

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ДОЗИМЕТРИИ ВETERANОВ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ОСОБОГО РИСКА

Е. И. Першина*, Ю. В. Суворова, В. А. Ратников, С. С. Москалева, В. П. Горелов, Е. А. Куус
Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л. Г. Соколова Федерального
медико-биологического агентства России, Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ. Природное (фоновое) ионизирующее излучение испытывают все жители Земли. Его воздействие компенсируется возможностями организма. Ионизирующее излучение ядерных технологий имеет техногенную природу. Для его компенсации требуется участие медицинских организаций, оказывающих помощь лицам, подвергшимся такому воздействию. Статья содержит данные медицинской литературы, авторские комментарии и оценки по теме применения методик цитогенетического исследования для анализа результатов воздействия ионизирующего излучения ядерных технологий (ВИИЯТ).

ЦЕЛЬ. Определить методы цитогенетической дозиметрии для оценки доз ионизирующего излучения ядерных технологий, полученных ветеранами подразделений особого риска, проходившими службу на атомных подводных лодках и испытательных полигонах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В качестве цитирования использовались портал «Научная электронная библиотека» eLIBRARY.RU и база данных медицинских и биологических публикаций PubMed. Для поиска русскоязычных источников применялись запросы: лимфоциты периферической крови; aberrации хромосом; биологическая дозиметрия; дицентрик; цитогенетическая дозиметрия. Поиск данных в базе PubMed осуществлялся по запросам Peripheral Blood Lymphocytes, Chromosome Aberrations, Biological Dosimetry, Dicentric, Cytogetic Dosimetry. Исследовались публикации за период 1947–2020 гг. Проанализировано 55 публикаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассмотрены методы проведения цитогенетической дозиметрии, применяемые в настоящее время. Определены методы, подходящие для организации цитогенетического обследования ветеранов подразделений особого риска. Определены границы применимости методов цитогенетической дозиметрии и принципы отбора лиц из состава рассматриваемого контингента для организации обследования.

ОБСУЖДЕНИЕ. Рассмотрены некоторые трудности при проведении цитогенетической дозиметрии и интерпретации ее результатов с учетом неочевидных факторов, таких как порог чувствительности применяемого метода и использование лучевой терапии при оказании медицинской помощи обследуемым лицам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Отмечена роль цитогенетической дозиметрии в восполнении зачастую отсутствующей информации о полученной физической дозе ВИИЯТ на лиц, профессионально причастных к ситуации. Отобран основной метод проведения цитогенетической дозиметрии для применения при оказании медицинской и социальной помощи ветеранам подразделений особого риска.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морская медицина, цитогенетическая дозиметрия, лимфоциты периферической крови, aberrации хромосом, дицентрики, биологическая дозиметрия

*Для корреспонденции: Першина Елена Игоревна, e-mail: pershina.ei@inbox.ru

*For correspondence: Elena I. Pershina, e-mail: pershina.ei@inbox.ru

Для цитирования: Першина Е.И., Суворова Ю.В., Ратников В.А., Москалева С.С., Горелов В.П., Куус Е.А. Организация проведения цитогенетической дозиметрии ветеранов подразделений особого риска // *Морская медицина*. 2025. Т. 11, № 2. С. 38–47, doi: <https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2025-11-2-38-47>; EDN: <https://eLibrary.ru/NKMSTE>

For citation: Pershina E.I., Suvorova Yu.V., Ratnikov V.A., Moskaleva S.S., Gorelov V.P., Kuus E.A. Organization of cytogenetic dosimetry for veterans of special risk units // *Marine Medicine*. 2025. Vol. 11, № 2. P. 38–47, doi: <https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2025-11-2-38-47>; EDN: <https://eLibrary.ru/NKMSTE>

© Авторы, 2025. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины» Федерального медико-биологического агентства. Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа» в соответствии с лицензией CCBY-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при указании автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>

ORGANIZATION OF CYTOGENETIC DOSIMETRY FOR VETERANS OF SPECIAL RISK UNITS

Elena I. Pershina, Yuliya V. Suvorova, Viacheslav A. Ratnikov, Svetlana S. Moskaleva, Victor P. Gorelov, Eva A. Kuus*

North-Western District Scientific and Clinical Center named after L.G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, St. Petersburg, Russia.

INTRODUCTION. Natural (background) ionizing radiation is experienced by all inhabitants of the Earth. Its impact is compensated by the body's capabilities. Ionizing radiation from nuclear technologies is of man-made nature. Its compensation requires the involvement of medical organizations that provide assistance to persons exposed to such effects. The article contains data of medical literature, author's comments and assessments on the topic of applying cytogenetic research techniques to analyze the results of exposure to ionizing radiation of nuclear technologies (IRNT).

OBJECTIVE. To determine the methods of cytogenetic dosimetry for assessment of nuclear ionizing radiation doses received by veterans of special risk units who served on nuclear submarines and test sites.

MATERIALS AND METHODS. The portal "Scientific Electronic Library" eLIBRARY.RU and the database of medical and biological publications PubMed were used as citations. The following queries were used to search Russian-language sources: peripheral blood lymphocytes; chromosome aberrations; biological dosimetry; dicentric; cytogenetic dosimetry. Data in the PubMed database were searched using the queries Peripheral Blood Lymphocytes, Chromosome Aberrations, Biological Dosimetry, Dicentrics, Cytogenetic Dosimetry. Publications from the period 1947-2020 were examined. 55 publications were analyzed.

RESULTS. The methods of cytogenetic dosimetry currently used are considered. The methods suitable for organization of cytogenetic examination of veterans of special risk units are determined. The limits of applicability of cytogenetic dosimetry methods and the principles of selecting persons from the contingent under consideration for organizing the examination are determined.

