

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель Министра –
Главный государственный
санитарный врач
Республики Беларусь



А.А. Тарасенко
2022 г.

Регистрационный №

010-1121

**МЕТОД ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО РИСКА ЗДОРОВЬЮ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА
ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

инструкция по применению

УЧРЕЖДЕНИЕ-РАЗРАБОТЧИК:

Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр
гигиены»

АВТОРЫ: к.м.н. Николаенко Е.В., Роздяловская Л.Ф., к.б.н. Кляус В.В.,
Сароко Н.В., Гусейнова Д.И., к.т.н., доцент Жукова О.М., Попова Е.Н.,
Кочергина Н.С., Ошуркевич А.Ю.

Минск, 2022

**МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель министра
Главный государственный
санитарный врач
Республики Беларусь

_____ А. А. Тарасенко
28.01.2022
Регистрационный № 010-1121

**МЕТОД ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОГО РИСКА ЗДОРОВЬЮ
И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА
ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

инструкция по применению

УЧРЕЖДЕНИЕ-РАЗРАБОТЧИК: РУП «Научно-практический центр гигиены»

АВТОРЫ: канд. мед. наук Е. В. Николаенко, Л. Ф. Роздяловская, канд. биол. наук
В. В. Кляус, Н. В. Сароко, Д. И. Гусейнова, канд. техн. наук, доц. О. М. Жукова,
Е. Н. Попова, Н. С. Кочергина, А. Ю. Ошуркевич

Минск 2022

ГЛАВА 1

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1. В настоящей инструкции по применению изложен метод, который может быть использован в комплексе мероприятий по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия персонала Белорусской АЭС – метод оценки радиационного риска здоровью и определения граничных доз облучения персонала при нормальной эксплуатации Белорусской АЭС (БелАЭС):

совершенствовать радиационно-гигиеническое нормирование в области радиационной защиты персонала при нормальной эксплуатации БелАЭС в соответствии с принципом оптимизации;

оценивать радиационные риски здоровью персонала БелАЭС при нормальной эксплуатации атомной станции;

обосновывать приоритетность мероприятий, направленных на оптимизацию радиационной защиты персонала БелАЭС и минимизацию риска его здоровью при эксплуатации атомной станции.

Метод может быть использован в комплексе медицинских услуг, направленных на медицинскую профилактику заболеваний персонала БелАЭС, ассоциированных с воздействием на организм ионизирующего излучения при эксплуатации атомной станции.

2. Настоящая инструкция по применению предназначена для врачей-гигиенистов, иных врачей-специалистов учреждений, осуществляющих государственный санитарный надзор, государственного предприятия «Белорусская АЭС», а также для других организаций, занимающихся вопросами оценки безопасности объектов использования атомной энергии.

ГЛАВА 2

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3. Для целей настоящей инструкции по применению используются следующие термины и определения:

граничная доза (далее – ГД) – заблаговременно введенное ограничение индивидуальной дозы облучения от данного источника, обеспечивающее базовый уровень защиты для большинства лиц, облучаемых данным источником в повышенных дозах, и служащее для установления верхней границы дозового диапазона, в пределах которого проводится оптимизация защиты для данного источника излучения;

«лучшая практика» – параметры радиационной защиты и безопасности персонала и характеристики радиационной обстановки на рабочих местах станции-аналога, превосходящие существующие на БелАЭС, и являющиеся наиболее эффективными для обеспечения радиационной безопасности и защиты;

оптимизация – поддержание на достижимом низком уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения (принцип ALARA – As Low As Reasonably Achievable);

радиологическое воздействие на персонал – радиологическое воздействие источника ионизирующего излучения (далее – ИИИ), радиационного объекта или объекта использования атомной энергии на организм человека, которое количественно определяется величиной дозы облучения или риска возможного вреда для жизни и здоровья персонала;

стандартный работник – воображаемый человек, обладающий биологическими и физическими свойствами, присущими среднестатистическому здоровому взрослому человеку. Свойства стандартного работника включают:

антропометрические характеристики тела, отдельных органов и тканей человека;

характеристики физиологических показателей человека;

параметры биокинетики химических элементов в органах и тканях человека, рекомендованные МКРЗ и использованные при определении значений допустимых уровней облучения, установленных НРБ-2012 [1].

4. Оптимизация доз облучения персонала БелАЭС достигается путем установления граничных доз облучения персонала и индивидуального пожизненного риска здоровью персонала.

5. Граничная доза облучения персонала устанавливается в соответствии с Положением о порядке установления и применения граничных доз облучения и референтных уровней, утвержденным приказом Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.08.2020 № 881, и характеризует верхнюю границу возможного уровня облучения персонала при нормальной эксплуатации БелАЭС.

6. Меры по оптимизации радиационной защиты персонала включают: введение дополнительных средств индивидуальной защиты (далее – СИЗ) или замена СИЗ с повышением коэффициента защиты;

автоматизацию процессов для снижения времени пребывания персонала в условиях облучения;

усиление биологической защиты на рабочих местах;

ужесточение контроля за временем нахождения в зоне воздействия ИИИ;

внедрения новых инженерных решений и технологий, влияющих на параметры радиационной защиты;

другие меры.

7. Разность между пределом дозы (далее – ПД) облучения и ГД облучения персонала используется для оценки уровня обеспечения радиационной безопасности персонала и эффективности мер оптимизации радиационной защиты в условиях нормальной эксплуатации атомной станции.

