

Анализ возможностей оценки размеров охранных зон мирных ядерных взрывов на основе количественных закономерностей деформации земных недр

В.С. Репин¹, В.П. Рамзаев¹, А.М. Библин¹, К.В. Варфоломеева¹, С.А. Зеленцова¹, К.А. Седнев¹, В.А. Ильичев², А.В. Касаткин², В.В. Касаткин²

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Отнесение территорий в местах проведения мирных ядерных взрывов к местам размещения особых радиоактивных отходов накладывает серьезные требования к прилегающей территории, ее границам, информированию населения, органов государственной власти и юридических лиц о запрете на ведение хозяйственной деятельности в пределах этих границ. В действующих Санитарных нормах и правилах СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» размеры границ охранных зон не определены. Целью данной работы является анализ литературных данных по структуре деформационных изменений недр при проведении мирных ядерных взрывов и обоснование количественных соотношений, на основе которых могут оцениваться размеры охранных зон. На основе сравнительного анализа литературных данных были выбраны количественные соотношения, позволившие рассчитать радиусы деформационных изменений (полость, зона дробления, зона трещиноватости и зона остаточных деформаций) в различных горных породах. Оценено, что максимальные значения радиусов зоны трещиноватости для мирных ядерных взрывов, проведенных на территории Российской Федерации в твердых породах, не превышают 200 м, а в пластичных породах – 250 м. Для определения границ охранных зон предложены упрощенные формулы, позволяющие дать консервативную оценку радиуса охранной зоны с учетом мощности и глубины взрыва.

Ключевые слова: охранный зона, мирные ядерные взрывы, подземные ядерные взрывы, особые радиоактивные отходы, горные породы, полость взрыва, трещиноватость, зона дробления, зона разрушения.

Введение

Отнесение территорий в местах проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ) к местам размещения особых радиоактивных отходов (ОРАО)^{1,2} предопределило необходимость длительного наблюдения за данными объектами, поскольку жизненный цикл существования ОРАО

исчисляется тысячами лет из-за наличия в зоне взрыва долгоживущих радионуклидов, а их извлечение из зоны взрыва с целью окончательного захоронения не предусматривается в силу их «особого» статуса, связанного с технической сложностью, экономической и радиационной нецелесообразностью процесса извлечения.

¹ Федеральный закон от 11.07.2011 г. №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Federal Law of 11.07.2011 №190-FZ «On the Management of Radioactive Waste and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation» (In Russ.)]

² Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» [Decree No. 1069 of the Government of the Russian Federation dated October 19, 2012. On Criteria for assignment of solid, liquid and gaseous waste to radioactive waste, criteria for assignment of radioactive waste to special radioactive waste and to disposed radioactive wastes and criteria for the classification of disposed radioactive waste» (In Russ.)]

Репин Виктор Степанович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

Можно выделить несколько основных источников потенциальной опасности ОРАО, находящихся в зоне взрыва: вынос радионуклидов в водоносные горизонты и на поверхность, несанкционированное бурение в охранной зоне (ОЗ) и несанкционированное ведение хозяйственной деятельности на территории ОЗ.

Несанкционированная деятельность на территории ОЗ может привести к повреждению технологических (зарядных), контрольных, приборных скважин и стимулированию выноса долгоживущих радионуклидов в верхние горизонты, поэтому определение размеров ОЗ, то есть границ, за пределами которых хозяйственная деятельность может осуществляться без развития неблагоприятных сценариев, имеет принципиальное значение.

Действующие санитарные правила³ предусматривают создание охранных зон в местах проведения МЯВ, но размеры этих зон в данном документе не приводятся.

В соответствии с федеральными нормами и правилами⁴ границы объекта МЯВ должны устанавливаться с учетом размеров зон механического действия взрыва и других критериев.

Из результатов исследований, представленных в целом ряде работ, следует, что на территориях в ряде мест проведения взрывов границы ОЗ не обозначены, некоторые территории захлаплены остатками технологического оборудования и металлоконструкциями, на них имеются следы хозяйственной деятельности [1–6].

Цель исследования – анализ литературных данных по методам количественной оценки деформационных изменений земных недр при проведении мирного ядерного взрыва и обоснование количественных соотношений, на основе которых могут оцениваться размеры охранных зон.

Методические подходы

В научной литературе приводятся различные методы оценки размеров деформационных изменений горных пород при проведении МЯВ. Типичная структура центральной зоны камуфлетного ядерного взрыва представлена на рисунке 1 [7, 8].

