

Ю.Е. Квачева

«ГОРЯЧИЕ» ЧАСТИЦЫ В ЛЕГКИХ УЧАСТНИКОВ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС И ЖИТЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Yu.E. Kvacheva

Chernobyl Hot Particles in Lungs of the Participants of the Post-Accident Clean-up Operation and Residents of the Contaminated Regions

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

Цель: Изучить морфологическую специфику распределения «горячих» частиц (ГЧ) в легких участников ликвидации последствий аварии (ЛПА) на Чернобыльской АЭС и жителей загрязненных территорий.

Материал и методы: Разработана методика поиска и оценки содержания ГЧ в легких человека, с помощью которой исследованы материалы аутопсий участников ЛПА 1986–1988 гг., умерших в течение трех поставарийных лет (12); жителей загрязненных территорий, скончавшихся от случайных причин в 1989–1992 гг. (170); непосредственных свидетелей аварии (27), погибших от острой лучевой болезни (ОЛБ).

Результаты и заключение: Наличие ГЧ в легких обнаруживалось в подавляющем большинстве случаев (24/27; 88 %), составивших группу непосредственных свидетелей аварии, погибших от ОЛБ. По типу излучателей регистрируемые при световой микроскопии гисторадиоавтографов ГЧ были представлены смешанными (альфа-/бета-излучающими) и чистыми (бета-излучающими) ГЧ и визуализировались в легочных макрофагах (интрацеллюлярно), располагавшихся преимущественно в просветах бронхиол и альвеол, а также на поверхности межальвеолярных перегородок (интралюминальная локализация). Из 12 участников ЛПА ГЧ были обнаружены у одного (1/12; 8,3 %), умершего в 1990 г. от рака легких. Морфологическая специфика их распределения была аналогичной представленной выше (интрацеллюлярная + интралюминальная локализация ГЧ). Из 170 жителей загрязненных районов Белоруссии и Украины, умерших в 1989–1992 гг. от случайных причин (острая алкогольная интоксикация, транспортная травма, суицид и др.), ГЧ были обнаружены в легких 3 человек (3/170; 1,8 %). Зарегистрированные в этих наблюдениях ГЧ были немногочисленными и, в отличие от упомянутых выше наблюдений первых двух групп, визуализировались в макрофагах, располагавшихся не в просветах альвеол, а в фиброзной ткани по ходу сосудов и бронхов (интрамуральная локализация). При этом во всех трех случаях имела место фоновая патология органов системы дыхания, что свидетельствовало о функциональной недостаточности (дефицитности) механизмов самоочищения легких.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, «горячие» частицы, легкие человека, ингаляционный путь поступления, аутопсия

Purpose: To investigate the morphological specificity of hot particles (HP) retention in the lungs of participants of liquidation of the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant and residents of the contaminated territories.

Material and methods: The lungs obtained after the standard manner were examined in total using an elaborated technique based on auto- and histoautoradiography of autopsy materials. Three distinct groups of patients were studied: 12 persons who participated in post-accident clean-up operation (1986–1988) and died 3 years later after the accident; 170 residents of the contaminated regions, who died from casual causes in 1989–1992; and the immediate witnesses of the accident (27) who dying from the acute radiation sickness (ARS).

Results and conclusion: Chernobyl HP were observed in most of patients (24/27; 88 %) died of ARS. These particles presented as mixed alpha-/beta- and pure beta-emitters were seen in pulmonary macrophages (i.e. intracellularly), located predominantly in the bronchioles and alveoli, as well as on the surfaces of alveolar septa (intraluminal localization). Only one of 12 participants of the post-accident clean-up operation had HP in his lungs (1/12; 8.3 %). Morphological specificity of HP retention was similar to the mentioned above (intracellular + intraluminal localization). Three out of 170 (3/170; 1.8 %) residents of the Ukrainian and Belorussian regions contaminated by radionuclides, died in 1989–1992 from accidental causes (acute alcohol intoxication, transport injury, suicide, etc.), were shown to have HP. These particles were few in number and, unlike the above presented groups, were visualized in macrophages, located in fibrous tissue along the vessels and bronchi (intramural localization). In addition, all three cases were found to be accompanied by lung pathology indicative of pulmonary self-clearance deficiency.

