

[Л.А. Ильин], О.А. Кочетков, А.В. Барабанова, В.Г. Барчуков

МЕДИЦИНСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ НА АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДКАХ СССР

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Валерий Гаврилович Барчуков, e-mail: barchval@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Провести анализ медицинских последствий радиационных аварий на атомных подводных лодках СССР

Результаты: За весь период эксплуатации отечественных атомных подводных лодок (далее – АПЛ) произошло восемь тяжелых аварий, связанных с ядерными энергетическими установками (далее – ЯЭУ). Особенностью этих аварий является то, что при авариях в замкнутом пространстве радиационная обстановка носит более сложный характер, чем в других условиях, поэтому медицинские последствия таких аварий и более значимы. На АПЛ имели место аварии двух типов – это теплотехнические (пять случаев), связанные с нарушением теплоотвода из активной зоны, и аварии (три случая), обусловленные формированием неполной цепной реакции. Аварии первого типа имели место при нахождении АПЛ в море, а второго – при проведении работ на судоремонтных заводах. Теплотехнические аварии были связаны с разгерметизацией в той или иной степени I контура реактора, что приводило к повышению фона γ -излучения и β -излучения вследствие поступления в отсек больших количествах радиоактивных благородных газов (далее – РБГ) и радиоактивных аэрозолей (далее – РАЗ). Показано, что особенность облучения человека в условиях ограниченного объема отсека АПЛ заключается в том, что значительный вклад в дозу вносят изотопы РБГ (в основном – ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe), а критическим органом является кожа.

Выводы: Анализ медицинских последствий теплотехнических аварий на АПЛ показал, что радиационные поражения обусловлены внешним γ - и β -облучением, а также поступлением внутрь организма радиоактивных аэрозолей. Если аварии сопровождаются длительными незначительными протечками, приводящими к поступлению в отсек РБГ, основной вклад вносит β -облучение и критическим органом является кожа. Если имеет место однократное значительное поступление теплоносителя в объем отсека, формируются сочетанные радиационные поражения и в этом случае поражения кожи отягощают течение ОЛБ. При авариях, обусловленных возникновением неполной цепной реакции, ведущим радиационным фактором является внешнее γ - n облучение в моменте вспышки НЦР, и если имел место тепловой взрыв, на человека, воздействует и травмирующий фактор, приводящий к формированию у пострадавших травм различной степени тяжести.

Ключевые слова: радиационные аварии, подводные лодки, ядерные энергетические установки, радиационные поражения, кожа, поражения в ограниченном объеме

Для цитирования: Ильин Л.А., Кочетков О.А. , Барабанова А.В., Барчуков В.Г. Медицинские последствия радиационных аварий на атомных подводных лодках СССР // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 6. С. 42–48. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-6-42-48

[L.A. Ilyin], O.A. Kochetkov, A.V. Barabanova, V.G. Barchukov

Health Effects of Onboard Radiation Accidents in the Soviet Nuclear Submarines

A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: V.G. Barchukov, e-mail: barchval@yandex.ru

ABSTRACT

Purpose: To analyze the health effects of onboard radiation accidents in the Soviet nuclear submarines.

Results: Over the entire operation period of Soviet nuclear submarines, eight severe accidents occurred related to nuclear power installations. These accidents occurred in a confined space and the associated radiation situation is more complex than in other conditions; therefore, health effects of such accidents are more significant. There were two types of onboard accidents: thermal accidents (five cases) associated with a failure during heat removal from the reactor core; and accidents (three cases) caused by a partial chain reaction. The first type of accidents occurred during the route operation of nuclear submarine, and the second one – during repair work. Thermal accidents were associated with varying degrees of depressurization of the primary circuit of the reactor, which increased the gamma and beta background due to the entry into the compartment of a large amount of radioactive noble gases (hereinafter – RBGs) and radioactive aerosols. It has been shown that in the confined space of nuclear submarines, RBG isotopes (mainly ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe) make a significant contribution to the individual dose and the skin is a critical organ.

Conclusion: An analysis of the health effects of thermal onboard accidents showed that radiation injuries were caused by external gamma and beta-exposure, as well as the ingestion of radioactive aerosols. If accidents are accompanied by prolonged minor leaks leading to entry of RBG into the compartment, the main contribution is made by beta-exposure and the skin is a critical organ. If there is a simultaneous inflow of coolant into the compartment, combined radiation injuries are formed and, in this case, skin lesions aggravate the acute radiation sickness. In accidents induced by a partial chain reaction, the main radiation factor is external γ - n -exposure during an outbreak of a partial chain reaction, and in the case of a thermal explosion, a traumatic factor also affects a person, leading to injuries of varying severity in the victims.