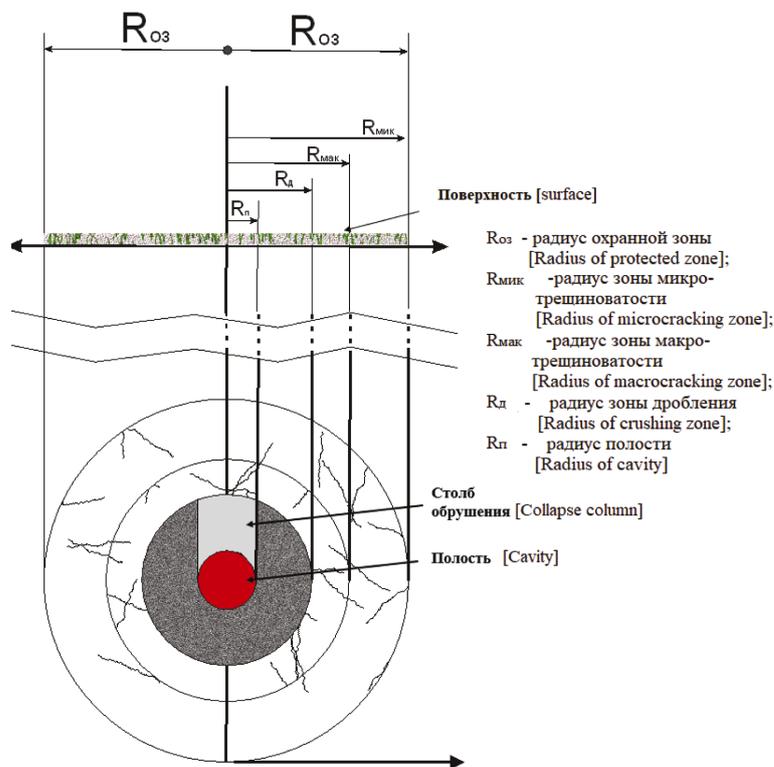


Рис. 1. Проекция зоны мирного ядерного взрыва на поверхность Земли
[Fig. 1. Projection of the zone of a peaceful nuclear explosion on the Earth's surface]

³ СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 годы) ядерных взрывов в мирных целях» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2819-10 «Ensuring radiation safety of the population living in areas where nuclear explosions for peaceful purposes were conducted (1965–1988)» (In Russ.)]

⁴ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» (НП-103-17), утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 октября 2017 г. № 418. Зарегистрировано в Минюсте России 2 ноября 2017 г. № 48779 [Federal norms and rules in the field of atomic energy use “Requirements for ensuring the safety of special radioactive waste disposal sites and special radioactive waste conservation sites” (NP-103-17), approved by order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated October 10, 2017 No. 418. Registered by the Ministry of Justice of Russia on November 2, 2017 No. 48779. (In Russ.)]

Структурными элементами этой зоны являются полость со столбом обрушения радиусом R_n , зона дробления – R_d и зона трещиноватости в форме макротрещин – $R_{мак}$ и микротрещин – $R_{мик}$. Макро- и микротрещины способствуют переносу радионуклидов из полости к периферии, а несанкционированное бурение скважин в зоне микротрещин способствует ускорению переноса радионуклидов, вышедших за пределы полости, в водоносные горизонты. Таким образом, радиус охранной зоны мирного ядерного взрыва должен быть не менее радиуса распространения микротрещин.

Для описания деформирующих свойств грунта при взрыве используются различные модели грунтовых сред и выделяют 3 основных их вида: скальные, полускальные и мягкие. К скальным относятся гранитоиды, диориты и пр., к полускальным – песчаники, известняки и др., к мягким – глины, суглинки и пр. [9].

В научной литературе приводятся различные соотношения, позволяющие оценить размеры деформационных изменений после проведения взрыва. В основу большинства расчетов для камуфлетных взрывов из теории подобия положена линейная зависимость радиуса деформации от кубического корня мощности взрыва, выраженного в килотоннах тринитротолуола [7–11]. Например, для взрывов, произведенных в штольнях Семипалатинского полигона, предложено соотношение (1) [9]:

$$R_{пв} = (8,5 - 10) \cdot E^{1/3}, \quad (1)$$

где:

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

8,5–10 – диапазон возможных значений коэффициентов, м/кт.