Key words: Chernobyl NPP disaster, hot particles, human lungs, inhalation retention, autopsy

Введение

Под термином «горячие» частицы (ГЧ) понимают радиоактивные аэрозоли с относительно высокой удельной активностью. При аварии на Чернобыльской АЭС они образовались в результате теплового взрыва четвертого энергоблока и выброса в атмосферу значительного количества диспергированного реакторного топлива. Сообщалось о том,

что воздействию аэрозоля чернобыльских ГЧ подверглись не менее 65 % из 1500 работников станции, ставших непосредственными свидетелями аварии 26 апреля 1986 г. [1].

Хотя зарождение проблемы ГЧ относится к середине 1950-х гг., до настоящего времени все занимающиеся этим вопросом исследователи существенно расходятся в оценке степени их опасности для чело-

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: fmbs-fmba@bk.ru.

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: fmbs-fmba@bk.ru.

века. В отношении ингалированных ГЧ существуют две крайние точки зрения — от полного отрицания какой-либо патологической значимости ввиду того, что они «практически не попадают в органы дыхания» [2], до явного преувеличения потенциальных биологических эффектов. В последнем случае, исходя чаще всего из теоретических расчетов, полагают, что в непосредственной близости от такой частицы величина дозовой нагрузки может быть настолько высока, что все клетки из ближайшего микроокружения погибнут [3]. Это повлечет за собой грубую деструкцию, или буквально «выжигание», участков легочной ткани в радиусе действия ГЧ, тогда как клеточные элементы легких, отстоящие от ГЧ, полагаются обреченными неопластической трансформации [4, 5]. На эти вопросы нет однозначного ответа и в Публикациях МКРЗ, посвященных биологическим эффектам ингалированных радионуклидов [6].

Из вышесказанного следует, что до настоящего времени остается не вполне ясным, задерживаются ли ГЧ в легких людей и, если да, насколько продолжительно их пребывание, а также какова морфологическая специфика их распределения и взаиморасположения с тканевыми и клеточными компонентами воздухоносных и респираторных отделов органа дыхания человека. Это и стало предметом настоящего исследования.

Материал и методы

Существующие в настоящее время методики поиска ГЧ в легких основаны главным образом на радиометрических и радиохимических исследованиях, что исключает возможность изучения их распределения и взаиморасположения с гистоструктурами органа и не позволяет оценивать микрораспределение дозовых нагрузок и возможные биологические эффекты, связанные с ними [7]. Именно этими обстоятельствами была продиктована необходимость создания собственной методики, разработанной в лаборатории патологической морфологии радиационных поражений ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. При этом исходили из следующих основных моментов.

Во-первых, принимали во внимание, что число ГЧ в легких людей при отсутствии фоновой патологии органов дыхания и наличии эффективной функции самоочищения будет невелико, что объективным образом может затруднять их поиск и идентификацию. Во-вторых, исходили из факта, что точная топография распределения ГЧ в легких остается неизвестной. Экстраполяция результатов эксперимента с лабораторных животных на человека существенным образом затруднена в силу принципиальных гистоморфологических различий [8, 9]. В то же время,

предпринятые ранее клинко-анатомические исследования связаны с изучением отдельных фрагментов легких, отбираемых, как правило, из нижних долей [10]. Однако общепризнанное положение о наибольшей вентиляции нижних (базальных) отделов органа дыхания, и, как следствие, преимущественного поступления в них горячих частиц, отнюдь не исключает возможности попадания последних в среднюю и верхние доли. В этой связи представлялось целесообразным исследовать отбираемые при аутопсии легкие тотально. Наконец, в-третьих, неотъемлемым требованием к разрабатываемой методике явилось обязательное обеспечение сохранности секционного материала для гистологической оценки.