Keywords: radiation accidents, submarines, nuclear power plants, radiation damage, skin, damage in a limited volume

For citation: Ilyin LA, Kochetkov OA, Barabanova AV, Barchukov VG. Health Effects of Onboard Radiation Accidents in the Soviet Nuclear Submarines. Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68(6):42–48. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-6-42-48

Введение

Чуть более 100 лет назад по указу императора России Николая II было сформировано первое соединение подводных лодок, что стало началом развития подводного флота России. Становление атомной отрасли привело к новому этапу в развитии подводного флота. Первая атомная подводная лодка (далее – АПЛ) «К-3» проекта 627А была введена в состав ВМФ СССР 17 декабря 1958 г., а первое гражданское судно, атомный ледокол «Ленин», было сдано Министерству морского флота СССР 3 декабря 1959 г. Использование ядерных энергетических установок (далее – ЯЭУ) на подводных лодках обеспечило большие возможности подводного флота, который стал неотъемлемой частью (триадой) ядерного сдерживания.

В настоящее время расширяется использование ЯЭУ на ледокольном флоте, надводном Военно-морском флоте, плавающих атомных станциях.

Имевшие место аварии ЯЭУ на АПЛ свидетельствуют о том, что исключить возможные аварии на транспортных реакторах невозможно. Это обуславливает необходимость выработки соответствующих медицинских мероприятий по ликвидации их последствий, что в свою очередь определяет необходимость проведения ретроспективного анализа проблем и медицинских последствий аварийных ситуаций, связанных с ЯЭУ на надводных и подводных кораблях в прошлом.

Как известно, сколько-либо значимых аварий на реакторах, установленных на надводных кораблях (ледоколы, лихтеровозы, надводные корабли с ЯЭУ) за время с момента постройки первого ледокола «Ленин» и до настоящих дней не было. Все аварии, имевшие место с транспортными ЯЭУ, связаны с атомным подводным флотом. Использование в качестве источника энергии на подводных лодках ЯЭУ на начальных этапах их развития привело к ряду значительных аварий на флотах всех стран, обладающих такими технологиями. По данным Н.Г. Мормуль, представленных в книге «Катастрофы под водой» [1], отмечается, что опыт эксплуатации подводных лодок с ЯЭУ в американском флоте свидетельствует о том, что их аварийность на треть связана с авариями ЯЭУ. Однако научных публикаций, анализирующих причины и последствия этих аварий на АПЛ США до настоящего времени нет.

На первом поколении советских АПЛ также имели место аварии, связанные с ЯЭУ [1]. Эти аварии не приводили к неблагоприятным медицинским последствиям (повышенному облучению, радиационным поражениям, радиоактивному загрязнению окружающей природной среды). Но в ряде случаев таких последствий избежать не удалось [2–4]. За весь период эксплуатации отечественных АПЛ произошло восемь значимых аварий. В результате облучению, согласно данным [3], подверглось около тысячи человек в дозах свыше допустимых согласно НРБ, из них имели место 25 летальных исходов [3]. Следует отметить, что в фундаментальном обзоре, который представлен на основе данных, сохранённых в регистре ГНЦ ФМБЦ им А.И. Бурназяна о радиационных инцидентах, имевших место в СССР [4, 5], отмечено лишь 5 аварий на АПЛ с числом погибших 12 чел. Такое расхождение можно объяснить тем, что в тот период данные о фактических медицинских последствиях аварий на АПЛ имели ограниченный доступ. В настоящее время значительная часть сведений о радиационных последствиях аварий на АПЛ СССР стала доступна в открытых

источниках [3, 6–11]. Это явилось следствием большой работы, проведенной под руководством Главного радиолога ВМФ (1987–1995 гг.) Олега Ивановича Петрова. В настоящем обзоре мы, как участники ряда работ, выполненных в свое время по данной тематике, представляем обзор медицинских последствий аварий, имевших место на АПЛ СССР.

При оценке последствий аварий на АПЛ следует иметь в виду, что при авариях в замкнутом пространстве, какое представляет собой подводная лодка, радиационная обстановка является более сложной, чем в других условиях, поэтому медицинские последствия таких аварий и более значимы [12]. На АПЛ имели место два типа аварий – это теплотехнические (пять случаев), связанные с нарушением теплоотвода из активной зоны, и аварии (три случая), обусловленные возникновением неполной цепной реакции (далее – НЦР)¹. Первый тип аварий имел место при нахождении АПЛ в море, а второй – при проведении работ на судоремонтных заводах. Радиационная обстановка при любом типе аварии на АПЛ усугубляется, когда по техническим причинам или вследствие неправильных действий личного состава невозможно принять оперативные меры по ликвидации причин, приведших к ее ухудшению и по ее нормализации.

Причины и радиационные последствия аварий

Одна из первых тяжелых аварий, связанных с ЯЭУ, произошла 13 октября 1960 г. на АПЛ «К-8» проекта 627А. Авария случилась в Мотовском заливе через полтора месяца после принятия подводной лодки на вооружение во время короткого выхода АПЛ в море. Причиной аварии стал разрыв трубопровода контура охлаждения в одном из реакторов, что привело к нарушению герметичности и к быстрому падению давления в первом контуре. Это, в свою очередь, послужило причиной выброса радиоактивных веществ в отсек [6]. На момент аварии мощность дозы γ-излучения в турбинном отсеке составила 60 МГр/ч. При этом объемная активность РБГ через 1,5 ч по расчетным данным достигла $1,8 \times 10^7$ Бк/м³.

