

DOI: <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-3-149-154>

УДК 575:224. 23

© Коллектив авторов, 2019

Минина В.И.¹, Нелюбова Ю.А.², Савченко Я.А.¹, Тимофеева А.А.¹, Астафьева Е.А.¹, Баканова М.Л.¹, Мейер А.В.², Глушков А.Н.¹**Оценка повреждений хромосом у рабочих угольной теплоэлектростанции**¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии» Сибирского отделения Российской академии наук, пр-т Советский, 18, Кемерово, Россия, 650000;²ФГБУВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, Кемерово, Россия, 650000**Введение.** Угольные теплоэлектростанции характеризуются выраженным неблагоприятным действием производственной среды на организм рабочих.**Цель исследования** — анализ повреждений хромосом у рабочих теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), работающей на углях Кузнецкого угольного бассейна (Западная Сибирь).**Материалы и методы.** Изучен уровень и спектр хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови у 185 рабочих Кемеровской ТЭЦ и 218 жителей той же местности, не работающих на промышленных предприятиях (Кемерово, Россия). Для каждого индивида анализировались, в среднем, 200 метафазных пластинок высокого качества.**Результаты.** Установлено, что у работников ТЭЦ уровень хромосомных aberrаций статистически значимо выше, чем в контроле ($3,01 \pm 0,13\%$ против $1,45 \pm 0,08\%$; $p < 0,00001$). При этом повышена частота встречаемости aberrаций как хроматидного, так и хромосомного типов, что указывает на комплексное воздействие химических и радиационных факторов.**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки мер для снижения генотоксической опасности производственной среды.**Ключевые слова:** теплоэлектростанции; рабочие; хромосомные aberrации; угольная пыль**Для цитирования:** Минина В.И., Нелюбова Ю.А., Савченко Я.А., Тимофеева А.А., Астафьева Е.А., Баканова М.Л., Мейер А.В., Глушков А.Н. Оценка повреждений хромосом у рабочих угольной теплоэлектростанции. *Мед. труда и пром. экол.* 2019. 59 (3): 149–154. <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-3-149-154>**Для корреспонденции:** Минина Варвара Ивановна, гл. науч. сотр. лаб. цитогенетики ФИЦ УУХ СО РАН, доктор биол. наук. E-mail: vminina@mail.ru**Финансирование.** Исследование проведено при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-44-420017 р-а и государственного задания № 0352–2016.**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.Varvara I. Minina¹, Yuliya A. Nelyubova², Yana A. Savchenko¹, Anna A. Timofeeva¹, Yevgeniya A. Astafieva¹, Mariya L. Bakanova¹, Alina V. Meier², Andrey N. Glushkov¹**Estimation of chromosome disorders in workers at coal thermal power plant**¹Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 18, Sovetskiy Ave., Kemerovo, Russia, 650000;²Kemerovo State University, 6, Krasnaya str., Kemerovo, Russia, 650000**Introduction.** Coal heat power stations are characterized by severe hazardous effect of occupational environment on workers.**Objective.** To analyze chromosomal disorders in workers of thermal power plant working on coal from Kuznetsk coal field (West Siberia).**Materials and methods.** The authors studied level and specter of chromosomal aberrations in blood lymphocytes of 185 workers of Kemerovo thermal power plant and 218 inhabitants of the same location, not working on industrial enterprises (Kemerovo, Russia). For every individual, average number of 200 metaphase plates of high quality was analyzed.**Results.** Findings are that the workers of thermal power plant have levels of chromosomal aberrations significantly higher than those of reference group ($3,01 \pm 0,13\%$ vs. $1,45 \pm 0,08\%$; $p < 0,00001$). With that, increased frequency is seen both for chromatid aberrations and for chromosomal ones — that indicates complex exposure to chemical and radiation factors.**Conclusions.** The results obtained necessitate elaboration of measures to decrease genotoxic hazards in the occupational environment.**Key words:** thermal power plants; workers; chromosomal aberrations; coal dust**For citation:** Minina V.I., Nelyubova Yu.A., Savchenko Ya.A., Timofeeva A.A., Astafieva Ye.A., Bakanova M.L., Meier A.V., Glushkov A.N. Estimation of chromosome disorders in workers at coal thermal power plant. *Med. truda i prom. ekol.* 2019. 59 (3): 149–154. <http://dx.doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-3-149-154>**For correspondence:** Varvara I. Minina, Chief researcher of cytogenetic laboratory in 1Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Dr. Biol. Sci. E-mail: vminina@mail.ru**Funding:** The study was sponsored by grant of RFFI 18-44-420017 and governmental task N 0352–2016.**Conflict of interests:** The authors declare no conflict of interests.**Введение.** Угольные теплоэлектростанции (теплоэлектроцентрали, ТЭЦ) являются одним из важнейших источников загрязнения окружающей среды из-за выбросов