В аналогичном соотношении (2), приведенном в статье Boardmen [12], радиус, выраженный в футах, рассчитывается через коэффициенты, принятые отдельно для каждого типа породы (табл. 1):

$$R_{пв} = C \cdot E^{1/3}, \quad (2)$$

где:

$R_{пв}$ – радиус полости, взрыва, футы;

E – мощность взрыва, кт;

C – коэффициент, фут/кт^{1/3}.

В ряде публикаций расчет радиуса полости взрыва рассчитывается с учетом физических свойств горных пород [7, 11–13]. В монографии В.Н. Архипова и др. [7]

поясняется, что «полость взрыва формируется в результате воздействия на грунтовую среду продуктов взрыва (в основном испаренного грунта), ударной волны и волны сжатия. Максимальное значение радиуса полости взрыва зависит от свойств грунта, энергии взрыва и глубины заложения заряда». Для расчета радиуса предложено эмпирическое выражение (3):

$$R_{пв} = \frac{K \cdot E^{1/3}}{(\rho \cdot H \cdot 10^{-3})^\alpha}, \quad (3)$$

где:

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

ρ – средняя плотность грунтовой среды, г/см³;

H – глубина заложения заряда, м;

α – показатель, зависящий от эффективной массовой влажности грунтовой среды вблизи центра взрыва и изменяющийся в пределах 0,27–0,32;

K – коэффициент, характеризующий влажность среды и равный примерно 5 для влажного грунта и примерно 10 для скальной породы.

Разновидностью формулы (3) является формула (4), приведенная в [11]:

$$R_{пв} = \frac{C \cdot E^{1/3}}{(\rho \cdot H)^\alpha}, \quad (4)$$

где:

коэффициент C принимается равным 580 – для сланцев, 509 – для гранитов, фут/кт^{1/3};

α – показатель, равный 0,324 для плотных силикатных пород, плотностью 2,7–2,8 г/см³;

E – мощность взрыва, кт;

ρ – плотность породы, г/см³;

H – глубина заложения заряда, футы.

Универсальное эмпирическое соотношение (5) оценки радиуса полости взрыва в твердых породах (гранит, туф, доломит, каменная соль, аллювий) с учетом плотности породы, мощности взрыва, глубины заложения заряда, прочности породы на сжатие и на сдвиг предложено в статье [14]:

$$r_{cv} = 21 \cdot W^{0,306} \cdot E^{0,514} \cdot \rho^{-0,244} \cdot \mu^{-0,576} \cdot h^{-0,161}, \quad (5)$$

где r_{cv} – радиус полости взрыва, м;

W – мощность взрыва, кт;

E – модуль Юнга, мегабар;

ρ – плотность породы, г/см³;

μ – модуль сдвига, мегабар;

h – глубина заложения заряда, м.

Значения коэффициента C , принятые для некоторых видов горных пород для расчета радиуса полости взрыва по формуле (2) [12]

Таблица 1

[Table 1

The coefficient C values accepted for certain types of rocks for the calculation of the radius of the explosion cavity by formula (2) [12]

Тип породы [Rocks kind]	Мощность взрыва, кт [Explosive power, kt]	Глубина, фут [Depth, ft]	C , фут/кт ^{1/3} [C, ft/kt ^{1/3}]	$R_{пв}$, фут [Radius of cavity, ft]	C , м/кт ^{1/3} [C, m/kt ^{1/3}]
Граниты [Granits]	61	1520	37,2	146	11,3
Песчаники [Sandrocks]	26	4240	28,6	85	8,7
Доломит [Dolomite]	12	1320	29,6	68	9,0
Каменная соль [Rock salt]	3,4	1184	40,5	90	12,3

Данное соотношение было верифицировано на 46 взрывах и позволяет, как показано в статье [14], рассчитывать радиус полости со средней неопределенностью 7,8%.

Из всего многообразия МЯВ взрывы, проведенные в каменной соли, выделены в отдельную группу. Особенности этих взрывов являются высокая пластичность породы, большой объем полости и устойчивость ее к обрушению [8, 15, 16]. Эти свойства позволили создать большие подземные полости различного назначения.

Для оценки радиуса полости в каменной соли в публикации [8] предложена формула (6), включающая, кроме мощности взрыва, глубину заложения заряда и плотность породы:

$$R_{пв} = \frac{66,3E^{1/3}}{(\rho \cdot H)^{1/4}} \quad (6)$$

где:

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина заложения заряда, м;

ρ – плотность породы, принятая для каменной соли равной 2,173 кг/дм³.

