

**Г.В. Жунтова¹, Т.В. Азизова¹, А.В. Ефимов¹, Е.К. Василенко¹,
Н.В. Сотник¹, Н.Н. Дудченко², И.А. Вологодская², Е.П. Фомин²**

**ОПЫТ ОКАЗАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ
ПЛУТОНИЯ В ОРГАНИЗМ РАБОТНИКА В РЕЗУЛЬТАТЕ НЕШТАТНОЙ
СИТУАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ**

**G.V. Zhuntova¹, T.V. Azizova¹, A.V. Ephimov¹, E.K. Vasilenko¹,
N.V. Sotnik¹, N.N. Dudchenko², I.A. Vologodskaya², E.P. Phomin²**

**Medical Assistance after Plutonium Intake by a Worker due to an Emergency
Situation during Production Operations**

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Рассмотрен случай поступления ^{239}Pu в организм работника в результате разгерметизации производственной установки при выполнении ремонтных работ. Работник получил ушибленную рану второго пальца правой кисти и ушиб передней брюшной стенки. Начальное содержание ^{239}Pu в месте повреждения кожи пальца составило 2 мБк, а в месте повреждения кожи живота — 40 кБк. Оценка ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, формируемой за 50 лет (ОЭД_{50}) исходя из предположения о переходе всего зарегистрированного количества ^{239}Pu из места первоначальной локализации в жидкости организма с последующим накоплением в основных органах депонирования, составила 54 Зв.

Было выполнено иссечение загрязненных радионуклидом тканей пальца и передней брюшной стенки. Однако для устранения потенциально опасного загрязнения потребовалась ампутация второго пальца правой руки. В процессе дозиметрического обследования было установлено, что поступление ^{239}Pu в организм работника произошло не только через поврежденные кожные покровы, но также через органы дыхания и пищеварения. Проведен курс хелатотерапии (5 %-й раствор пентацина) продолжительностью 4 мес. Заключительная оценка ОЭД_{50} внутреннего облучения, выполненная на основании данных о естественной экскреции актинидов, составила 25 ± 11 мЗв.

Таким образом, своевременно оказанная специализированная медицинская помощь позволила избежать значимого перехода ^{239}Pu из мест первичного отложения в организм работника и многократно снизить дозу внутреннего альфа-облучения.

Ключевые слова: плутоний, инкорпорация, инцидент, пентацин

We consider a case of ^{239}Pu intake by a worker as a result of a production manufacturing unit rupture during repair operations. The worker received a contused wound of an index finger of his right hand and anterior abdominal wall contusion. The initial ^{239}Pu burden in the areas of finger and abdominal skin injuries were 2000 and 40 kBq, respectively. The committed effective dose from internal radiation over 50 years (CED_{50}) assuming the complete transfer of the measured ^{239}Pu burden from original site of the intake into body fluids and eventual accumulation in main organs of deposition was 54 Sv.

Radionuclide-contaminated tissues of the finger and the anterior abdominal wall were excised; however it became necessary to amputate the index finger of the right hand to avoid potentially harmful contamination. A dosimetry screening revealed that injured skin was not the only route by which ^{239}Pu entered the worker's body, but respiratory and digestive organs were also involved. The duration of chelation therapy (5 % pentacin solution) was 4 months. The final estimate of CED_{50} from internal radiation based on data on natural excretion of actinides was 25 ± 11 mSv.

Thus, timely specialized medical assistance allowed avoiding significant transfer of ^{239}Pu from the sites of original deposition to the worker's body and decreasing the dose from internal alpha-radiation by a large factor.

Key words: plutonium intake, incident, pentacin

При возникновении нештатных ситуаций и технологических сбоев на предприятиях атомной промышленности возможно поступление плутония в организм работников тремя путями: ингаляционным через органы дыхания, через поврежденные кожные покровы и в небольших количествах — из полости рта (перорально) в желудочно-кишечный тракт (ЖКТ). В дальнейшем происходит резорбция плутония из места первичного отложения (легкие, раневые поверхности, ЖКТ) в кровь, где растворимые формы плутония связываются с белками плазмы (преимущественно с трансферрином), а затем откладываются в печени и скелете [1]. Для описания поведения и метаболизма плутония в организме созданы специальные биокинетические модели, на ко-

торых основываются расчеты поглощенных в различных органах доз внутреннего альфа-облучения [2–5].