8. Граничная доза персонала устанавливается при проектировании атомной станции и пересматривается (или устанавливается впервые) на этапе эксплуатации атомной станции.

9. Граничная доза устанавливается для всего персонала и (или) отдельных групп персонала с учетом радиационной обстановки на рабочих местах и прогнозируемых уровней доз облучения персонала при изменении условий работы, в том числе за счет внедрения новых технологических процессов или применения новых мер защиты персонала в рамках процесса оптимизации.

10. Граничная доза персонала не должна превышать ПД облучения персонала, установленных согласно таблице приложения 1 Гигиенического норматива [2]. Установление ГД персонала на уровне, равном или ниже 1 мЗв/год, является нецелесообразным.

11. Значения ГД персонала пересматриваются при изменении условий работы персонала и с учетом принятия мер по оптимизации радиационной защиты персонала. Уровень ГД определяет эффективность запланированных защитных мероприятий.

12. Для контроля соблюдения норматива ГД персонала локальным нормативным правовым актом устанавливаются контролируемые параметры (допустимые уровни), являющиеся производными ГД.

ГЛАВА 3

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА

13. На этапах проектирования и строительства атомной станции ГД персонала устанавливается на основе анализа эксплуатационного опыта станций-аналогов, результатов научных исследований и экспертиз.

14. В качестве ГД группы персонала проектируемой станции устанавливается значение медианы индивидуальных доз облучения максимально облученных работников из аналогичных групп персонала станций-аналогов.

15. На этапах проектирования и строительства атомной станции определение ГД персонала проводится по следующему алгоритму:

анализ доз облучения персонала станций-аналогов за период не менее 5 последних лет работы в условиях, характерных для проектируемой атомной станции;

определение «лучшей практики» станций-аналогов;

проведение сравнительного анализа доз облучения и параметров, характеризующих радиационную обстановку на рабочих местах персонала проектируемой атомной станции и станций-аналогов;

установление ГД персонала проектируемой атомной станции исходя из доз облучения максимально облучаемого стандартного работника персонала «лучшей практики» станций-аналогов.

Рекомендуемый перечень станций и реакторов-аналогов приведен в приложении 1 к настоящей инструкции по применению.

16. На этапе эксплуатации атомной станции определение ГД персонала основывается на анализе фактических индивидуальных годовых и накопленных доз облучения персонала и оценках доз облучения максимально облучаемого стандартного работника в сравнении с дозами облучения персонала на станциях-аналогах «лучшей практики», а так же прогнозируемыми дозами максимально облучаемого стандартного работника после оптимизирования защитных мер.

17. Алгоритм определения ГД персонала на этапе эксплуатации атомной станции включает следующие этапы:

ретроспективный анализ индивидуальных доз облучения персонала за период 5 лет работы (приложение 2 к настоящей инструкции по применению);

выбор наиболее облучаемых групп персонала с учетом результатов анализа индивидуальных годовых доз облучения и накопленной дозы облучения за анализируемый период (приложение 3 к настоящей инструкции по применению);

установление групп персонала для дифференцирования ГД – на основании анализа доз облучения и радиационных параметров на рабочих местах;

выбор «лучшей практики» (одного реактора-аналога) по данным уровней годовых доз облучения персонала станций-аналогов (приложение 1 к настоящей инструкции по применению);

сравнительный анализ доз облучения и уровней параметров, характеризующих радиационную обстановку на рабочих местах персонала атомной станции и станций-аналогов;

расчет доз облучения стандартного работника на основе радиационных параметров на рабочих местах установленных групп персонала (приложение 4 к настоящей инструкции по применению);

расчет доз облучения стандартного работника выбранной группы после оптимизации защитных мер для выбранной группы до уровня «лучшей практики» станции-аналога, или внедрения прогрессивных методов защиты (прогнозируемая доза);

расчет и обоснование нормативного значения ГД для персонала каждой из выбранных групп;

оценка и установление ГД.

ГЛАВА 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТЕГОРИЙ ПЕРСОНАЛА ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ДОЗЫ

18. Граничные дозы устанавливаются дифференцировано для различных групп персонала атомной станции с учетом результатов анализа данных о годовых индивидуальных и накопленных дозах персонала за период 5 лет работы на данном рабочем месте и параметров радиационной обстановки рабочего места.

19. Для установления групп персонала по ГД рекомендуются следующие диапазоны прогнозируемых доз облучения персонала на рабочих местах:

1-5 мЗв/год (например: служба охраны или персонал, работающий с досмотровыми устройствами, обслуживающий персонал, работающий на площадке атомной станции, бухгалтерия, хозяйственная служба и др.);

6-20 мЗв/год (например: работники реакторного цеха, цеха обращения с радиоактивными отходами, работники, работающие с переносными ИИИ).

20. Количество групп персонала, для которых устанавливается ГД и (или) диапазон доз облучения в группах ГД устанавливается и пересматривается эксплуатирующей организацией в зависимости от фактических данных по результатам радиационного контроля на рабочих местах и других условий работы, влияющих на дозы облучения работников.

ГЛАВА 5 РАСЧЕТ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНОЙ ДОЗЫ

21. Расчет и определение ГД персонала осуществляется на основе оценки дозы облучения стандартного работника с учётом фактических данных радиационной обстановки на рабочих местах и прогнозируемого изменения дозы облучения после введения планируемых защитных мер.

