А.В.Кружалов, М.В.Жуковский

Уральский технический университет, г.Екатеринбург

А.В.Павлюк

Институт промышленной экологии УрО РАН, г.Екатеринбург

АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОГОВОЙ И БЕСПОРОГОВОЙ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрены основные способы оценки радиационных рисков: линейная беспороговая модель и модель практического порога. Предложены новые подходы к выбору порога оценки радиационных рисков, основанные на сопоставлении доз техногенного облучения с пожизненными дозами облучения от природных источников излучения. Предложен порог оценки риска при облучении дочерними продуктами распада радона, равный 30 Бк/м^3. С использованием как беспороговой, так и пороговой моделей сделаны оценки радиационного риска для населения Свердловской области, подвергшегося облучению от природных и техногенных источников. Показано, что вклад техногенного обучения много ниже, чем постоянно действующих радиационных факторов – облучения радоном и медицинского диагностического облучения.

The basic methods of radiation risk assessment , i.e. the linear threshold-free model and the model of practical threshold are considered hereinafter. A new approach to the choice of threshold for radiation risk assessment, based on the comparison between accidental doses and lifetime exposure to natural radiation sources, has been proposed, the main point of which is the application of EEC Rn 30Bq/m^3 threshold for radon exposure risk assessment. Radiation risks for the population of the Sverdlovsk region exposed by natural and accidental radiation sources have been calculated using both the linear threshold-free model and the model of practical threshold. As a result of studies the level of radiation risks and loss of life expectancy due to the accidental population exposure at major radiation accidents have been found to be much lower than the lifetime exposure to natural radiation sources and those caused by medical diagnostic exposures.

При анализе последствий для населения радиационных воздействий: природных источников излучения, медицинского диагностического излучения и последствий радиоактивного загрязнения территории – всегда возникает вопрос о выборе исходной концепции для оценки радиационного риска. На настоящий момент при оценке радиологических последствий для населения исходят из двух основных концепций: линейной беспороговой концепции и концепции практического порога. Первая предполагает линейную зависимость радиационно-индуцированных эффектов от дозы облучения вплоть до нулевых значений дозы. При этом зависимость доза – эффект при малых дозах оценивается путем экстраполяции экспериментальных или эпидемиологических данных, полученных при больших дозах. В соответствии со второй концепцией для органов и тканей существует порог индукции стохастических эффектов и при облучении дозами, ниже пороговых, радиационно-индуцированные эффекты не возникают. Линейная беспороговая концепция является на настоящий момент официальной точкой зрения Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [12] и используется при нормировании пределов доз облучения населения и персонала.

В пользу как той, так и другой концепции имеется достаточно большое количество веских доводов. Теоретическое обоснование отсутствия порога при радиационном канцерогенезе приведено в работе [13]. Основные положения, на базе которых был сделан такой вывод, являются общими как для радиационного, так и для химического канцерогенеза. Двойные разрывы ДНК, способные инициировать злокачественное перерождение клетки, могут иметь место при одиночном попадании редкоионизирующей частицы в чувствительный объем клетки, т.е. и при минимальных дозах. Для когорты Хиросимы и Нагасаки наблюдалась статистически значимая повышенная смертность от солидных опухолей при дозах менее 50 мЗв. Кроме того, статистически значимое увеличение заболеваемости лейкемией отмечалось и в диапазоне доз от 0 до 100 мЗв. На основании анализа последних данных по когорте Хиросимы и Нагасаки сделан вывод, что возможной верхней границей порога возникновения стохастических эффектов является 60 мЗв [16].

Вместе с тем, в значительном количестве работ приводятся достаточно веские доводы в пользу существования практического дозового порога [4-7], особенно при пролонгированном облучении. Например, на основании анализа ряда эпидемиологических данных предлагается принять порог возникновения лейкозов и рака щитовидной железы в 0,3 Зв, а остальных опухолей – в 1 Зв [5-7].

Проблема наличия или отсутствия порога возникновения стохастических эффектов, в особенности при воздействии редкоионизирующего излучения, вряд ли найдет свое однозначное разрешение в ближайшее время. В связи с этим представляется целесообразным проведение оценок радиационных рисков и радиационного ущерба с использованием и той, и другой модели. Расчет по беспороговой модели даст прогнозную оценку максимально возможного ущерба, включая диапазон доз, для которого отсутствует прямое эпидемиологическое подтверждение возникновения стохастических эффектов. Расчет риска и ущерба с использованием концепции практического порога даст величины, ожидаемые в соответствии с имеющимися эпидемиологическими данными. При установлении порога на уровне, подтвержденном прямыми эпидемиологическими исследованиями, мы получим оценку минимально возможного ущерба.