Плутоний-239 входит в число наиболее радиотоксичных элементов, так как обладает длительным периодом полураспада и полувыведения, поэтому даже после однократного поступления радионуклида облучение продолжается на протяжении всей жизни человека. Вследствие неравномерного распределения плутония в организме максимальные дозы альфа-облучения приходятся на органы основного депонирования радионуклида (легкие, печень, скелет), что увеличивает риск возникновения злокачественных новообразований [6, 7]. Известна способность ионизирующего излучения вызывать повреждения хромосомного аппарата клеток, что может приводить к нарушению

¹ Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озерск. E-mail: clinic@subi.su

² Центральная медико-санитарная часть №71 ФМБА России. Озерск

¹ Southern Urals Biophysics Institute of FMBA, Ozyorsk, Russia. E-mail: clinic@subi.su

² Central Medical Sanitary Department No. 71 of FMBA, Ozyorsk, Russia/

различных регуляторных механизмов, инициации и стимуляции канцерогенеза [8–10].

Для предотвращения или минимизации неблагоприятных эффектов на здоровье в случае поступления в организм плутония и америция используются хелатообразователи — комплексные соли кальция или цинка и диэтиленetriаминпентауксусной кислоты, которые захватывают плутоний, вытесняя его из связи с белками плазмы крови и межклеточной жидкости, и способствуют выведению радионуклида [11]. Для этих целей наиболее широкое применение нашел пентацин (кальций тринатриевая соль диэтиленetriаминпентауксусной кислоты). Раннее начало хелатотерапии (в течение первых двух часов) после поступления радионуклидов в организм является важнейшим условием ее эффективности, т.к. в первые часы—сутки происходит наиболее интенсивный переход плутония из места первичного отложения в кровь [12].

В настоящей статье рассмотрен случай поступления ^{239}Pu в организм работника в результате инцидента, произошедшего при выполнении ремонтных работ.

При проведении сварочных работ на одной из производственных установок предприятия произошла разгерметизация оборудования (срыв заглушки трубы с выбросом радиоактивных веществ в воздух ремонтной зоны). Выполнявший эти работы слесарь-ремонтник, мужчина в возрасте 45 лет, имевший стаж работы по специальности 24 года, получил ушибленную рану в области второй фаланги второго пальца правой кисти, а также ушиб передней брюшной стенки с повреждением кожных покровов в виде ссадины, внутрикожной и подкожной гематомы. Работник использовал штатные средства индивидуальной защиты, однако с правой руки была сорвана перчатка, в результате чего произошло загрязнение кожных покровов, включая раневые поверхности, альфа-активными радионуклидами. Нарушения целостности пневмомаски и комбинезона при осмотре не было обнаружено.

Плотность загрязнения места повреждения кожи второго пальца правой кисти альфа-излучающими радионуклидами составила до 2900 частиц/см²×мин, места повреждения на передней брюшной стенке до 2500 частиц/см²×мин, других участков кожи — от 20 до 160 частиц/см²×мин. На предприятии была выполнена дезактивация кожных покровов, затем фельдшером здравпункта оказана работнику первая медицинская помощь и введено внутривенно 15 мл 5 %-го раствора пентацина.

Спустя 1 ч 40 мин с момента получения травмы работник был доставлен в приемное отделение Центра профессиональной радиационной патологии Центральной медико-санитарной части № 71 ФМБА России. При осмотре работника в приемном отделении его состояние оценено как удовлетворительное. В лаборатории дозиметрии внутреннего облучения Южно-Уральского института биофизики (ЮУрИБФ) выполнено инструментальное измерение содержания актинидов в местах повреждения кожных покровов работника. Было определено, что содержание ^{239}Pu в

месте повреждения кожи второго пальца правой руки составляет 2000 кБк, а в месте повреждения кожи живота — 40 кБк. На основании этих данных оценена ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения, формируемая за 50 лет (ОЭД₅₀), исходя из предположения о переходе всего зарегистрированного количества ^{239}Pu из места первоначальной локализации в жидкости организма с последующим накоплением в основных органах депонирования. Оценки ОЭД₅₀ составили: от поступления радионуклида через поврежденную кожу пальца — 54 Зв и от поступления через поврежденную кожу живота — 1 Зв.