Для оценки конечного радиуса полости взрыва в работе Васильева А.П. и др. [8] приведена также формула (7):

$$R_{пв} = E^{1/3} \left(1 - \frac{H}{H_0}\right) \quad (7)$$

где:

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина заложения заряда, м;

H_0 – константа, равная 2800 м.

Радиус полости взрыва, как правило, является отправным показателем при оценке радиуса зон дробления, трещиноватости, смятия и остаточных деформаций (табл. 2) [7].

Из таблицы 2 видно, что за пределами полости взрыва деформационные изменения достигают 7-кратных значений по отношению к радиусу полости взрыва.

В работах АО «ВНИПИпромтехнологии» рассматривается и другой подход. При разработке проектов реабилитации территорий и таких локальных нормативных актов, как «Технологический регламент обеспечения радиационной безопасности», «Обоснование безопасности эксплуатации объекта МЯВ» и др., для оценки размеров «охранной зоны» принята следующая концепция оценки потенциально возможного влияния техногенных радионуклидов на загрязнение земной поверхности и зоны активного водообмена [17–23]:

- при отсутствии горногеологических условий миграции техногенных радионуклидов в вышележащие горизонты⁵ размер ОЗ принимается равным проекции зоны дробления;

- при потенциальной возможности выхода техногенных радионуклидов, в том числе по заколонному пространству технологической (зарядной) скважины рассчитывается радиус возможного распространения радионуклидов в водоносных горизонтах, и размер охранной зоны определяется с учётом как радиуса зоны дробления, так и зоны распространения (миграции) техногенных радионуклидов;

- при наличии на земной поверхности пунктов хранения отходов, содержащих повышенное количество техногенных радионуклидов, и/или устьев скважин в зоне взрыва, размер ОЗ увеличивается за счет участков территории этих объектов.

В статье Ю.В. Дубасова [24] оценка размеров зоны трещиноватости выполнена по формуле, в которой ради-

Таблица 2

Размер зон разрушения камуфлетным ядерным взрывом [7]

[Table 2]

Size of the destruction zones due to a camouflage nuclear explosion [7]

Грунт [Ground]	Зоны разрушения [Zones of destruction]	Радиус зоны, м [Radius of zone, m]
	Зона дробления [Crushing zone]	$(1,5-2,5) \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
Скальная порода [Rock formation]	Зона интенсивной трещиноватости [Zone of intense fracturing]	$(3-5) \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
	Зона масштабирования естественных трещин [Scaling zone of natural cracks]	$(5-7) \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
Мягкий грунт [Soft ground]	Зона смятия (дробление твердых зерен, потеря сцепления, трещинообразование) [Buckling zone (crushing of hard grains, loss of adhesion, cracking)]	$\sim 3 \times R_{пв}$ [Radius of cavity]
	Зона остаточных деформаций [Residual deformation zone]	$\sim 5 \times R_{пв}$ [Radius of cavity]

⁵ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» (НП-103-17, п.п. 49, 54), утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 октября 2017 г. № 418. Зарегистрировано в Минюсте России 2 ноября 2017 г. № 48779 [Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Requirements for ensuring the safety of special radioactive waste disposal sites and special radioactive waste conservation sites" (NP-103-17, paragraphs 49,54), approved by order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated October 10, 2017 No. 418. Registered by the Ministry of Justice of Russia on November 2, 2017 No. 48779. (In Russ.)]

ус зоны микротрещин консервативно оценен коэффициентом пропорциональности 70–100 м/кТ^{1/3}.

В материалах, представленных в работе Васильева А.П. и др. [8], размер полости взрыва $R_{пв}$, зоны дробления – $R_{др}$ и зоны микротрещиноватости – $R_{мик}$ выражены также упрощенным образом (8) через мощность взрыва, выраженную в килотоннах (кТ):

$$\begin{aligned} R_{пв} &= (6 \div 8) \text{ м/кТ}^{1/3}, \\ R_{др} &= (25 \div 35) \text{ м/кТ}^{1/3} \\ R_{мик} &= (70 \div 90) \text{ м/кТ}^{1/3} \end{aligned} \quad (8)$$

В книге В.В. Адушкина и др. [10] размер радиуса зоны трещиноватости в штольнях Семипалатинского полигона выражен через размер полости взрыва с коэффициентом, близким к 5,5, а радиус полости – величиной 8–10 м/кТ^{1/3}, то есть радиус зоны микротрещин, выраженный через произведение указанных коэффициентов, может быть порядка 44–55 м/кТ^{1/3}.

