

# Клинико-патогенетические особенности радиационного поражения нервной системы (лекция)

В.А. Кузина<sup>1</sup>, О.А. Кичерова<sup>1</sup>, П.Б. Зотов<sup>1</sup>, Ю.И. Доян<sup>1,2</sup>,  
Л.И. Рейхерт<sup>1</sup>, Е.П. Гарагашева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тюменский государственный медицинский университет

<sup>2</sup>Областная клиническая больница № 2, Тюмень

## Clinical and pathogenetic features of radiation damage to the nervous system (lecture)

V. Kuzina<sup>1</sup>, O. Kicherova<sup>1</sup>, P. Zotov<sup>1</sup>, Yu. Doyan<sup>1,2</sup>,  
L. Reikherth<sup>1</sup>, E. Garagasheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tyumen State Medical University

<sup>2</sup>Regional Clinical Hospital N 2, Tyumen

© Коллектив авторов, 2024 г.

### Резюме

В современном мире в связи с возрастающей угрозой применения ядерного оружия актуальной становится проблема влияния радиации на человеческий организм и, в частности, нервную систему. Исторически термин «радиация» используется для обозначения одного из многочисленных видов излучения — ионизирующего. Ионизация представляет собой процесс отделения электрона от атома или молекулы с нарушением их структуры и образование свободных радикалов, обладающих высокой реакционной способностью. Авторы приводят данные об источниках ионизирующего излучения, дают характеристику видам излучения и особенностям их воздействия на организм. Описываются факторы, оказывающие влияние на особенности патогенеза и разнообразие клинической симптоматики (тип и энергия ионизирующих излучений, интенсивность дозы, степень чувствительности клеток и тканей и т.п.). Особое внимание в лекции уделяется вопросу радиационных поражений нервной системы: перечисляются причины, патогенетические механизмы воздействия на нервные структуры, описываются виды и особенности возникающих под влиянием радиации изменений

в центральной нервной системе. Указываются особенности воздействия различных доз радиации, а также структурные и функциональные изменения в различных отделах нервной системы. Подчеркивается, что симптомы и последствия поражения могут различаться в зависимости от формы облучения и того, какие структуры нервной системы больше подвержены изменениям. Приводится подробный обзор литературных данных по неврологическим проявлениям острой и хронической лучевой болезни. Описываются стадии процесса, степени тяжести, а также типичные неврологические симптомы. Отдельное внимание уделяется особенностям психической патологии, девиантных и аддитивных форм поведения. В заключении описываются методы лечения радиационных поражений нервной системы на разных стадиях патологического процесса, описываются меры первой помощи и первичного лечения, а также мероприятия стационарного этапа, методы специализированной помощи и тактика в период восстановления. В целом понимание механизмов воздействия радиации на нервные клетки способствует разработке эффективных мер защиты нервной системы от ее негативного влияния.

**Ключевые слова:** радиоактивность, радиация, ядерные излучения, лучевая болезнь, острая радиационная энцефалопатия

### Summary

In the modern world, due to the growing threat of the use of nuclear weapons, the problem of the influence of radiation on the human body and, in particular, the nervous system becomes relevant. Historically, the term “radiation” is used to refer to one of the many types of radiation — ionizing. Ionization is the process of separating an electron from an atom or molecule, disrupting its structure and producing free radicals that are highly reactive. The authors provide data on sources of ionizing radiation, characterize the types of radiation and the characteristics of their effects on the body. The factors influencing the features of pathogenesis and the variety of clinical symptoms (type and energy of ionizing radiation, dose intensity, degree of sensitivity of cells and tissues, etc.) are described. Particular attention in the lecture is paid to the issue of radiation damage to the nervous system: the causes and pathogenetic mechanisms of effects on nervous structures are listed, the types and characteristics of changes in the central nervous system that occur under

the influence of radiation are described. The features of the effects of various doses of radiation, as well as structural and functional changes in various parts of the nervous system are indicated. It is emphasized that the symptoms and consequences of damage may vary depending on the form of irradiation and the structures of the nervous system that are more susceptible to changes. A detailed review of the literature data on the neurological manifestations of acute and chronic radiation sickness is provided. The stages of the process, degrees of severity, as well as typical neurological symptoms are described. Special attention is paid to the characteristics of mental pathology, deviant and addictive forms of behavior. In conclusion, methods for treating radiation damage to the nervous system at different stages of the pathological process, first aid and primary treatment measures are described, as well as inpatient measures, methods of specialized care and tactics during the recovery period. In general, understanding the mechanisms of the effects of radiation on nerve cells contributes to the development of effective measures to protect the nervous system from its negative effects.

**Keywords:** radioactivity, radiation, nuclear radiation, radiation sickness, acute radiation encephalopathy

### Актуальность проблемы

Несмотря на то что радиоактивность существовала на Земле задолго до возникновения жизни, живой мир ранее не подвергался воздействию высоких доз ионизирующих излучений, поэтому в ходе эволюции не сформировались ни специфические органы восприятия этого вида воздействия, ни механизмы защиты. Между тем с развитием технологий человечество стало сталкиваться с искусственными источниками ионизирующего излучения, такими как рентгеновские лучи, гамма-излучение и другие формы радиации. Это явилось результатом использования ядерных технологий, медицинских процедур, промышленных процессов и других видов деятельности, что привело к увеличению дозы облучения не только у отдельного человека, но и в целом у населения земного шара [1–3].