DISCUSSION. Some difficulties in performing cytogenetic dosimetry and interpreting its results are considered, taking into account non-obvious factors, such as the sensitivity threshold of the applied method and the use of radiation therapy when providing medical care to the subjects.

CONCLUSION. It is noted the role of cytogenetic dosimetry in replenishing the often missing information on the received physical dose of IRNT on the persons professionally involved in the situation. The main method of cytogenetic dosimetry was selected for use in providing medical and social assistance to veterans of special risk units.

KEYWORDS: marine medicine, cytogenetic dosimetry, peripheral blood lymphocytes, chromosome aberrations, dicentrics, biological dosimetry

Введение. Ионизирующее излучение – это электромагнитные волны, имеющие частоту, значительно превышающую область видимого спектра, или поток элементарных частиц, выбрасываемых при ядерных превращениях. Источниками такого излучения являются радиоактивные вещества, которые производят его в процессе своего распада, а также окружающий космос в процессе синтеза веществ и технические устройства, предназначенные для его получения. В результате взаимодействия ионизирующего излучения с веществом в нем образуются заряженные частицы (ионы). Степень ионизации вещества зависит от плотности излучения. Все живущие на нашей планете подвергаются постоянному воздействию природного ионизирующего излучения, которое чаще всего называют фоновым. Уровень фонового ионизирующего излучения зависит от рассматриваемой территории. Нормативный

показатель фонового ионизирующего излучения составляет от 0,05 до 0,2 мкЗв/ч. Когда ионизирующее излучение находится в допустимых пределах, возможности, заложенные в организме человека, позволяют устранить последствия такого воздействия. В результате интенсивного облучения в организме развиваются различные мутагенные изменения, злокачественные новообразования, наследственные заболевания и т. д.

Первыми, кто столкнулся с получением сверхнормативной дозы ионизирующего излучения, были военнослужащие подразделений особого риска (ПОР), принимавшие участие в испытаниях и учениях с применением ядерного оружия, военные моряки, проходившие службу на атомных подводных лодках, сборщики ядерных зарядов до введения автоматических линий сборки, участники операций по утилизации радиоактивных отходов и другие.

Ликвидаторы последствий аварии (ЛПА) на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) относятся к наиболее пострадавшей от радиации категории граждан. Масштабы аварии были столь велики, что в обществе начали более активно обсуждать вопросы оказания медицинской и социальной помощи пострадавшим от воздействия ионизирующего излучения ядерных технологий (ВИИЯТ).

Тема оказания медицинской помощи работникам и служащим, связанным с деятельностью в зоне риска ВИИЯТ, на сегодня остается актуальной для тех граждан страны, которые в настоящее время выполняют свои обязанности в сфере применения ядерных технологий. К таковым относятся действующие военнослужащие современных ПОР, работники медицинских учреждений, по роду своей деятельности подверженные ВИИЯТ, работники действующих АЭС, а также лица, оказавшиеся вблизи от места техногенной аварии случайно.

Рассматриваемая в статье тема представляет серьезный практический интерес для совершенствования процесса оказания медицинской помощи ветеранам ПОР. Дело в том, что в процессе выполнения ими своих обязанностей, возникали нештатные ситуации, приводящие к тому, что нынешние ветераны ПОР, а в то время – действующие военнослужащие – оказывались в зоне ВИИЯТ. При этом не всегда были под рукой дозиметрические приборы для фиксации полученных доз облучения. Иногда такие данные просто округлялись, а иногда и не фиксировались вовсе. Между тем эти данные нужны для подтверждения социального статуса ветеранов ПОР, но главное – для правильного диагностирования и адекватной организации лечебных и профилактических процедур в процессе оказания медицинской помощи [1].

Следует отметить, что решение об установлении причинной связи заболеваний с рассматриваемым фактором риска принимают межведомственные экспертные советы. На сегодняшний день главным учитываемым параметром для принятия решения является значение дозы облучения, зафиксированное физическими приборами или методом цитогенетической дозиметрии, в том числе – ретроспективной.

Цель. Определить методы цитогенетической дозиметрии для оценки доз ионизирующего излучения ядерных технологий, полученных ветеранами подразделений особого риска, прохо-

дивших службу на атомных подводных лодках и испытательных полигонах.

Материалы и методы. В качестве цитирования использовались портал Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU и база данных медицинских и биологических публикаций PubMed. Для поиска русскоязычных данных применялись запросы: лимфоциты периферической крови; aberrации хромосом; биологическая дозиметрия; дицентрики; цитогенетическая дозиметрия. Поиск данных в базе PubMed осуществляли по запросам: Peripheral Blood Lymphocytes; Chromosome Aberrations; Biological Dosimetry; Dicentrics; Cytogenetic Dosimetry. Исследовали публикации за период 1947–2020 гг. Всего было проанализировано 55 публикаций.

Результаты. По данным В. Ю. Нугиса [2], в периодически переиздаваемых международных рекомендациях МАГАТЭ по использованию анализа aberrаций хромосом в качестве способа биологической дозиметрии в связи с радиационными происшествиями большое внимание уделяется не только индикации дозы острого облучения в ближайшие сроки после воздействия, но и возможностям применения различных цитогенетических подходов для ретроспективной оценки полученных доз [2–4].

По своей потенциальной способности элиминировать или сохраняться с течением времени после облучения все виды aberrаций хромосом можно разделить на нестабильные (дицентрики и другие полицентрики, центрические и ацентрические кольца, парные ацентрические фрагменты, хроматидные aberrации) и на стабильные (реципрокные транслокации, или симметричные обмены; парацентрические и перичентрические инверсии; вставки, или инсерции).