В связи с тем, что в момент аварии АПЛ находилась вблизи пункта базирования и имела возможность вентилировать загрязненный воздух в атмосферу, клинически выраженных радиационных поражений личного состава удалось избежать. Около 50 % личного состава получили дозы от 0,1 до 0,8 Гр.

Вторая значимая авария произошла в 1961 г. на АПЛ «К-19» проекта 658 [6]. На 16-е сут плавания в подводном положении лопнула трубка, которая вела от первого контура к манометру. В результате давление в первом контуре реактора упало с 200 до 150 атмосфер, манометр при этом показывал нулевое давление. Командование АПЛ, основываясь на данных показаний манометра, не убедившись, что давление и температура остаются в технологически приемлемых режимах, приняло решение сбросить аварийную защиту реактора и смонтировать нештатную систему подачи в реактор холодной воды [6]. При монтаже нештатной системы был вскрыт находящийся под давлением I контур, что привело к выбросу пара. Развитие аварии сопровождалось выбросом РБГ и других летучих продуктов деления за пределы аппаратурной выгородки. Ретроспективный анализ показал, что объемная активность РБГ и РАЗ находилась в преде-

¹ Неполная цепная реакция – это процесс ядерного деления без последующего взрывного продолжения.

лах $3,7 \times 10^1 - 3,7 \times 10^3$ Бк/л (РБГ) и $3,7 \times 10^1 - 3,7 \times 10^2$ Бк/л (РАЗ).

Анализ сформировавшейся радиационной обстановки [11] свидетельствует о том, что весь личный состав АПЛ получил радиационные поражения различной степени тяжести. Дозу до 0,75 Гр получили 107 чел, от 0,75 до 1,25 Гр – 23 чел, от 1,25 до 2 Гр – 2 чел, от 2 до 3 Гр – 5 чел. и 1 чел получил дозу более 4 Гр.

В 1968 г. на АПЛ «К-27» (проект 645 с жидкокометаллическим теплоносителем, далее – ЖМТ) в подводном положении произошло защелковывание ЖМТ реактора [1]. Это привело к тому, что он стал быстро терять мощность. Реактор вовремя не был остановлен, в результате чего часть тепловыделяющих элементов расплавилась, и ядерное топливо было разнесено по первому контуру. Развитие аварии сопровождалось выбросом РБГ и РАЗ в реакторный отсек и резким увеличением уровней γ -излучения. Индивидуальные дозы γ -излучения и β - γ -излучения для кожных покровов определялись расчетным путем исходя из реконструкции радиационной обстановки, сложившейся на АПЛ в момент и в ходе развития аварии [3]. Было установлено, что дозу внешнего γ -облучения до 0,5 Гр получили 102 чел, от 0,5 до 8 Гр – 43 чел, и 2 чел – более 10 Гр. Расчет суммарного воздействия внешнего β - γ -облучения кожных покровов показал, что дозу на кожные покровы от 2 до 5 Гр получили 80 чел, от 5 до 10 Гр – 55 чел, от 10 до 20 Гр – 6 чел и от 20 до 40 Гр – 5 чел. От острых радиационных поражений погибло четыре человека.

В июле 1979 г. при нахождении в море произошла авария реактора на АПЛ «К-116» проекта 675. На мощности 65 % реактора левого борта было обнаружено снижение расхода теплоносителя. Затем – вскипание, срыв циркуляции в контуре. Недостаточно эффективная реализация мероприятий по локализации последствий аварии привела к распространению РБГ и РАЗ по всем отсекам АПЛ. Основными источниками ионизирующих излучений явились продукты ядерного деления, попавшие в аппаратную выгородку с водой I контура через трещину в крышке реактора.

Дозу личного состава аварийной АПЛ оценивали расчетным путем на основании данных о радиационной обстановке в период аварии, времени нахождения личного состава в различных отсеках и сопоставляли с данными индивидуальных дозиметров. Полученные результаты указывают, что дозу до 0,1 Гр получили 70 чел, от 0,1 до 0,5 Гр – 23 чел, от 0,5 до 0,75 Гр – 3 чел, дозу 1,5 и 2,5 Гр – 2 чел.

Последняя теплотехническая авария при нахождении АПЛ в море произошла 26 июля 1989 г. на АПЛ «К-192» [1]. Во время боевой службы была обнаружена течь первого контура одного из реакторов. Авария привела к минимальным лучевым поражениям личного состава. Максимальная эффективная доза внешнего γ -излучения личного состава составила около 40 мЗв. Среди личного состава, участвовавшего в работах по ликвидации последствий аварии, случаев превышения предельно допустимой дозы не было. Максимальная дозовая нагрузка за одно посещение реакторного отсека не превышала 10 мЗв.

Все отмеченные выше аварии в той или иной степени связаны с нарушением в работе систем обеспечения отвода тепла от реактора. Однако имели место и аварии, связанные с возникновением НЦР. Примером такой аварии является авария на АПЛ «К-11» проекта 627А в 1965 г. на судоремонтном заводе (далее – СРЗ) «Звездочка» [1, 13]. Авария произошла, когда начались швартовые испытания. При подъеме крышки реактора произошел и

подъем компенсирующей решетки, в реакторе возникла НЦР. При этом пострадало девять человек из состава перегрузочной команды, которые в момент НЦР находились в реакторном отсеке и получили дозы в районе 0,1–0,12 Гр.