22. Для целей определения ГД оценивается максимальная годовая эффективная доза облучения стандартного работника (далее – ГЭД₁) с учетом максимальных значений контролируемых параметров радиационной обстановки на рабочих местах (мощность эквивалентной дозы, объемная активность аэрозолей, плотность потока α- и β-частиц и др.) выбранных групп персонала и прогнозируемая доза облучения этого персонала с учетом планируемых защитных мероприятий на рабочих местах ГЭД₂ (приложение 4 к настоящей инструкции по применению).

23. По результатам выполненного анализа на основе ретроспективных статистических данных об индивидуальной и накопленной дозе облучения на рабочих местах в цехах БелАЭС определяются максимальные показатели радиационной обстановки за последние 5 лет, которые затем используются для расчета дозы облучения стандартного работника.

24. Прогнозируемая доза облучения рассчитывается для условий, возникающих после введения новых защитных мер, или устанавливается по данным о дозах облучения от внедрения «лучшей практики» станции-аналога.

25. Новое нормативное значение ГД для персонала рассчитывается по формуле 1:

$$ГД_2 = ГД_1 \times \frac{(E_{max_1} + E_{max_2})/2}{E_{max_1}}, \quad (1)$$

где ГД₁ – действующий норматив ГД, мЗв/год;

ГД₂ – рассчитываемый норматив значения ГД, мЗв/год;

E_{max₁} – максимальная ГЭД облучения стандартного работника, рассчитанная исходя из данных о радиационной обстановке на рабочих местах данной группы персонала, мЗв/год;

E_{max₂} – прогнозируемая ГЭД облучения стандартного работника с учетом введения защитных мер, влияющих на снижение доз облучения на рабочих местах, или устанавливаемая по данным о дозах облучения от внедрения «лучшей практики» станций-аналогов, мЗв/год.

26. В связи с наличием неопределенностей и возможных значительных отклонений в расчетах прогнозируемой E_{max}, новый норматив ГД₂ рассчитывается с учетом усреднения фактической и прогнозируемой ГЭД персонала (E_{max₁} + E_{max₂})/2.

27. Рассчитанное значение ГД округляется до целых величин в сторону снижения (ужесточение норматива).

28. Новое значение ГД устанавливается, если рассчитанное значение ГД₂ персонала отличается от действующего норматива более чем на 1 мЗв/год, достижение которого необходимо дополнительно оценить с учетом социально-экономических условий и возможностей внедрения защитных мероприятий или промышленного прогресса на атомной станции.

29. По решению учреждений, осуществляющих государственный санитарный надзор (далее – госсаннадзор) ГД персонала может быть установлена и в единицах эквивалентных доз облучения кожи, хрусталика, кистей и стоп персонала. В таком случае используются уже приведенные подходы по установлению ГД, однако, вместо ГЭД используются годовые эквивалентные дозы облучения соответствующих органов персонала. Обоснование ГД является частью отчета по обоснованию безопасности атомной электростанции и включается в раздел «Оценка радиологического воздействия на население и персонал».

30. Обоснование ГД должно включать следующую информацию:

описание характеристики радиационной обстановки на рабочих местах, анализ доз персонала на атомной станции за последние 5 лет;

оценку доз максимально облучаемого работника при эксплуатации атомной станции, включающую анализ доз облучения персонала на основе данных индивидуального дозиметрического контроля и накопленных дозах за 5 лет;

анализ «лучшей практики», включающий анализ ГЭД облучения персонала станций-аналогов, а также сравнительный анализ характеристик радиационной обстановки на рабочих местах и доз облучения персонала на БелАЭС и на станциях-аналогах;

прогнозную оценку доз максимально облучаемого работника после внедрения оптимизированных защитных мер (или новой практики), включающую оценку прогнозных доз максимально облучаемого работника БелАЭС после введения новых защитных мероприятий и изменений характеристик радиационной обстановки на рабочих местах персонала;

расчет и обоснование нового норматива ГД персонала с оценкой возможности внедрения нового норматива ГД персонала на БелАЭС.

ГЛАВА 6

МЕТОД ОЦЕНКИ РАДИОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗДОРОВЬЮ ПЕРСОНАЛА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕЛАЭС

31. Метод предназначен для оценки радиологического риска здоровью персонала БелАЭС при эксплуатации атомной станции в нормальном режиме. Он предполагает определение индивидуального пожизненного радиационного риска заболеваемости (далее – ИПРЗ) работника радиационно-индуцированными солидными злокачественными новообразованиями (далее – ЗНО) и может быть использован для оценки риска у мужчин и женщин в возрасте от 18 лет до 90 лет в результате профессионального облучения при работе атомной станции в режиме нормальной эксплуатации (для женщин – за исключением периодов беременности и грудного вскармливания).

32. Метод не предназначен для оценки радиационных рисков от облучения высокими дозами облучения в ситуации аварийного облучения. В данном методе также не учитывался вклад в суммарный риск генетических наследственных эффектов, который в условиях нормальной работы атомной станции считается незначительным.

33. ИПРЗ – это вероятность для здорового человека, получившего в возрасте g дозу облучения D , заболеть радиационно-индуцированным раком в течении предстоящей жизни. Исходными данными для вычисления ИПРЗ являются:

пол;

достигнутый возраст на момент расчета (возраст дожития) – a ;

возраст при облучении – g ;

среднегодовая доза облучения – D .

34. Результаты расчетов характеристик радиационного риска представляются в виде безразмерных величин пример расчетов по изложенной методике представлен в приложении 5 к настоящей инструкции по применению.