Исторически для анализа хромосом первым был разработан метод дифференциального окрашивания хромосом, обычно с использованием красителя Гимза, обеспечивающий регистрацию в основном нестабильных aberrаций и лишь частично – стабильных aberrаций. Для более полного выявления стабильных aberrаций используют G-окрашивание хромосом и флуоресцентную гибридизацию *in situ* (fluorescent in situ hybridization или FISH).

При стандартном кариотипировании хромосом по группам выявляемость транслокаций в случае использования классического метода, по данным разных авторов, составляла не более 10 % [5] или 29 % [6] по сравнению

с геномной частотой FISH-регистрируемых транслокаций.

Относительно метода G-окраски хромосом следует сказать, что, хотя он в меру своего разрешения обеспечивает относительно полное (попарное) кариотипирование, однако весьма трудоемок и требует высококвалифицированного персонала. Поэтому в радиационной цитогенетике его используют достаточно редко, например, в работах некоторых авторов [7, 8]. В большинстве случаев FISH-метод считается наиболее предпочтительным для ретроспективной оценки дозы [9].

В исследовании А. В. Севаньяева и соавт. [10], проведенном через 10 лет после аварии на Чернобыльской АЭС, показано, что частота регистрируемых FISH-транслокаций соответствует первоначальной частоте дицентриков (в предположении их равновероятной индукции) только до дозы 2 Гр. Похожие данные были получены при обследовании лиц, пострадавших при аварии в Гойянии (Бразилия) в 1987 г., когда расхождение первоначальных частот дицентриков и частот транслокаций, идентифицируемых через 8 лет после облучения, началось с еще более низкой дозы – 1 Гр [11]. Таким образом, в своем первоначальном виде [12], когда оценка дозы производится по зависимости «доза – частота FISH-транслокаций» после облучения крови здоровых доноров *in vitro*, данный метод будет работать только до 1–2 Гр. На практике для большинства случаев ретроспективной оценки дозы этого вполне достаточно.

В настоящее время наиболее употребительным является «одноцветное» FISH-окрашивание, когда какие-либо три пары крупных хромосом окрашены одним флуоресцентным красителем [13–16]. Однако при таком варианте FISH-окрашивания не видны перестройки между этими тремя парами хромосом, тогда как учет дополнительного числа перестроек может повысить чувствительность метода в области низких доз.

Область, где биодозиметрия является особенно востребованной, связана с пациентами, подвергшимися чрезмерному радиационному воздействию в прошлом. К таковым относятся, в частности, вышеупомянутые ветераны ПОР, участвовавшие в создании ядерного щита нашей Родины, а также граждане, пострадавшие в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

По данным В. Ю. Нугиса и соавт. [17], непосредственно после аварии на Чернобыльской

АЭС индикация дозы по абберациям хромосом (дицентрикам) в культурах лимфоцитов периферической крови с помощью традиционного метода окраски была практически единственным доступным источником информации о дозах, полученных пострадавшими лицами.

Заметим, что в работе Е. К. Пяткина и соавт. [18] обследованию подверглись в основном пациенты, у которых была зафиксирована острая лучевая болезнь различной степени тяжести.

В ряде исследований цитогенетический анализ был использован и для определения малых величин доз радиационного поражения. Было отмечено, что у представителей различных групп ликвидаторов и жителей загрязненных территорий (среди которых рассматривались и взрослые, и дети) наблюдались абберации хромосом, превышающие фоновый уровень. Однако в ближайшие сроки после указанного события цитогенетическое исследование было произведено лишь для небольшой группы людей, которые могли быть подвергнуты ВИИЯТ [19–26].

Со временем потребность в биологической оценке степени ВИИЯТ стала проявляться для все больших объемов обследуемых лиц. Информация о наличии такого воздействия и величина дозы облучения потребовались для принятия решений межведомственных экспертных советов на предмет наличия причинной связи заболеваний, инвалидности и летальности лиц, оказавшихся в зоне ВИИЯТ.

Традиционный метод окрашивания хромосом для решения такой задачи не подходит, потому что частоты аббераций хромосом нестабильного типа, которые ранее были единственным видом маркеров радиационного воздействия, со временем опускаются ниже фонового уровня.

В настоящее время для ретроспективной оценки доз, полученных в прошлом, исследователи применяют FISH-методику окрашивания хромосом [27–30].

Такой подход осуществляется в соответствии с методическими рекомендациями МАГАТЭ [31].

Для выполнения цитогенетического исследования обоих типов требуется периферическая кровь обследуемых лиц. В данном случае в обследуемые группы входили ЛПА на ЧАЭС и жители загрязненных территорий. Для сравнения результатов применяли оба вида окрашивания хромосом.

Расчет оценки дозы ВИИЯТ производится по результатам применения FISH-окрашивания хромосом при условии, что имеется статистическая значимость отличий частот аберраций хромосом от фоновых значений.

Благодаря использованию FISH-методики окраски хромосом примерно через 30 лет после аварии на ЧАЭС были определены дозы ВИИЯТ, полученные ЛПА на ЧАЭС и лицами, проживающими на загрязненной территории.

При использовании в отношении тех же лиц традиционного метода окраски хромосом не удалось в их частотах аберраций обнаружить статистически значимые отличия от фоновых показателей.

В работе В. Ю. Нугиса и соавт. [32] получило дальнейшее развитие упомянутое выше исследование.

Авторы работы указали, что среднюю ретроспективную оценку дозы облучения всего тела выполняли только по частотам, содержащимся в клетках одиночных транслокаций [33–35].

Для автоматического поиска метафаз и их анализа на мониторе использовали компьютеризированную систему «Метафер 4» (MetaSystems, Германия) [32].