Более точные эмпирические соотношения, позволяющие оценивать радиусы зон дробления и трещиноватости с учетом физических свойств пород, приведены в монографиях [9, 10].

Радиус зоны дробления определяется через радиус полости взрыва посредством формулы (9):

$$R_{др} = R_{пв} \left(\frac{\rho \cdot C_p^2}{4 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1/3} \quad (9)$$

где:

$R_{др}$ – радиус зоны дробления, м;

$R_{пв}$ – радиус полости взрыва, м;

ρ – плотность породы, г/см³;

C_p – скорость звука, м/с;

$\sigma_{сж}$ – прочность породы на сжатие, Па.

В свою очередь, радиус зоны трещиноватости определяется через радиус зоны дробления следующим образом (10):

$$R_{тр} = R_{др} \left(\frac{\sigma_{сж}}{2(\sigma_{раст} + \rho g H)} \right)^{1/2} \quad (10)$$

где:

$R_{тр}$ – радиус зоны трещиноватости, м;

$R_{др}$ – радиус зоны дробления, м;

$\sigma_{сж}$ – прочность породы на сжатие, Па;

$\sigma_{раст}$ – прочность породы на растяжение, Па;

ρ – плотность породы, г/см³;

H – глубина заложения заряда, м;

g – ускорение свободного падения 9,8 м/с².

Из формул (9) и (10) видно, что радиус зоны трещиноватости растет с увеличением мощности заряда, плотности породы и с уменьшением глубины заложения заряда, прочности на сжатие и прочности на растяжение.

Результаты и обсуждение

На основе анализа литературных данных и приведенных выше соотношений и формул представляется возможным сравнить оценки деформационных изменений в горных породах после проведения мирного ядерного взрыва и выбрать наиболее приемлемую формулу, на основе которой можно будет рассчитывать радиус охранных зон.

Общее представление о видах пород, диапазонах мощностей взрывов, количестве взрывов и глубинах заложения зарядов дает таблица 3 [8].

Данные таблицы 3 показывают, что наибольшее количество взрывов произведено в пластах каменной соли, глинах, песчаниках и известняках. Наиболее мощные взрывы выполнены в карбонатных, доломитных, аргиллитных и алевролитных породах.

На рисунке 2 показано распределение количества взрывов по мощности и по глубине заложения заряда. Из рисунка 2 видно, что около 70% взрывов произведе-

Таблица 3

Обобщение данных по количеству мирных ядерных взрывов, их мощности и глубине заложения зарядов, проведенных в РФ в различных видах горных пород [8]

[Table 3

Summary of data on the number of peaceful nuclear explosions, their yield and depth of emplacement of charges detonated in different types of rocks in the Russian Federation [8]]

№ п/п	Виды и группы горных пород* [Types and groups of rocks*]	Количество произведенных взрывов, шт. [Number of explosions]	Диапазон мощностей взрывов, кТ [Explosive power range, kt]	Диапазон глубин, м [Depth range, m]
1	Граниты [Granites]	2	8,5–10	499–557
2	Каменная соль [Rock salt]	33	2,3–15	160–1 491
3	Алевролиты [Aleurolite]	4	6,3–15	640–886
4	Аргиллиты [Argyllites]	4	2,5–19	130–2851
5	Глины [Clay]	11	0,3–37,6	172–1511
6	Доломиты [Dolomites]	5	2,3–15	577–2123
7	Известняки [Limestones]	12	1,7–7,6	98–2075
8	Карбонаты [Carbonate]	6	15	1515–1541
9	Мергели [Marls]	2	7,6–8,5	537–982
10	Песчаники [Sandrocks]	8	0,3–7,6	395–959

* в перечень вошли только основные виды (в основном осадочных) горных пород
[* only common types of rocks (mostly sedimentary rocks) are listed].