На заводе «Красное Сормово» в г. Горьком (теперь Нижний Новгород) 18 января 1970 г. проводили гидравлические испытания реактора на АПЛ «К-320» проекта 670 [7]. Возникла НЦР. Вода в реакторе мгновенно вскипела. Термовой взрыв не успел произойти из-за наличия открытого отверстия. Через отверстие в стойке ударила струя радиоактивного пара, которым были загрязнены лодка и крытый эллинг, в котором она находилась. В результате аварии пострадал в основном персонал завода. Пять человек получили радиационные поражения с развитием ОЛБ, у трех ОЛБ закончилось летальным исходом.

При перезарядке реакторов АПЛ «К-431» на СРЗ в бухте Чажма 10 августа 1985 г. произошла НЦР, приведшая к вскипанию теплоносителя, что стало причиной теплового взрыва. Сразу после взрыва в реакторном отсеке возник пожар, который был ликвидирован через 4 ч [1, 8, 14]. Повышенному облучению подверглись 290 чел. Из них у 39 чел имели место проявления лучевой патологии, причем у 7 чел сформировалась острая лучевая болезнь 1–2-ой степени. В момент теплового взрыва 10 чел. получили комбинированные поражения, приведшие к летальному исходу в момент аварии [3].

Обобщая данные по анализу причин аварий, представленных выше, следует отметить, что аварии относятся к двум типам: реактивные аварии и теплотехнические. Эти типы аварий отличаются не только по своей природе, но и по причинам возникновения и последствиям. В частности, все три серьезные реактивные аварии произошли при проведении ремонтных работ на судостроительных предприятиях и, как правило, из-за случайных ошибок обслуживающего персонала, неправильной оценкой ситуации или нарушений технологии работ.

Описанные выше теплотехнические аварии происходили в процессе эксплуатации ЯЭУ, когда АПЛ находились в море. Их причиной, как правило, были нарушения теплообмена в активной зоне реактора. Причиной нарушения теплообмена могли быть ошибки при проведении теплофизических измерений в процессе эксплуатации ЯЭУ или, что чаще всего случалось, когда невозможно было организовать циркуляцию теплоносителя штатными средствами по причине выхода из строя оборудования или разгерметизации первого контура.

Формирование тканевой дозы облучения

Биологическая защита реактора АПЛ и в целом всей ЯЭУ была спроектирована таким образом, чтобы обеспечить при нормативной работе ЯЭУ такие уровни гамма-нейтронного (далее γ - n) излучения в реакторном и смежных отсеках, чтобы доза облучения личного состава не превышала регламентных значений (для АПЛ I и II поколения это 15 бэр/год – 150 мЗв/год). При этом доза γ -облучения контролируется средствами ИДК, а для нейтронного облучения определяется расчётным путём.

В процессе эксплуатации АПЛ I и II поколения имели место нештатные ситуации, связанные с наличием протечек и выходом радиоактивных веществ в объём реакторного отсека. Как отмечено в материалах [1], на АПЛ I поколения течи из-под крышек реактора произошли на 5 лодках, а частичные течи парогенераторов ПГ-13 с

трубной системой из нержавеющей стали имело место почти на всех АПЛ I поколения. На АПЛ II поколения произошло 14 течей парогенераторов ПГ-14Т и 16 течей из-под крышек реакторов [1]. На АПЛ последующих поколений в связи с заменой парогенераторов улучшенной конструкции подобных явлений не отмечалось.

В результате имевших место протечек в объём реакторного отсека поступали преимущественно газообразные продукты ядерного деления топливных элементов реактора (это группа изотопов ряда РБГ – криптоны и ксеноны), что приводило к дополнительному облучению части личного состава БЧ-5.

Как отмечалось выше, имевшее место теплотехнические аварии были связаны с разгерметизацией в той или иной степени первого контура реактора, что приводило к поступлению в отсек больших количествах РБГ и РАЗ. Более того, поскольку уровни объёмной активности РБГ превышали пределы измерений стационарных систем контроля радиационной обстановки (КУРК-1, КДУС-1, КДУС-1М), то реальная радиационная обстановка оказывалась неизвестной, и дозу облучения личного состава приходилось восстанавливать ретроспективно в соответствии с имевшимися методическими разработками. Вот почему в период в 1960–1970-ые гг. в ряде организаций была выполнена серия работ по оценке формирования тканевой дозы в среде РБГ. Наиболее значимые исследования были проведены в Институте биофизики МЗ СССР [15]. Было показано, что облучение человека в условиях ограниченного объёма отсека АПЛ обусловлено β -излучением радионуклидов РБГ (в основном – ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe), а критическим органом является кожа, прежде всего ее герминативный слой на глубине 7 мг/см². Вклад γ -излучения РБГпренебрежимо мал, так же как мало и внутреннее облучение от РБГ. Для подтверждения расчётов были выполнены экспериментальные исследования по облучению фантома торса человека в ограниченном объеме. В эксперименте были использованы ^{85}Kr и ^{133}Xe . Расчётные значения тканевых доз удовлетворительно совпадали с результатами экспериментальных измерений, было подтверждено, что критическим органом оказывается кожа [16].