Перерасчет количества транслокаций на весь геном осуществляли с помощью методик, представленных в работах отечественных и зарубежных авторов [26–30, 36–39].

Выяснилось, что корреляция между физически полученными с помощью специальных приборов данными и биологическими оценками доз ВИИЯТ весьма невелика. В некоторых случаях указанная корреляция отсутствует совсем, поэтому точность задокументированных физических измерений иногда вызывает большие сомнения.

Национальный радиационно-эпидемиологический регистр был создан для того, чтобы накапливать и систематизировать данные по состоянию здоровья лиц, подвергшихся ВИИЯТ в результате техногенной аварии на ЧАЭС. Наряду с указанными данными, в базе Национального радиационно-эпидемиологического регистра имеется информация о дозах ВИИЯТ, измеренных физическими приборами.

Однако по данным Е. Г. Нероновой и соавт. [40], сведения о полученных дозах имеются далеко не у всех ЛПА на ЧАЭС, зарегистрированных в Национальном радиационно-э-

пидемиологическом регистре, и вопрос реконструкции доз методами цитогенетической дозиметрии является актуальным. По сведениям официальных источников информации из Северо-Западного регионального центра Национального радиационно-эпидемиологического регистра, более чем 32 % зарегистрированных ЛПА на ЧАЭС не имеют данных о полученной дозе ВИИЯТ. По данным Всеармейского регистра, сформированного в 1986 г., не имеют официально зарегистрированной дозы 11,1 % ЛПА на ЧАЭС, включенных в него [41].

Проведено уже немало реальных исследований, в рамках которых опробованы возможности получения оценочных данных по дозе ВИИЯТ с применением методов цитогенетической дозиметрии. Традиционный метод является маркером наличия ВИИЯТ в ближайшие сроки после события, а FISH-метод дает возможность оценки дозы и сразу, и в ретроспективе. Ретроспективный вариант метода может помочь восстановить данные о ВИИЯТ, в том числе и для ЛПА на ЧАЭС, и для ветеранов ПОР.

Такое решение проблемы является востребованным при проведении экспертизы причинной связи фактора риска получения ВИИЯТ и заболеваемостью лиц данной категории и не только. Ее решение позволит составлять более точные версии профилактических и лечебных алгоритмов.

Обсуждение. Однако не стоит ожидать 100 % успеха при попытке применения ретроспективного варианта цитогенетического исследования в отношении лиц, получивших малые дозы ВИИЯТ. Как выяснилось, в ряде исследований проявился так называемый «порог чувствительности метода», который препятствует применению метода ретроспективной дозиметрии при значениях ВИИЯТ, которые ниже или равны 10 сГр.

В работе Г. П. Снигиревой и соавт. [42] было проведено цитогенетическое обследование 108 ЛПА на ЧАЭС спустя 27–30 лет после участия в ликвидационных работах.

Обследованные лица выполняли свою миссию в зоне аварии в 1986–1987 гг. Возраст ЛПА на ЧАЭС на момент проведения исследования находился в диапазоне от 51 года до 88 лет.

В рамках рассматриваемого обследования использовали оба вида цитогенетических исследований: и традиционный, и FISH-метод окрашивания хромосом. При выполнении обо-

их вариантов исследования применялись рекомендации МАГАТЭ.

При ретроспективной оценке биологической дозы ВИИЯТ рассматривали только те лимфоциты, в которых не было нестабильных хромосомных aberrаций. Биологические дозы ВИИЯТ рассчитывали по формулам, учитывающим значения частот транслокаций.

Традиционный вариант цитогенетического исследования использовали для анализа нестабильных хромосомных aberrаций, при этом учитывались все их типы.

В результате анализа ретроспективного исследования оказалось, что у большей части ЛПА на ЧАЭС частота стабильных транслокаций не превысила возрастные показатели. Очевидно, что доза полученного ВИИЯТ оказалась ниже границы чувствительности метода, упомянутого выше.

Для лиц, у которых возрастные показатели частот стабильных транслокаций были превышены, выполнялись расчеты биологической оценки полученных доз ВИИЯТ. Выяснилось, что оценочные значения лежат в пределах от 14 до 48 сГр.

Здесь проявилась другая сторона вопроса правильности интерпретации результатов анализа. Оказалось, что у тех ЛПА на ЧАЭС, у которых частота транслокаций значительно превышала средний уровень, были ранее зафиксированы онкологические заболевания, и они в недавнем времени получали лучевую терапию, искажившую результаты.

В процессе цитогенетического исследования был применен и другой методический подход, учитывающий нестабильные нарушения aberrаций хромосом. Рассматривались следующие виды нестабильных aberrаций хромосом:

- парные фрагменты;
- дицентрики;
- трицентрики;
- кольцевые хромосомы.

Частоты нестабильных aberrаций хромосом достоверно превысили аналогичные показатели в контрольной группе, в которую включались лица, не испытывавшие ВИИЯТ. В результате анализа полученных данных определено, что биологические маркеры ВИИЯТ зафиксированы у 45 % обследованных ЛПА на ЧАЭС.

Существует теоретическое положение, подерживаемое большинством специалистов, что с течением времени частота нестабильных

aberrаций снижается. Тем не менее в ряде публикаций по рассматриваемой теме описано, что иногда такие aberrации фиксируются и по прошествии значительного периода времени. Такие данные имеются и по ЛПА на ЧАЭС.

По этому поводу была высказана гипотеза, что данный вид нарушений передается через посредничество стволовых клеток даже после снятия фактора воздействия ВИИЯТ.