Для стандартизации исследований был утвержден специальный регламент, согласно которому легочный комплекс отбирали целиком. Фиксацию осуществляли в 10 %-м растворе нейтрального формалина. При наличии отека или резкого полнокровия органа производили поверхностные надрезы в параллельных плоскостях для лучшего пропитывания фиксирующей жидкостью. Каждый случай сопровождали унифицированной формой документального сопровождения с указанием паспортных данных, места проживания, места работы и характера выполняемых рабочих операций в момент аварии и после нее, сведений об участии в ликвидации последствий аварии (ЛПА), клинического и патолого-анатомического диагнозов.

Методика поиска и идентификации ГЧ предусматривала следующие этапы исследования.

Этап 1. Доли легкого после фиксации в формалине по вертикальной оси разрезали на пластины (анатомические макросрезы) толщиной не более 10 мм, которые маркировали и герметично запаивали в полиэтиленовую пленку со стандартной толщиной (0,5 мм). Данная процедура предотвращала высыхание легочной ткани и хорошо сохраняла ее для дальнейшей проводки.

Этап 2. Для отбора легочных макросрезов, содержащих радиоактивность, их помещали между двумя листами радиографической медицинской пленки (РМ-1, «Тасма») или фотопластинами для ядерных исследований, обеспечивая плотный контакт между поверхностями пленки (фотопластин) и исследуемых объектов, исключая воздушные зазоры, но избегая излишне плотного давления. Продолжительность экспонирования составляла 30 сут. Выполнение данного этапа позволяло автордиографически выявить радиоактивность и определить характер ее распределения (диффузный или локальный).

Этап 3. Участки (локусы) макросрезов легких, содержащие радиоактивность, вырезали в виде кусочков объемом 1,5–2,0 см³ и обрабатывали ги-

стологически с помощью общепринятых методик (обезжизнение, заливка в парафин-целлоидин или парафин). Из целого образца изготавливали серийные микросрезы толщиной 4–5 мкм (в среднем их количество составляло около 2000) и наклеивали на предметные стекла, далее помещаемые на пленку РМ-1, или непосредственно на ядерные пластинки со стороны эмульсии. По результатам экспонирования, продолжительность которого на данном этапе исследования составляла 15 сут, отбирали уже микросрезы, содержащие радиоактивность. Для контроля вновь полученные гистологические препараты экспонировали одновременно с таковыми, заведомо содержащими ГЧ (архивные материалы лаборатории).

Этап 4. Из отобранных гистологических срезов после удаления парафина изготавливали гисторadioавтографы с использованием фотоэмульсий, продолжительность экспонирования с которыми составляла в каждом отдельном случае не менее 15 сут. Гисторadioавтографы, в которых обнаруживалось содержание ГЧ, окрашивали гематоксилином и эозином, либо с помощью любой другой необходимой гистологической методики. Для патогистологической оценки состояния легких из каждого исследуемого образца отбирали по 2–3 среза.

Таким образом был исследован аутопсийный материал от 12 участников ликвидации последствий аварии (ЛПА) 1986–1988 гг., умерших в течение трех поставарийных лет, а также 50 жителей Украины и 120 жителей Белоруссии, проживавших на загрязненных территориях и скончавшихся в 1989–1992 гг. от случайных причин. Кроме того, в исследование были включен аутопсийный материал (части легких) от 27 человек, погибших в первые недели (2–14-я) после аварии на Чернобыльской АЭС от острой лучевой болезни, обусловленной неконтролируемым относительно равномерным внешним гамма- и бета-облучением в диапазоне доз от 3,7 до 13,7 Гр.

Результаты и обсуждение

Наличие ГЧ в легких обнаруживалось в подавляющем большинстве случаев, составивших группу непосредственных свидетелей аварии, скончавшихся от острой лучевой болезни (24/27; 88 %). Максимальное содержание ГЧ определяли в образцах легочной ткани, отобранных из нижних долей легких, из прикорневых и центральных их отделов, что соответствует нормальному регионарному распределению дыхательного объема.