Были выполнены уникальные эксперименты с добровольцами, которые находились в замкнутом пространстве экспериментальной камеры, заполненной ^{85}Kr , а затем ^{133}Xe . Здесь также было получено удовлетворительное согласие с расчётом. Выявленные закономерности по накоплению, распределению в различных органах и тканях, а также выведению изотопов ^{85}Kr и ^{133}Xe позволили рассчитать тканевые дозы при поступлении РБГ внутрь организма, которые оказались пренебрежимо малы по сравнению с тканевой дозой на кожу от внешнего β -облучения РБГ. Проведённые эксперименты подтвердили, что основной вклад в формирование дозы облучения личного состава при аварийном поступлении РБГ в отсек вносит их β -излучение.

Таким образом, расчетная методика определения кожной дозы была надёжно верифицирована и в дальнейшем использовалась для ретроспективного восстановления дозы γ - и β -облучения личного состава [12].

В зависимости от состава топлива, типа аварии, сроков выработки энергоресурса ЯЭУ состав и количество изотопов РБГ, формирующих тканевую дозу, существенно меняется. Однако можно выбрать ряд возможных сценариев облучения и для них рассчитать тканевую дозу на кожу за счёт внешнего β -излучения. Такие расчёты были выполнены для 8 вариантов изотопного состава и двух сценариев облучения: 1) однократная протечка теплоносителя первого контура и однократное по-

ступление в отсек РБГ; 2) постоянные протечки и РБГ поступают в отсек периодически.

Как показали расчёты, в случае длительной течи парогенератора при постоянной концентрации РБГ в отсеке 1 мКи/м³ (37×10^6 Бк/м³), что часто имело место на практике, кожная доза за 7 сут облучения не превышала 0,2 Гр для одного из самых критических изотопных составов РБГ, т.е. подобные условия облучения не создавали критически значимых кожных доз облучения личного состава.

Другое дело – это крупные аварии, рассмотренные выше. В этом случае диапазон доз облучения весьма широк и определяется количеством вышедших в отсек продуктов деления, и в том числе РБГ, а также γ -излучением. Облучение личного состава является сочетанным и формируется за счёт внешнего β - и γ -излучения, и внутреннего облучения за счёт вышедших в отсек аэрозолей. Уровень дозовой нагрузки может достигать нескольких десятков грей. В этом случае развивается острая лучевая болезнь различной степени тяжести, отягощённая значительным поражением кожи.

Большие специальные исследования по формированию кожных доз в зависимости от условий облучения были проведены в 1 ЦНИИ МО СССР [3]. Показана важная роль кожи как критического органа в формировании радиационных поражений при авариях. Данные этих исследований положены в основу методических рекомендаций для восстановления радиационной обстановки на аварийной АПЛ. Эти методические рекомендации позволили восстановить данные по дозе облучения для каждого пострадавшего в результате аварии и определить тактику организации лечебного процесса при их госпитализации [12].

Радиационные поражения личного состава при аварийном облучении

Имевшие место теплотехнические аварии свидетельствуют о том, что формирование радиационной обстановки обусловлено наличием таких аварий двух типов. Это длительные незначительные протечки теплоносителя в парогенераторах с выходом преимущественно РБГ в отсек. Второй тип теплотехнических аварий обусловлен значительным поступлением продуктов деления в отсек с формированием значительной дозы γ - и β -облучения.

Основной вклад в формирование тканевой дозы при теплотехнической аварии ЯЭУ первого типа, когда имеет место преимущественное поступление РБГ в отсек, вносит внешнее β -излучение. Об этом свидетельствуют проведенные расчеты, показавшие, что независимо от состава топлива ЯЭУ, типа аварии, срока выработки ЯЭУ и количества радионуклидов РБГ, основная тканевая доза формируется в коже. Вклад РБГ в дозу составляет 80–97 %, вклад РАЗ ~ 2–3 % [3, 10, 11].

Следует подчеркнуть, что облучение человека при аварии со значительным поступлением теплоносителя в объем отсека существенно отличается от условий облучения человека в других ситуациях, биологические последствия которых подробно рассмотрены в ряде фундаментальных монографий [5, 10]. Это различие состоит в том, что облучению подвергается все тело со значительным поражением кожного покрова, что обуславливает специфические особенности течения лучевой болезни по сравнению со случаями, имевшими место при местных лучевых поражениях кожных покровов [17]. Однако каждая авария имела свои особенности развития, что нашло отражение и в формировании лучевой патологии.

Естественно, клиническое течение лучевых поражений в каждом отдельном случае зависит от условий, в

которых находился пострадавший в момент аварии, а именно, от времени с момента начала аварии и продолжительности нахождения в конкретном месте, а также от особенностей контакта с источниками β -излучения (на расстоянии от загрязненных поверхностей, намокание одежды и обуви и т.д.). Для людей, находившихся в относительно одинаковых условиях, характерно было и одинаковое или сходное течение имевших место лучевых поражений. Одной из особенностей описываемого сочетанного γ - β -поражения является то, что у каждого пострадавшего могут иметь место радиационные поражения кожи разной степени и на различных частях тела с выраженной волнообразностью течения патологического процесса.