разнообразных продуктов сгорания угля. Эти продукты включают дымовые газы и взвешенные частицы (золевая пыль). Частицы угольной золы представляют собой

сложную смесь, состоящую из CO_x, NO_x, SO_x, кварца, несгоревшего углерода, тяжелых металлов (мышьяк, бор, кадмий, хром, медь, свинец, селен, железо, цинк и т. д.), радиоактивных элементов (уран, торий, радий, радон) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [1]. Рабочие ТЭЦ в высокой степени подвержены воздействию комплекса неблагоприятных факторов: вредных химических веществ, неблагоприятного микроклимата, шума, вибрации, тяжелого физического труда [2]. Воздействие этих факторов обуславливает формирование высокой общей и профессиональной заболеваемости рабочих, дисфункции легких и нарушений респираторной системы, повышение риска рака легкого [1–3]. В последние годы приобретает свою актуальность изучение генетических биомаркеров эффекта воздействия производственной среды у рабочих производств угольного цикла [4–6], в том числе у рабочих угольных теплоэлектростанций [7–9].

Установлено, что степень генотоксической опасности производственной среды может существенно варьироваться в зависимости от марки углей, конкретных технологических условий, эффективности очистки вредных для здоровья выбросов, применяемых средств индивидуальной защиты и т. п.

Цель исследования — анализ уровня и спектра повреждений хромосом, выполняющих основные производственные операции у рабочих Ново-Кемеровской ТЭЦ в сравнении с жителями г. Кемерово, никогда не работавшими на производстве.

Материалы и методы. Всего в 2017 г. было обследовано 403 человека, проживающих в г. Кемерово. По этнической принадлежности — все русские. Из них: 185 рабочих Ново-Кемеровской ТЭЦ (НК ТЭЦ), выполняющих основные производственные операции (средний стаж работы во вредных условиях — 23 года). В качестве данных групп сравнения использовались результаты цитогенетического анализа рабочих Кемеровской ТЭЦ (Кем ТЭЦ) и Кемеровской ГРЭС (Кем ГРЭС), проведенного ранее (2005, 2007 гг.) [8]. В качестве контроля использовали данные 218 здоровых русских жителей г. Кемерово, доноров областной станции переливания крови, не работавших на промышленных предприятиях, сдавших кровь для исследования в 2017 г. Краткая характеристика групп представлена в табл. 1.

Перед началом сбора данных и проведения эксперимента все обследованные заполняли анкеты и подписывали информированное согласие о проведении генетических исследований. Критерием исключения из исследования явился прием лекарственных препаратов и рентгенодиагностические процедуры за 3 месяца до сбора материала. Дизайн исследования был утвержден комитетами по этике Института экологии человека ФИЦ УУХ СО РАН.

Материалом для исследования хромосомных aberrаций (ХА) служила цельная периферическая кровь, которую забирала из локтевой вены в асептических условиях. Подготовка препаратов хромосом и их анализ осуществлялись в соответствии с требованиями, подробно описанными ранее [5]. У каждого индивида были проанализированы по 200–1000

Таблица 1 / Table 1

Общая характеристика обследованных групп жителей г. Кемерово
General characteristics of examined inhabitants groups of Kemerovo

Показатель	Рабочие НК ТЭЦ	Контроль*	Группы сравнения**	
			Рабочие Кем ТЭЦ	Рабочие Кем ГРЭС
Обследовано всего	185	218	95	185
Средний возраст, лет	52,12	49,96	42,65	40,98
Возраст (min-max)	39–69	35–67	23–65	22–62
Мужчин	146	175	64	145
Женщин	39	43	31	40
Курильщики	78	80	42	108
Некурящих	107	138	53	77
Стаж работы на ТЭЦ (средний), лет	23	–	16	13

Примечание: * — не работают на промышленных предприятиях г. Кемерово, ** — группы рабочих ТЭЦ, обследованные ранее.
Note: * — not working at industrial enterprises of Kemerovo, ** — groups of thermal power plant workers examined earlier.

