., Касимов Н. С., Сорокина О. И., Гунин П. Д., Бажа С. Н., Энх-Амгалан С.* Геохимия ландшафтов Улан-Батора // *Изв. РАН. Геогр. науки*. 2013. Т. 5. С. 111–126.
9. Стандарт предприятия СТП 105-2004. Многокомпонентный инструментальный гамма-активационный анализ почв и других объектов окружающей среды на токсичные и сопутствующие элементы. ОИЯИ, 6-8233. Дубна, 2004. 15 с.
10. *Ketris M. P., Yudovich Ya. E.* Estimations of Clarkes for Carbonaceous Biolithes: World Averages for Trace Element Contents in Black Shales and Coals // *Intern. J. Coal Geol.* 2009. V. 78, No. 2. P. 135–148.
11. *Алексеевко В. А., Алексеевко А. В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов н/Д., 2013.
12. ГОСТ 30108-94. Межгосударственный стандарт. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. М.: Стандартинформ, 2007. 8 с.

Получено 11 октября 2021 г.