

DOI 10.21661/r-470002

*Михнев Илья Павлович**Михнева Светлана Владимировна***ПРИРОДНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ КАК ИСТОЧНИК ФОНОВОГО
ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ НИЖНЕВОЛЖСКОГО РЕГИОНА**

Ключевые слова: гамма-фон, дочерние продукты распада, источники ионизирующего излучения, мощность поглощенной дозы, объемная активность, природные радионуклиды, радон.

В монографии изложены исследования фонового облучения населения от природных радионуклидов в помещениях Нижневолжского региона и представлены методы защиты от влияния естественных радионуклидов. Прямыми исследованиями установлена мощность поглощенной дозы Нижневолжского региона в помещениях деревянных, кирпичных и бетонных зданий. Проведен анализ частотного распределения эффективной удельной активности естественных радионуклидов в строительных материалах. Установлено, что доза, получаемая организмом на протяжении длительного периода, приводит к более серьезному поражению, чем такая же доза, полученная за короткий период.

Keywords: gamma background, daughter products of decay, sources of ionizing radiation, absorbed dose rate, volume activity, natural radionuclides, radon.

The monograph contains research of background radiation of the population from natural radionuclides in the premises of the Lower Volga region and presents methods of protection against the influence of natural radionuclides. Direct studies have established the absorbed dose rate of the Lower Volga region in the premises of wooden, brick and concrete buildings. The frequency distribution of the effective specific activity of natural radionuclides in building materials is analyzed. It has been established that the dose received by the body over a long period leads to more serious damage than the same dose received in a short period.

Среди всех источников ионизирующего излучения (ИИИ) ведущее место занимают природные радионуклиды, формирующие радиационный фон

помещений. Поскольку население промышленно развитых стран мира большую часть времени проводит внутри жилых и общественных помещений, на дозовые нагрузки от природных ИИИ существенно влияют естественные радионуклиды (ЕРН), содержащиеся в строительных материалах. Основные компоненты радиационного фона помещений существенным образом зависят от деятельности людей (выбор территорий под застройку, строительных материалов, конструкции зданий и пр.). Всё это привело к тому, что именно гамма-фон территорий, а также жилых и общественных помещений привлёк к себе наибольшее внимание в последние годы [1; 5]. В настоящее время установлено, что средняя доза облучения населения, обусловленная природным радиационным фоном и доза облучения при медицинских процедурах составляет 0,1–0,2 Зв за пятьдесят лет. Таким образом, выход соматических отдалённых последствий составляет 1–2% общей смертности от злокачественных образований. Выявление ранних случаев заболеваний среди населения ставит перед медицинской службой проблему ранней диагностики и профилактики заболеваний, что влечет за собой необходимость применения современных информационных технологий в здравоохранении, особенно, создание систем дифференциальной медицинской диагностики [1; 2–4].

В последние годы население промышленно развитых стран всего мира было твердо убеждено в том, что основная опасность, исходящая от радиационного излучения – это разнообразные выбросы атомной промышленности и ядерные испытания. Однако современная действительность показывает, что на территориях, где не было никаких радиоактивных загрязнений, вдали от атомных предприятий, значительное количество людей, находясь у себя дома, получают внушительную дозу облучения. Еще в XVI веке было известно о трагических последствиях длительного нахождения населения в местах с повышенной концентрацией радона (^{222}Rn). В те годы о тяжелом инертном газе практически ничего не было известно. В горной местности Южной Германии рудокопатели подвергались неизвестному заболеванию – «горной чахотке». Знаменитые в те времена врачи, Парацельс и Агрикола в своих исследованиях доказывали о существовании в рудниках забоев инертных газов. В этих рудниках рабочие испытывали

одышку, усиление сердцебиения, многие теряли сознание и умирали. Причем в атмосферном воздухе не было замечено никаких примесей и запаха [1–3].

В настоящее время практически каждый человек хотя бы раз слышал фразы: «радонотерапия» и «радоновые ванны». Однако не многие знают, какую именно пользу или вред, несет этот инертный тяжелый газ (в 7,5 раз тяжелее воздуха), и как часто можно его использовать в лечебных целях. Несмотря на свою известность в качестве лечебного средства, не стоит забывать, что этот газ, прежде всего, радиоактивное вещество. А это значит, что ^{222}Rn далеко не безопасен для человеческого организма. Микродозы ^{222}Rn , растворенные в предназначенных для ванн минеральных водах, проникая внутрь человеческого организма, оказывают влияние практически на все системы: от кровеносной до нервной. Под воздействием ^{222}Rn , на кожных покровах и в органах возникает эффект ионизации, который инициирует внутренние процессы и приводит в действие регенерационные механизмы человеческого тела. Как и любое лекарственное средство, ^{222}Rn имеет целый ряд противопоказаний. Лечение ^{222}Rn строго противопоказано людям со злокачественными образованиями, беременным, а также при гипотериозе, гипозестрогении, выраженной лейкопении и некоторых видах бесплодия. Запрещается использовать ^{222}Rn тем людям, чья профессиональная деятельность заставляет часто находиться в зоне воздействия разнообразных излучений (например, СВЧ, УВЧ и т. д.). Не допускаются к аналогичному лечению люди, у которых наблюдаются кожные заболевания, лихорадочные состояния, тяжело протекающие невроты и при нарушениях работы щитовидной железы [4; 6].