Обобщая характер лучевых поражений при авариях ЯЭУ на АПЛ, следует отметить, что локализация и распространение радиационных поражений отличались определенной стереотипностью: «рисунок ожога» повторялся у каждого из пострадавших, но различия заключались в сроках их возникновения и степени прогрессирования в зависимости от дозы облучения, локализации и площади участков поражения.

Большое значение имеет степень радиочувствительности кожи отдельных областей тела. Известно, что наиболее радиочувствительной является кожа лица и шеи, где раньше всего, при наименьших дозах появляются признаки радиационного поражения в виде эритемы и всех последующих фаз развития патологического процесса. Наименьшая чувствительность характерна для кожи на разгибательных поверхностях рук и ног, но именно эти зоны чаще оказывались пораженными за счет контакта с намокшей одеждой, загрязненной радиоактивными веществами. Большие по площади участки быстрее прогрессируют в своем развитии, и медленнее и хуже восстанавливаются.

В первые один–два часа после облучения у всех пострадавших независимо от развивавшейся в дальнейшем степени тяжести ОЛБ отмечалась бледность кожных покровов, которая затем сменялась эритемой. Наиболее рано эта «ранняя эритема» возникала у больных ОЛБ 4-й степени – через 3–6 ч после облучения – на коже лица и шеи и без латентного периода сохранялась до возникновения «основной эритемы».

У больных с меньшей степенью тяжести ОЛБ ранняя эритема возникала на 1–2 ч позже и держалась менее продолжительно, иногда в течение всего одного дня. Закрытые одеждой участки кожи в эти ранние сроки имели нормальный вид. В течение 2-й и 3-й нед после облучения эритема на облученных участках возобновлялась – т.е. возникала вторичная – основная волна эритемы.

У наиболее тяжело пострадавших, и в единичных случаях у больных из числа легких, первая волна эритемы без скрытого периода переходила во вторую или главную волну. Яркая гиперемия уступала место более темной, застойной, развивался отёк дермы, что сопровождалось расширением зоны пораженного участка, развитием буллезных изменений. В случаях выраженного прогрессирования кожных поражений наблюдался подъём температуры тела и ухудшение общего состояния пострадавших.

Среди больных с наиболее легкими формами ОЛБ гиперемия открытых частей тела была наибольшей на 4–6-е сут после облучения и распространялась с лица на шею, открытую часть груди, но даже под самой легкой одеждой – рубахой, майкой, бельем разового пользования эритема отсутствовала. Эффект «экранирования» проявлялся у пострадавших с исключительной отчетли-

востью: на коже возникали отпечатки одежды и других предметов (ремешок от часов, многослойная ткань плавок, поясной ремень).

На 3-й нед у больных ОЛБ 4-й степени появлялись участки эритемы в различных областях кожи, находившихся во время облучения под одеждой. На 5-6-й нед эти изменения отмечались у больных ОЛБ 3-й степени и к концу 6-й нед – у больных ОЛБ 2-й степени, причем наиболее выраженными эти изменения были на участках под промокшой одеждой или обувью. Эта поздняя волна эритемы, связанная с поражением сосудов дермы, обусловлена воздействием β -излучения относительно высоких энергий (более 1 МэВ).

Топография поражения и сроки развития эритемы состояли в отчетливой связи не только с условиями облучения, но и с особенностями строения кожи на различных участках. Это прослеживалось, например, по характеру распространения эритемы в подмышечной области, на плече и бедре, на половых органах. Наиболее рано зона эритемы в подмышечной впадине появлялась в глубине ямки, хотя несомненно, что именно здесь наибольшим было частичное экранирование кожи рукой.

На фоне эритематозно-буллезных изменений у больных ОЛБ 4 и 3-й степени возникали очаги некроза, которые очень долго не заживали, нередко инфицировались, что сказывалось на общем состоянии больного.

Примером может служить наблюдение лучевого поражения области голени у единственного выжившего больного из числа больных с ОЛБ крайне тяжелой степени (1968 г.). До 18-х сут у него никаких субъективных и объективных данных о радиационном поражении кожи в области голеней не было. На 18-е сут одновременно на правой и левой голени возникла эритема, которая распространилась совершенно симметрично. Разница возникла в начале 2-го мес, когда на левой голени стало наблюдаться восстановление кожного покрова, а в нижней трети правой голени после отторжения покрышек пузьрей образовалась язва. В дальнейшем плохо гранулировавшаяся поверхность язвы значительно расширилась, дно ее углубилось, края стали утолщенными и «подрытыми». Из раны высевалась синегнойная палочка и патогенный стафилококк. Все попытки консервативного лечения были неэффективными. Жизнь больного была под угрозой в связи с развивающимся хирургическим сепсисом. На 120-е сут по жизненным показаниям была проведена ампутация правой ноги, после чего состояние больного стало улучшаться. Заживление кожи на пораженных участках сопровождалось появлением пигментации, сохранявшейся и после стихания всех воспалительных явлений. Кожа на местах поражений 2-ой степени выглядела истонченной, и приобретала пестрый вид благодаря чередованию участков гипер- и депигментации. Позднее на этих участках наряду с атрофическими изменениями появлялись гиперкератозы и множественные телеангиоэктазии, кожа отличалась повышенной сухостью и постоянным шелушением, на ней легко образовывались длительно незаживающие ссадины. Эпилияция возникала у всех больных ОЛБ 4, 3 и 2-ой степени, т. е. при дозе выше 3,0 Гр и начиналась с 12–15-х сут болезни. Восстановление волосистого покрова начиналось в конце 2-го – 3-м мес заболевания.