Таблица 2 / Table 2

Частота клеток с повреждениями хромосом (%) в изученных группах жителей г. Кемерово
Frequency of cells with chromosomal injuries (%) in the examined population groups of Kemerovo

Группа	Mean±St. err	Me	25–75%	Min-Max
Рабочие НК ТЭЦ	3,17±0,13*°	3,00	2,00–4,50	0–12,00
Контроль	1,53±0,09	1,50	0,50–2,00	0–7,50
Группы сравнения:				
Рабочие Кем ТЭЦ	3,80±0,31*	3,00	2,00–5,00	0–13,00
Рабочие Кем ГРЭС	3,97±0,17*	4,00	3,00–5,00	0–10,00

Примечание. Mean±St. err — среднее значение и его ошибка, Me — медиана, 25–75% — верхний и нижний квартиль; * — статистически значимо отличается от значений в контрольной группе: p=0,000001; ° — статистически значимо отличается от значений в группе Кем ГРЭС: *p=0,00008.

Note: Mean±St. err — mean value and its error, Me — median, 25–75% — upper and lower quartile; * — statistically significant difference from values in the reference group: p=0,000001; ° — statistically significant difference from values in the group of Kemerovo thermal power plant: *p=0,00008.

метафазных пластинок высокого качества (с хорошим разбросом хромосом и качественной окраской). Оценивалась частота встречаемости клеток с ХА, учитывались aberrации хроматидного (одиночные фрагменты и межхроматидные обмены) и хромосомного типов (парные фрагменты, дигцентрические хромосомы с фрагментами и без, кольцевые хромосомы, атипичные моноцентрики). Ахроматические пробелы в число aberrаций не включались.

Математическая обработка результатов проводилась с помощью программы «Statistica for Windows v. 8.0». Рассчитывались средние значения и их ошибки, оценивались медианы, квантили (25 и 75 перцентили), минимальные и максимальные значения. Для оценки различий между двумя независимыми выборками использовался U-критерий Манна-Уитни (Mann — Whitney U test).

Результаты. У 98% обследованных рабочих НК ТЭК регистрировались повреждения хромосом в лимфоцитах крови. Интегральный показатель генотоксической нагрузки — частота клеток с повреждениями хромосом у рабочих НК ТЭЦ — оказался в 2 раза выше (статистически значимо), чем у жителей г. Кемерово, не занятых на производстве (табл. 2).

В то же время частота встречаемости клеток с хромосомными нарушениями у рабочих НК ТЭЦ оказалась ниже, чем у рабочих других теплоэлектростанций г. Кемерово (различия с КемГРЭС статистически значимы, с КемТЭЦ — не достигают уровня статистической значимости).

Влияния таких факторов, как возраст, пол, статус курения, стаж работы на производстве на частоту клеток с повреждениями хромосом (всех типов) у рабочих НК ТЭЦ выявлено не было. Статистически значимой корреляции между параметрами стаж работы во вредных условиях и частота ХА выявлено не было. Уже через 1 год трудового стажа (минимальный стаж в изученной нами группе) в крови рабочих наблюдается значительное число клеток с aberrациями хромосом (3%). Статистически значимой корреляции между параметрами стаж работы во вредных условиях и частотой ХА выявлено не было. Частота появления клеток с ХА у рабочих разных цехов

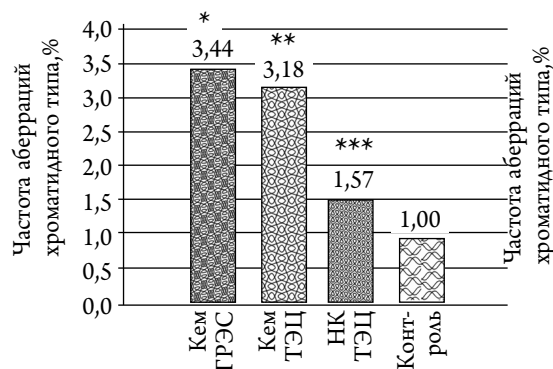


Рис. 1. Частота aberrаций хроматидного типа у обследованных индивидов

Fig. 1. Frequency of chromatid aberrations in the examinees

Примечания: * — статистически значимо отличаются от значения аналогичного показателя в группе контроля, $p=0,000001$; ** — отличается от значений в группе контроля, $p=0,000001$; *** — в группах рабочих Кем ГРЭС и Кем ТЭЦ, $p<0,001$.