Действительно, уже к 1920-м годам выяснилось, что в микродозах ^{222}Rn оказывается благотворное влияние на организм человека. Однако у всего сущего есть две стороны. Современные исследования выявили, что именно этот, инертный радиоактивный газ ^{222}Rn , более века служащий здоровью населения, – одна из основных причин развития рака легких. Воздействие на живой организм ионизирующего излучения может проявляться в отдаленные сроки (появление генетических эффектов через 10 – 30 лет). Причиной заболевания становятся дочерние продукты распада (ДПР), оседающие в организме человека после распада

газа ^{222}Rn и интенсивно облучающие его изнутри. Часто люди страдают от аналогичного излучения, даже не замечая его. Ведь этот тяжелый инертный газ находится в строительных материалах и выделяется из недр земли в том месте, где построено здание [4; 6–7].

К началу 40-х годов прошлого века почти никто не сомневался в том, что главная причина рака легких у шахтеров – это альфа-излучение ^{222}Rn . По оценкам Научного комитета по действию атомной радиации Организации объединенных наций (НК ДАР ООН), не существует порога индуцирования молекулярного изменения на особых участках ДНК, затронутых взаимодействием альфа и гамма-излучения, которое приводит к злокачественному образованию и в итоге к развитию рака. Из всех последствий облучения человека, даже малыми дозами, наиболее серьезным заболеванием является – рак. Любая сколь угодно малая доза увеличивает вероятность заболевания раком для человека, получившего эту дозу, и всякая дополнительная доза облучения ещё более увеличивает эту вероятность. Известно, что появление злокачественных опухолей возрастает прямо пропорционально дозе облучения [1; 4–7].

Обширные обследования НК ДАР ООН, охватившие около ста тысяч человек, показали, что самыми распространёнными видами рака, вызванными действием альфа и гамма-излучения, оказались рак лёгких, рак молочной и щитовидной железы. Период между получением дозы и распознаванием рака длится многие годы. Этот период называется – латентным. Средний латентный период составляет обычно 8 лет в случае индуцированной лейкемии и в 2–3 раза больше в случае многих индуцированных твёрдых опухолей, например молочной железы или лёгкого. Минимальный латентный период составляет около двух лет для острой миелоидной лейкемии и порядка 5–10 лет для других видов рака [1–3].

Под руководством ученых в разных областях науки НК ДАР ООН с конца 1970 года, накопленные данные о действии радона на население, были подвергнуты тщательному анализу. В итоге получен важнейший результат: соотношение риск – экспозиция (связь между вероятностью возникновения раковых

заболеваний и временем пребывания человека в атмосфере с заданной концентрацией радона) [4–7].

В Федеральном законе «О радиационной безопасности населения», принятом в декабре 1995 г. изложено ограничение облучение населения, обусловленное радоном и дочерними продуктами распада в жилых и производственных зданиях. В дальнейшем эти ограничения были изложены в Нормах радиационной безопасности (НРБ-99). В соответствии с НРБ-99 контролю подлежит, как строительное сырье, и территории, предназначенные под строительство зданий, так и завершённые строительные конструкции [1; 4]. Также можно отметить, что контроль радиационных характеристик на всех этапах производства и строительства может обеспечить принятие различных альтернативных решений. При этом контроль радиационных характеристик радона только внутри построенных зданий, приведет к значительным финансовым расходам [1; 5–6].

В основную дозу облучения населения вносят естественные источники ионизирующего излучения. Примерно 3/4 индивидуальной годовой эффективной эквивалентной дозы облучения, получаемой населением от природных источников радиации, вносит ^{222}Rn и его дочерние продукты распада (ДПР). Существенное влияние на дозу, обусловленную радоном, оказывают радиационные характеристики стройматериалов и почвы под зданием, т.к. значительную часть времени (около 80%) население промышленно развитых стран мира, находится внутри помещений. От изменения радиационных характеристик стройматериалов, меняются и индивидуальные дозы облучения в помещениях, построенных на различных участках. Поэтому исследования объемной активности радона, факторов, влияющих на ее изменение, а также методов снижения воздействия радона на население являются актуальной задачей. Решение проблемы обеспечения радоновой безопасности может быть осуществлено путем комплексных исследований радиационных характеристик строительного сырья, материалов, территорий, атмосферного воздуха, а также концентраций радона, в воздухе вновь построенных и эксплуатируемых жилых и общественных зданий.

Снижение коллективной дозы для населения на 20–25% означает сокращение раковых заболеваний населения Волгоградского региона на 25–30%.

Ввиду того, что содержание ЕРН в строительных материалах варьирует в широких пределах, индивидуальные дозы облучения населения в различных зданиях и регионах изменяются от значений в два раза ниже среднего до значений в 100 раз и более превышающих средние. Поэтому исследования гамма-фона территорий, жилых и общественных помещений, а также радиационных характеристик строительных материалов и разработка методов снижения облучения населения являются актуальной задачей. Решение проблемы снижения дозовых нагрузок в помещениях может быть осуществлено путём комплексных исследований радиационных характеристик строительного сырья, материалов, территорий и мощности дозы в строящихся и эксплуатируемых зданиях. Чрезвычайно важным этапом решения комплексной проблемы является радиационный контроль при разработке новых и реализуемых на рынке материалов для снижения мощности дозы в помещениях [1–3; 7].

В ходе исследований решались следующие задачи:

- выявление закономерностей изменения гамма-фона территорий и помещений от влияния различных факторов;
- разработка эффективных средств и методов снижения доз облучения населения в жилых и общественных помещениях.