При использовании линейной беспороговой модели неизбежно завышение ожидаемого популяционного риска и ущерба за счет включения в рассмотрение больших контингентов населения, получивших малые дозы облучения (сопоставимые с дозами, обусловленными природным радиационным фоном). Пороговая модель дает заниженные риск и ущерб за счет завышенных значений порога возникновения стохастических эффектов, обусловленных не-

достаточной статистической значимостью прямых эпидемиологических данных в области пороговой дозы.

Определенным компромиссом между этими двумя подходами может являться принятие порога оценки радиационно-индуцированных эффектов, ниже которого радиационные риски и обусловленный ими ущерб считаются пренебрежимо малыми. По-видимому, численное значение такого порога должно примерно соответствовать уровню радиационного риска, обусловленного эквивалентной дозой, получаемой человеком от природных источников излучения в течение жизни. В пользу выбора пожизненной дозы облучения от естественного радиоактивного фона как достаточно безопасного уровня дополнительного облучения говорят данные исследований, выполненных в районах с повышенным природным фоном, где статистически достоверной связи увеличения онкологической заболеваемости с повышенным уровнем облучения населения от природных источников не обнаружено. Годовая эквивалентная доза на органы и ткани человека (за исключением легких) составляет 1,15 мЗв. Исходя из этого, порог оценки радиационного риска от воздействия какого-либо дополнительного радиационного фактора мог бы быть принят при эквивалентной дозе на орган около 100 мЗв.

Необходимо также учитывать возраст человека, который испытывает дополнительное радиационное воздействие. Такой учет может быть осуществлен с использованием возрастных множителей $w(t_e)$ для органов и тканей, показывающих, во сколько раз доза облучения, полученная в возрасте t_e, более эффективна, чем та же доза, полученная равномерно в течение жизни [3, 9]. Численное значение порога оценки радиационного риска для того или иного органа или ткани в миллизивертах может быть найдено в виде

$$D^{\text{пор}}(t_e) = \frac{100}{w(t_e)}.$$

При этом независимо от возраста, в котором будет иметь место радиационное воздействие, пожизненный радиационно-обусловленный риск возникновения стохастических эффектов не превысит риска, обусловленного эквивалентной дозой, получаемой человеком от природных источников излучения в течение жизни.

Отдельную проблему представляет оценка радиационного риска при облучении населения дочерними продуктами распада (ДПР) радона. Во-первых, облучение радоном является фактором, постоянно воздействующим в той или иной мере на все население. Во-вторых, бóльшая часть населения подвергается воздействию относительно невысоких уровней радона, для которых достоверные эпидемиологические данные по связи возникновения рака легких с ингаляционным облучением ДПР радона отсутствуют. В-третьих, снижение уровня объемной активности (ОА) радона в помещениях ниже определенного уровня ($n \cdot 10$ Бк/м^3) представляет определенные технические сложности, существенно снижает комфортность пребывания в помещении и явно экономически нецелесообразно. К сожалению, следует отметить, что ни одно эпидемиологическое исследование, выполненное по принципу случай – контроль (как наиболее корректное), не имеет достаточной статистической точности в области малых уровней объемной активности радона в жилищах. Поэтому особый интерес представляют результаты мета-анализа, по данным 20 завершенных на настоящее время исследований случай – контроль [10]. В данном мета-анализе суммарная численность основной группы составила 12044 человека, а контрольной – 20932. В результате анализа было показано, что относительный риск возникновения рака легких связан в объемной активностью радона в жилищах линейной зависимостью

$$R = 0{,}0012(C_{\text{Rn}} - C_{\text{Rn0}}) + 1,$$

где $C_{\text{Rn0}} = 26$ Бк/м^3.

Характерной особенностью полученных результатов является то, что для объемной активности радона $C_{\text{Rn}} > 50$ Бк/м^3 отношение шансов (относительный риск) статистически достоверно больше единицы, а за-

висимость доза – эффект хорошо описывается линейной зависимостью.