В современном мире в связи с возрастанием количества очагов военных конфликтов, особенно с привлечением потенциала ядерных держав и все возрастающей угрозой применения ядерного оружия тема поражающего действия ядерного излучения становится особенно актуальной.

Радиация, являющаяся неотъемлемой частью нашей современной жизни, оказывает влияние на организм в целом, а особенно на нервную систему, что представляет собой сложную и актуальную пробле-

му. Осознание механизмов воздействия радиации на нервные клетки, их эффектов и методов профилактики помогает лучше понимать риски и принимать меры для защиты нервной системы от негативных воздействий радиации.

Радиация (от лат. *radiatio*) означает «сияние» или «блеск» и включает разнообразные виды излучений. Однако исторически этот термин стал употребляться для обозначения определенного вида излучения — ионизирующего [1], представляющего собой излучение радиоактивных лучей, которые при взаимодействии с веществом передают ему энергию, вызывающую ионизацию атомов или молекул. Ионизацией называют процесс отделения электрона от атома или молекулы, что приводит к нарушению их структуры и образованию свободных радикалов, которые обладают высокой реакционной активностью и могут вызывать оксидативный стресс [4].

### Радиация: источники, виды и воздействие на организм

Все виды излучений разделяются на корпускулярные и электромагнитные (или фотонные).

К корпускулярным излучениям относят:

- альфа-излучение ( $\alpha$ ), состоящее из альфа-частиц и представляющее собой ядра гелия (2 протона и 2 нейтрона);

- бета-излучение ( $\beta^-$ ), включающее электроны (бета-частицы), которые испускаются в результате радиоактивного распада ядер;
- позитроны ( $\beta^+$ ): это античастицы электронов, которые также могут быть испущены при радиоактивном распаде;
- протоны ( $P^+$ ): являются частицами с положительным зарядом и массой, состоящей из кварков;
- нейтроны ( $n^0$ ) и другие разновидности: нейтроны являются частицами без заряда и представляют собой ключевой компонент атомных ядер.

*Электромагнитные (фотонные) излучения* включают:

- квантовое гамма ( $\gamma$ ): это высокоэнергетические фотоны, испускаемые ядрами атомов при ядерных реакциях или распадах;
- рентгеновское излучение: включает фотоны, обладающие меньшей энергией по сравнению с гамма-излучением.

Каждый из этих видов излучений оказывает различное воздействие на ткани и органы человеческого организма. Особенности воздействия радиационных поражений зависят от типа и энергии ионизирующих излучений, а также от интенсивности дозы и распределения в организме человека, что приводит к разнообразию патогенеза и клинической симптоматики [1]. Все радиоактивные излучения обладают общими характеристиками, среди которых выделяются два основных свойства: проникающая и ионизирующая способность. Совокупность этих свойств определяет их воздействие на окружающую среду [5].

Ядерные излучения способны проникать через различные материалы, включая воздух, воду и биологические ткани. В то время как некоторые виды излучений могут быть остановлены толстым слоем материала, другие способны преодолевать большие расстояния и имеют высокую проникающую способность. Ионизирующая способность является ключевой особенностью ядерных излучений, которые обладают свойством вырывать электроны из атомов и молекул вещества, создавая ионы и свободные радикалы. Этот процесс может воздействовать на химические реакции и структуру биологических молекул. При прохождении через среду часть энергии радиоактивных излучений поглощается этой средой. Измерение поглощенной дозы излучения является основой для оценки его воздействия на окружающее вещество, а также на биологические системы.

Выявлена общая закономерность: чем более высоко организован организм, тем он более подвержен воздействию радиации. Степень чувствительности к радиации может изменяться не только в рамках одного вида, но и внутри конкретного организма, так как клетки и ткани могут различаться по своей радиочувствительности. В этом контексте для корректной оцен-

ки последствий облучения для организма человека следует учитывать радиочувствительность на разных уровнях [5–7].

На уровне клеток факторы, такие как организация генома, эффективность системы репарации ДНК, наличие антиоксидантов и интенсивность окислительно-восстановительных процессов, влияют на их радиочувствительность.

На уровне тканей действует правило Бергонье–Трибондо: чувствительность тканей к радиации прямо пропорциональна их способности к активному делению и обратно пропорциональна степени их дифференцировки.

На уровне органов радиочувствительность обусловлена не только чувствительностью составляющих их тканей, но и их функциональными характеристиками. У взрослого человека большинство тканей относительно устойчивы к воздействию радиации. Например, почки без значительного вреда могут выдержать суммарную дозу радиации равную 23 Гр, полученную в течение 5 нед. Печень устойчива к дозе 40 Гр за месяц, а мочевой пузырь выдерживает до 55 Гр, полученных в течение 4 нед. Зрелая хрящевая ткань допускает дозу до 70 Гр. Нервная ткань высокоспециализирована и обладает радиорезистентностью. Она более устойчива к радиации в сравнении с другими тканями. Тем не менее, если дозы облучения превышают 100 Гр, наблюдается гибель клеток нейронов [2].

Эти особенности радиочувствительности органов связаны с их спецификой функций, структурой и регенеративными возможностями. Разнообразие радиочувствительности разных тканей оказывает важное влияние на клиническую картину после воздействия радиации [1, 2].

## Причины радиационных поражений нервной системы

Поражение нервной системы радиацией основано на острой или хронической экспозиции ионизирующему излучению. Это излучение может быть внешним, когда человек подвергается воздействию извне, или внутренним, когда радиоактивные вещества попадают в организм через воду, пищу или воздух (редко — через кожу) [8].