Notes: * — statistically significant difference from values of analogous parameter in the reference group, $p=0,000001$; ** — different from the values in the reference group, $p=0,000001$; *** — in groups of workers in Kemerovo electric power station and thermal power plant, $p<0,001$.

статистически значимо не различалась, но наблюдалась тенденция к повышению значений в котельном цехе (котельный цех — $3,60\pm 0,40\%$, турбинный цех — $3,15\pm 0,53\%$, топливно-транспортный — $3,04\pm 0,25\%$, электрический — $3,22\pm 0,33\%$, химический — $3,02\pm 0,28\%$, ремонтный — $3,09\pm 0,30\%$). Наиболее опасными (с точки зрения генотоксического воздействия среды НК ТЭЦ) являлись рабочие места машинистов котельного ($5,46\pm 0,61\%$), топливно-транспортного ($4,35\pm 0,20\%$), турбинного цехов ($4,38\pm 0,38\%$), которые подвергаются воздействию угольной пыли в наиболее высоких концентрациях.

Оценка частоты повреждений хромосом в зависимости от хронических заболеваний (их наличие против отсутствия) не показала статистически значимых отличий ($p>0,05$).

Детальный анализ качественного спектра нарушений структуры хромосом позволил установить, что у рабочих ТЭС повышена частота встречаемости aberrаций как хроматидного, так и хромосомного типов. Aberrации хроматидного типа (преимущественно одиночные фрагменты) были статистически значимо повышены по сравнению с контролем у рабочих всех трех ТЭЦ г. Кемерово (рис. 1).

Частота aberrаций хроматидного типа у рабочих НК ТЭЦ оказалась статистически значимо ниже, чем у рабочих Кем ГРЭС и Кем ТЭЦ. Данные различия складывались, в первую очередь, за счет снижения частоты хроматидных фрагментов ($1,54\pm 0,12\%$ у рабочих НК ТЭЦ против $3,18\pm 0,27\%$ в Кем ТЭЦ, $3,44\pm 0,16\%$ в Кем ГРЭС; $p<0,00001$).

Aberrации хромосомного типа оказались статистически значимо повышены по сравнению с контролем только у рабочих НК ТЭЦ (рис. 2).

Данные различия складывались за счет высокой частоты встречаемости парных фрагментов ($1,10\pm 0,08\%$ у рабочих НК ТЭЦ; $0,36\pm 0,04\%$ в контроле; $0,40\pm 0,06\%$ у рабочих КемТЭЦ и $0,40\pm 0,05\%$ у рабочих КемГРЭС; различия статистически значимы $p<0,00001$), дигцентрических хромосом с фрагментами ($0,07\pm 0,02\%$ у рабочих НК ТЭЦ против $0,02\pm 0,01\%$ в контроле; $p<0,05$; у рабочих КемТЭЦ и КемГРЭС — не обнаружены) и кольцевых хромосом ($0,12\pm 0,02\%$ у рабочих НК ТЭЦ против $0,05\pm 0,01\%$ в контроле, $p<0,05$; у рабочих Кем ТЭЦ и Кем ГРЭС — не обнаружены).

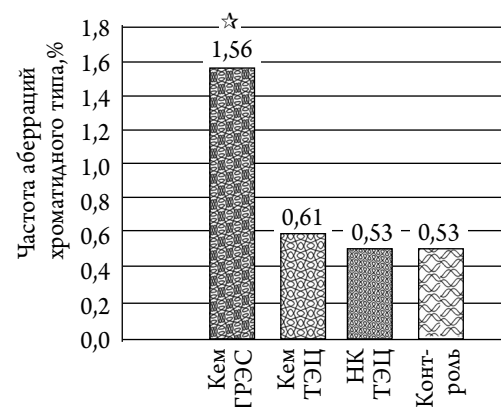


Рис. 2. Частота aberrаций хромосомного типа у обследованных индивидов

Fig. 2. Frequency of chromosomal aberrations in the examinees

Примечания: * — статистически значимо отличаются от значения аналогичного показателя в других группах, $p=0,000001$.