По типу излучателей регистрируемые в гисторadioавтографах ГЧ были представлены двумя вариантами: смешанные альфа-/бета-излучающие ГЧ и чистые бета-излучающие ГЧ, при явном преоб-

ладании первых (рис. 1). Специального изучения радионуклидного состава не проводили, он хорошо известен из литературы. Повторные гисторadioграфические исследования одного и того же материала, проведенные с периодичностью раз в два года (1986, 1988, 1990 и 1992 гг.) подтвердили известные из литературы данные: в гисторadioавтографах 1990 и 1992 гг. содержание бета-излучателей было заметно снижено, и ГЧ в итоге оказывались представленными преимущественно альфа-излучателями. При этом еще можно было встретить единичные чистые бета-излучающие ГЧ, состоящие, скорее всего, из ^{90}Sr или ^{106}Ru .

Все обнаруживаемые при световой микроскопии гисторadioавтографов ГЧ визуализировались в альвеолярных макрофагах (т.е. интрацеллюлярно), располагавшихся среди клеточных элементов того же типа, свободных от ГЧ, в просветах бронхиол и альвеол, а также на поверхности межальвеолярных перегородок (интралюминальная, или внутрипросветная локализация). Лишь малая часть альвеолярных фагоцитов, «нагруженных» ГЧ, определялась в толще последних.

Это обстоятельство, на наш взгляд, заслуживает особого внимания. С одной стороны, подобная морфологическая картина (интрацеллюлярная + интралюминальная локализация ГЧ) является документальным подтверждением элиминации радиоактивности из легких фагоцитами-носителями, входящими в состав мокроты (функция мукоцилиарного клиренса). С другой стороны, данный факт свидетельствует о перемещении радиоактивности макрофагами по тканевым структурам дыхательной системы человека и, следовательно, о реализации дозовых нагрузок не только в пределах отдельных микролюков, как это принято считать, а в существенно боль-

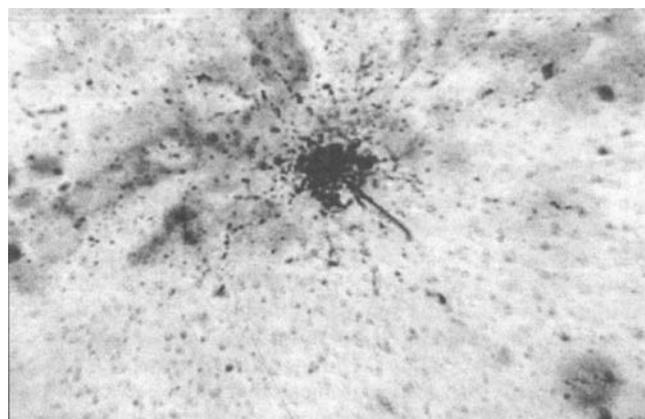


Рис. 1. «Горячая» частица в легком свидетеля аварии на ЧАЭС, погибшего от ОЛБ на 23-е сут. Гисторadioавтограф. Окраска – гематоксилин-эозин. X280

шем объеме воздухопроводящих и газообменивающих областей легких.

Путем измерения геометрического диаметра пылевых ГЦ, содержащихся в цитоплазме 10 макрофагов из 10 различных образцов легочной ткани изученных случаев, было показано, что размеры обнаруживаемых ГЧ укладывались в пределы от 0,2 до 1 мкм.

В зависимости от местонахождения в момент аварии и ближайшие часы после нее все 27 погибших были подразделены на две подгруппы:

1) 18 человек (главным образом, персонал АЭС по обслуживанию реактора и турбин), работавшие в помещениях четвертого энергоблока на расстоянии от эпицентра взрыва до 50 м, до 100 м и до 200 м;

2) 9 человек (пожарные, вахтеры, рабочий железной дороги), работавшие вне помещений АЭС на расстоянии от эпицентра взрыва до 100 м, до 200 м и свыше 200 м. Минимальное расстояние составило 35 м (подгруппа 1), максимальное – 1000 м (подгруппа 2).