Методы исследований включали: аналитическое обобщение известных научных и технических результатов; стандартные методики исследования свойств строительных материалов и гамма-спектрометрический анализ эффективной удельной активности ЕРН; дозиметрические и радиометрические методы определения дозовых нагрузок и обработку экспериментальных данных методами математической статистики.

Научная значимость исследования дозовых нагрузок в помещениях. Впервые в Нижневолжском регионе проведены широкомасштабные исследования дозовых нагрузок в жилых и общественных помещениях, построенных из различного вида строительных материалов. Установлены мощность экспозиционной

дозы (МЭД) месторождений строительного сырья, территории и эффективная удельная активность ($A_{эфф}$) почвы Нижневолжского региона. Установлены закономерности изменения мощности доз территорий, месторождений строительного сырья и помещений в зависимости от влияния различных факторов (времени года, применяемых строительных материалов и т. д.). Получено частотное распределение $A_{эфф}$ в строительном сырье и материалах. Анализ частотных распределений показал, что население Нижневолжского региона подвергается большему (до 56%) облучению от строительных материалов с $A_{эфф}$ до 200 Бк/кг. Впервые экспериментально выявлена зависимость мощности поглощенной дозы (МПД) в помещении от $A_{эфф}$ применяемого строительного материала. Установлено, что мощность поглощённой дозы в производственных помещениях предприятий строительного комплекса в среднем на 15–20% выше, чем в жилых помещениях (42–213 нГр/ч). В тёплое время года мощность дозы в помещениях повышается на 2–3% и практически не зависит от этажности здания [1; 4–7].

Рассчитана среднегодовая эффективная эквивалентная доза гамма-излучения (485–1985 мкЗв/год) населения. Впервые установлена дополнительная эффективная эквивалентная доза (ЭЭД) для населения Нижневолжского региона ($H_{пом} = 235,8$ мкЗв/год), обусловленная проживанием в современных каменных зданиях. Уровень облучения жителей региона превышает средний уровень облучения населения по стране на 100 мкЗв/год. Исследованы удельные активности ЕРН в местных и импортных отделочных материалах, изготовленных из различного вида сырья. Установлено, что наиболее низкие показатели (менее 50 Бк/кг) имеют полимерные, гипсовые, гипсополимерные и древесно-волоконистые отделочные материалы, а наиболее высокие (164–355 Бк/кг) – керамические облицовочные плитки. Установлено, что отделка только двух поверхностей (пола и потолка) облицовочным материалом с $A_{эфф} \leq 30$ Бк/кг снижает МЭД в помещении в 1,5–2 раза. Для снижения дозовых нагрузок в помещениях целесообразно использовать материалы с высокой плотностью и низкой $A_{эфф}$ (например, радиационно-модифицированные гипсополимерные, древесно-волоконистые плиты и паркет). Впервые предложен метод снижения дозовых нагрузок в строящихся и

эксплуатируемых зданиях, основанный на расчёте толщины защитных материалов и определении мощности источника излучения, представляющего замкнутую систему. Предложен метод снижения МЭД в помещениях за счёт нормирования удельной активности ЕРН в строительных материалах [1; 4–5].

Теоретическая часть исследования. По результатам исследований впервые составлена карта распределения дозовых нагрузок территории Волгоградской области, позволяющая ориентироваться проектным организациям при инженерных радиационно-экологических изысканиях и отведении территорий под застройку. Разработан метод расчёта мощности дозовых нагрузок помещений с учётом эффективной удельной активности строительных материалов, позволяющий оценить опасность радиационного воздействия на человека. Разработан нормативный материал для использования в стройиндустрии с целью снижения облучения населения в регионе. Разработаны и приняты к исполнению «Нормы допустимых уровней гамма-излучения, радона на участках застройки и отбора проб», обеспечивающие радиационную безопасность населения Нижневолжского региона. Результаты выполненных исследований внедрены на предприятиях стройиндустрии Волгоградской области при разработке месторождений строительного сырья, производстве строительных материалов, отводе участков под застройку и строительстве зданий, а также используются при ежегодном составлении радиационно-гигиенического паспорта Волгоградской области.

В настоящее время известны около 300 естественных радионуклидов. Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. До недавнего времени излучение от природных источников рассматривалось как незначительное и неизбежное явление естественного радиационного фона, не влияющее на человека. В настоящее время признано, что поглощённые дозы населения в жилых помещениях могут быть весьма высокими и их можно уменьшить, а также избежать возникновения значительных дозовых нагрузок при строительстве новых зданий [1; 5–7]. Для природных ИИИ характерен широкий разброс значений. В зависимости от применяемых строительных материалов, большие группы населения могут получать дозы выше средних. Основной вклад

в коллективную дозу облучения населения вносят природные ИИИ в основном вследствие облучения от строительных материалов. По оценкам Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НК ДАР ООН), население промышленно развитых стран около 80% времени проводит внутри жилых и производственных помещений. Основные компоненты радиационного фона помещений существенным образом зависят от деятельности людей (выбор строительных материалов, конструкции зданий, вентиляции помещений и пр.). Всё это привело к тому, что именно радиационный фон помещений (и в первую очередь жилых) в последние десятилетия привлёк к себе наибольшее внимание специалистов. В процессе переработки минерального сырья может происходить концентрирование ЕРН в конечном или промежуточном продуктах, а также в отходах производства, используемых стройиндустрией. Такие производства могут явиться поставщиками продуктов с повышенной концентрацией ЕРН. Трудность заключается в том, что специалисты стройиндустрии (проектировщики, технологи, строители) чрезвычайно мало информированы об этой физической характеристике строительных материалов, о концентрации радиоактивности в строительном сырье и методах их контроля, наконец, о действующих в России и за рубежом нормативных документах.