Notes: * — statistically significant differences from values of the analogous parameter in other groups, $p=0,000001$.

Качественный спектр ХА не различался у рабочих НК ТЭЦ разного пола и возраста. Не было зарегистрировано отличий частоты отдельных видов ХА в зависимости от продолжительности трудового стажа и у сотрудников, работающих в разных цехах НК ТЭЦ. Частота парных фрагментов оказалась повышена у курящих рабочих НК ТЭЦ по сравнению с некурящими ($1,30 \pm 0,12\%$ против $0,96 \pm 0,11\%$, $p=0,04$). Однако у некурящих рабочих данный показатель был выше, чем контроле (частота парных фрагментов в контроле у некурящих — $0,34 \pm 0,05\%$, у курильщиков $0,40 \pm 0,07\%$). В группе контроля статус курения оказывал влияние на частоту аберраций хроматидного типа. В группе курильщиков она составила $1,17 \pm 0,11\%$, тогда как у некурящих — $0,90 \pm 0,08\%$ ($p=0,04$).

Обсуждение. Проведено изучение уровня и спектра повреждений хромосом у рабочих Ново-Кемеровской ТЭЦ, работающей на углях Кузнецкого угольного бассейна. К настоящему моменту накоплены цитогенетические данные по всем трем действующим теплоэлектростанциям г. Кемерово: КемГРЭС, КемТЭЦ, НК ТЭЦ и полученные данные по жителям той же местности, близкого половозрастного состава, не работающими на промышленных предприятиях.

У рабочих всех трех предприятий теплоэнергетики г. Кемерово зафиксировано статистически значимое повышение частоты нарушений хромосом в лимфоцитах крови, что свидетельствует о мутагенном характере воздействия факторов производственной среды на организм сотрудников. Среди потенциальных генотоксикантов особое внимание привлекает действие на рабочих ТЭЦ угольной пыли в высоких концентрациях. Среднесменная концентрация угольной пыли в воздухе рабочих зон машинистов топилоподдачи составляет 23 мг/м^3 , у слесарей — 11 мг/м^3 ; во всех случаях отмечалось превышение ПДК по пыли — 4 мг/м^3 (ГН 2.2.5.1827-03).¹

Угольная пыль представляет собой смесь разнообразных химических веществ органической и неорганической природы.

Воздействие данного комплекса *in vitro* способно вызывать повышение уровня ДНК-комет и микроядер в клетках [10]. Эксперименты показывают, что воздействие угольной пыли вызывает молекулярные, клеточные и гистопатологические изменения у животных *in vivo* [11]. Результаты исследований у рабочих угольных шахт и разрезов, выполненных в разных странах мира (Россия, Турция, Бразилия, Колумбия, Нидерланды, Перу, Индия), свидетельствуют о высоком уровне хромосомных нарушений у рабочих угледобывающей индустрии [5,6,12–14]. Авторы отмечают, что помимо угольной пыли наблюдаемые генотоксические эффекты могут быть связаны с воздействием сверхнормативных доз радона, с присутствием тяжелых металлов, полициклических ароматических углеводородов и других летучих опасных соединений, действующих на фоне неблагоприятных физических факторов: производственного шума и вибрации, высоких температур, высоких физических нагрузок.

Данные, полученные в группе НК ТЭЦ г. Кемерово, оказались сопоставимы с результатами исследований, выполненных ранее в Турции [7]. У рабочих угольной ТЭЦ г. Эльбистан (юго-восток Турции), частота аберрантных метафаз составила $3,12 \pm 0,19\%$ (значимо выше, чем в контроле $0,93 \pm 0,13$) [7]. Авторы также указывали, что цитогенетические повреждения могут объясняться кумулятив-

ным воздействием ряда химических соединений угольной золы и газообразных выбросов, а не одного конкретного вещества [7].