35. ИПРЗ вычисляется суммированием значений годового индивидуального радиационного риска заболеваемости солидными ЗНО $R_{год}$ по всем последующим календарным годам начиная от текущего года, с учетом вероятности здорового дожития (формула 2).

$$\text{ИПРЗ} = \sum_{32}^{90} S(\alpha) \times R_{год}, \quad (2)$$

$R_{год}$ рассчитывается по формуле 3 и определяет вероятность для здорового человека, получившего дозу облучения D в возрасте g , заболеть радиационно-индуцированным раком на год расчета a .

$$R_{год}(g, a, D) = A_{add} \times \sum_g^{a-10} D \times B_{add} + A_{mult} \times \lambda_0 \times \sum_g^{a-10} D \times B_{mult}, \quad (3)$$

где D – среднегодовая доза облучения, Зв;

g – возраст на момент облучения;

a – возраст дожития.

A_{add} , B_{add} , A_{mult} , B_{mult} , λ_0 – параметры модели, учитывающие показатели заболеваемости солидными ЗНО. Значения этих параметров, рассчитанные с учетом показателей онкозаболеваемости в Республике Беларусь, приведены в приложении 6 к настоящей инструкции по применению.

Вероятность здорового дожития ($S(g, a, s)$) определяется по формуле 4:

$$S(g, a, s) = \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{i=g}^{a-1} \Lambda(i, s) \right], \quad (4)$$

где $\Lambda(i, s)$ – расчетный параметр, учитывающий половозрастные показатели смертности от всех причин, половозрастные показатели смертности от солидных ЗНО и половозрастные показатели заболеваемости солидными ЗНО в Республике Беларусь, его значение для различных возрастов работника на момент облучения приведены в таблице 6.2 приложения 6 настоящей инструкции по применению.

36. Суммируя значения годового индивидуального радиационного риска заболеваемости солидными ЗНО $R_{\text{год}}$ по всем последующим календарным годам (до 90 лет), начиная от текущего года (α), с учетом вероятности здорового дожития S по формуле 1 вычисляется ИПРЗ конкретного работника в возрасте g , проработавшего на станции, a лет при нормальном режиме работы станции, то есть в условиях не превышения норматива граничной дозы.

Приложение 1
(СПРАВОЧНОЕ)

Список станций-аналогов с реакторами ВВЭР

Таблица – Список станций аналогов для БелАЭС

Станции-аналоги	Блок	Мощность	Срок эксплуатации, лет	Год ввода в эксплуатацию
Нововоронежская	НВВ-4	ВВЭР-417/179	60	1973
	НВВ-5	ВВЭР-1000/187	55	1981
	НВВ-2-1	ВВЭР-1181/392М	60	2017
	НВВ-2-2		60	2019
Ленинградская	Л-2-1	ВВЭР-1200/491	60	2018
	Л-2-2	ВВЭР-1200/491	60	2021
Калининская	К-1	ВВЭР-1000/338	30	1985
	К-2		30	1987
	К-3	ВВЭР-1000/320	30	2005
	К-4		30	2012
Балаковская	Б-1	ВВЭР-1000/320	59	1986
	Б-2		55	1988
	Б-3		59	1989
	Б-4		60	1993
Ровенская	Р-1	ВВЭР-420/213	30	1981
	Р-2	ВВЭР-420/213	30	1982
	Р-3	ВВЭР-1000/320	30	1987
	Р-4	ВВЭР-1000/320	30	2006

Порядок подготовки данных для ретроспективной оценки доз облучения персонала

1. Сбор данных о годовых индивидуальных эффективных дозах облучения персонала за период 5 лет, предшествующих анализу.

2. Для анализа необходимы следующие данные:

анализ и описание статистических параметров, касающиеся самих работников (численность), значений, полученных ими индивидуальных эффективных доз с учетом и без учета нулевых доз, а также интерпретация этих данных статистическими методами;

представление значений полученных доз персонала осуществляется при помощи статистических методов визуализации (таблицы, графики, диаграммы и пр.);

при статистической обработке и анализе полученных доз облучения персонала проводятся расчеты средних величин (мода, медиана, средняя арифметическая);

в сводные таблицы (графики) вносятся наиболее ценные описательные характеристики такие как полученные значения моды, медианы, среднего арифметического, стандартного отклонения, значений 95-го перцентиля выборки, значения коэффициента вариации. Пример сводных таблиц по использованию данного приложения представлен в таблицах 2.1, 2.2;

Таблица 2.1. – Внешнее и внутреннее облучение персонала с учетом нулевой индивидуальной дозы АЭС на АЭС-аналогах за 2017 год

АЭС на ВВЭР	Численность персонала, чел.	Число нулевых значений дозы	Мода ^а , мЗв	Медиана ^б , мЗв	Среднее ^с , мЗв	Стандартное отклонение ^д , мЗв	95-й перцентиль ^е	Коэффициент вариации ^ф , %
С учетом нулевой индивидуальной дозы								
Станция-аналог 1	1587	914	0	0	0,7	1,74	4,4	248,6
Станция-аналог 2	1943	1105	0	0	0,59	1,56	3,40	264,4
Станция-аналог 3	1946	859	0	0,1	0,77	1,82	3,90	236,4
Станция-аналог 4	4259	3504	0	0	0,11	0,44	0,59	400

Примечания:

^{а)} – Медиана – значение, занимающая срединное значение в вариационном ряду, делит вариационный ряд на две равные части;

^{б)} – Мода – значение, чаще других встречающаяся в совокупности;

^{с)} – Среднее – число, равное сумме всех чисел исследуемой совокупности, деленное на их количество, рассчитывается на основе всех числовых значений;

^{д)} – Стандартное отклонение представляет собой общую меру отклонения значений от среднего значения, дает наиболее полную характеристику разнообразия признака в статистической совокупности;

^{е)} – 95-й перцентиль – значение, которое выше остальных 95 % представленных чисел;

^{ф)} – Коэффициент вариации показывает, какую долю среднего значения величины составляет ее средний разброс.