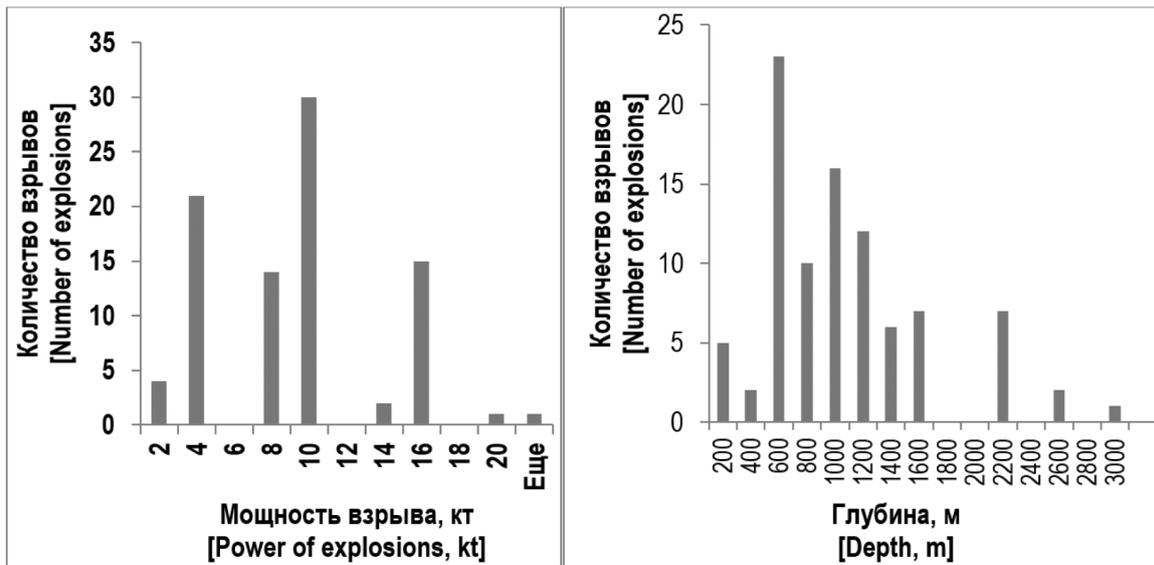


Рис. 2. Распределения количества взрывов по мощности (слева) и по глубине (справа)
 [Fig. 2. Distributions of the number of explosions by power (left) and by depth (right)]

ны с мощностью до 10 кт (слева), а преобладающее число взрывов (справа) произведено на глубинах от 500 до 1600 м.

Поскольку радиус полости взрыва является отправным показателем при определении радиусов зон дробления и трещиноватости (смятия), то важным было сравнить между собой варианты расчета и выбрать из них наиболее консервативный, но не дающий существенной переоценки по сравнению с другими вариантами расчета. Расчеты выполнены для мощности взрыва 10 кт и для 2 глубин заложения заряда 500 и 1500 м и для 5 типов

пород с различающимися значениями физических характеристик: прочность на сжатие, модуль Юнга, прочность на растяжение, прочность на сдвиг, плотность.

Справочные данные о физических свойствах горных пород характеризуются большим разнообразием для каждого показателя [25–29], поэтому в таблице 4 приведены значения, сочетание которых позволяет получать более высокие значения радиусов. Исключение составляет прочность на сдвиг, величина которого связана с модулем Юнга U через соотношение (11) [25]:

Физические характеристики горных пород, принятые для расчета⁶

Таблица 4

Physical characteristics of rock groups used for calculation⁶

[Table 4

Горная порода [Groups of rocks]	Прочность на сжатие ¹⁾ , МПа [Compressive strength, MPa]	Модуль Юнга ²⁾ , МПа [The Young's modulus, MPa]	Прочность на растяжение ¹⁾ МПа [Tensile strength, MPa]	Прочность на сдвиг ³⁾ , МПа [Flexural strength (MPa)]	Плотность ⁴⁾ , г/см ³ [Density, g/cm ³]
Граниты [Granits]	165	70	15	29	2,4
Песчаники [Sandrocks]	115	60	11	21	1,6
Известняки [Limestones]	62	30	6	14	1,7
Каменная соль [Rock salt]	29	20	2	7,7	2,1
Глины [Clay]	7	15	0,5	7,5	1,7

¹⁾ для расчета использованы средние значения [the mean values are used for calculation];

²⁾ приняты значения, близкие к максимальным [the values near maximum were taken into account];

³⁾ рассчитано через модуль Юнга и коэффициент Паскаля [calculated through the Young's modulus and the Pascal's coefficient];

⁴⁾ приняты значения, близкие к минимальным [the values near minimum were taken].