Принимая во внимание высокие уровни содержания ^{239}Pu в местах повреждения кожных покровов и дозовую нагрузку, потенциально формируемую за счет их последующего перераспределения в тканях и органах, было выполнено иссечение мягких тканей второго пальца правой кисти на расстоянии 5 мм от краев раны, загрязненной радионуклидами. Однако это не привело к существенному снижению активности в области раны. Решение о повторной радикальной операции было отложено до получения результатов определения суточной экскреции ^{239}Pu с мочой и уточнения прогноза в отношении ОЭД₅₀, т.к. для устранения радиоактивного загрязнения хирургическим путем требовалось обширное иссечение тканей пальца, что привело бы к нарушению его функции в дальнейшем, либо ампутация.

На следующий день после инцидента по решению консилиума врачей и с согласия работника проведена повторная операция, включавшая широкое иссечение мягких тканей основной фаланги второго пальца правой кисти, а также широкое иссечение ссадины передней брюшной стенки. Контрольные измерения показали, что щадящее хирургическое вмешательство не позволило устранить радиоактивное загрязнение, в связи с чем была выполнена ампутация второго пальца правой кисти на уровне пястно-фалангового сустава. Зарегистрированное в иссеченных и ампутированных тканях содержание радионуклида подтвердило первоначальные оценки содержания ^{239}Pu и прогноз в отношении ОЭД₅₀, а также показало высокую эффективность радикального вмешательства, которое предотвратило возможный переход радионуклида в органы основного депонирования.

Через 5 дней после инцидента на основании определения содержания ^{239}Pu в суточных порциях мочи, собранных за первые и вторые сутки после инцидента, было определено, что медицинские мероприятия (хирургическая дезактивация и ампутация) позволили многократно снизить прогнозируемую величину ОЭД₅₀, обусловленную поступлением радионуклидов через поврежденные кожные покровы. Первичная оценка ОЭД₅₀ была выполнена с допущением, что вся зарегистрированная в суточных количествах мочи активность была обусловлена переходом радионуклида из мест первоначального отложения в жидкости организма. При указанном допущении и учете действия пен-

татаина, стимулирующего экскрецию ^{239}Pu , первичная оценка ОЭД_{50} составила 44 мЗв.

С момента поступления работника в ЦМСЧ № 71 ФМБА России ему проводился длительный курс хелатотерапии, который включал внутривенные инъекции 5 %-го раствора пентацина в количестве 5 мл 2 раза в сутки в первые 7 дней, затем 1 раз в сутки на протяжении 35 дней, а в период от 1,5 до 4 мес после инцидента введение препарата осуществлялось 2 раза в неделю. В ранние сроки после травмы выполнялась обработка участков кожи, загрязненных альфа-активными радионуклидами, и наложение повязок с 5 %-ым раствором пентацина на раневые поверхности, а также ингаляции препарата 1 раз в сутки на протяжении 16 дней, поскольку по результатам дозиметрического обследования путем анализа скорости экскреции ^{239}Pu с мочой и калом было установлено, что имело место также поступление ^{239}Pu и через органы дыхания. На рис. 1 представлены оценки ОЭД_{50} , полученные в различные сроки после инцидента, лечебные мероприятия и динамика хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови работника.

В лаборатории дозиметрии внутреннего облучения ЮУрИБФ в течение первого месяца после инцидента было выполнено измерение содержания изотопов ^{239}Pu и ^{241}Am радиометрическим и спектрометрическим методами в 29 суточных порциях мочи и 9 суточных порциях кала, собранных у работника на фоне хелатотерапии. Результаты этих измерений в динамике свидетельствовали о том, что альфа-активные радионуклиды поступили в организм тремя путями: через поврежденные кожные покровы, органы дыхания и пищеварения. Основным дозообразующим радионуклидом явился ^{239}Pu , на долю которого пришлось 97 % активности. ОЭД_{50} была уточнена через 30 дней после инцидента с учетом всех путей поступления радионуклидов и действия пентацина и составила 110 мЗв.

Лечение и обследование работника в условиях стационара ЦМСЧ № 71 ФМБА России осуществлялось на протяжении 61 дня с момента получения травмы, затем курс хелатотерапии был продолжен амбулаторно.