Таблица 2.2. – Внешнее и внутреннее облучение персонала без учета нулевой индивидуальной дозы АЭС на АЭС-аналогах за 2017 год

АЭС на ВВЭР	Численность персонала, чел.	Число нулевых значений дозы	Мода, мЗв	Медиана, мЗв	Среднее, мЗв	Стандартное отклонение, мЗв	95-й перцентиль	Коэффициент вариации, %
Без учета нулевой индивидуальной дозы								
Станция-аналог 1	1587	–	0,10	0,60	1,64	2,37	4,4	144,5
Станция-аналог 2	1943	–	0,07	0,46	1,37	2,14	6,56	156,4
Станция-аналог 3	1946	–	0,10	0,50	1,38	2,26	5,70	164,6
Станция-аналог 4	4259	–	0,01	0,26	0,62	0,88	2,34	144,6

формируется таблица по различным дозовым диапазонам (например: <1, 2-<5, 5-<15, 15-<20, 20-<50, >50 мЗв/год) облучения персонала с учетом полученных значений индивидуальной эффективной дозы облучения (таблица 2.3).

Таблица 2.3. – Распределение персонала атомной станции с учетом полученных индивидуальных доз облучения (пример представления данных)*

Диапазоны индивидуальной дозы облучения, мЗв/год	Суммарная численность персонала, чел.	Численность групп (категорий) персонала, чел.				
		Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	Группа 5
<1	96 132	-	-	-	-	67 131
2-<5		-	-	-	24 169	-
5-<15		-	-	4156	-	-
15-<20		-	656	-	-	-
20-<50		20	-	-	-	-
>50		-	-	-	-	-

* – отдельно необходимо оценить количество персонала с индивидуальными дозами облучения выше и ниже установленного значения ГД.

1. Так как предметом исследований являются дозы облучения персонала по группам (выборочной совокупности), эти ряды данных числовых значений могут иметь разную природу распределения, а именно нормальное и логнормальное виды распределения (рисунок 2.1).

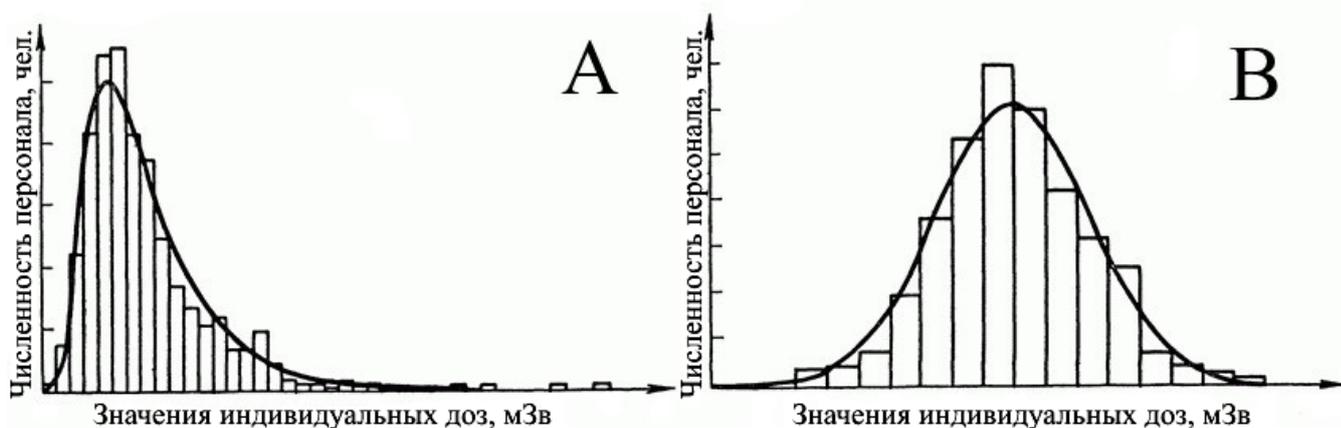


Рисунок 2.1. – Пример логнормального распределения (А) и нормального распределения (В) полученных значений индивидуальных доз персонала

Чаще всего данные о дозах облучения имеют логнормальное распределение, в данном случае за среднее значение принимается значение медианы. В некоторых случаях при нормальном распределении ряда используется среднее значение.

При соответствии данных нормальному закону распределения случайных величин характерно совпадение для значений средней арифметической, моды и медианы.

Для оценки максимальных значений доз облучения при расчетах граничной дозы используются дозы, составляющие 95 %-перцентиль (верхний 5 %-квантиль).

Приложение 3
(СПРАВОЧНОЕ)

Оценка значений накопленной дозы персонала

1. Оценка значений накопленной дозы может быть применена для определения наиболее облучаемых групп персонала, цехов или профессий на предприятии.