При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы мощность дозы гамма-излучения в помещениях не превышала мощности дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч (20 мкР/ч). Для обеспечения нормальных по радиационному признаку условий в помещении, к первому классу отнесены строительные материалы с удельной активностью не более 370 Бк/кг [1; 4–5].

Существующая практика производства строительных материалов складывалась с учётом их стоимости. Поэтому учёт дополнительного критерия – степени радиационного воздействия на человека приведёт к определённому повышению стоимости производства строительных материалов. Учёт соотношения «польза-вред» при решении целесообразности проведения технологических мероприятий (изменение температуры, длительности обработки материалов и др.) при

переработке строительного сырья с повышенной концентрацией ЕРН, является актуальной задачей. Проведение мероприятий, ведущих к уменьшению ущерба здоровья населения целесообразно, если уменьшение ущерба будет не менее стоимости этих мероприятий, а свойства материалов останутся прежними, либо будут улучшаться. Для высокой точности оценки радиационного фона в жилых помещениях требуется специальная аппаратура, позволяющая измерять низкие удельные активности ЕРН в объектах внешней среды, а также предельно низкие мощности дозы гамма-излучения с разделением вклада в показания приборов, обусловленного космическим и гамма-излучением от строительных материалов. Наиболее приемлемыми приборами для измерения указанных выше радиационных характеристик являются дозиметры ДРГ-01Т1 и СРП-68–01, обладающие высокой чувствительностью, достаточной точностью измерений, удобством и простотой проведения массовых измерений. Для определения удельных активностей ЕРН в строительном сырье, материалах, почве, древесине и др. целесообразно использовать универсальный спектрометрический комплекс (УСК «Гамма Плюс Р») на базе сцинтилляционного гамма-спектрометра, обеспечивающий установление класса материала [1; 3].

Практическая значимость исследования. Результаты проведённых широко-масштабных исследований дозовых нагрузок территории Нижневолжского региона показывают, что их значения находятся в пределах 50–120 нГр/ч (5–12 мкР/ч). В местах залегания коренных пород, где ведутся работы по добыче основных строительных материалов, мощность дозы колеблется от 128 до 374 нГр/ч на поверхности, а на глубине от 3 до 5 метров от 187 до 460 нГр/ч [1; 4–7]. На основании результатов проведённых исследований, нами разработаны и приняты к исполнению «Нормы допустимых уровней гамма-излучения, радона на участках застройки и отбора проб» которые устанавливают предельный допустимый уровень мощности дозы гамма-излучения на открытых участках территории, равный 200 нГр/ч (20 мкР/ч). Также составлена карта (рис. 1) распределения мощности дозы на территории области для проведения анализа дозовых нагрузок территорий, отведённых под застройку.



Рис. 1. Карта распределения средней мощности поглощённой дозы на территории Волгоградской области, нГр/ч

Средние значения МПД гамма-излучения на улицах населённых пунктов области близки к средним значениям по России и составляют $\sim 76\text{--}87$ нГр/ч, а в садах, парках, в лесу (на открытой местности) ~ 52 нГр/ч. Все измеренные значения дозовых нагрузок территории области не превышают допустимых уровней, установленных региональными нормами [1; 3]. Территория Волгоградской области характеризуется пористыми геологическими системами и обеспечена глинами, песками, мелом и известняками. Горные породы области, разрабатываемые для нужд стройиндустрии, представлены исключительно осадочными породами. Анализ радиоактивности отдельных видов сырьевых строительных материалов показал, что наиболее высокие $A_{\text{эфф}}$ характерны для глины; наиболее низкие – для карбонатных пород (известняк, доломит). Песок и гравий, как правило, имеют удельную активность ЕРН, близкую к средней активности для

земной коры. Проведённое исследование большого числа образцов строительных материалов (около 1200 образцов) по Нижневолжскому региону позволило получить частотное распределение материалов по эффективной удельной активности. Наибольшие значения удельной активности наблюдаются в бетонных конструкциях и керамическом кирпиче, а наименьшие в гипсовых материалах и изделиях из стекла. Частотное распределение строительных материалов Нижневолжского региона по $A_{эфф}$ имеет два существенных отличия от частотного распределения по $A_{эфф}$ в среднем по России:

– наибольшие значения $A_{эфф}$ приходятся на интервал 25–200 Бк/кг, чем в среднем по России. На этот интервал приходится 55,6% всех обследованных материалов, а в среднем по России на этот интервал приходится менее 10% материалов;

– наименьшие значения для Нижневолжского региона приходятся на материалы с $A_{эфф}$ более 200 Бк/кг.