Аналогичное повышение частоты клеток с повреждениями хромосом наблюдалось у рабочих трех ТЭЦ г. Кемерово, работающих на углях Кузнецкого угольного бассейна (Западная Сибирь, Россия): КемТЭЦ и КемГРЭС (обследованы в 2005–2007 гг.), НК ТЭЦ (данное исследование, 2017 г.), что отражает общую негативную тенденцию воздействия производственной среды угольных ТЭЦ на геном сотрудников (табл. 2). Наиболее высокий уровень повреждений хромосом был зарегистрирован у рабочих самой крупной ТЭЦ г. Кемерово — КемГРЭС (КемГРЭС имеет 13 котлов, 9 турбогенераторов; тепловая мощность 1540 Гкал/ч ; для сравнения — КемТЭЦ: 8 котлов, 4 турбогенератора; тепловая мощность 749 Гкал/ч ; НК ТЭЦ: 9 котлов, 8 турбогенераторов; тепловая мощность 1449 Гкал/ч). Помимо разницы в объемах производства можно отметить, что в НК ТЭЦ с 2012 г. перешли на использование угля марки Д (длиннопламенный, с меньшей теплотой сгорания и большей зольностью, более дешевый по сравнению со слабоспекающимся углем марки С, применявшимся на ТЭЦ ранее), что также способно модифицировать генотоксическую опасность производственной среды.

Анализ качественного спектра поврежденных хромосом показал, что у рабочих ТЭЦ повышена частота встречаемости аберраций хроматидного типа, что свидетельствует о значимом вкладе химических мутагенов. Однако особое внимание привлекает значительное повышение частоты аберраций хромосомного типа (дигцентрических, кольцевых хромосом, парных фрагментов) у рабочих НК ТЭЦ. Известно, что ведущей причиной появления перестроек хромосомного типа является воздействие радиации [15]. Активно обсуждается возможность использования в качестве биомаркера действия радиации не только высокую частоту дигцентрических хромосом («золотой стандарт» биодозиметрии), но и ацентрических фрагментов [16], частота которых у рабочих НК ТЭЦ значительно повышена. Известно, что альфа-частицы радиоактивного газа радона способны аккумулироваться на поверхности микрочастиц угольной пыли и с ними переноситься. Таким образом, рабочие теплоэлектростанций оказываются подвержены воздействию не только комплекса химических веществ, но и действию радиационного фактора.

Не было обнаружено влияния возраста, пола, статуса курения (за исключением частоты парных фрагментов, которые оказались логично повышены у курильщиков), хронических заболеваний на высокую частоту поврежденных хромосом у рабочих НК ТЭЦ, что указывает на то, что ведущей причиной накопления повреждений ДНК в данной группе является действие производственной среды. Установлено, что наиболее опасными, с точки зрения генотоксической опасности, на всех изученных теплоэлектростанциях г. Кемерово являются рабочие места машинистов котельного, топливно-транспортного, турбинного цехов.

Выводы:

1. Производственная среда угольных теплоэлектростанций способна оказывать выраженное мутагенное воздействие на организм рабочих. При этом формирование аберраций хромосом не зависит от пола, возраста (в изученном диапазоне), наличия хронических заболеваний у обследованных рабочих, а определяется, в первую очередь, действием факторов производственной среды.

2. Наиболее высокий уровень хромосомной нестабильности зарегистрирован у машинистов котельного, топлив-

¹ Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.1827-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» Дополнение №1 к ГН 2.2.5.1313-03.