С учетом полученных данных было принято решение оценивать радиационные риски при облучении радоном в жилище при уровнях ОА радона, для которых отношение шансов статистически достоверно больше единицы по сравнению с диапазоном 0-50 Бк/м^3. В качестве такого порога была выбрана C_{Rn} = 75 Бк/м^3 (эквивалентная равновесная объемная активность 30 Бк/м^3). При таком подходе в оценке радиационного риска имеется два основных преимущества:

- расчет радиационных рисков производится в диапазоне значений ОА радона, для которых имеется статистически достоверное подтверждение связи заболеваемости раком легких с облучением радоном;
- значения ОА радона, для которых производится оценка радиационного риска, потенциально могут быть уменьшены за счет использования различных радонозащитных мер.

До сих пор оценки радиационного риска для территории Уральского региона рассчитывались исключительно на основе линейной беспороговой зависимости доза – эффект [9]. При этом учитывались все уровни радиационной нагрузки, в том числе и те, которые давали пренебрежимо малые значения радиационных рисков.

С использованием данных по уровням облучения ДПР радона и торона населения Свердловской области [8, 11, 14, 15] в рамках обсуждаемых моделей были получены оценки пожизненного радиационного риска и ожидаемого сокращения продолжительности жизни (ОСПЖ) для населения Свердловской области, проживающего в различных районах области и в различных типах зданий (табл.1).

Таблица 1

Сопоставление расчетов радиационного риска и ОСПЖ при облучении радоном в жилищах с использованием различных подходов

Вид жилища	$P_{прив}$, WLM/год	Радиационный риск	ОСПЖ, сут	Атрибутивный риск, %
Беспороговая модель				
Сельские дома	0,85	0,022/0,0043	91,5/21,7	34,2/35,5
Городские квартиры	0,26	0,0068/0,0014	28,0/6,7	12,4/13,3
Городские квартиры, первые этажи	0,37	0,0096/0,0019	39,8/9,5	18,5/19,6
Городские квартиры, верхние этажи	0,23	0,0060/0,0012	24,8/5,9	11,5/12,2
Среднее по области	0,37	0,0096/0,0019	39,8/9,5	18,5/19,6
Пороговая модель				
Сельские дома	0,85	0,013/0,0025	53,5/12,7	20,0/20,5
Городские квартиры	0,26	0,0018/0,00035	7,4/1,7	3,3/3,5
Среднее по области	0,37	0,0039/0,00075	15,9/3,8	6,4/6,6

Примечания. 1. В числителе и знаменателе – для мужчин и женщин соответственно.
2. Для 20,2 % городских и 59,4 % сельских жилищ ожидается превышение порога оценки 30 Бк/м^3.

Из полученных оценок следует, что примерно 6,5 % случаев рака легкого в Свердловской области могут быть обусловлены экспозицией ДПР радона и торона с ЭРОА изотопов радона, превышающем 30 Бк/м^3. В принципе эта величина является той долей заболеваний, которую можно подтвердить при подробных эпидемиологических исследованиях и потенциально предотвратить широкомасштабным проведением противорадоновых мероприятий, снижающих уровень ЭРОА

радона в жилищах до величин, не превышающих 30 Бк/м^3.

Важную практическую задачу представляет оценка радиационных рисков для населения, проживающего на территории восточно-уральского радиоактивного следа (ВУРСа), образовавшегося в результате аварии 1957 г. на ПО «Маяк» [1, 2]. Оценки пожизненного популяционного риска возникновения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний и популяционный ущерб для населения зоны ВУРСа, рассчитанные как в рамках беспороговой модели, так и с использованием порога оценки радиационного риска $D^{пор}(t_e)$, приведены в табл.2. Для уровней радиоактивного загрязнения, характерных для территории Свердловской области, пороговое значение дозы $D^{пор}(t_e)$ было превышено только для красного костного мозга, а также верхнего и нижнего отделов толстого кишечника.

Таблица 2

Оценка пожизненного популяционного риска возникновения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний и популяционного ущерба для населения зоны ВУРСа Свердловской области (300 тыс. человек на момент аварии 1957 г.)