Из выше изложенного следует, что население региона подвержено облучению в большей степени от материалов с $A_{эфф}$ до 200 Бк/кг и меньшему облучению от материалов с $A_{эфф}$ превышающей 200 Бк/кг [1, 5–7]. Особый интерес представляют материалы, изготавливаемые с использованием отходов промышленности. Безотходная технология стимулирует использование отходов промышленности для производства строительных материалов. Такая практика способствует сохранению окружающей среды, природных ресурсов, предотвращает загрязнение земной поверхности, рек, а также сокращает расходы на производство стройматериалов. Однако эффективная удельная активность в отходах промышленности соответствует повышенным значениям ЕРН в материалах. Исследования удельных активностей ЕРН в отходах промышленности показали более высокие значения в золошлаковых отходах и фосфогипсе. Поэтому рекомендовано производителям строительных материалов использовать отходы промышленности с ограниченным дозированием в составах с целью снижения активности ЕРН в конечном продукте. Разработанные нами «Нормы допустимых уровней гамма-излучения, радона на участках застройки и отбора проб», «Справочник по

радиационному контролю в стройиндустрии Волгоградской области», а также результаты МЭД территории Волгоградской области переданы Территориальному строительному комитету Администрации Волгоградской области в виде Научно-технического отчёта. Таким образом, на территории области стало возможно проведение радиационного анализа участков, отведённых под строительство, месторождений строительного сырья и материалов с целью управления снижением радиационных характеристик в регионе.

Исследования жилых и общественных помещений показали, что МПД в деревянных, кирпичных и железобетонных зданиях находятся соответственно в пределах 24 – 82, 31 – 146, 98 – 327 нГр/ч (см. табл. 1).

Таблица 1

Показатели мощности поглощённой дозы гамма-излучения в помещениях

Материал здания	Число жителей, тыс. чел.	Число измерений	МПД, нГр/ч		ЭЭД населения, мкЗв/год
			средняя	вариации	
Силикатный кирпич	932,2	978	71	39 – 187	612
Железобетонные панели	1403	1062	213	98 – 327	1983
Керамический кирпич	250	723	64	31 – 146	574
Строительная древесина	29,8	637	42	24 – 82	486

Установлено, что средняя эффективная эквивалентная доза (ЭЭД) в зданиях, построенных из различных строительных материалов, составляет от 486 до 1983 мкЗв/год, что в 1,1–4,5 раз выше, чем в среднем по России (441 мкЗв/ч) [1; 6–7]. Это объясняется различием активности ЕРН в строительных материалах, из которых построены здания и почвообразующих пород районов, имеющих различные показатели $A_{эфф}$. В случае, если население Нижневолжского региона круглый год будет находиться на открытой местности (2π-геометрия), то годовая ЭЭД гамма-излучения (мкЗв/год) в исследуемом регионе составит:

$$H_{2\pi} = k \cdot A_{эфф}, \quad (1)$$

где k – коэффициент учитывающий дозовые нагрузки, создаваемые гамма-излучением ЕРН (для открытой местности $k = 3,25$; для помещений, построенных из дерева $k = 3,09$; для кирпичных зданий $k = 4,74$; для панельных зданий $k = 12,38$). Для населения, проживающего в современных каменных домах (при среднем значении $A_{эфф} = 158,3$ Бк/кг), годовая эквивалентная доза ($H_{ном}$) составит 750,3 мкЗв/год и $H_{2\pi} = 514,5$ мкЗв/год.

Разность $H_{ном} - H_{2\pi}$ представляет собой дополнительное действие гамма-излучения ЕРН, обусловленное проживанием в современных каменных зданиях. Дополнительная ЭЭД гамма-излучения для населения Нижневолжского региона составляет:

$$H_{ном} - H_{2\pi} = 750,3 - 514,5 = 235,8 \text{ мкЗв/год} \quad (2)$$

Сравнивая полученное значение с величиной дополнительного облучения в среднем по стране (136 мкЗв/год при $A_{эфф} = 93$ Бк/кг), можно заключить, что уровень облучения жителей региона превышает средний уровень облучения населения по стране на 100 мкЗв/год [1, 4]. Отношения средней мощности дозы гамма-излучения в жилых зданиях $R_{пом}$ Нижневолжского региона к мощности дозы на открытой местности $R_{ул}$, отнесённой к числу жителей, составили для деревянных домов – 0,96; бетонных – 1,87 и кирпичных – 1,41. Значения $R_{пом}/R_{ул}$ для деревянных домов близки к известным ранее данным, а для панельных и кирпичных домов на 4–15% выше. Средняя мощность дозы гамма-излучения в жилых зданиях различается для разных районов региона в зависимости от преимущественного типа построек и удельной активности ЕРН в местных строительных материалах. Установлено, что в панельных зданиях суммарные дозы, получаемые населением в 3–5 раз выше, чем в остальных зданиях. Это связано с тем, что в панельных конструкциях используются инертные заполнители (щебень, гравий), а иногда и отходы промышленности (шлак, зола и т. д.), которые, как правило, имеют повышенные показатели удельной активности.

Кроме жилых помещений нами проводились исследования мощности дозы в зданиях общественного назначения. В первую очередь были обследованы помещения в детских и учебных заведениях, так как воздействие дозовых нагрузок

особенно опасно для детского организма. Мощность поглощённой дозы более чем в 50% помещений детских и учебных заведений не превышает 150 нГр/ч и менее чем в 2% превышает 250 нГр/ч (25 мкР/ч). Все обследованные помещения детских и образовательных заведений не превышают допустимого уровня мощности дозы. С целью выявления зависимости МПД в помещении от $A_{эфф}$ применяемых строительных материалов проведены экспериментальные исследования дозовых нагрузок. Были изготовлены два куба с размером ребра 100 см и 120 см установленные один в другой, стенки между которыми заполняли смесью компонентов с $A_{эфф}$ до 370 Бк/кг, то есть материалом 1 класса. В центре куба на расстоянии 0,5 м от стен с помощью дозиметра ДРГ-01Т1 и СРП-68–01 проводили измерения МЭД.