В период обследования работника в ЦМСЧ № 71 ФМБА России был выполнен цитогенетический анализ частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови в различные сроки (4 сут, 7 сут, 1 мес) после поступления радионуклидов в организм. Цитогенетическое исследование проводилось рутинным методом. Лимфоциты периферической крови культивировали 48 ч согласно утвержденному протоколу [13], хромосомные препараты окрашивали по Романовскому–Гимза и анализировали в проходящем свете с помощью лабораторного микроскопа Axiostar plus (Carl Zeiss, Германия). Анализ хромосомных aberrаций проводился в метафазных разбросах, соответствующих следующим критериям: хороший разброс и четкая окраска всех хромосом, общее число хромосом в клетке при визуальном исследовании 46, отсутствие случайных хромосом в поле зрения, допускалось только поперечное наложение длинных плеч хромосом. Хромосомы идентифицированы по группам в соответствии с Денверской системой [14]. Для каждого срока после инцидента было проанализировано по 100 метафазных разбросов. Регистрировали все типы aberrаций: хромосомные (стабильные и нестабильные) и хроматидные. Частоту aberrаций оценивали на 100 метафазных клеток.

В результате цитогенетического исследования на четвертые сутки после поступления альфа-активных радионуклидов в организм работника было обнаружено повышение частоты хромосомных aberrаций как стабильных (5 на 100 клеток), так и нестабильных (5 на 100 клеток), а также выявлены хроматидные aberrации (2 на 100 клеток). Среди хромосомных aberrаций

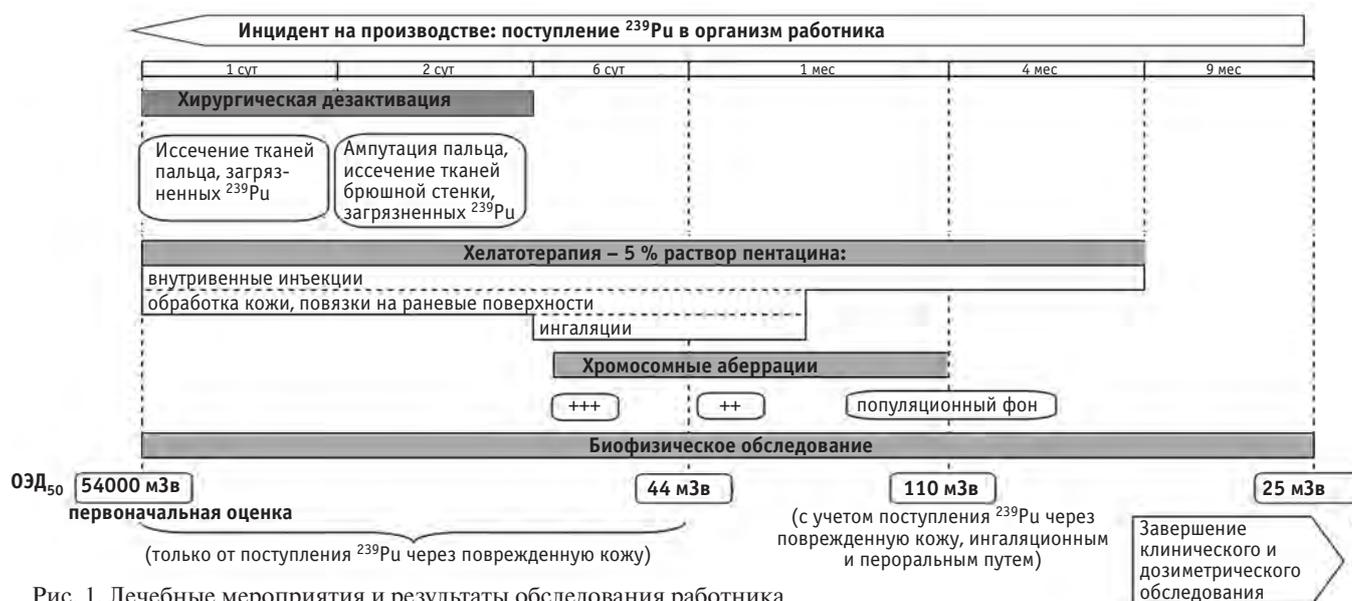


Рис. 1. Лечебные мероприятия и результаты обследования работника

ций выявлены концевые делеции, перичентрические инверсии, дицентрики и фрагменты.

На седьмые сутки частота стабильных хромосомных aberrаций снизилась до 3 на 100 клеток, а нестабильных — до 4 на 100 клеток, частота хроматидных aberrаций оставалась прежней — 2 на 100 клеток. Различия в частоте хромосомных aberrаций в разные сроки не являлись статистически значимыми. Через месяц после инцидента на фоне проводимого лечения частота хромосомных aberrаций приблизилась к популяционному фону: стабильные и хроматидные aberrации не были выявлены, частота нестабильных aberrаций составила 1 на 100 проанализированных клеток.