Можно было бы сказать, что рассмотренное исследование подтверждает гипотезу, однако при анализе всегда следует очень внимательно рассматривать следующие моменты:

- достоверность доз, измеренных физическими приборами в прошлом;
- фактор применения лучевой терапии из-за наличия онкологических заболеваний у обследуемых лиц.

Заключение. Анализ данных литературы показал, что при оценке дозы, полученной рабочими, служащими или военнослужащими в результате ВИИЯТ, довольно часто отсутствуют или недостоверны документально зафиксированные данные, приобретенные с помощью соответствующих измерительных приборов.

Недостающие сведения могут быть восполнены путем проведения цитогенетического исследования, которое позволит вычислить биологическую оценку полученной дозы.

Традиционный метод применяется для оценки факта получения ВИИЯТ сразу после произошедшего события. Нестабильные клетки по прошествии какого-то времени погибают, а частота нестабильных aberrаций хромосом довольно быстро падает до фоновых значений, поэтому при ретроспективном анализе данный метод не используют.

FISH-метод цитогенетического исследования выполняется для получения ретроспективной оценки биологической дозы. Поскольку метод работает только со стабильными клетками, частоты aberrаций хромосом сохраняют свое значение многие годы, превышая фоновое значение. При работе с ветеранами ПОР этот метод является основным, поскольку требуется получить ретроспективную оценку дозы облучения.

Указанная оценка получена на основании исследования состояния лимфоцитов периферической крови конкретного человека и является более индивидуализированной, чем оценка, данная группе лиц при однократном измерении

с помощью одного дозиметра. Эта особенность получения биологической оценки в перспективе позволит персонализировать оказание медицинской помощи рассматриваемой категории граждан с составлением индивидуальных профилактических и лечебных алгоритмов.

Сведения об авторах:

Першина Елена Игоревна – младший научный сотрудник, главный врач, Центр промышленной и морской медицины, Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л. Г. Соколова Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации; Санкт-Петербург, просп. Ленинский, д. 101, стр. 5; SPIN: 1458-3530; ORCID: 0000-0003-1899-5192; e-mail: pershina.ei@inbox.ru

Суворова Юлия Владимировна – доктор медицинских наук, начальник научно-образовательного управления, заведующий отделением рентгеноструктурных методов исследования, Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л. Г. Соколова Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации; 194291, Санкт-Петербург, просп. Культуры, д. 4; ORCID: 0000-0003-0183-8166; e-mail: juliavsuvorova@mail.ru

Ратников Вячеслав Альбертович – доктор медицинских наук, профессор, заместитель генерального директора – медицинский директор, Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л. Г. Соколова Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации; 194291, Санкт-Петербург, просп. Культуры, д. 4; ORCID: 0000-0002-9645-8408; e-mail: dr.ratnikov@mail.ru

Москалева Светлана Сергеевна – Заслуженный врач РФ, заместитель медицинского директора по амбулаторно-поликлинической работе; Северо-западный окружной научно-клинический центр им. Л. Г. Соколова Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации; 194291, Санкт-Петербург, просп. Культуры, д. 4; ORCID: 0000-0003-1563-5255; e-mail: moss261966@gmail.com

Горелов Виктор Павлович – кандидат медицинских наук, главный врач, Клиническая больница 122, Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л. Г. Соколова Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации; 194291, Санкт-Петербург, просп. Культуры, д. 4; ORCID: 0000-0003-4829-7029; e-mail: vpgorelov@gmail.com

Куус Ева Андреевна – начальник отдела радиационной безопасности, Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л. Г. Соколова Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации; 194291, Санкт-Петербург, просп. Культуры, д. 4; ORCID: 0009-0004-3854-9493; e-mail: kuus.e@yandex.ru

Information about the authors:

Elena I. Pershina – Junior Researcher, Chief Physician, Center for Industrial and Marine Medicine, North-Western District Scientific and Clinical Center named after L. G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; Saint Petersburg, Leninsky Ave., 101, building 5; SPIN: 1458-3530; ORCID: 0000-0003-1899-5192; e-mail: pershina.ei@inbox.ru

Julia V. Suvorova – Dr. of Sci. (Med.), Head of the Scientific and Educational Department, Head of the Department of X-ray Diffraction Research Methods, North-Western District Scientific and Clinical Center named after L. G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; 194291, Saint Petersburg, Culture Ave., 4; ORCID: 0000-0003-0183-8166; e-mail: juliavsuvorova@mail.ru

Viacheslav A. Ratnikov – Dr. of Sci. (Med.), Professor, Deputy General Director – Medical Director, North-Western District Scientific and Clinical Center named after L. G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; 194291, Saint Petersburg, Culture Ave., 4; ORCID: 0000-0002-9645-8408; e-mail: dr.ratnikov@mail.ru

Svetlana S. Moskaleva – Honored Doctor of the Russian Federation, Deputy Medical Director for Outpatient Work; North-Western District Scientific and Clinical Center named after L. G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; 194291, Saint Petersburg, Culture Ave., 4; ORCID: 0000-0003-1563-5255; e-mail: moss261966@gmail.com

Victor P. Gorelov – Cand. of Sci. (Med.), Chief Physician, Clinical Hospital 122; North-Western District Scientific and Clinical Center named after L. G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; 194291, Saint Petersburg, Culture Ave., 4; ORCID: 0000-0003-4829-7029; e-mail: vpgorelov@gmail.com

Eva A. Kuus – Head of the Radiation Safety Department, North-Western District Scientific and Clinical Center named after L. G. Sokolov of the Federal Medical and Biological Agency of Russian Federation; 194291, Saint Petersburg, Culture Ave., 4; ORCID: 0009-0004-3854-9493; e-mail: kuus.e@yandex.ru

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределен следующим образом: концепция исследования – Ю. В. Суворова; сбор, анализ интерпретация данных – Е. И. Першина; составление статьи – Е. А. Куус; итоговая переработка статьи, утверждение материала – В. А. Ратников; окончательное утверждение версии для публикации – В. П. Горелов, С. С. Москалева.