но-транспортного и турбинного цехов. Высокий уровень aberrаций хромосомного типа у рабочих Ново-Кемеровской ТЭЦ свидетельствует о том, что обследованные индивиды, подвергались воздействию мутагенов лучевой природы, что указывает на необходимость проведения комплекса мер по обеспечению радиационной безопасности работников данного производства и профилактики заболеваний, связанных с накоплением поврежденных ДНК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh L.M., Kumar M., Sahoo B.K., Sapra B.K., Kumar R. Study of radon, thoron exhalation and natural radioactivity in coal and fly ash samples of Kota super thermal power plant, Rajasthan, India. *Radiat Prot Dosimetry*. 2016; 171(2): 196–9.
2. Захаренков В.В., Кислицына В.В. Оценка риска нарушения здоровья работников угольной теплоэлектростанции от воздействия производственных факторов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014; 1(2): 168–70. Available at: <http://applied-research.ru/ru/article/view?id=4616> (in Russian).
3. Nichols L., Sorahan T. Mortality of UK electricity generation and transmission workers, 1973–2002. *Occup. Med. (Lond.)* 2005; 55: 541–8.
4. Ada A.O., Demiroglu C., Yilmazer M., Suzen H.S., Demirbag A.E., Efe S. et al. Cytogenetic damage in Turkish coke oven workers exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons: Association with CYP1A1, CYP1B1, EPHX1, GSTM1, GSTT1, and GSTP1 gene polymorphisms. *Arh Hig Rada Toksikol*. 2013; 64 (3): 359–69. DOI: 10.2478/10004-1254-64-2013-2328.
5. Минина В.И., Кулемин Ю.Е., Толочко Т.А., Мейер А.В., Савченко Я.А., Волобаев В.П. и др. Генотоксические эффекты воздействия производственной среды у шахтеров Кузбасса. *Мед. труда и пром. экол.* 2015; 5: 4–8.
6. Sinitsky M.Y., Minina V.I., Gafarov N.I., Asanov M.A., Lari-onov A.V., Ponasenko A.V. et al. Assessment of DNA damage in underground coal miners using the cytokinesis-block micronucleus assay in peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*. 2016; 31(6): 669–75.
7. Celik M., Donbak L., Unal F., Yuzbasioglu D., Aksoy H., Yilmaz S. Cytogenic damage in workers from a coal-fired power plant. *Mutat. Res.* 2007; 627(2): 158–63. DOI 10.1016/j.mrgentox. 2006.11.003.
8. Савченко Я.А., Дружинин В.Г., Минина В.И., Глушков А.Н., Ахматянова В.Р., Остапцева А.В. и др. Цитогенетический анализ генотоксических эффектов у работников теплоэнергетического производства. *Генетика*. 2008; 44 (6): 857–62.
9. Савченко Я.А., Минина В.И., Баканова М.Л., Рыжкова А.В., Соболева О.А., Кулемин Ю.Е. и др. Роль межгенных взаимодействий в формировании хромосомных нарушений у работников угольных теплоэлектростанций. *Генетика*. 2018; 54(10): 96–108.
10. Matzenbacher C.A., Garcia A.L., Dos Santos M.S., Nicolau C.C., Premoli S., Corrêa D.S. et al. DNA damage induced by coal dust, fly and bottom ash from coal combustion evaluated using the micronucleus test and comet assay in vitro. *J. Hazard Mater*. 2017; 15 (324): 781–8. DOI: 10.1016/j. jhazmat. 2016.11.062.
11. Caballero-Gallardo K., Olivero-Verbel J. Mice housed on coal dust-contaminated sand: A model to evaluate the impacts of coal mining on health. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2016; 294: 11–20.
12. Donbak L., Rencuzogullari E., Yavuz A., Topaktas M. The genotoxic risk of underground coal miners from Turkey. *Mutat Res.* 2005; 588 (2): 82–7. DOI: 10.1016/j. mrgentox. 2005.08.014.
13. Rohr P., Kvitko K., da Silva F.R., Menezes A.P., Porto C., Sarmento M. et al. Genetic and oxidative damage of peripheral

blood lymphocytes in workers with occupational exposure to coal. *Mutat Res.* 2013; 758(1–2): 23–31. DOI: 10.1016/j. mrgentox. 2013.08.006.

14. León-Mejía G., Quintana M., Debastiani R., Dias J., Espitia-Pérez L., Hartmann A. et al. Genetic damage in coal miners evaluated by buccal micronucleus cytome assay. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2014; 107: 133–9.

15. *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies*. Vienna: IAEA; 2011.

16. Fucic A., Bonassi S., Gundy S., Lazutka J., Sram R., Ceppi M. et al. Frequency of Acentric Fragments Are Associated with Cancer Risk in Subjects Exposed to Ionizing Radiation. *Anticancer Res.* 2016; 36(5): 2451–2457.