Существует несколько потенциальных причин радиационного поражения центральной нервной системы:

- прямая работа с радиоактивными веществами (работники атомных электростанций, исследовательских центров, заводов, использующих радиоактивные элементы, ученые, занимающиеся разработкой ядерного оружия);
- работа с медицинским оборудованием (врачи, проводящие лучевую терапию, и пациенты, получающие радиационное лечение от рака);

- пребывание в зараженной области (зоны ядерных испытаний или места техногенных катастроф, в которых фигурируют радиоактивные элементы).

### Патогенез поражения нервной системы

При облучении головного мозга дозами 10–30 Гр наблюдается ингибирование окислительного фосфорилирования. Возможно, это связано с острым дефицитом АТФ, который играет важную роль в восстановлении поврежденной ДНК [9].

Первичные изменения, которые происходят в центральной нервной системе при радиационном повреждении с дозой до 50 Гр, сосредотачиваются в синапсах, где происходит «связывание» везикул медиаторов, находящихся в конечных участках пресинаптической мембраны или в синаптическом пространстве. В результате возникает отек клеток нервной системы и происходит пикноз (сжатие и плотное уплотнение) зернистых клеток мозжечка и инфильтрация гранулоцитами. Указанные изменения представляют собой проявление таких патологических процессов, как васкулит, менингит, а также воспаление сосудистых сплетений желудочков головного мозга.

Когда нервная система облучается одновременно дозой более 50 Гр, это вызывает непосредственное разрушительное воздействие на нейроны. Подобные дозы приводят к множественным повреждениям нуклеарного хроматина и чрезмерной активации ферментов, ответственных за репарацию ДНК. Реакции ДНК-лигазы в таких условиях характеризуются расщеплением АТФ на АДФ, что, в свою очередь, совместно с ферментом АДФ-трансферазой вызывает стремительное истощение внутриклеточного запаса НАД<sup>+</sup>, выполняющей роль кофермента в клеточном дыхании, глюкозном обмене и синтезе АТФ [10].

### Структурные и функциональные изменения в центральной нервной системе под действием ионизирующего излучения

Влияние ионизирующего излучения на головной мозг реализуется двумя основными механизмами: посредством прямого его повреждения, а также за счет воздействия на астроцитарно-капиллярный комплекс [2, 9]. Прямое повреждение нейронов и других клеток мозга оказывает серьезное воздействие на их нормальное функционирование. Влияние на астроцитарно-капиллярный комплекс не менее важно, поскольку тесно связано с трофическими и обменными

процессами в головном мозге, что в свою очередь также может неблагоприятно сказаться на нормальной деятельности нервных клеток. Кроме того, понимание того, как ионизирующее излучение воздействует на межнейронные контакты, имеет большое значение для объяснения изменений в передаче нервных сигналов и функционировании мозга в целом.

В большинстве научных исследований зарегистрированы увеличение размеров и отек нейроцитов в различных областях центральной нервной системы в первые часы и сутки после облучения. Между тем, понимание роли этих изменений в механизме ранней лучевой гибели вызывает разногласия среди ученых. Некоторые исследователи акцентируют внимание на значимости отека мозга, в то время как другие не рассматривают его как главную причину патологического процесса.

Изменения гематоэнцефалического барьера (ГЭБ), особенно связанные с эндотелием мозговых сосудов, действительно имеют большое значение в развитии радиационных поражений нервной системы. Эндотелиальные клетки играют важную роль в поддержании барьера между кровью и мозгом, и их повреждение может привести к нарушениям проницаемости барьера и другим патологическим изменениям.

В целом величина дозы, ее распределение во времени и пространстве, наряду со степенью зрелости мозга к моменту облучения, оказывают существенное влияние на развитие радиационных повреждений нервной системы.

Исследования в данной области часто проводятся на людях, которые подверглись облучению в результате несчастных случаев на атомных предприятиях, радиотерапии при онкологических заболеваниях или в ходе трансплантационных программ. Эти исследования позволяют лучше понять, как радиационное воздействие может влиять на нервную систему человека [10–12].

Важно подчеркнуть, что механизмы взаимодействия могут проявляться по-разному в зависимости от характера облучения, его дозы, распределения и типа. Симптомы и последствия могут также различаться в зависимости от формы облучения и того, какие структуры нервной системы более подвержены изменениям. В некоторых случаях нарушения нервной системы могут играть ведущую роль в заболевании, в других они могут быть менее выраженными и даже незаметными.

С учетом сложности этой темы исследования в данной области будут продолжаться для более глубокого понимания эффектов радиационного воздействия на нервную систему и разработки подходов к предотвращению или уменьшению его негативных последствий.

## Неврологические нарушения при острой лучевой болезни

В литературе имеется достаточно много данных, касающихся неврологических проявлений острой лучевой болезни (ОЛБ) [13], которые были получены преимущественно в ходе исследований жертв атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, а также жителей Маршалловых островов, пострадавших от испытания водородной бомбы в атолле Бикини.

Типичными симптомами ОЛБ являются: общая слабость, головные боли, головокружение, тошнота, рвота, понос, нарушения сна и парестезии в конечностях. Эти и другие симптомы представляют собой реакцию организма на воздействие радиации и могут носить временный характер [14]. Однако, несмотря на ограниченность данных и сложность анализа, понимание неврологических аспектов радиационных поражений важно для определения и разработки методов лечения и поддержки пациентов, которые подверглись облучению [13–16].