⁶ Плотность породы, прочность на сжатие, прочность на разрыв и модуль Юнга, представленные в таблице, выбраны из широкого набора справочных данных [25–29], а значения определены таким образом, чтобы результаты расчета радиусов принимали по возможности максимальные значения [The rock density, compressive strength, tensile strength, and Young's modulus presented in the table are selected from a wide range of reference data [25–29], and the values are determined in such a way that the results of radii calculations take the maximum possible values].

$$G = \frac{U}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (11)$$

где:

G – прочность на сдвиг, МПа;

U – модуль Юнга, МПа;

ν – коэффициент Пуассона.

Средние значения коэффициентов Пуассона, по данным [25, 28], равны 0,2; 0,1; 0,4; 0,3; 0 для гранита, песчаника, известняка, каменной соли и глины соответственно.

Физические характеристики пород, на основе которых выполнены расчеты, приведены в таблице 4.

Результаты расчета радиуса полости с использованием разных формул для параметров, приведенных в таблице 4, даны в таблице 5.

Из результатов, приведенных в таблице 5, видно, что наибольшие значения радиусов получены с использованием соотношения (2) и (5), но при расчете по формуле (2) расчетные значения не зависят от глубины, поэтому их дальнейшее использование нецелесообразно.

Соотношение (3) дает близкие, но несколько меньшие значения. Для каменной соли и глины значения, рассчитанные по формуле (6), близки к значениям, рассчитанным по формуле (5). Таким образом, выражение (5) является универсальным вариантом консервативного расчета радиуса полости на различных глубинах и для пород с различными физическими характеристиками. Более наглядное представление различий в расчетах изменений радиусов от глубины взрыва по формулам (3) и (5) для твердых пород (гранит, песчаник, известняк) и пластичных пород (каменная соль и глина) дают графики на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что расчеты по формуле (5) дают более высокие значения, чем по формуле (3) для всех перечисленных на рисунке горных пород, что дополнительно подтверждает целесообразность использования формулы (5) для консервативной оценки радиуса полости.

Используя результаты расчета радиуса полости взрыва по формуле (5), можно рассчитать радиусы зон трещиноватости для твердых пород и радиусов зон остаточ-

Таблица 5

Результаты расчета радиуса полости в зависимости от используемой формулы расчета, м

[Table 5

Results of calculating the radius of the cavity depending on the calculation formula used, m]

Номер формулы, ссылка на литературный источник [Formula number, reference]	Радиус полости взрыва, м (числитель для глубины 500 м, знаменатель – 1500 м) [Radius of the explosion cavity, m (numerator is for the depth of 500 m, denominator is for the depth of 1500 m)]				
	Граниты [Granites]	Песчаники [Sandrocks]	Известняки [Limestones]	Каменная соль [Rock salt]	Глины [Clay]
(1), [9]	21,5/21,5	21,5/21,5	21,5/21,5	21,5/21,5	21,5/21,5
(2), [12]	24,3/24,3	18,7/18,7	–	26,5/26,5	–
(3), [7]	20,6/15,6	22,8/17,3	22,4/17,0	26,5/16,2	24,4/17,0
(5), [14]	22,7/19,3	27,9/23,7	24,4/20,6	26,5/22,4	24,4/20,7
(6), [8]	–	–	–	25,1/19,1	26,4/20,1