2. Средняя за любые последовательные 5 лет ГЭД рассчитывается по формуле 3.1:

$$\overline{E}_A = \frac{1}{5} \sum_{i=A-4}^A E_i \quad (3.1)$$

где E_i – индивидуальная годовая эффективная доза, полученная за i -й год;

E_A – отнесенная к календарному году A усредненная за последовательные 5 лет индивидуальная годовая эффективная доза.

3. За значение индивидуальной эффективной дозы, накопленной за период трудовой деятельности (N лет) следует принимать величину, рассчитанную по формуле 3.2:

$$E(50)_A = \frac{1}{5} \sum_{i=A-50}^A E_i, \quad (3.2)$$

где $E(50)_A$ – отнесенная к календарному году A накопленная за период трудовой деятельности индивидуальная эффективная доза;

E_i – индивидуальная годовая эффективная доза, полученная за i -й год.

4. Полученные данные о накопленных дозах облучения персонала позволяют определить самые дозозатратные профессии (например, в порядке убывания накопленной дозы) по различным цехам и зонам выполнения работ.

Расчет индивидуальной дозы профессионального облучения для стандартного работника

1. Индивидуальная эффективная доза облучения работника, полученная за период контроля, равна сумме индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения, полученной за период контроля, и ожидаемой индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же период (формула 4.1.):

$$E = E_{\text{внеш}} + E_{\text{внутр}}, \quad (4.1)$$

2. При отсутствии на рабочих местах такого вредного фактора как радиоактивные аэрозоли, доза внутреннего облучения не рассчитывается.

В таком случае за индивидуальную эффективную дозу облучения работника принимается только доза от внешнего облучения.

При наличии данных контроля мощности амбиентного эквивалента дозы на рабочих местах эффективная доза внешнего облучения $E_{\text{внеш}}$, мЗв, рассчитывается по формуле 4.2:

$$E_{\text{внеш}} = 0,001 \times \sum_k H(10)_k \times \Delta t_k, \quad (4.2)$$

где $H(10)_k$ – мощность амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч;

Δt_k – длительность выполнения k -ой операции работником в течении контролируемого периода при мощности амбиентного эквивалента дозы ($H(10)_k$), часы;

0,001 – коэффициент, учитывающий перевод мкЗв в мЗв.

При наличии данных об энергетическом распределении плотности потока фотонов и нейтронов на рабочем месте, получаемых путем измерений или расчетов, эффективная доза внешнего облучения $E_{\text{внеш}}$, мЗв, для соответствующего вида частиц будет равна (формула 4.3.):

$$E_{\text{внеш}} = 3,6 \times 10^6 \sum_{R, E_R, k} \varphi(E_R)_k \times e(E_R)_{\text{внеш}} \times \Delta t_k, \quad (4.3)$$

где $\varphi(E_R)_k$ – средняя плотность потока частиц R-го типа с энергией E_R , част./($\text{см}^2 \times \text{с}$);

$e(E_R)_{\text{внеш}}$ – эффективная доза внешнего облучения на единичный флюенс частиц R-го типа с энергией E_R при облучении параллельным пучком в передне-задней геометрии (далее – ПЗ-геометрии), Зв \times см²;

Δt_k – длительность выполнения k -ой операции работником в течение контролируемого периода при средней плотности потока частиц ($\varphi(E_R)_k$), ч;

$3,6 \times 10^6$ – коэффициент, учитывающий соотношение 1 ч = 3600 с.

3. Эффективная доза внешнего облучения $E_{\text{внутр}}$ (мЗв), при ингаляционном поступлении радионуклида в виде аэрозоля или газа в течение контролируемого периода рассчитывается по формуле 4.4:

$$E_{\text{внутр}} = 1,4 \times 10^3 \sum_{U,G,k} C(U, G)_k \times e(\tau)_{\text{внутр } U,G} \times \Delta t_k, \quad (4.4)$$

где $C(U, G)_k$ – средняя объемная активность соединения типа G радионуклида U непосредственно в зоне дыхания, Бк/м³;

$e(\tau)_{\text{внутр } U,G}$ – ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения на единичное поступление соединения радионуклида U, которое при ингаляции следует отнести к типу G, Зв/Бк;

Δt_k – длительность выполнения k-ой операции работником в течение контролируемого периода при средней объемной активности ($C(U, G)_k$), ч.;

$1,4 \times 10^3$ – коэффициент, учитывающий скорость дыхания стандартного работника ($2400 \text{ м}^3/1700 \text{ ч} = 1,4$), м³/ч и соотношение $1 \text{ Зв} = 10^3 \text{ мЗв}$.

4. Для определения прогнозируемых доз стандартного работника также можно использовать коэффициенты защиты, учитывающие планируемое введение защитных мер на атомной станции, влияющие на снижение доз облучения персонала:

коэффициенты экранирования;

коэффициент, учитывающий увеличение расстояния от источника (защита расстоянием);

коэффициент, учитывающий уменьшение рабочего времени по отношению к фактическому рабочему времени (защита временем);

коэффициенты защиты средств индивидуальной (респираторы, защитные очки, защитные костюмы и т. д.) и коллективной защиты работников от ионизирующего излучения.

Средства защиты имеют определенный уровень защиты, коэффициент защиты которых определяется согласно технической документации на продукцию.