При ОЛБ легкой и средней степени тяжести (дозы до 3–4 Гр) преимущественно страдает нервно-висцеральная регуляция, следствием которой является общая астенизация, изменение настроения, аппетита; может развиваться сонливость и другие общие симптомы. В таких случаях неврологические проявления могут быть менее выраженными, чем при более высоких дозах облучения.

При тяжелой степени ОЛБ, когда средняя доза облучения составляет более 4–6 Гр, основными неврологическими симптомами являются:

- общезлобовые и оболочечные симптомы, включающие головную боль, головокружение, боли в области глаз, снижение зрения, фотофобию, метеозависимость и другие проявления, связанные с поражением центральной нервной системы;
- вегетативные расстройства включают изменения в работе автономной нервной системы, такие как изменения сердечного ритма, артериальное давление, потливость, нарушения терморегуляции и другие симптомы;
- очаговые и рассеянные церебральные микросимптомы включают нарушения координации движений, боли в различных частях тела, судороги и другие проявления, связанные с повреждением отдельных участков головного мозга;
- координаторные нарушения включают потерю равновесия, нестабильность при ходьбе и другие нарушения координации движений.

В ходе развития ОЛБ у больных происходят изменения в неврологических симптомах, которые проходят через несколько периодов [16].

- Первичная реакция у больных возникает в течение 10–60 мин после облучения и выражается общей слабостью, быстрой утомляемостью, головной болью, головокружением, тошнотой, рвотой и общей гиперестезией. В зависимости от того, как быстро развиваются указанные симптомы, и степени их выраженности уже на этой стадии можно сделать прогноз о тяжести ОЛБ [17].

При облучении высокими дозами может наблюдаться временное помрачение сознания, оглушенность и в редких случаях — двигательное беспокойство. При оценке неврологического статуса может выявляться болезненность тригеминальных, окципитальных и сосудистых точек. Эти симптомы и признаки служат индикаторами степени тяжести поражения и могут быть использованы в диагностике острой лучевой болезни [16].

- Во втором периоде, так называемом периоде «мнимого благополучия», наблюдается уменьшение выраженности менингеальных и общезлобовых симптомов.
- В третьем периоде, когда наблюдается «разгар заболевания» на фоне выраженной клинической картины ОЛБ, общезлобовые и менингеальные симптомы вновь усиливаются. На этой стадии начинает формироваться отек головного мозга, который может иметь разную степень выраженности. Очаговая неврологическая симптоматика проявляется в виде асимметрии рефлексов, появлении патологических знаков, нарушается функция черепных нервов. На фоне нарастающей мышечной гипотонии развиваются расстройства статики и координации. В этот период особенно ярко проявляются вегетативные нарушения в виде лабильности пульса и артериального давления, нарушается терморегуляция и формируются патологические кожно-сосудистые реакции. Описанные нарушения характеризуются термином «паренхиматозно-оболочечный синдром».
- Четвертый период, характеризуемый восстановлением кроветворения, проявляется медленным восстановлением нарушенных функций. На фоне улучшения общего состояния исчезают общезлобовые симптомы, однако вегетативная дисфункция и астенизация могут сохраняться длительное время.

## Неврологические нарушения при хронической лучевой болезни

При наблюдениях в течении длительного периода за лицами, длительное время подвергавшимися хроническому профессиональному облучению либо

пребывающих на зараженной территории и получавших облучение в дозах до 0,05 Гр в год, были установлены и систематизированы неврологические нарушения, типичные для хронической лучевой болезни (ХЛБ). Указанные нарушения были объединены в соответствующие симптомокомплексы. Так, было показано наличие функциональных отклонений от нормы в работе многих систем, включая нервную, при суммарных накопленных дозах порядка 0,50–0,75 Гр. Данные различных исследователей позволили охарактеризовать данные отклонения как компенсаторные, не выходящие за пределы расширенных физиологических норм и не влияющие на трудоспособность [16].

Установлено, что хроническая лучевая болезнь может развиваться при длительном воздействии внешнего или внутреннего облучения дозами, превышающими предельно допустимые для профессионального облучения (5 сЗ в год). Кроме этого, перенесенная острая лучевая болезнь может стать пусковым фактором для развития ХЛБ.

При ХЛБ неврологические симптомокомплексы появляются обычно в определенной последовательности.

**Синдром нейрососудистой и нейровисцеральной дисрегуляции имеет следующие особенности:** асимметричную гиперрефлексию (сухожильных и кожных рефлексов); преходящие вестибулярные, окуловестибулярные и окулостатические расстройства; отсутствие типичных нервно-соматических признаков преимущественной локализации процесса в диэнцефальной области; жалобы пациентов на нарушение адаптации к физическим нагрузкам, головные боли, головокружение, утомляемость; лабильность изменений; нормальную биоэлектрическую активность коры головного мозга.

**Астенический синдром** характеризуется значительным снижением функциональной активности нервной системы и внутренних органов по сравнению с фазой нервно-вегетативной дисрегуляции. Лица, страдающие астеническим синдромом после воздействия радиации, характеризуются повышенной физической и, в меньшей степени, психической истощаемостью. Для них характерно ухудшение самочувствия преимущественно во второй половине дня, при длительной физической нагрузке или напряжении, требующем активного усилия торможения. В отдаленном периоде на фоне неблагоприятных травмирующих факторов или инволюционных изменений могут возникнуть типичные невротические реакции с изменением поведения.