Исследования показали, что в объёме 1 м^3 изготовленном из строительных материалов с $A_{эфф} = 370 \pm 5\%$ Бк/кг, превышение МЭД составит в среднем 27,1 мкР/ч, что на 7,1 мкР/ч выше нормативных значений. Расчётом было установлено, что площадь помещения практически не влияет на мощность дозы. Проведённые экспериментальные исследования дозовых нагрузок в известном объёме с различной $A_{эфф}$ позволили построить график зависимости МПД в помещении от $A_{эфф}$ применяемых строительных материалов. По $A_{эфф}$ материалов с помощью этого графика можно определить не только значения МПД в помещении, но и их отклонения при случайном включении в стены или перекрытия инородных тел с высокими активностями.

Исследование большого числа домов показало, что МПД в помещении практически не зависит от этажности здания. Наблюдается только незначительное повышение дозовых нагрузок (на 0,5–1,5%) в помещениях, расположенных на десятом этаже и выше. Это связано с дополнительным вкладом космического излучения, которое обладает достаточно высокой проникающей способностью и сильно зависит от высоты над уровнем моря. Установлено, что в весенне-летний период средняя мощность дозы на 2–3% выше, чем в осенне-зимний. Это обусловлено тем, что в весенне-летний период определённый вклад в мощность дозы вносит максимальная солнечная активность и космическое излучение.

Повышение дозовых нагрузок в тёплое время года объясняется максимальным открытием пор земной поверхности, а также в ряде районов влиянием глинообразующих пластов, у которых высокие показатели удельной активности радионуклидов [1; 3–4]. Проведённые исследования МПД в известном объёме показали, что для снижения дозовых нагрузок в помещении необходимо, чтобы $3 \cdot A_{\text{эфф}}$ защитного материала была $\leq A_{\text{эфф}}$ строительного материала стен и перекрытий. Исследованные нами группы материалов, изготовленные по разным технологиям, позволили выявить такие материалы (полимерные, гипсополимерные и т. д.).

Теория снижения мощности дозы гамма-фона в помещениях основана на применении законов ионизации среды заряженными частицами различной природы. В результате взаимодействия с атомами среды, движущийся заряд постепенно теряет свою энергию на возбуждение и ионизацию атомов этой среды, а также на излучение при торможении. Количественные результаты зависят как от свойств среды защиты (плотность, атомный номер), так и от природы движущейся частицы (энергия, заряд, масса). Для решения практических задач снижения дозовых нагрузок в жилых и общественных помещениях определяется радиационная обстановка (мощность дозы, годовая доза и др.), измеряется мощность экспозиционной дозы P (Р/ч):

$$P = \frac{M \cdot 8,4}{R^2}, \quad (3)$$

где M – гамма-эквивалент источника, $мг \cdot эквRa$; $8,4$ – гамма-постоянная Ra в равновесии с основными дочерними продуктами распада; R – расстояние от источника (в нашем случае плоскости стены, пола или потолка), $м$. При необходимости рассчитывается экспозиционная доза D гамма-излучения:

$$D = \frac{dQ_x}{dm} = \frac{dQ_x}{\rho \cdot dV}, \quad \text{или} \quad D = \frac{M \cdot 8,4 \cdot t}{R^2}, \quad (4)$$

где dQ_x – сумма электрических зарядов одного знака всех ионов в элементе объёма воздуха (dV) массой (dm), образованных электронами эмиссии, вызванных гамма-квантами, при условии полного торможения; ρ – плотность материала; t –

время детектирования, (τ). Выбор строительного материала и оценка толщины защитного слоя осуществляется в зависимости от плотности материалов, $A_{эфф}$ и рассчитывается по таблице 2.

Таблица 2

Значение толщины защитного материала (см) при заданной кратности ослабления и плотности (ρ) выбранного материала

Кратность ослабления	Расчётные значения толщины и коэффициентов	Кратность ослабления	Расчётные значения толщины и коэффициентов
1,0	20,0 – 6,4 ρ	10	118,2 – 51,2 ρ
1,5	29,7 – 9,1 ρ	20	147,5 – 63,1 ρ
2,0	44,9 – 13,2 ρ	50	189,6 – 76,4 ρ
2,5	66,8 – 19,7 ρ	100	206,4 – 79,8 ρ
5,0	89,9 – 36,4 ρ	200	234,5 – 87,4 ρ

Так как в условиях нашей задачи усреднённая МЭД создаётся шестью плоскими источниками (четыре стены, пол, потолок), формула для расчёта поля излучения источника такой геометрической формы состоит из шести i -функций и описывается в виде (см. рис. 6):

$$\varphi_{\bar{n}\delta i} = \frac{S}{4\pi} \left[\frac{\pi}{2} E(a) + \varphi_1(m; n; a) + \varphi_2(m; n; a) + \dots + \varphi_6(m; n; a) \right] \quad (5)$$

$$\varphi_i = A \cdot 8,4 \cdot \hat{O}(m; n; a) \quad (6)$$

где $n = h/l$; $m = l/b$; a – толщина защиты; S – активность плоского источника.