Средствами индивидуальной защиты являются респираторы, защитные очки, спецодежда (комбинезоны или костюмы, спецбелье), рукавицы, сапоги, изолирующие пневмокостюмы, пневмошлемы с индивидуальной подачей в них воздуха и тому подобное.

Средствами коллективной защиты являются оградительные устройства; предупредительные устройства; герметизирующие устройства; защитные покрытия; устройства улавливания и очистки воздуха и жидкостей; средства дезактивации; устройства автоматического контроля; устройства дистанционного управления; средства защиты при транспортировании и временном хранении радиоактивных веществ; емкости для радиоактивных отходов и др.

**Пример расчета пожизненного риска здоровью для конкретной
возрастной группы персонала**

Задача: определить ИПРЗ для работника БелАЭС в возрасте 32 лет, подвергающегося профессиональному облучению в течение 10 лет при условии, что среднегодовая доза облучения не превышает граничной дозы облучения персонала, установленной для его вида работ.

Решение:

Определяем годовой индивидуальный риск по формуле 5.1:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{год}}(g, a, D) &= A_{\text{add}} \times \sum_g^{a-10} D \times B_{\text{add}} + A_{\text{mult}} \times \lambda_0(a) \\
 &\times \sum_g^{a-10} D \times B_{\text{mult}}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Из условия задачи: $g = 22$, $a = 32$,

В качестве среднегодовой дозы облучения примем граничную дозу облучения персонала, равную 16 мЗв.

Подставляем коэффициенты из таблиц 6.1 и 6.2 приложения 6 к настоящей инструкции в формулу 5.1:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{год}} &= 3,36 \times 10^{-4} \times \sum_{22}^{22} 16 \times 10^{-3} \times 1,25 + 6,44 \times 10^{-6} \times \\
 &45,9/5 \times \sum_{22}^{22} 16 \times 10^{-3} \times 1,16 = 7,8 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

Вычисляем по формуле 5.2 функции здорового дожития для каждого года начиная с возраста работника (возраст 32 года) и далее по годам до 90 лет:

$$\begin{aligned}
 S(g, a, s) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{i=g}^{a-1} \Lambda(i, s) \right] \tag{5.2} \\
 S(32) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{31} \Lambda(i, s) \right] = 0,992 \\
 S(33) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{32} \Lambda(i, s) \right] = 0,990 \\
 S(34) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{33} \Lambda(i, s) \right] = 0,988 \\
 S(35) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{34} \Lambda(i, s) \right] = 0,987 \\
 S(36) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{35} \Lambda(i, s) \right] = 0,983 \\
 S(37) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{36} \Lambda(i, s) \right] = 0,981 \\
 S(38) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{37} \Lambda(i, s) \right] = 0,979 \\
 S(39) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{38} \Lambda(i, s) \right] = 0,976 \\
 S(40) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{39} \Lambda(i, s) \right] = 0,974 \\
 S(41) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{40} \Lambda(i, s) \right] = 0,970 \\
 S(42) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{41} \Lambda(i, s) \right] = 0,966 \\
 S(43) &= \exp \left[-10^{-5} \times \sum_{22}^{42} \Lambda(i, s) \right] = 0,963
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S(44) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{43} \Lambda(i, s)] = 0,959 \\
S(45) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{44} \Lambda(i, s)] = 0,955 \\
S(46) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{45} \Lambda(i, s)] = 0,950 \\
S(47) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{46} \Lambda(i, s)] = 0,945 \\
S(48) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{47} \Lambda(i, s)] = 0,939 \\
S(49) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{48} \Lambda(i, s)] = 0,934 \\
S(50) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{49} \Lambda(i, s)] = 0,929 \\
S(51) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{50} \Lambda(i, s)] = 0,919 \\
S(52) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{51} \Lambda(i, s)] = 0,914 \\
S(53) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{52} \Lambda(i, s)] = 0,906 \\
S(54) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{53} \Lambda(i, s)] = 0,899 \\
S(55) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{54} \Lambda(i, s)] = 0,892 \\
S(56) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{55} \Lambda(i, s)] = 0,880 \\
S(57) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{56} \Lambda(i, s)] = 0,875 \\
S(58) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{57} \Lambda(i, s)] = 0,857 \\
S(59) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{58} \Lambda(i, s)] = 0,845 \\
S(60) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{59} \Lambda(i, s)] = 0,834 \\
S(61) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{60} \Lambda(i, s)] = 0,815 \\
S(62) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{61} \Lambda(i, s)] = 0,803 \\
S(63) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{62} \Lambda(i, s)] = 0,788 \\
S(64) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{63} \Lambda(i, s)] = 0,773 \\
S(65) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{64} \Lambda(i, s)] = 0,759 \\
S(66) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{65} \Lambda(i, s)] = 0,744 \\
S(67) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{66} \Lambda(i, s)] = 0,730 \\
S(68) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{67} \Lambda(i, s)] = 0,716 \\
S(69) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{68} \Lambda(i, s)] = 0,702 \\
S(70) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{69} \Lambda(i, s)] = 0,689 \\
S(71) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{70} \Lambda(i, s)] = 0,677 \\
S(72) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{71} \Lambda(i, s)] = 0,665 \\
S(73) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{72} \Lambda(i, s)] = 0,654 \\
S(74) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{73} \Lambda(i, s)] = 0,642 \\
S(75) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{74} \Lambda(i, s)] = 0,631 \\
S(76) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{75} \Lambda(i, s)] = 0,621 \\
S(77) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{76} \Lambda(i, s)] = 0,612 \\
S(78) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{77} \Lambda(i, s)] = 0,602 \\
S(79) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{78} \Lambda(i, s)] = 0,593 \\
S(80) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{79} \Lambda(i, s)] = 0,583 \\
S(81) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{80} \Lambda(i, s)] = 0,573 \\
S(82) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{81} \Lambda(i, s)] = 0,563 \\
S(83) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{82} \Lambda(i, s)] = 0,553 \\
S(84) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{83} \Lambda(i, s)] = 0,544 \\
S(85) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{84} \Lambda(i, s)] = 0,534
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S(86) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{85} \Lambda(i, s)] = 0,527 \\
S(87) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{86} \Lambda(i, s)] = 0,521 \\
S(88) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{87} \Lambda(i, s)] = 0,514 \\
S(89) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{88} \Lambda(i, s)] = 0,508 \\
S(90) &= \exp[-10^{-5} \times \sum_{22}^{89} \Lambda(i, s)] = 0,501 \\
\sum_{32}^{90} S(\alpha) &= 46,318
\end{aligned}$$