**Демиелинизирующий энцефаломиелоз или токсическая энцефалопатия.** Данные нарушения формируются постепенно и включают общую слабость, ухудшение памяти, нарушение ритма сон–бодрство-

вание, головную боль, головокружение, шаткость при ходьбе, нарушение функций черепных нервов (III, VII, XII пар), двигательные и чувствительные нарушения. Дисфункция гипофизарно-диэнцефальной системы проявляется нарушениями терморегуляции, обмена веществ, пищевого рефлекса, трофики. У некоторых пациентов могут преобладать симптомы хронической недостаточности мозгового кровообращения. Органические симптомы могут стабилизироваться или исчезнуть, но периодически декомпенсируются под воздействием различных факторов, таких как физические нагрузки или инфекции.

**Диэнцефальный синдром** может развиваться на фоне развернутого симптомокомплекса ХЛБ или возникать спустя 1–2 года после постановки диагноза. Характерными являются жалобы на головную боль, усиленную потливость, сердцебиение или боли в области сердца, приливы жара и приступы озноба, а также похолодание дистальных отделов конечностей. Кроме того, возможны нарушения сна, памяти, раздражительность, истощаемость, неустойчивость настроения. Может наблюдаться пароксизмальное чувство голода, частое и обильное мочеиспускание, расстройства менструального цикла и полового влечения.

**Остеоалгический синдром** характеризуется постепенно нарастающей болью в костях голени, предплечий и позвоночнике, неприятными ощущениями в мышцах и связках конечностей. Может нарушаться потоотделение, особенно в дистальных отделах конечностей.

Эти синдромы могут проявляться различными неврологическими симптомами и отклонениями в функционировании различных систем организма. Приблизительно в 62% случаев больных ХЛБ наблюдается хотя бы один из этих синдромов, при этом наибольшая частота клинических проявлений фиксируется в течение первых 10–15 лет контакта с радиационным фактором, особенно в неблагоприятных условиях.

Достижения психогенетики [18, 19] также свидетельствуют о том, что длительные негативные воздействия на субклеточном уровне не проходят бесследно и для психики. Хроническое лучевое воздействие может рассматриваться как дополнительный фактор, влияющий на развитие психической патологии, девиантных и аддиктивных форм поведения [20–22].

## Лечение радиационных поражений нервной системы

Лечение радиационной болезни требует комплексного и многоступенчатого подхода [23–26]. Процесс лечения может включать следующие этапы.

**Первая помощь и первичное лечение.** На этом этапе важно оказать медицинскую помощь немедленно после воздействия радиации. Это включает эвакуацию из зоны радиационного загрязнения, симптоматическое лечение с противорвотными, обезболивающими и другими препаратами для облегчения неврологических симптомов, а также восстановление общециркуляторного кровотока (ОЦК).

**Стационарное лечение.** Пациенты, нуждающиеся в долгосрочной медицинской помощи, переводятся в стационар. Здесь проводится более детальное лечение, включая назначение антибиотиков для профилактики инфекций, коррекцию электролитного и жидкостного баланса, а также другие медикаментозные меры.

**Специализированная помощь.** На этом этапе применяются специализированные методы лечения, направленные на улучшение состояния пациента. Они включают переливание крови или ее компонентов, коррекцию нарушений функции ствола, использование антибиотиков и других лекарственных средств для облегчения симптомов.

**Период восстановления.** После активной фазы лечения начинается период восстановления. Физиотерапевтические процедуры, такие как массаж, упражнения и физиотерапия, направлены на восстановление функции нервной системы и общего здоровья пациента.

Целью всех этих этапов является не только купирование неврологических симптомов, но и предотвращение возникновения вторичных осложнений, а также улучшение качества жизни пациента [27–30].

## Заключение

Таким образом, радиационные поражения могут иметь разнообразные неврологические аспекты и симптомы, и их проявления действительно зависят от нескольких ключевых факторов.

**Доза излучения.** Степень воздействия радиации на нервную систему в значительной степени зависит от дозы полученного излучения. Высокие дозы могут вызвать более серьезные и быстро развивающиеся неврологические симптомы.

**Тип излучения.** Различные типы радиации (например, альфа, бета, гамма) оказывают разное воздействие на организм. От типа излучения зависят глубина проникновения радиации и ее воздействие на разные органы и ткани.

**Распределение дозы.** Распределение дозы излучения по тканям и органам может быть неравномерным. Это способно привести к разнообразным неврологическим симптомам в зависимости от того, какие части нервной системы получили большую дозу.

**Индивидуальная чувствительность.** Уровень чувствительности организма к радиации может различаться. Некоторые люди могут проявлять более выраженные неврологические симптомы при одной и той же дозе радиации, чем другие.

Понимание всех этих факторов позволяет оценить степень риска и разработать соответствующие стратегии защиты и лечения при радиационных поражениях [31–35].