Локализация	Заболеваемость, число случаев		Общая заболеваемость, число случаев	Общая смертность, число случаев	Ожидаемый ущерб, человеко-годы		Суммарный ожидаемый ущерб, человеко-годы
	Мужчины	Женщины			Мужчины	Женщины	
Лейкемия	30-36 13-14	19-26 6-10	49-62 19-24	48-61 19-24	640-720 270-400	410-480 200-220	1120-1130 470-620
Новообразования	73-221 26-116	151-413 28-123	234-613 58-251	166-435 32-138	730-1700 170-540	1900-4400 320-780	3100-6000 490-1300
Всего	103-257 36-130 (187/74)	170-439 38-140 (251/76)	283-675 74-270 (438/150)	214-496 51-162 (327/93)	1400-2400 440-940 (2100/670)	2300-4900 520-990 (3100/710)	4200-7100 960-1900 (5200/1400)

Примечание. 1. В числителе – оценка в рамках беспороговой модели; в знаменателе – данные расчетов с использованием порога оценки радиационного риска.

2. В скобках – среднее значение.

Еще одним радиационным фактором, воздействовавшим на население Свердловской области, стали газоаэрозольные выбросы ПО «Маяк», имевшие место в 1950-1960 гг. [2]. Основным дозообразующим нуклидом в этих выбросах являлся ^{131}I. Расчеты ожидаемой для населения Свердловской области вероятности возникновения рака щитовидной железы, обусловленного газоаэрозольными выбросами ПО «Маяк», были произведены с использованием аддитивной, мультипликативной и других моделей радиационного риска. Ожидаемое количество случаев радиационно-индуцированного рака щитовидной железы в зоне ВУРСа от 80 до 580 (среднее 340), для территории Свердловской области вне зоны ВУРСа от 220 до 1600 (среднее 950). Для условий облучения, характерных для Свердловской области, пороговая и беспороговая модели дали сопоставимые результаты.

Наибольший интерес представляет сопоставление радиационных рисков и радиационного ущерба для зоны ВУРСа, на население которого воздействовали следующие источники излучения:

1) радиоактивное загрязнение территории радионуклидами в результате аварии на ПО «Маяк» в сентябре 1957 г.;

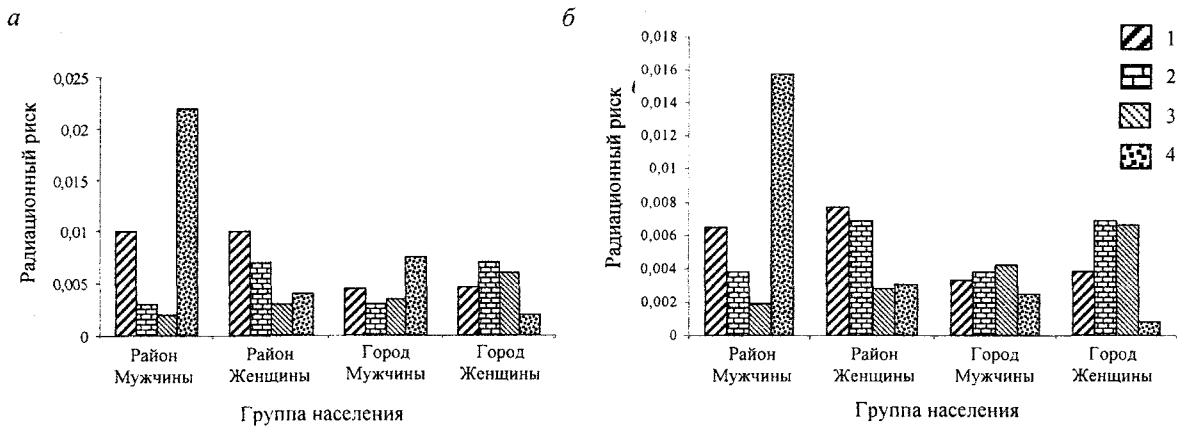


Рис.1. Сопоставление пожизненного радиационного риска от различных источников облучения для критической группы населения Каменского района и г.Каменск-Уральского: *а* – расчет в рамках беспороговой модели; *б* – расчет с использованием порогового подхода к оценке радиационного риска