Author contribution. All authors according to the ICMJE criteria participated in the development of the concept of the article, obtaining and analyzing factual data, writing and editing the text of the article, checking and approving the text of the article.

Special contribution: YuVS research concept. EIP data collection, analysis and interpretation. EAK compilation of the article. VAR final revision of the article, approval of the material. VPG, SSM final approval of the version for publication.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare that they have no competing interests.

Финансирование: исследование проведено в рамках госзадания ФМБА (рег.№ НИОКТР 124022100029-9)

Funding: the study was conducted within the framework of the FMBA state assignment (R&D reg. no. 124022100029-9)

Поступила/Received: 18.02.2025

Принята к печати/Accepted: 15.06.2025

Опубликована/Published: 30.06.2025

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Першина Е. И. Организация медицинской помощи ветеранам подразделений особого риска Российской Федерации // *Вестник Ивановской медицинской академии*. 2020. Т. 25, № 2. С. 18–22 [Pershina E. I. Organization of medical care for veterans of special risk units of the Russian Federation. *Bulletin of the Ivanovo Medical Academy*, 2020, Vol. 25, No. 2, pp. 18–22 (In Russ.)].
2. Нугис В. Ю. FISH-метод: способ цитогенетической ретроспективной оценки дозы // *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2016. Т. 12, № 4. С. 671–678 [Nugis V. Yu. FISH method: a method of cytogenetic retrospective dose assessment. *Saratov Scientific and Medical Journal*, 2016, Vol. 12, No. 4, pp. 671–678 (In Russ.)].
3. *Cytogenetic analysis for radiation dose assessment: A manual*. Vienna: IAEA, 2001, 126 p.
4. *Cytogenetic dosimetry: applications in preparedness for and response to radiation emergencies*. Vienna: IAEA, 2011, 229 p.
5. Dybskiy S. S. FISH method applied to the cytogenetic examination of persons recovered from acute radiation sickness due to the Chernobyl power plant accident. In: The problems of radiation genetics at the turn of the century: Abstracts. Moscow: Publishing House of Russian Peoples' Friendship, 2000, p. 271.
6. Pilinskaya M. A. The frequency of chromosome aberrations in critical groups of Ukrainian population in delayed terms following the Chernobyl accident. In: The problems of radiation genetics at the turn of the century: Abstracts. Moscow: Publishing House of Russian Peoples' Friendship, 2000, p. 312.
7. Севаньяев А. В., Голуб Е. В., Хвостунов И. К. и др. Ретроспективная оценка доз в отдаленный пострadiационный период разными биологическими методами // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2004. Т. 44, № 6. С. 637–652 [Sevan'kaev A. V., Golub E. V., Khvostunov I. K., et al. Retrospective assessment of doses in the long-term radiation period by various biological methods. *Radiation biology. Radioecology*, 2004, Vol. 44, No. 6, pp. 637–652 (In Russ.)].
8. Chen Y., Jin C.-Z., Zhang X.-Q., et al. Seventeen-year follow-up study on chromosomal aberrations in five victims accidentally exposed to several Gy of ^{60}Co γ -rays. *Radiat Environ Biophys*, 2009, Vol. 48, No. 1, pp. 57–65.
9. Simon S. L., Bailiff I., Bouville A., et al. BiodosEPR-2006 consensus committee report on biodosimetric methods to evaluate radiation doses at long times after exposure. *Radiat Measurements*, 2007, Vol. 42, No. 6–7, pp. 948–971.
10. Sevan'kaev A. V., Khvostunov I. K., Mikhailova G. F., et al. The suitability of FISH chromosome painting and ESR-spectroscopy of tooth enamel assays for retrospective dose reconstruction. *J Radiat Res*, 2006, No. 47 (Suppl. A), A75–A80.
11. Natarajan A. T., Santos S. J., Darroudi F., et al. 137 Cesium-induced chromosome aberrations analysed by fluorescence in situ hybridization: Eight years follow up of the Goiânia radiation accident victims. *Mutat Res*, 1998, Vol. 400, No. 1, pp. 299–312.
12. Lucas J. N., Awa A., Straume T., et al. Rapid translocation frequency analysis in human decades after exposure to ionizing radiation. *Int J Radiat Biol*, 1992, Vol. 62, No. 1, pp. 53–63.
13. Ainsbury E. A., Bakhanova E., Barquinero J. F., et al. Review of retrospective dosimetry techniques for external ionising radiation. *Radiat Prot Dosim*, 2011, Vol. 147, No. 4, pp. 573–592.
14. Edwards A. A., Lindholm C., Darroudi F., et al. Review of translocations detected by FISH for retrospective biological dosimetry application. *Radiat Prot Dosim*, 2005, Vol. 113, No. 4, pp. 396–402.
15. Knehr S., Bauchinger M. Application of FISH painting for dose reconstruction: current status and views of the GSF cytogenetics group. *Radiat Prot Dosim*, 2000, Vol. 88, No. 1, pp. 15–20.
16. Rodriguez P., Montoro A., Barquinero J. F., et al. Analysis of translocations in stable cells and their implications in retrospective biological dosimetry. *Radiat Prot Dosim*, 2000, Vol. 88, No. 1, pp. 15–20.
17. Нугис В. Ю., Бушманов А. Ю., Западинская Е. Э. Цитогенетические исследования через 28–29 лет после аварии на Чернобыльской АЭС // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2016. Т. 61, № 4. С. 35–42 [Nugis V. Yu., Bushmanov A. Yu., Zapadinskaya E. E. Cytogenetic studies 28–29 years after the Chernobyl accident. *Medical radiology and radiation safety*, 2016, Vol. 61, No. 4, pp. 35–42 (In Russ.)].
18. Пяткин Е. К., Нугис В. Ю., Чирков А. А. Оценка поглощенной дозы по результатам цитогенетических исследований культур лимфоцитов у пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС // *Медицинская радиология*. 1989. Т. 34, № 6. С. 52–57 [Pyatkin E. K., Nugis V. Yu., Chirkov A. A. Assessment of the absorbed dose based on the results of cytogenetic studies of lymphocyte cultures in victims of the Chernobyl accident. *Medical radiology*, 1989, Vol. 34, No. 6, pp. 52–57 (In Russ.)].
19. Бочков Н. П., Катосова Л. Д., Сапачева В. А. Цитогенетический анализ лимфоцитов периферической крови у проживающих в загрязнённых радионуклидами районах Калужской области // *Медицинская радиология*. 1991. Т. 36, № 1. С. 50–52 [Bochkov N. P., Katosova L. D., Sapacheva V. A. Cytogenetic analysis of peripheral blood lymphocytes from people living in radionuclide-contaminated areas of the Kaluga Region. *Medical radiology*, 1991, Vol. 36, No. 1, pp. 50–52 (In Russ.)].
20. Воробцова, И. Е., Колубаева С. Н., Воробьева М. В. Цитогенетическая характеристика детей, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС // *Медицинская радиология*. 1993. Т. 38, № 10. С. 25–28 [Vorobtsova, I. E., Kolyubaeva S. N., Vorobyeva M. V. Cytogenetic characteristics of children affected by the Chernobyl accident. *Medical radiology*, 1993, Vol. 38, No. 10, pp. 25–28 (In Russ.)].