Полученные значения подставляем в формулу 5.3:

$$\text{ИПРЗ} = \sum_{32}^{90} S(\alpha) \times -R_{\text{год}} = 46,318 \times 7,8 \times 10^{-6} = 3,61 \times 10^{-4}, \quad (5.3)$$

Таким образом, для работника БелАЭС в возрасте 32 лет, подвергающегося профессиональному облучению в течении 10 лет со среднегодовой дозой облучения 16 мЗв индивидуальный пожизненный радиационный риск заболеваемости ЗНО будет в 2,7 раза ниже норматива – предельный индивидуальный пожизненный радиационный риск для персонала 10^{-3} , установленный исходя из ПД 20 мЗв/год, согласно п. 22 НРБ-2012 [3].

Приложение 6
(СПРАВОЧНОЕ)

Коэффициенты для расчета пожизненного риска здоровью

Таблица 6.1. – Коэффициенты $A_{add}(a, s)$, $A_{mult}(a, s)$, $\lambda_0(a, s)$ для вычисления индивидуальных рисков заболеваемости солидными ЗНО

Возраст дожития (a)	$A_{add}, 10^{-4}$		$A_{mult}, 10^{-6}$		λ_0	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины	мужчины	женщины
15-19	0,75	1,04	18,36	30,42	8,2	12,8
20-24	1,38	1,92	12,0	19,89	20,6	33,3
25-29	2,25	3,11	8,54	14,15	27,5	47,1
30-34	3,36	4,66	6,44	10,67	45,9	122,9
35-39	4,75	6,57	5,04	8,35	80,7	198,4
40-44	6,41	8,88	4,10	6,79	162,7	296,1
45-49	8,38	11,60	3,40	5,63	291	413,4
50-54	10,66	14,76	2,87	4,76	598,7	566,8
55-59	13,26	18,36	2,47	4,09	1065,7	710,6
60-64	16,20	22,42	2,15	3,56	1721,9	1000,8
65-69	19,48	26,96	1,89	3,13	2390,6	1180,5
70-74	23,11	31,99	1,68	2,78	3035,2	1461,1
75-79	27,11	37,53	1,56	2,59	3290,6	1644,7
80-84	31,49	43,59	1,35	2,24	3299,6	1600,4
85-90	36,76	50,88	1,21	2,01	2189,5	1052,7

Таблица 6.2. – Коэффициенты $B_{add}(g)$, $B_{mult}(g)$ и $\Lambda(i, s)$ для вычисления индивидуальных рисков заболеваемости солидными ЗНО

Возраст начала облучения (g)	B_{add}	B_{mult}	Λ	
			мужчины	женщины
15-19	1,43	1,27	117,90	65,5
20-24	1,25	1,16	199,40	73,6
25-29	1,09	1,06	386,20	132
30-34	0,95	0,96	841,80	388,2
35-39	0,83	0,88	1276,60	591
40-44	0,72	0,80	1919,70	862,2
45-49	0,63	0,75	2790,10	1241,7
50-54	0,55	0,66	4123,70	1770,9
55-59	0,48	0,60	6699,30	2984,4
60-64	0,41	0,55	9436,00	4264,5
65-69	0,36	0,50	9666,50	5194,9
70-74	0,32	0,46	8743,80	5897,3
75-79	0,28	0,48	7901,10	8299,2
80-84	0,24	0,38	8813,00	13705,7
85-90	0,21	0,34	7629,40	21680,2

Примечание: коэффициенты $\lambda_0(a, s)$, $\Lambda(i, s)$, приведенные в таблицах 6.1 и 6.2, суммированы по годам в каждой возрастной группе.

Чтобы применить данные коэффициенты к расчетам для одного определенного года a требуется усреднить коэффициент по соответствующей возрастной группе (т. е. разделить на 5).

Список использованных источников

1. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в контролируемых условиях обращения с источниками ионизирующего излучения : инструкция 2.6.1. 11-8-41-2004 / М-во здравоохранения Респ. Беларусь. – Минск, 2004 – С. 5.
2. Критерии оценки радиационного воздействия : гигиенический норматив / М-во здравоохранения Респ. Беларусь. – Минск, 2012. – С. 12.
3. Требования к радиационной безопасности : санитар. нормы и правила / М-во здравоохранения Респ. Беларусь. – Минск : РЦГЭиОЗ, 2013. – С. 6–34.