## Список литературы

1. Федоров В.П. Медико-биологические аспекты церебральных последствий радиационных аварий. Экосистемы 2023; 34: 207–214 [Fedorov V.P. Medical and biological aspects of cerebral consequences of radiation accidents. *Jekosistemy* 2023; 34: 207–214 (In Russ.)].
2. Пенионжкевич Ю.Э. Ядерная энергетика. Вестник международной академии наук (русская секция) 2022; 1: 69–75 [Penionzhkevich Ju. Je. Nuclear energy. *Vestnik mezhdunarodnoj akademii nauk (russkaja sekcija)* 2022; 1: 69–75 (In Russ.)].
3. Синягина Д.И., Лопатин М.И. Ядерное оружие массового поражения и его запасы в России. Инновации. Наука. Образование 2021; 34: 1252–1257 [Sinjagina D.I., Lopatin M.I. Nuclear weapons of mass destruction and their stockpiles in Russia. *Innovacii. Nauka. Obrazovanie* 2021; 34: 1252–1257 (In Russ.)].
4. Кичерова О.А., Рейхерт Л.И., Кичерова К.П. Вред и польза окислительного стресса. Медицинская наука и образование Урала. 2019; 20; 4 (100): 193–196 [Kicherova O.A., Reikher L.I., Kicherova K.P. The harms and benefits of oxidative stress. *Medicinskaja nauka i obrazovanie Urala*. 2019; 20; 4 (100): 193–196 (In Russ.)].
5. Кулганов В.А., Косырев С.В., Васнецов К.С. К вопросу оценки поражающего воздействия ионизирующего излучения на человека и защиты от него. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. «Технологии гражданской безопасности 2023; 20; 1 (75): 1–7 [Kulganov V.A., Kosyrev S.V., Vasnevov K.S. On the issue of assessing the damaging effects of ionizing radiation on humans and protection from it. *Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah*. «Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti 2023; 20; 1 (75): 1–7 (In Russ.)].
6. Zyla J., Fannon P., Bulman R., Bouffler S., Badie Ch., Polanska J. Seeking genetic signature of radiosensitivity — a novel method for data analysis in case of small sample sizes. *Theor. Biol. Med. Model.* 2014; 7; 11 (Suppl. 1): S2. doi: 10.1186/1742-4682-11-S1-S2.
7. Zwierzchowski G., Bielecka G., Szymbor A., Boehlke M. Personalized Superficial HDR Brachytherapy-Dosimetric Verification of Dose Distribution with Lead Shielding of Critical Organs in the Head and Neck Region. *J. Pers. Med.* 2022 Aug 31; 12 (9): 1432. doi: 10.3390/jpm12091432.
8. Гуськова А.К., Краснюк В.И. Последствия для здоровья лиц, участвовавших в ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС: основные итоги и нерешенные проблемы. Медицина труда и промышленная экология 2012; 10: 11–20 [Gus'kova A.K., Krasnjuk V.I. Consequences for the health of persons involved in the liquidation of the accident at the Chernobyl nuclear power plant: main results and unresolved problems. *Medicina truda i promyshlennaja jekologija* 2012; 10: 11–20 (In Russ.)].
9. Федоров В.П., Холодов О.М., Гундарова О.П. Моделирование пороговых изменений в головном мозге при радиационных