21. Воробцова И. Е., Михельсон В. М., Воробьева М. В. Результаты цитогенетического обследования ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, проведенного в разные годы // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1994. Т. 34, № 6. С. 798–803 [Vorobtsova I. E., Mikhelson V. M., Vorobyeva M. V. The results of the cytogenetic examination of the liquidators of the consequences of the Chernobyl accident, conducted in different years. *Radiation biology. Radioecology*, 1994, Vol. 34, No. 6, pp. 798–803 (In Russ.)].
22. Домрачева Е. В., Клевезаль Г. А., Нечай В. В. Индивидуальные дозы облучения, определённые двумя методами биологической дозиметрии у жителей Чернобыльского региона и участников ликвидации аварии // *Гематология и трансфузиология*. 1991. Т. 36, № 12. С. 18–20 [Domracheva E. V., Klevezal G. A., Nechai V. V. Individual radiation doses determined by two methods of biological dosimetry for residents of the Chernobyl region and participants in the liquidation of the accident. *Hematology and Transfusiology*, 1991, Vol. 36, No. 12, pp. 18–20 (In Russ.)].
23. Зайнуллин В. Г., Бородин П. А., Черняк С. И. Результаты цитогенетического обследования лиц, принимавших участие в ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиобиология*. 1992. Т. 32, № 5. С. 668–672 [Zainullin V. G., Borodkin P. A., Chernyak S. I. Results of cytogenetic examination of persons who participated in the liquidation of the Chernobyl accident. *Radiobiology*, 1992, Vol. 32, No. 5, pp. 668–672 (In Russ.)].
24. Пилинская М. А., Шеметун А. М., Дыбский С. С. Цитогенетический эффект в лимфоцитах периферической крови как индикатор действия на человека факторов Чернобыльской аварии // *Радиобиология*. 1992. Т. 32, № 6. С. 632–639 [Pilinskaya M. A., Shemetun A. M., Dybskiy S. S. Cytogenetic effect in peripheral blood lymphocytes as an indicator of human exposure to Chernobyl accident factors. *Radiobiology*, 1992, Vol. 32, No. 6, pp. 632–639 (In Russ.)].
25. Хандогина Е. К., Агейкин В. А., Зверева С. В. Цитогенетическое обследование различных групп детей, проживающих в районах Брянской области, загрязненных в результате Чернобыльской аварии // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1995. Т. 35, № 5. С. 618–625 [Khandogina E. K., Ageikin V. A., Zvereva S. V. Cytogenetic examination of various groups of children living in areas of the Bryansk region contaminated as a result of the Chernobyl accident. *Radiation Biology. Radioecology*, 1995, Vol. 35, No. 5, pp. 618–625 (In Russ.)].
26. Хвостунов И. К., Севанькаев А. В., Михайлова Г. Ф. Роль цитогенетического обследования для оценки последствий неконтролируемого воздействия радиации на человека // В сб.: «Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет». Под ред. В.К. Иванова, А.Д. Каприна. М.: ГеОС. 2015. С. 93–119 [Khvostunov I. K., Sevankaev A. V., Mikhailova G. F. The role of cytogenetic examination in assessing the effects of uncontrolled radiation exposure on humans // In collection: “Medical radiological consequences of Chernobyl: prognosis and evidence after 30 years.” Edited by V. K. Ivanov, A. D. Kaprin. Moscow: GeOS, 2015, pp. 93–119 (In Russ.)].
27. Воробцова И. Е., Богомазова А. Н. Стабильные хромосомные аберрации в лимфоцитах периферической крови лиц, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1995. Т. 35, № 5. С. 636–640 [Vorobtsova I. E., Bogomazova A. N. Stable chromosomal aberrations in peripheral blood lymphocytes of persons affected by the Chernobyl accident. *Radiation Biology. Radioecology*, 1995, Vol. 35, No. 5, pp. 636–640 (In Russ.)].
28. Севанькаев А. В., Михайлова Г. Ф., Потетня О. И. Результаты динамического цитогенетического наблюдения за детьми и подростками, проживающими на радиоактивнозагрязненных территориях после Чернобыльской аварии // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2005. Т. 45, № 1. С. 5–15 [Sevankaev A. V., Mikhailova G. F., Potetnya O. I. The results of dynamic cytogenetic monitoring of children and adolescents living in radioactively contaminated areas after the Chernobyl accident. *Radiation Biology. Radioecology*, 2005, Vol. 45, No. 1, pp. 5–15 (In Russ.)].
29. Снигирева Г. П., Шевченко В. А., Новицкая Н. Н. Использование FISH метода для реконструкции поглощенных доз, полученных участниками ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1995. Т. 35, № 5. С. 654–661 [Snigireva G. P., Shevchenko V. A., Novitskaya N. N. The use of the FISH method for the reconstruction of absorbed doses received by participants in the liquidation of the Chernobyl accident. *Radiation Biology. Radioecology*, 1995, Vol. 35, No. 5, pp. 654–661 (In Russ.)].
30. Шевченко В. А., Снигирева Г. П. Значимость цитогенетического обследования для оценки последствий Чернобыльской катастрофы // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2006. Т. 46, № 2. С. 133–139 [Shevchenko V. A., Snigireva G. P. The significance of cytogenetic examination for assessing the consequences of the Chernobyl disaster. *Radiation Biology. Radioecology*, 2006, Vol. 46, No. 2, pp. 133–139 (In Russ.)].
31. Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. Vienna: IAEA, 2011, 245 p.
32. Нугис В. Ю., Бушманов А. Ю., Козлова М. Г. Цитогенетическая индексация дозы облучения примерно через 30 лет после аварии на Чернобыльской АЭС // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2017. Т. 62, № 3. С. 26–32 [Nugis V. Yu., Bushmanov A. Yu., Kozlova M. G. Cytogenetic radiation dose indication approximately 30 years after the Chernobyl accident, *Medical radiology and radiation safety*, 2017, Vol. 62, No. 3, pp. 26–32 (In Russ.)].
33. Edwards A. A., Lindholm C., Darroudi F., et al. Review of translocations detected by FISH for retrospective biological dosimetry application. *Radiat. Protect. Dosim.*, 2005, Vol. 113, No. 4, pp. 396–402.
34. Salassidis K., Georgiadou-Schumacher V., Braselmann H., et al. Chromosome painting in highly irradiated Chernobyl victims: a follow-up study to evaluate the stability of symmetrical translocations and the influence of clonal aberrations for retrospective dose estimation. *Int. J. Radiat. Biol.*, 1995, Vol. 68, No. 3, pp. 257–262.
35. Savage J. K. Classification and relationships of induced chromosomal structural changes. *J. Medical Genetic*, 1976, Vol. 13, No. 2, pp. 103–122.
36. Lucas J. N., Awa A., Straume T., et al. Rapid translocation frequency analysis in human decades after exposure to ionizing radiation. *Int. J. Radiat. Biol.*, 1992, Vol. 62, No. 1, pp. 53–63.
37. Mendelsohn M. L., Mayall B. H., Bogart E., et al. DNA content and DNA-based centromeric index of 24 human chromosomes. *Science*, 1973, Vol. 179, No. 78, pp. 1126–1129.