1-4 – источники излучения

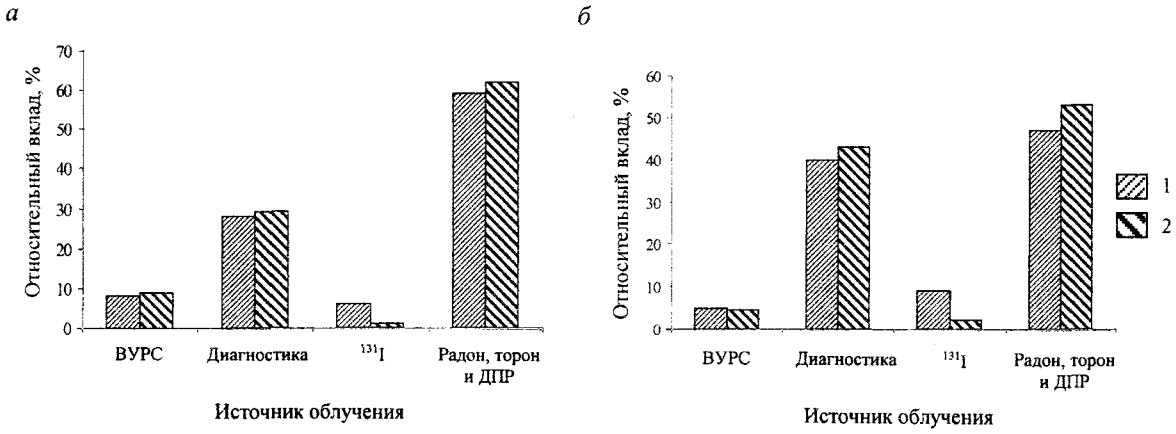


Рис.2. Относительный вклад различных источников излучения в ожидаемые популяционные риск и ущерб для зоны ВУРСа Свердловской области: *а* – расчет в рамках беспороговой модели; *б* – расчет с использованием порогового подхода к оценке радиационного риска

1 – заболеваемость; 2 – потеря продолжительности жизни

2) газоаэрозольные выбросы ПО «Маяк» (в основном ^{131}I) в 1950-1960 гг;

3) природные радионуклиды, включая радон, торон и их дочерние продукты распада;

4) медицинское облучение от проведения рентгенодиагностических процедур.

В связи с этим для всех районов зоны ВУРСа были рассчитаны индивидуальный и популяционный риск и ущерб, обусловленные всеми основными радиационными факторами (рис.1 и 2, табл.3).

Для населения зоны ВУРСа доминирующий вклад в популяционные радиационные риски и ущербы вносит пожизненное облучение ДПР радона в жилищах и медицинское диагностическое облучение. Эти факторы доминируют в любой модели расчета.

Таблица 3

Оценка популяционного радиационного риска и ущерба для зоны ВУРСа Свердловской области

Источник облучения	Количество онкологических заболеваний		Ожидаемое количество потерянных человеко-лет жизни	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
ВУРС	190 73	250 75	2100 660	3100 700
Диагностика	580	930	6000	11300
Газоаэрозольные выбросы	105 102	240 220	170 160	570 550
Радон, торон и ДПР	2700 1500	540 310	30500 17500	7600 4300

Примечание. В числителе – оценка в рамках беспороговой модели; в знаменателе – расчеты с использованием порога оценки радиационного риска.

Анализ вклада основных нерадиационных факторов риска в структуру смертности населения подтвердил, что тремя основными причинами смерти в регионе, как и в России в целом, являются болезни системы кровообращения, онкологические заболевания и несчастные случаи и травмы. При этом обусловленный ими уровень индивидуального пожизненного летального риска и связанного с ним снижения продолжительности жизни на несколько порядков выше, чем для радиационных факторов.

Выводы

1. Полный пожизненный атрибутивный риск возникновения рака легких за счет ингаляционного облучения ДПР радона составляет в области 18,5 %. Ингаляционное облучение при ЭРОА изотопов радона более 30 Бк/м^3, т.е. уровне, для которого доказана связь облучения ДПР радона и возникновения рака легких, соответствует атрибутивному риску возникновения радиогенного рака легкого (6,5 %).

2. Уровни индивидуального радиационного риска и ожидаемого сокращения продолжительности жизни, обусловленные техногенными радиационными воздействиями, сопоставимы с уровнями, обусловленными постоянно действующими радиационными факторами, только для критической группы жителей Каменского района 1951-1957 г. рождения. Для остальных районов и групп населения вклад техногенного облучения много ниже, чем постоянно действующих радиационных факторов.

3. Индивидуальные радиационные риски и ОСПЖ, обусловленные облучением в зоне ВУРСа Свердловской области и зоне влияния газоаэрозольных выбросов ПО «Маяк», на один-два порядка ниже, чем вероятность смерти от основных нерадиационных факторов риска (сердечно-сосудистые заболевания, онкологические заболевания, несчастные случаи и травмы и др.).