- воздействиях. Вестник новых медицинских технологий 2022; 29 (2): 96–99 [Fedorov V.P., Holodov O.M., Gundarova O.P. Modeling of borderline changes in the brain under radiation exposure. Vestnik novyh medicinskih tehnologi 2022; 29 (2): 96–99 (In Russ.)].
10. Zong-Wen S., Lei S., Qinglin L., Yue K., Feng-Lei D., Tie-Ming X., Yong-Hong H., Qiao-Ying H., Xiao-Zhong Ch., Yuan-Yuan Ch., Ming Ch. Results of the radiation dose of head, body and tail of hippocampus in nasopharyngeal carcinoma patients treated with intensity modulated radiotherapy. Sci. Rep. 2018 Apr 4; 8(1): 5595. doi: 10.1038/s41598-018-23127-6.
  11. Zhou K., Xie C., Wickström M., Dolga A.M., Zhang Y., Li T., Xu Y., Culmsee C., Kogner P., Zhu Ch., Blomgren K. Lithium protects hippocampal progenitors, cognitive performance and hypothalamus-pituitary function after irradiation to the juvenile rat brain. Oncotarget. 2017; May 23; 8(21): 34111–34127. doi: 10.18632/oncotarget.16292.
  12. Zhang Y., Li Y., Han Y., Li M., Li X., Fan F., Liu H., Li Sh. Experimental study of EGFR-TKI aumolertinib combined with ionizing radiation in EGFR mutated NSCLC brain metastases tumor. Eur J. Pharmacol. 2023; Apr 15: 945: 175571. doi: 10.1016/j.ejphar.2023.175571.
  13. Герасимова Т.В., Зюлькона Л.А., Микуляк Н.И., Кавтаева Г.Г., Зиновьев А.И. Современный взгляд на проблему биологических эффектов радиационного излучения на живые организмы (обзор литературы). Известия высших учебных заведений. Поволжский регион 2020; 3 (55): 104–117 [Gerasimova T.V., Zjul'kona L.A., Mikuljak N.I., Kavtaeva G.G., Zinov'ev A.I. A modern view on the problem of the biological effects of radiation on living organisms (literature review). Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region 2020; 3 (55): 104–117 (In Russ.)].
  14. Соловьев В.Ю., Барабанова А.В., Бушманов А.Ю. Радиационные инциденты с неравномерным облучением человека. Саратовский научно-медицинский журнал 2013; 9 (4): 901–905 [Solov'ev V.Ju., Barabanova A.V., Bushmanov A.Ju. Radiation incidents with uneven human exposure. Saratovskij nauchno-meditsinskij zhurnal 2013; 9(4): 901–905 (In Russ.)].
  15. Varan M.P., Turna H., Dinçbaş F.O. Radiation recall myositis with pazopanib in a patient with soft tissue sarcoma. J. Oncol. Pharm. Pract. 2023 Jun; 29 (4): 980–985. doi: 10.1177/10781552221125869.
  16. Strojan P., Hutcheson K.A., Eisbruch A., Beitler J.J., Langendijk J.A., Lee A.W.M., Corry J., Mendenhall W.M., Smees R., Rinaldo A., Ferlito A. Treatment of late sequelae after radiotherapy for head and neck cancer. Cancer Treat Rev. 2017. Sep; 59: 79–92. doi: 10.1016/j.ctrv.2017.07.003.
  17. Урываев А.М., Бова А.А., Нагорнов И.В., Ермолкевич Р.Ф. Современные подходы к диагностике и оказанию помощи при острых радиационных поражениях в региональных военных конфликтах. Военная медицина 2023; 2 (67): 22–32 [Uryvaev A.M., Bova A.A., Nagornov I.V., Ermolkevich R.F. Modern approaches to diagnosis and care for acute radiation injuries in regional military conflicts. Voennaja medicina 2023; 2 (67): 22–32 (In Russ.)].
  18. Костюк С.А., Давидовский С.В., Костюк Д.Д., Полуян О.С. Фундаментальные основы психогенетики. Сообщение I. Девиантология 2021; 5 (1): 58–64 [Kostiuk S.A., Davidovski S.V., Kostiuk D.D., Poluyan O.S. Fundamental foundations of psychogenetics. Report I. Deviant Behavior (Russia) 2021; 5 (1): 58–64 (In Russ.)]. doi: 10.32878/devi.21-5-01(8)-58-64.
  19. Костюк С.А., Давидовский С.В., Костюк Д.Д., Полуян О.С. Фундаментальные основы психогенетики. Сообщение II. Девиантология 2021; 5 (2): 43–50 [Kostiuk S.A., Davidovski S.V., Kostiuk D.D., Poluyan O.S. Fundamental foundations of psychogenetics. Report II. Deviant Behavior (Russia) 2021; 5 (2): 43–50 (In Russ.)]. doi: 10.32878/devi.21-5-02(9)-43-50.
  20. Колмогорова В.В. Суицидальное поведение у лиц старшего зрелого и пожилого возраста, проживающих на экологически неблагоприятной территории Южного Урала. Академический журнал Западной Сибири 2015; 1: 38 [Kolmogorova V.V. Suicidal behavior in older and older people living in the environmentally unfavorable territory of the Southern Urals. Akademicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri 2015; 1: 38 (In Russ.)].
  21. Буторин Г.Г. Пограничные психические расстройства у детей, проживающих в экологически неблагополучных районах. Академический журнал Западной Сибири 2015; 5: 81–82 [Butorin G.G. Borderline mental disorders in children living in environmentally disadvantaged areas. Akademicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri 2015; 5: 81–82 (In Russ.)].
  22. Козлов В.А., Голенков А.В., Сапожников С.П. Роль генома в суицидальном поведении (обзор литературы). Суицидология 2021; 12 (1): 3–22 [Kozlov V.A., Golenkov A.V., Sapozhnikov S.P. The role of the genome in suicidal behavior (literature review). Suicidology 2021; 12 (1): 3–22 (In Russ./ Engl.). doi: 10.32878/suiciderus.21-12-01(42)-3-22.
  23. Гнелицкий Г.И., Кауров Я.В., Кацуба А.М., Андрюхин В.И., Артеменко А.Г. и др. Лечение лучевой болезни от внутреннего облучения. Журнал научных статей «Здоровье и образование в XXI веке» 2011; 2 (13): 243–244 [Gnelickij G.I., Kaurou J.V., Kacuba A.M., Andruhin V.I., Artemenko A.G. et al. Treatment of radiation sickness from internal exposure. Zhurnal nauchnyh statej «Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke» 2011; 2 (13): 243–244 (In Russ.)].
  24. Рейхерт Л.И., Кичерова О.А., Ахметьянов М.А. Связанное со здоровьем качество жизни в неврологической практике. Академический журнал Западной Сибири 2022; 18; 3 (96): 25–34 [Rejher L.I., Kicherova O.A., Ahmetjanov M.A. Health-related quality of life in neurological practice. Akademicheskij zhurnal Zapadnoj Sibiri 2022; 18; 3 (96): 25–34 (In Russ.)].
  25. Тимошевский А.А., Белых В.Г. Медицинская помощь пострадавшим при радиационных авариях. Медицинская сестра 2016; 5: 11–14 [Timoshevskij A.A., Belyh V.G. Medical assistance to victims of radiation accidents. Medicinskaja sestra 2016; 5: 11–14 (In Russ.)].
  26. Zwicker F., Kirchner C., Huber P.E., Debus J., Zwicker H., Klepper R. Breast cancer occurrence after low dose radiotherapy of non-malignant disorders of the shoulder. Sci. Rep. 2019 Mar 28; 9 (1): 5301. doi: 10.1038/s41598-019-41725-w.
  27. Усков В.М., Усков М.В. Служба медицины катастроф в организации прогнозирования последствий и оказания экстренной медицинской помощи при радиационных авариях. Вестник Воронежского государственного технического университета 2010; 1–5 [Uskov V.M., Uskov M.V. Disaster Medicine Service in organizing the forecasting of consequences and provision of emergency medical care during radiation accidents. Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta 2010; 1–5 (In Russ.)].
  28. Гладких В.Д., Белых В.Г., Тимошевский А.А., Чиж И.М. Организация лечебно-профилактических мероприятий при радиационных поражениях. Военно-медицинский журнал 2017; 338 (11): 19–26 [Gladkih V.D., Belyh V.G., Timoshevskij A.A., Chizh I.M. Organization of treatment and preventive measures for radiation injuries. Voennno-meditsinskij zhurnal 2017; 338 (11): 19–26 (In Russ.)].
  29. Гуськова А.К., Краснюк В.И., Галстян И.А., Надеждина Н.М. 30 лет аварии на Чернобыльской АЭС: опыт ликвидации медицинских последствий. Медицинская радиология и радиационная безопасность 2016; 61 (3): 30–35 [Gus'kova A.K., Krasnjuk V.I., Galstjan I.A., Nadezhdina N.M. 30 years of the