REFERENCES

1. Singh L.M., Kumar M., Sahoo B.K., Sapra B.K., Kumar R. Study of radon, thoron exhalation and natural radioactivity in coal and fly ash samples of Kota super thermal power plant, Rajasthan, India. *Radiat Prot Dosimetry*. 2016; 171 (2): 196–9.
2. Zaharenkov V.V., Kislicyna V.V. Assessment of the risk of health impairment of workers in a coal-fired power plant against the impact of production factors. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovaniy*. 2014; 1(2): 168–70. Available at: <http://applied-research.ru/ru/article/view?id=4616> (in Russian).
3. Nichols L., Sorahan T. Mortality of UK electricity generation and transmission workers, 1973–2002. *Occup. Med. (Lond.)* 2005; 55: 541–8.
4. Ada A.O., Demiroglu C., Yilmazer M., Suzen H.S., Demirbag A.E., Efe S. et al. Cytogenetic damage in Turkish coke oven workers exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons: Association with CYP1A1, CYP1B1, EPHX1, GSTM1, GSTT1, and GSTP1 gene polymorphisms. *Arh Hig Rada Toksikol*. 2013; 64 (3): 359–369. DOI: 10.2478/10004-1254-64-2013-2328.
5. Minina V.I., Kulemin Yu.E., Tolochko T.A. et al. Genotoxic effects of the working environment among the Kuzbass miners. *Med. Truda Prom. Ekol.* 2015; 5: 4–8.
6. Sinitsky M.Y., Minina V.I., Gafarov N.I., Asanov M.A., Lari-onov A.V., Ponasenko A.V. et al. Assessment of DNA damage in underground coal miners using the cytokinesis-block micronucleus assay in peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*. 2016; 31(6): 669–675.
7. Celik M., Donbak L., Unal F., Yuzbasioglu D., Aksoy H., Yilmaz S. Cytogenic damage in workers from a coal-fired power plant. *Mutat. Res.* 2007; 627(2): 158–163. DOI 10.1016/j.mrgentox. 2006.11.003.
8. Savchenko Ia.A., Druzhinin V.G., Minina V.I., Glushkov A.N., Akhmatianova V.R., Ostapseva A.V. et al. Cytogenetic analysis of genotoxic effects in subjects employed in heat power industry. *Russian J. of Genetika*. 2008; 44(6): 746–750.
9. Savchenko Ya.A., Minina V.I., Bakanova M.L., Ryzhkova A.V., Soboлева O.A., Kulemin Yu.E. et al. Role of Gene-Gene Interactions in the Chromosomal Instability in Workers at Coal Thermal Power Plants. *Genetika*. 2018; 54(10): 96–108.
10. Matzenbacher C.A., Garcia A.L., Dos Santos M.S., Nicolau C.C., Premoli S., Corrêa D.S. et al. DNA damage induced by coal dust, fly and bottom ash from coal combustion evaluated using the micronucleus test and comet assay in vitro. *J. Hazard Mater*. 2017; 15 (324): 781–8. DOI: 10.1016/j. jhazmat. 2016.11.062.
11. Caballero-Gallardo K., Olivero-Verbel J. Mice housed on coal dust-contaminated sand: A model to evaluate the impacts of coal mining on health. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2016; 294: 11–20.
12. Donbak L., Rencuzogullari E., Yavuz A., Topaktas M. The genotoxic risk of underground coal miners from Turkey. *Mutat Res.* 2005; 588 (2): 82–7. DOI: 10.1016/j. mrgentox. 2005.08.014.
13. Rohr P., Kvitko K., da Silva F.R., Menezes A.P., Porto C., Sarmento M. et al. Genetic and oxidative damage of peripheral

13. Rohr P., Kvitko K., da Silva F.R., Menezes A.P., Porto C., Sarmento M. et al. Genetic and oxidative damage of peripheral blood lymphocytes in workers with occupational exposure to coal. *Mutat Res.* 2013; 758(1–2): 23–31. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2013.08.006.

14. León-Mejía G., Quintana M., Debastiani R., Dias J., Espitia-Pérez L., Hartmann A. et al. Genetic damage in coal miners evaluated by buccal micronucleus cytome assay. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2014; 107: 133–9.

15. *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies.* Vienna: IAEA; 2011.

16. Fucic A., Bonassi S., Gundy S., Lazutka J., Sram R., Ceppi M. et al. Frequency of acentric fragments are associated with cancer risk in subjects exposed to ionizing radiation. *Anticancer Res.* 2016; 36(5): 2451–7.

Дата поступления / Received: 10.08.2018

Дата принятия к печати / Accepted: 14.10.2018

Дата публикации / Published: 18.03.2019