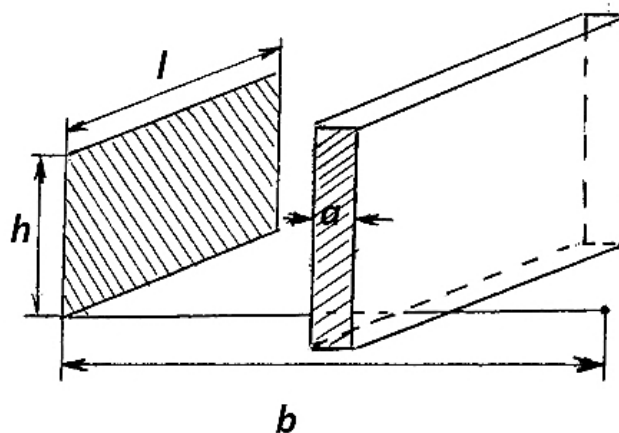


Рис. 6. Схема плоского источника излучения (S), защитного материала с толщиной (a) и расстояния (b) до точки детектирования (A) к формулам (4) и (5)

Если A – активность выражена в $Bк$, расстояние b от источника до детектора – в $м$, а гамма-постоянная в $мкР \cdot м^2 / (с \cdot Bк)$, то мощность дозиметрической величины будет выражена в $мкР/с$. Таким образом, суммарное значение измеренной величины соответствует значению активности от шести плоских прямоугольных источников, то есть $\varphi_{сум} = 6\varphi_i$. Установлено, что диапазон показателей активности изменяется в помещениях с различной площадью (от 4 до 30 $м^2$) в пределах $1 - 6 \cdot 10^{-6} з \cdot эквRa$, то есть ничтожно мал. Поэтому расстоянием от источника до точки детектирования можно пренебречь, то есть $R = const$. Окончательный расчёт толщины защитных материалов сводится к определению 1/6 значений по таблице 2 с конкретными кратностями ослабления и плотностью выбранного материала. $A_{эфф}$ учитывается для определения расчётного значения МЭД при установлении защитного материала и представлены в таблице 3.

Таблица 3

Расчётные коэффициенты МЭД с учётом $A_{эфф}$ защитных материалов

$A_{эфф}$, Бк/кг	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
К пересчёта	1,04	1,05	1,07	1,08	1,09	1,11	1,12	1,13	1,15	1,16

Для снижения дозовых нагрузок в помещении следует использовать строительные материалы с высокой плотностью и низкой $A_{эфф}$. К материалам с высокой плотностью относятся бетоны, стекло, граниты, тяжёлые камни и др. Однако все эти материалы имеют большую эффективную удельную активность (более 200 Бк/кг). Стекло имеет сравнительно низкую $A_{эфф}$ ($\sim 40 - 60$ Бк/кг), но этот материал по своим физическим свойствам не может быть универсальным отделочным, а тем более, конструкционным материалом в зданиях. Исследованы группы керамических, полимерных, гипсо-полимерных и древесно-волоконистых отделочных материалов, выполненных по разным технологиям. Преимуществом обладают материалы, выполненные радиационно-химическим способом (полная степень полимеризации связующего, использование наполнения до 85%, высокая плотность материала, $A_{эфф}$ не превышает 20 Бк/кг). Эти материалы могут быть конкурентоспособными для использования в помещениях с целью

снижения дозовых нагрузок. Установлено, что облицовка только двух поверхностей (пол и потолок) материалом с $A_{эфф} \leq 30$ Бк/кг снижает МПД в помещении в 1,5–2 раза [1; 4]. Любое ограничение облучения населения может распространяться только на те источники излучения, для которых возможно влияние человека на создаваемую им дозу (принцип контролируемости облучения). Полная защита от ионизирующего излучения может быть достигнута только в том случае, если доза от всех источников будет равна нулю, а это невозможно при любых разумных затратах. Поэтому требование защиты «любой ценой» бессмысленно.

Важнейшим параметром, придающим количественный характер оценкам, является значение максимально оправданных затрат для снижения ЭЭД на 1 чел·Зв. Эти оценки лежат в диапазоне от 100 до 100 000 \$ США на 1 чел·Зв. Замена строительного материала с повышенной $A_{эфф}$ ЕРН на альтернативный (подвергшийся дополнительной переработке), с низкой $A_{эфф}$ является целесообразной, если уменьшение ущерба здоровью населения в результате такой замены будет не меньше стоимости этой замены. С целью оценки экономических затрат выполнен расчёт (табл. 4) денежного эквивалента (α – максимально оправданных затрат на снижение дозы облучения на 1 чел·Зв) при замене различных видов строительных материалов, а также при проведении отделочных работ.

Таблица 4

Значения денежного эквивалента по основным видам строительных материалов, используемых в Нижневолжском регионе

Строительный материал	Население тыс. чел.	$\Delta A_{эфф}$, Бк/кг	Стоимость замены, дол/т	ЭЭД, мкЗв/год	Денежный эквивалент	
					$\frac{\text{дол}}{\text{чел} \cdot \text{Зв}}$	$\frac{\text{млн.дол}}{\text{чел} \cdot \text{Зв}}$
Керамический кирпич	250	89	0,85	574	1496	374
Строительная глина	–	122	1,16	578	2011	502,7
Силикатный кирпич	932,2	25	0,24	612	187	174,3
Железобетонные панели	1403	104	0,99	1983	206	289

Установлено, что денежный эквивалент с учётом радиационной безопасности зависит в основном от разности удельных активностей ЕРН в строительных материалах. С уменьшением этой разницы уменьшается стоимость замены (дол/т) материалов и возрастает денежный эквивалент [1; 3].