В легких непосредственных свидетелей аварии, составивших первую подгруппу, число ГЧ было наибольшим. При этом в каждом отдельном случае оно определялось, очевидно, не столько расстоянием от эпицентра аварии и продолжительностью поставарийного пребывания на станции, сколько местом нахождения пострадавшего в момент аварии. Так, в легких двоих пострадавших, в момент аварии находившихся на одинаковом расстоянии (35–50 м) и работавших в течение приблизительно равного интервала времени (30–40 мин), однако в разных помещениях АЭС – в помещении для операторов и в помещении для электриков, – число обнаруженных ГЧ оказалось различным. В первом случае в одном гистологическом срезе легкого площадью около 2 см² было зафиксировано более двух десятков (23) ГЧ; в другом – 1 ГЧ в одном из сотен таких же срезов.

Такая высокая вариабельность ретенции ГЧ в легких связана, по-видимому, с неравномерностью распространения аэрозольного облака по рабочим помещениям АЭС, и была характерна только для группы ликвидаторов-профессионалов, работавших на станции в первые часы после аварии.

Количество ГЧ в легких лиц, составивших вторую подгруппу, было многократно меньшим; в ряде случаев (3 чел.) они не были обнаружены вовсе.

Следует отметить, что даже в случаях с максимальным насыщением легких ГЧ, число их в одном альвеолярном фагоците не превышало единицы, поэтому величина активности в одном макрофаге, скорее всего, соответствовала активности одной горячей частицы. Принимая во внимание, что активность альфа-излучающих радионуклидов ГЧ, измеренная

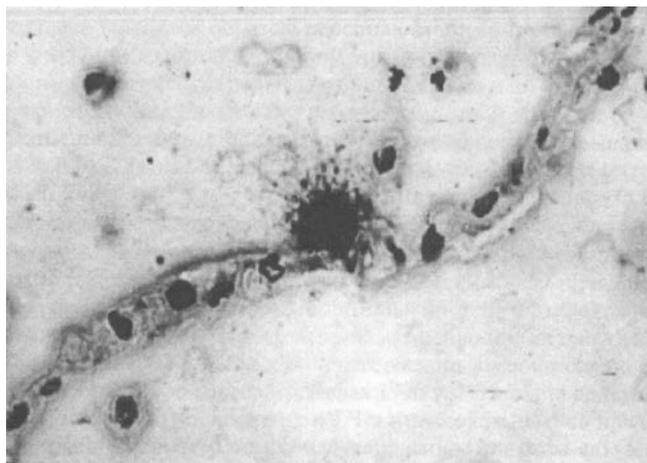


Рис. 2. «Горячая» частица в легком участника ликвидации последствий аварии на ЧАЭС 1986 г., умершего в 1992 г. Гисторадиоавтограф. Окраска – гематоксилин-эозин. X280

в помощью диэлектрических трековых детекторов, была в пределах от 5×10^{-6} до 8×10^{-5} Бк, и исходя из соотношения содержания альфа- и бета-излучателей в реакторном топливе АЭС (1:1000), можно заключить, что суммарная «усредненная» активность ГЧ составляла порядка 10^{-3} Бк [1].

Из 12 участников ликвидации последствий аварии ГЧ были обнаружены у одного (1/12; 8,3 %), работавшего шофером на поливочной машине (в 1986 г.) и умершего в 1990 г. от рака легких согласно записям в медицинских документах.

В данном аутопсийном наблюдении ГЧ были выявлены в двух гистологических срезах. Как и в легких непосредственных свидетелей аварии, обнаруженные ГЧ визуализировались в цитоплазме макрофагов (3 чел.), т.е. интрацеллюлярно, и, если принять, что в каждом фагоците-носителе число ГЧ не превышает единицы, то общее число обнаруженных ГЧ составило не более трех. В одном срезе альвеолярный фагоцит, содержащий ГЧ, располагался на поверхности межальвеолярной перегородки (интраалюминальная локализация, рис. 2), что, как указано выше, было расценено как морфологическое свидетельство перемещения и элиминации ГЧ из легких. Еще два макрофага, «нагруженных» ГЧ, были выявлены среди клеточных элементов воспалительного экссудата в бронхиальном дереве, поскольку помимо патоморфологических признаков основного заболевания, в данном случае наблюдались также выраженные явления хронического катарального и катарально-гнояного бронхита.