Дозиметрическое обследование было завершено через 9 мес после инцидента. На этот момент содержание актинидов в местах повреждений кожных покровов, полученных в результате инцидента, не превышало минимальной детектируемой активности применяемых методов измерения. Заключительная оценка ОЭД₅₀ внутреннего облучения, выполненная на основании данных о естественной экскреции актинидов, составила 25±11 мЗв.

Углубленное клиническое обследование, выполненное в ЦМСЧ № 71 ФМБА России, не выявило существенных отклонений со стороны различных органов и систем организма, однако в связи с полученной на производстве травмой работнику было определено 20 % утраты профессиональной трудоспособности. Врачебной комиссией ЦМСЧ № 71 ФМБА России по экспертизе профпригодности на основании Приказа Минздравсоцразвития России от 12.04.2011 № 302н было сделано заключение о возможности продолжения работы в контакте с источниками ионизирующего излучения при условии соблюдения пределов доз облучения, установленных НРБ-99/2009 [15, 16].

Таким образом, своевременно оказанная специализированная медицинская помощь, включая хирургическую дезактивацию и курс хелатотерапии, позволила избежать значимого перехода ²³⁹Pu из мест первичного отложения в организм работника и многократно снизить дозу внутреннего альфа-облучения, в результате был минимизирован риск радиогенных эффектов на здоровье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плутоний. Радиационная безопасность. Ред. Л.А. Ильин. — М: Издат. 2005. 416 с.
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. // Annals of the ICRP. — Oxford: Pergamon Press. 1994. Vol. 24. № 1–3. 482 pp.
3. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Limits on intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30. Part 1. // Annals of the ICRP. — Oxford: Pergamon Press. 1979. Vol. 2. № 3/4. 84 pp.

4. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Part 2. // Annals of the ICRP. — Oxford: Pergamon Press. 1993. Vol. 23. № 3/4. 450 pp.
5. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Development of a biokinetic model for radionuclide-contaminated wounds and procedures for their assessment. dosimetry and treatment. NCRP Report № 156. — Bethesda. Maryland: NCRP. 2007. 411 pp.
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Summary of Radiation Effects. — New York. 2010.
7. Sokolnikov M.E., Gilbert E.S., Preston D.L. et al. Lung, liver and bone cancer mortality in Mayak workers // Int. J. Cancer. 2008. Vol. 123. № 4. P. 905–911.
8. International Atomic Energy Agency (IAEA). Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. — Vienna: IAEA. 2011. 247 pp.
9. Сотник Н.В., Азизова Т.В., Осовец С.В. Структурные повреждения генома у работников плутониевого производства // Радиационная биология. Радиозэкология. 2011. Т. 51. № 2. С. 1–5.
10. Johansson M., Jin Y., Mandahl N. et al. Cytogenetic analysis of short-term cultured squamous cell carcinomas of the lung // Cancer Genetics and Cytogenetics. 1995. № 81. P. 46–55.
11. Durbin P.W., Kullgren B., Xu J., Raymond K.N. Development of decorporation agents for the actinides // Radiat. Protect. Dosim. 1998. Vol. 79. P. 433–443.
12. Lloyd R.D., Boseman J.J., Taylor G.N. et al. Decorporation from beagles of a mixture of monomeric and particulate plutonium using Ca-DTPA and Zn-DTPA: dependence upon frequency of administration // Health Phys. 1978. Vol. 35. P. 217–227.
13. Sotnik N.V., Osovets S.V., Scherthan H. et al. mFISH analysis of chromosome aberrations in workers occupationally exposed to mixed radiation // Rad. Environ. Biophys., 2014. Vol. 53. № 2. P. 347–354.
14. A proposed standard system of nomenclature of human mitotic chromosomes // Lancet. 1960. № 7133. P. 1063–1065.
15. Приказ Минздравсоцразвития России от 12.04.2011 № 302н (ред. от 15.05.2013) «Об утверждении перечней вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), и порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров (обследований) работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда». Минюст РФ. 2011. № 22111.
16. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09.

Поступила: 12.10.2015

Принята к публикации: 12.02.2016

В статье Н.А. Метляевой, О.В. Щербатых «Особенности социальной адаптации участников, пострадавших в результате аварии на атомных подводных лодках К-19 и К-27, по данным психофизиологического обследования», опубликованной в журнале «Медицинская радиология и радиационная безопасность» № 1 за 2016 г., на С. 31 допущена опечатка: инициалы Ф.М.С. следует читать как Ф.А.М.