Основные выводы и заключения. В ходе выполнения данного исследования была решена задача, имеющая существенное практическое значение – снижение дозовых нагрузок в жилых и общественных помещениях от природных радионуклидов строительных материалов. Впервые в Нижневолжском регионе проведены широкомасштабные радиационные исследования жилых, общественных и производственных помещений, построенных из различных строительных материалов. Установлено, что МПД в производственных помещениях предприятий строительного комплекса в среднем на 15–20% выше, чем в жилых помещениях. Выявлены закономерности изменения мощности доз территорий, месторождений строительного сырья и помещений в зависимости от влияния различных факторов (времени года, применяемых строительных материалов, этажности здания и т. д.). Составлена карта распределения дозовых нагрузок территории Волгоградской области, позволяющая ориентироваться проектным организациям при инженерных радиационно-экологических изысканиях и отведении территорий под застройку. Впервые экспериментально выявлена зависимость МПД в помещении от эффективной удельной активности применяемого строительного материала. Получено частотное распределение $A_{эфф}$ в строительном сырье и материалах. Анализ этих частотных распределений показал, что население Нижневолжского региона подвергается большему облучению (до 56%) от строительных материалов с $A_{эфф}$ до 200 Бк/кг. Рассчитана среднегодовая эффективная эквивалентная доза гамма-излучения населения региона. Впервые установлена дополнительная ЭЭД для населения региона ($H_{пом} = 235,8$ мкЗв/год), обусловленная проживанием в современных каменных зданиях. Установлено, что уровень облучения жителей региона превышает средний уровень облучения населения по стране на 100 мкЗв/год. Разработаны и приняты к исполнению «Нормы допустимых уровней гамма-излучения, радона на участках застройки и

отбора проб», обеспечивающие радиационную безопасность населения региона. Разработан и выпущен «Справочник по радиационному контролю в стройиндустрии Волгоградской области», позволяющий потребителям ориентироваться по радиационным показателям в минеральном сырье, а проектировщикам в выборе территорий под застройку. Впервые исследованы удельные активности ЕРН в местных и импортных отделочных материалах, изготовленных из различного вида сырья. Установлено, что наиболее низкие показатели $A_{эфф}$ (менее 50 Бк/кг) имеют полимерные, гипсовые, гипсополимерные и древесно-волокнистые отделочные материалы, а наиболее высокие (164–355 Бк/кг) – керамические облицовочные плитки. Разработаны теоретические положения по снижению дозовых нагрузок в помещениях. Предложен метод снижения МЭД в помещениях за счёт нормирования удельной активности ЕРН в строительных материалах, а также использования материалов с высокой плотностью и низкой эффективной удельной активностью. Установлено, что отделка только двух поверхностей (пола и потолка) облицовочным материалом с $A_{эфф} \leq 30$ Бк/кг снижает мощность дозы в помещении в 1,5–2 раза. Предложен метод снижения дозовых нагрузок в помещениях, основанный на расчёте толщины защитных материалов и определении мощности источника излучения, представляющего замкнутую систему. Выполнены расчёты денежного эквивалента дол/(чел·Зв) при замене различных видов строительных материалов и проведении отделочных работ в зависимости от удельной активности ЕРН материалов. Установлено, что с уменьшением разности удельных активностей ЕРН материалов уменьшается стоимость их замены и возрастает денежный эквивалент.

Список литературы

1. Михнев И.П. Фоновое облучение населения и методы защиты от природных радионуклидов в помещении: Дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2000. – 267 с.
2. Kamaev V.A. Natural Radionuclides as a Source of Background Irradiation Affecting People Inside Buildings / V.A. Kamaev, I.P. Mikhnev, N.A. Salnikova //

Procedia Engineering: 2nd International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2016. – Vol. 150. – 2016. – P. 1663–1672

3. Mikhnev I.P. Research of Activity of Natural Radionuclides in Construction Raw Materials of the Volgograd Region / I.P. Mikhnev, N.A. Salnikova, M.B. Lempert // Solid State Phenomena. – Vol. 265. – 2017. – P. 27–32.

4. Камаев В.А. Влияние гамма-фона помещений Волгоградской области на индуцирование рака / В.А. Камаев, И.П. Михнев, Н.А. Сальникова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – №14 (178). – С. 60–63.

5. Сидякин П.А. Материалы для снижения гамма-фона и концентрации радона в помещениях / П.А. Сидякин, О.П. Сидельникова, Ю.Д. Козлов, И.П. Михнев, В.Т. Малый. – М.: Строительные материалы, 1998. – №8. – С. 26–27.

6. Михнев И.П. Информационная безопасность спектрометрических систем при определении радиационных характеристик в помещениях Волгоградской области / И.П. Михнев, Н.А. Сальникова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – №13 (177). – С. 109–113.

7. Сидельникова О.П. Защитные материалы для снижения мощности дозы в помещениях / О.П. Сидельникова, Ю.Д. Козлов, П.А. Сидякин, И.П. Михнев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: ФГБОУ ВО Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 1999. – №2–3. – С. 57–59.

Михнев Илья Павлович – канд. техн. наук, доцент, Заслуженный работник науки и образования, доцент кафедры «Информационных систем и математического моделирования» Волгоградского института управления (филиала) ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ», Россия, Волгоград.

Михнева Светлана Владимировна – канд. юрид. наук, доцент РАН, доцент кафедры «Теории и истории права и государства» Волгоградского института управления (филиала) ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ», Россия, Волгоград.