Таким образом, можно сформулировать следующие требования к оценке радиационных рисков для населения, проживающего на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению:

- учет всех радиационных факторов, воздействующих на население;
- учет региональных демографических особенностей и данных по спонтанной частоте возникновения онкологических заболеваний;
- определение функции распределения дозовых нагрузок на население;
- дифференцированная оценка радиационных нагрузок и радиационных рисков от ингаляционного облучения ДПР радона (учет типа жилья, геологических особенностей, режима содержания зданий и др.);
- расчет радиационных рисков для различных половозрастных групп от всех ос-

новных радиационных факторов, воздействующих на население;

• использование при расчетах различных моделей экстраполяции радиационного риска;

• оценка радиационных рисков с использованием беспороговой (для получения верхней границы оценки) и пороговой модели оценки;

• сопоставление радиационных рисков техногенного происхождения с рисками, обусловленными постоянно действующими радиационными факторами, а также рисками нерадиационной природы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восточно-уральский радиоактивный след / В.Н.Чуканов, Б.А.Коробицын, А.В.Баженов, А.П.Кулигин, М.В.Жуковский и др.; ИПЭ УрО РАН. Екатеринбург, 1996.

2. Восточно-уральский радиоактивный след. Проблемы реабилитации населения и территорий Свердловской области / В.Н.Чуканов, П.В.Волобуев, Н.А.Штинов, М.В.Жуковский и др.; ИПЭ УрО РАН. Екатеринбург, 2000.

3. *Жуковский М.В.* Возможный подход к модификации формулы для вычисления эффективной дозы / М.В.Жуковский, А.В.Павлюк // Атомная энергия. 2002. Т.92., № 5.

4. *Ильин Л.А.* Радиобиология и радиационная медицина – проблемы и перспективы их взаимодействия в рамках регламентации ионизирующих излучений // Мед. радиология и радиационная безопасность. 1998. Т.43. № 1.

5. *Кеирим-Маркус И.Б.* Еще о регламентации облучения человека // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2000. Т.45. № 3.

6. *Кеирим-Маркус И.Б.* Новые сведения о действии на людей малых доз ионизирующего излучения – кризис господствующей концепции регламентации облучения // Мед. радиология и радиационная безопасность. 1997. Т.42. № 2.

7. *Кеирим-Маркус И.Б.* Регламентация облучения для XXI века // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2000. Т.45. № 1.

8. *Кружалов А.В.*, Радиационная обстановка / А.В.Кружалов, М.В.Жуковский, А.Н.Кямкин // Государственный доклад о состоянии окружающей среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской области в 1999 году. Екатеринбург, 2000.

9. *Кружалов А.В.* Анализ радиационных рисков для населения зоны влияния предприятий атомного комплекса Уральского региона / А.В.Кружалов, М.В.Жуковский, А.В.Павлюк // Записки Горного института. СПб, 2001. Т.149.

10. Мета-анализ эпидемиологических исследований риска рака легкого при облучении радоном в жилищах / И.В.Ярмошенко, И.А.Кирдин, М.В.Жуковский, С.Ю.Астраханцева //: Экологические проблемы XXI века: Сахаровские чтения. Минск, 2002.

11. Радиационная обстановка и радиационная безопасность населения / М.В.Жуковский, А.Н.Кямкин, И.В.Тибилов, А.В.Кружалов // Государственный доклад о состоянии окружающей среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской области в 1998 году. Екатеринбург, 1999.

12. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года: Публикация 60 МКРЗ; Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года: Публикация МКРЗ 61. М.: Энергоатомиздат, 1994.

13. *Филюшкин И.В.* Теория канцерогенного риска воздействия ионизирующего излучения / И.В.Филюшкин, И.М.Петоян. М.: Энергоатомиздат, 1988.

14. *Ярмошенко И.В.* Облучение населения Свердловской области радоном и тороном / И.В.Ярмошенко, М.В.Жуковский, А.А.Екидин // Техногенез и экология: Информ.-темат. сб. / Уральская горно-геолог. академия. Екатеринбург, 1999.

15. *Zhukovsky M.* Radon Survey in the Ural Region of Russia: Results and Analysis / M.Zhukovsky, I.Yarmoshenko // Radiation Protection Management. 1998. N 2.

16. *Pierce D.A.* Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors / D.A.Pierce, D.L.Preston // Radiation Res. 2000. V.154.