Из 170 жителей загрязненных районов Белоруссии и Украины, умерших в 1989–1992 гг. от случайных причин (острая алкогольная интоксикация, транспортная травма, суицид и др.), ГЧ были

обнаружены в легких 3 человек (3/170; 1,8 %), проживавших в Хойникском и Ветковском районах Гомельской области Белоруссии. Один из жителей Хойникского района являлся участником ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в 1986 г. Следует подчеркнуть, что во всех трех случаях обнаружения ГЧ в легких резидентов загрязненных территорий имела место фоновая патология органов системы дыхания в виде фиброзирующего альвеолита, туберкулеза легких и катарально-гнойного деформирующего бронхита, что свидетельствовало о той или иной степени функциональной недостаточности (дефицитарности) механизмов самоочищения легких.

Важно также отметить, что обнаруженные в этих наблюдениях ГЧ были немногочисленными (не более 2–3 на случай). При этом, в отличие от упомянутых выше наблюдений первых двух групп, ГЧ визуализировались в макрофагах, располагавшихся не в просветах альвеол, а в соединительной (фиброзной) ткани по ходу сосудов и бронхов (интрамуральная локализация).

Полученные данные, по-видимому, не следует рассматривать как показатель малой вероятности ингаляционного поступления ГЧ. Возможно, и число людей-носителей чернобыльских ГЧ, и количество самих частиц изначально (в первые месяцы после аварии на АЭС) были все-таки большими, однако по прошествии определенного времени последние подверглись активной элиминации.

Заключение

Таким образом, результаты исследований, проведенных с применением разработанной методики, показали, что чернобыльские ГЧ поступали в органы дыхания людей и в течение некоторого периода времени задерживались в ткани легких. Наиболее часто и в наибольшем количестве их обнаруживали в легких непосредственных свидетелей аварии; существенно реже и меньших количествах — в легких ликвидаторов ее последствий. Для жителей загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС территорий риск попадания ГЧ в легкие был много-

кратно ниже, подтверждением чего могут служить полученные в настоящем исследовании патоморфологические данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутьков В.А., Муравьев Ю.В., Арефьева З.С., Камарицкая О.И. Горячие частицы — взгляд спустя семь лет после аварии на Чернобыльской АЭС // Пульмонология. 1993. № 4. С. 10–19.
2. Иванов А.Е., Мудрецов Н.И., Куршакова Н.Н. Патологическая анатомия острой лучевой болезни. Практическое руководство для патологоанатомов и судебно-медицинских экспертов. — М.: Военное издательство. 1987. 145 с.
3. Charles M.W., Harrison J.D. Hot particle dosimetry and radiobiology — past and present // J. Radiol. Prot. 2007. V. 27. № 3A. P. A97–109.
4. Charles M.W., Mill A.J., Darley P.J. Carcinogenic risk of hot-particle exposures // J. Radiol. Prot. 2003. V. 23. № 1. P. 5–28.
5. Harrison J. Biokinetic and dosimetric modelling in the estimation of radiation risks from internal emitters // J. Radiol. Prot. 2009. V. 29. № 2A. P. A81–105.
6. ICRP PUBLICATION 71 Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients // Ann. ICRP. 1995.
7. Gerardi S. A comparative review of charged particle microbeam facilities // Radiat. Prot. Dosimetry. 2006. V. 122. № 1. P. 285–291.
8. Маленченко А.Ф., Голубенков А.М. Медико-биологические аспекты “горячих” частиц // Здравоохранение Белоруссии. 1990. № 6. С. 41–45.
9. Tyler W.S, Julian M.D. Gross and subgross anatomy of lungs, pleura, connective tissue septa, distal airways, and structural units // In: Comparative Biology of the Normal Lung. Vol. I (Parent RA, ed). — Boca Raton, FL: CRC Press, Inc. 1992. P. 37–48.
10. Harrison J.D., Stather J.W. The assessment of doses and effects from intakes of radioactive particles // J. Anat. 1996. V. 189. № 4. P. 521–530.

Поступила: 06.05.2016

Принята к публикации: 18.05.2016