- accident at the Chernobyl nuclear power plant: experience in eliminating medical consequences. *Medicinskaja radiologija i radiacionnaja bezopasnost'* 2016; 61 (3): 30–35 (In Russ.).
30. *Zweig G., Russell E.J.* Radiation myelopathy of the cervical spinal cord: MR findings. *AJNR Am J. Neuroradiol.* 1990 Nov-Dec; 11 (6): 1188–1190.
  31. *Guohong Zu, Yan Dou, Qingfen Tian, Houwei Wang, Weichong Zhao, Fusheng Li* Role and mechanism of radiological protection cream in treating radiation dermatitis in rats. *J. Tradit Chin Med.* 2014 Jun; 34 (3): 329. doi: 10.1016/s0254-6272(14)60098-4.
  32. *Zschaecck S., Wust P., Graf R., Wlodarczyk W., Schild R., Thieme A.H., Weihrauch M., Budach V., Ghadjar P.* Spinal cord constraints in the era of high-precision radiotherapy : Retrospective analysis of 62 spinal/paraspinal lesions with possible infringements of spinal cord constraints within a minimal volume Strahlenther. Onkol. 2017 Jul; 193 (7): 561–569 doi: 10.1007/s00066-017-1138-5.
  33. *Zou W.X.Y., Leung T.W., Simon Yu S.C.H., Wong E.C.H., Leung S.F., Soo Y.O.Y., Ip V.H.L., Chan A.Y.Y., Lam W.W.M., Siu D.Y.W., Abrigo J., Lee K.T., Liebeskind D.S., Wong K.S.* Angiographic features, collaterals, and infarct topography of symptomatic occlusive radiation vasculopathy: a case-referent study. *Stroke* 2013 Feb; 44 (2): 401–406. doi: 10.1161/STROKEAHA.112.674036.
  34. *Zou L., Wu S., Liu Y., Wang S., Wen W., Liu H.* Surgery option in the management of delayed diplopia after radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma. *Eur. J. Ophthalmol.* 2018 Sep; 28 (5): 547–551. doi: 10.1177/1120672118757430.
  35. *Zijlstra H., Striano B.M., Crawford A.M., Groot O.Q., Raje N., Tobert D.G., Patel C.G., Wolterbeek N., Delawi D., Kempen D.H.R., Verlaan J.J., Schwab J.H.* Neurologic Outcomes After Radiation Therapy for Severe Spinal Cord Compression in Multiple Myeloma: A Study of 162 Patients. *J. Bone Joint Surg. Am.* 2023 Aug 16; 105 (16): 1261–1269. doi: 10.2106/JBJS.22.01335.

Поступила в редакцию: 02.10.2023 г.

### Сведения об авторах:

*Кузина Валерия Александровна* — ординатор кафедры неврологии с курсом нейрохирургии Института клинической медицины ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России; 625023, г. Тюмень, Одесская ул., д. 54; e-mail: rogovskih.valeriya@mail.ru; ORCID 0009-0008-3573-3366;

*Кичерова Оксана Альбертовна* — доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой неврологии с курсом нейрохирургии Института клинической медицины ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России; 625023, г. Тюмень, Одесская ул., д. 54; e-mail: pan1912@mail.ru; ORCID 0000-0002-7598-7757; SPIN 3162-0770; Researcher ID: ADJ-6852-2022; Scopus AuthorID: 56806916100;

*Зотов Павел Борисович* — доктор медицинских наук, профессор — директор Института клинической медицины ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России; 625023, г. Тюмень, Одесская ул., д. 54; e-mail: note72@yandex.ru; ORCID 0000-0002-1826-486X; SPIN 5702-4899; Researcher ID: U-2807-2017;

*Доян Юлия Ивановна* — кандидат медицинских наук, доцент кафедры неврологии с курсом нейрохирургии Института клинической медицины ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России; 625023, г. Тюмень, Одесская ул., д. 54; врач-невролог неврологического отделения № 3 Регионального сосудистого центра ГБУЗ ТО «Областная клиническая больница № 2»; 625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, д. 75; e-mail: yul-gol25@yandex.ru; ORCID 0000-0002-8486-496X; SPIN 2748-9442; Researcher ID: HLN-6473-2023;

*Рейхерт Людмила Ивановна* — доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры неврологии с курсом нейрохирургии Института клинической медицины ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России; 625023, г. Тюмень, Одесская ул., д. 54; e-mail: lir0806@gmail.com; ORCID 0000-0003-4313-0836; SPIN 1703-2302; Researcher ID: HLN-6325-2023; Scopus Author ID: 6507192699;

*Гарагашева Екатерина Павловна* — ассистент кафедры микробиологии ФГБОУ ВО «Тюменский государственный медицинский университет» Минздрава России; 625023, г. Тюмень, Одесская ул., д. 54; e-mail: e.p.note@mail.ru; ORCID 0000-0002-2572-0480; SPIN 3893-1762; AuthorID: 901232.