38. Sigurdson A. J., Ha M., Hauptmann M., et al. International study of factors affecting human chromosome translocations. *Mutat. Res*, 2008, Vol. 652, No. 2, pp. 112–121.
39. Whitehouse C. A., Edwards A. A., Tawn E. J., et al. Translocation yields in peripheral blood lymphocytes from control populations. *Int. J. Radiat. Biol.*, 2005, Vol. 81, No. 2, pp. 139–145.
40. Неронова Е. Г., Саблина А. О., Алексанин С. С. Возможности реконструкции доз внешнего облучения у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции цитогенетическими методами // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2019. № 4. С. 70–78 [Neronova E. G., Sablina A. O., Aleksanin S. S. Possibilities of reconstructing doses of external radiation from the liquidators of the consequences of the Chernobyl nuclear power plant accident by cytogenetic methods. *Medical-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*, 2019, No. 4. pp. 70–78 (In Russ.)] doi: 10.25016/2541-7487-2019-0-4-70-78.
41. Алексанин С. С., Шантырь И. И., Астафьев О. М. и др. Реконструкция доз облучения участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС с оценкой дозозависимых эффектов (по материалам ведомственного и национального регистра): монография / Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А. М. Никифорова МЧС России. СПб., 2017. 208 с. [Aleksanin S. S., Shantyr I. I., Astafyev O. M., et al. Reconstruction of radiation doses of participants in the aftermath of the Chernobyl accident with an assessment of dose-dependent effects (based on the materials of the departmental and national register): monograph / A. M. Nikiforov All-Russian Center for Emergency and Radiation Medicine of the Ministry of Emergency Situations of Russia. St. Petersburg, 2017, 208 p. (In Russ.)].
42. Снигирева Г. П., Богомазова А. Н., Новицкая Н. Н. Биологическая индикация радиационного воздействия на организм человека с использованием цитогенетических методов (медицинская технология №ФС2007/015У). М., 2007. 29 с [Snigireva G. P., Bogomazova A. N., Novitskaya N. N. *Biological indication of radiation exposure to the human body using cytogenetic methods (medical technology No.FS2007/015U)*. Moscow, 2007. 29 p. (In Russ.)].