Как отмечено выше, кроме пяти значимых теплотехнических аварий на АПЛ имели место три реактивных аварии с ЯЭУ, и все они произошли при проведении ремонтных работ на СРЗ. Эти аварии связаны с формированием НЦР. Анализ последствий этих аварий свидетельствует о том, что наряду с лучевыми поражениями

часть пострадавших имели механические травмы, т.е. комбинированные поражения.

Так, при аварии на «К-11» в 1965 г. поражений, приведших к формированию радиационной патологии, не было. У 9 чел имело место повышенное облучение, а также у них отмечалось поступление радионуклидов в организм.

При аварии на «К-320» в 1970 г. вследствие НЦР пострадало 7 чел. Из них у 4 имело место формирование радиационных поражений вследствие воздействия внешнего γ - и нейтронного излучения, а у трех были комбинированные поражения, приведшие к летальным исходам.

Таким образом, сравнивая медицинские последствия при авариях, связанных с возникновением НЦР, с медицинскими последствиями при теплотехнических авариях, можно заключить, что они качественно отличались. Если при теплотехнических авариях особенностю ОЛБ являются радиационные поражения кожи, то при НЦР ведущим радиационным фактором является внешнее облучение, а также, как правило, воздействует и фактор механического воздействия с формированием механической травмы. Это приводит, как показала практика, к формированию комбинированных поражений.

Выводы

- На АПЛ имели место аварии двух типов – это теплотехнические, связанные с нарушением теплоотвода из активной зоны, и аварии, связанные с формированием НЦР. При теплотехнических авариях поражения личного состава в основном носили сочетанный характер, а при авариях, связанных с формированием НЦР, наряду с сочетанным облучением имели место комбинированные поражения.
- Анализ медицинских последствий теплотехнических аварий показал, что в основном имело место внешнее γ - и β -облучение и поступления вовнутрь организма радиоактивных аэрозолей, при этом ведущим фактором было внешнее β -облучение, обусловленное РБГ.
- При авариях, связанных с формированием НЦР, ведущим радиационным фактором было внешнее γ -облучение в моменте вспышки НЦР, и если имел место тепловой взрыв на организм человека, воздействовал и механический фактор, приводящий к формированию механической травмы.
- В результате имевших место пяти теплотехнических и трех аварий, связанных с возникновением НЦР, ОЛБ различной степени тяжести сформировалась у 203 чел., из них погибло 25 чел., включая 10 чел., получивших комбинированные поражения вследствие НЦР и механической травмы [3].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Мормуль Н.Г. Катастрофы под водой (Гибель подводных лодок в эпоху «холодной войны»). СПб.: Из-во Политехн. Ун-та, 2010. 544 с.
- Алексин В. Флот и аварийность // Морской сборник. 1992. № 10. С. 37–42.
- Шараевский Г., Беликов А., Петров О., Лисовский И. Радиологические и радиоэкологические последствия аварий корабельных атомных энергетических установок // Морской сборник. 1999. № 7. С. 52–57.
- Соловьев В.Ю., Барабанова А.В., Бушманов А.Ю., Гуськова А.К., Ильин Л.А. Анализ медицинских последствий радиационных инцидентов на территории бывшего СССР (по материалам регистра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2013. Т.58, № 1. С. 36–42.
- Пострадавшие при радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г. Ч.1 // Острая лучевая болезнь человека. Атлас. Под ред. Самойлова А.С., Соловьева В.Ю. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. 2016. 140 с.
- Осипенко Л.Г., Жильцов Л.М., Мормуль Н.Г. Атомная подводная эпопея. Подвиги, неудачи, катастрофы. М.: Издательство АО «Боргес». 1994. 350 с.
- Финюкова М.Г. Вахта памяти (авария на сормовской подводной лодке 18 янв. 1970 г.) // Красный Сормович. 2010. № 1. С. 3.
- Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Д., Данилян В.А. Радиоэкологические последствия радиационной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажме // Атомная энергия. 1994. Т. 76, № 2. С. 158–160.
- Боднарчук В.И. К-19. Рождающая мифы. Севастополь: СНУЯЭИП, 2013. 364 с.
- Гогин Е.Е., Емельяненко В.М., Бенецкий Б.А., Филатов В.Н. Сочетанные радиационные поражения. М.: ППО «Известия», 2000. 240 с.
- Величкин Е., Петров О., Саленко Ю. Опыт медицинского обеспечения при радиационной аварии на ПЛА «К-19» // Морской сборник. 2006. № 6. С. 62–67.
- Диагностика радиационных поражений: методические рекомендации // Под ред. Петрова О.И. М.: Воениздат, 1994. 71 с.
- Васильев А.А. Авария на ПЛА К-11. Электронный ресурс: <http://avtonomka.org/component/k2/1011-авария-на-к-11.html>.
- Сивинцев Ю.В. Была ли авария в Чажме дальневосточным Чернобылем? // Атомная энергия. 2002. Т. 94, № 6. С. 472–479.
- Туркин А.Д. Сборник работ по некоторым вопросам дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1961. № 2. С. 137.
- Туркин А.Д. и др. Изучение распределения тканевых доз, создаваемых в теле человека инертными радиоактивными газами // Материалы доклада на конференции в ИБФ. 1967.
- Надежина Н.М., Галстян И.А. Лечение местных лучевых поражений: монография. М.: ФМБЦ им. А.И.Бурназяна, 2013. 99 с.

REFERENCES:

- Mormul N.G. Katastrofy pod Vodoy (Gibel Podvodnykh Lodoek v Epokhu «Kholodnoy Voyny») = Disasters under Water (Death of Submarines in the Era of the Cold War). St. Petersburg Publ., 2010. 544 p. (In Russ.).
- Aleksin V. Fleet and Accident Rate. Morskoy Sbornik. 1992;10:37–42 (In Russ.).
- Sharayevskiy G., Belikov A., Petrov O., Lisovskiy I. Radiological and Radioecological Consequences of Accidents of Shipboard Nuclear Power Plants. Morskoy Sbornik. 1999;7:52–57 (In Russ.).
- Solovyev V.Yu., Barabanova A.V., Bushmanov A.Yu., Gus'kova A.K., Ilin L.A. Review of the Radiation Accidents Consequences in the Former USSR Territory (Burnasyan FMBC of FMBB of Russia Register Data) Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety. 2013;58:1:36–42 (In Russ.).
- Victims of the Radiation Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant in 1986. Part I. Ostraya Luchevaya Bolezn Cheloveka. Atlas. = Acute Radiation Sickness in Humans. Atlas. Ed. Samoilov A.S., Solovyov V.Yu. Moscow, A.I. Burnazyana FMBC Publ., 2016. 140 p. (In Russ.).
- Osipenko L.G., Zhiltsov L.M., Mormul N.G. Atomnaya Podvodnaya Epopeya. Podvigi, Neudachi, Katastrofy = Nuclear Submarine Epic. Exploits, Failures, Catastrophes. Moscow Publ., 1994. 350 p. (In Russ.).

7. Finyukova M.G. Watch of Memory (Accident on the Sormovo Submarine on 18 Jan. 1970). *Krasnyy Sormovich*. 2010;1:3 (In Russ.).
8. Sivintsev Yu.V., Vysotskiy V.D., Danilyan V.A. Radioecological Consequences of a Radiation Accident on a Nuclear Submarine in Chazhma Bay. *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 1994;76:2:158-160 (In Russ.).
9. Bodnarchuk V.I. *K-19. Rozhdayushchaya Mif* = K-19. Generating Myths. Sevastopol Publ., 2013. 364 p. (In Russ.).
10. Gogin E.E., Emelyanenko V.M., Benetskiy B.A., Filatov V.N. *Sochetannyye Radiatsionnyye Porazheniya* = Combined Radiation Injuries. Moscow Publ., 2000. 240 p. (In Russ.).
11. Velichkin E., Petrov O., Salenko Yu. Experience of Medical Support During a Radiation Accident on the K-19 Submarine. *Morskoy Sbornik*. 2006;6:62-67 (In Russ.).
12. *Diagnostika Radiatsionnykh Porazheniy* = Diagnosis of Radiation Injuries. Guidelines. Ed. Petrova O.I. Moscow Publ., 1994. 71 p. (In Russ.).
13. Vasilyev A.A. Accident on the Submarine K-11. URL: <http://avtonomka.org/component/k2/1011-авария-на-к-11.html>. (In Russ.).
14. Sivintsev Yu.V. Was the Chazhma Accident a Far Eastern Chernobyl? *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 2002;94;6:472-479 (In Russ.).
15. Turkin A.D. *Sbornik Rabot po Nekotorym Voprosam Dozimetrii i Radiometrii Ioniziruyushchikh Izlucheniy* = Collection of Works on Some Issues of Dosimetry and Radiometry of Ionizing Radiation. Moscow, Atomizdat Publ., 1961;2:137 (In Russ.).
16. Turkin A.D., et al. Study of the Distribution of Tissue Doses Created in the Human Body by Inert Radioactive Gases. Materials of a Report at a Conference at the IBP. 1967 (In Russ.).
17. Nadezhina N.M., Galstyan I.A. *Lecheniye Mestnykh Luchevykh Porazheniy* = Treatment of Local Radiation Injuries. Monograph. Moscow, A.I. Burnazyana FMBC Publ., 2013. 99 p. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.07.2023. Принята к публикации: 27.08.2023.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.07.2023. Accepted for publication: 27.08.2023.