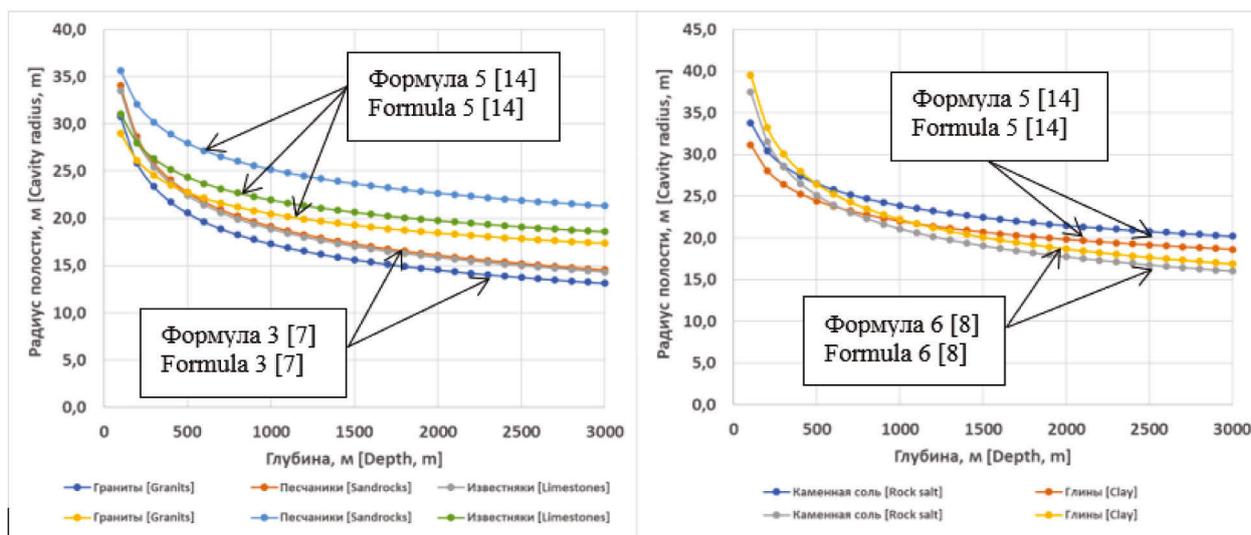


Рис. 3. Зависимость радиуса полости от глубины для различных вариантов расчета: слева – гранит, песчаник, известняк; справа – каменная соль, глина

[Fig. 3. Dependence of the cavity radius on depth for various calculation options: on the left – granite, sandstone, limestone; right – rock salt, clay]

ной деформации для пластичных пород – каменной соли и глины.

Расчеты для твердых пород (12) выполнены с использованием формул (5), (9), (10). Обобщенная формула имеет следующий вид:

$$R_{tr} = 21 \cdot W^{0,306} \cdot E^{0,514} \cdot \rho^{-0,244} \cdot \mu^{-0,576} \cdot h^{-0,161} \cdot \left(\frac{\rho \cdot C_p^2}{4 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\sigma_{сж}}{2(\sigma_{раст} + \rho g H)} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

где все обозначения соответствуют обозначениям, приведенным в формулах (5), (9), (10).

Расчеты для пластичных пород выполнены с использованием формулы (5), а оценка размеров зон остаточной деформации R_{def} выполнена путем умножения радиуса полости на коэффициент, приведенный в таблице 2. Величина этого коэффициента для мягкого грунта равна 5, однако в настоящей работе расчеты по формуле (13) выполнены с использованием коэффициента 7 – максимального коэффициента трещинообразования для скальных пород, что дает дополнительный запас консервативности:

$$R_{def} = 7 \cdot 21 \cdot W^{0,306} \cdot E^{0,514} \cdot \rho^{-0,244} \cdot \mu^{-0,576} \cdot h^{-0,161}, \quad (13)$$

Результаты расчета радиусов максимальных деформаций в зависимости от глубины заложения заряда для мощности взрыва 10 кт приведены на рисунке 4. Из рисунка 4 видно, что с увеличением глубины кривые для твердых и пластичных горных пород расходятся все сильнее, достигая практически двукратных различий на глубинах более 2000 м. Максимальные значения радиу-

сов в группе твердых пород относятся к песчаникам, а в группе пластичных пород – к каменной соли. Таким образом, формула (12) для песчаников и формула (13) для каменной соли могут быть предложены в качестве единых универсальных выражений при оценке радиуса максимальных деформаций для соответствующих групп горных пород. Применение этих соотношений для расчетов позволит избежать недооценки радиусов для всех остальных пород, входящих в указанные группы.

Горизонтальная линия, показанная на рисунке 4, – результат расчета радиуса микротрещин с помощью упрощенного соотношения (8) для мощности взрыва 10 кт: $R_{tr} = 90 \cdot 10^{1/3} = 194$ м. Из рисунка 4 видно, что упрощенный вариант расчета дает близкие значения только для глубины взрыва от 200 до 400 м. Для всех остальных значений глубин упрощенный вариант расчета завышает радиусы, рассчитанные по формулам (12) и (13).

Представляет интерес применить формулы (12) и (13) для всех взрывов, произведенных на территории РФ, исключая экскавационные, аварийные и штольневые взрывы в горном массиве, поскольку охранные зоны для этих взрывов определяются по другим критериям. Важно отметить, что все оценки по указанным формулам расцениваются как консервативные, то есть фактические размеры деформационных изменений могут быть меньше.

В таблице 6 даны оценки минимальных и максимальных радиусов трещиноватости для твердых пород и радиусов остаточной деформации для пластичных пород.

Из таблицы 6 видно, что расчеты по формуле (8) завышают размеры деформаций, причем, как видно из рисунка 4, степень завышения тем больше, чем больше глубина взрыва. Сопоставляя отношения радиусов, полученных

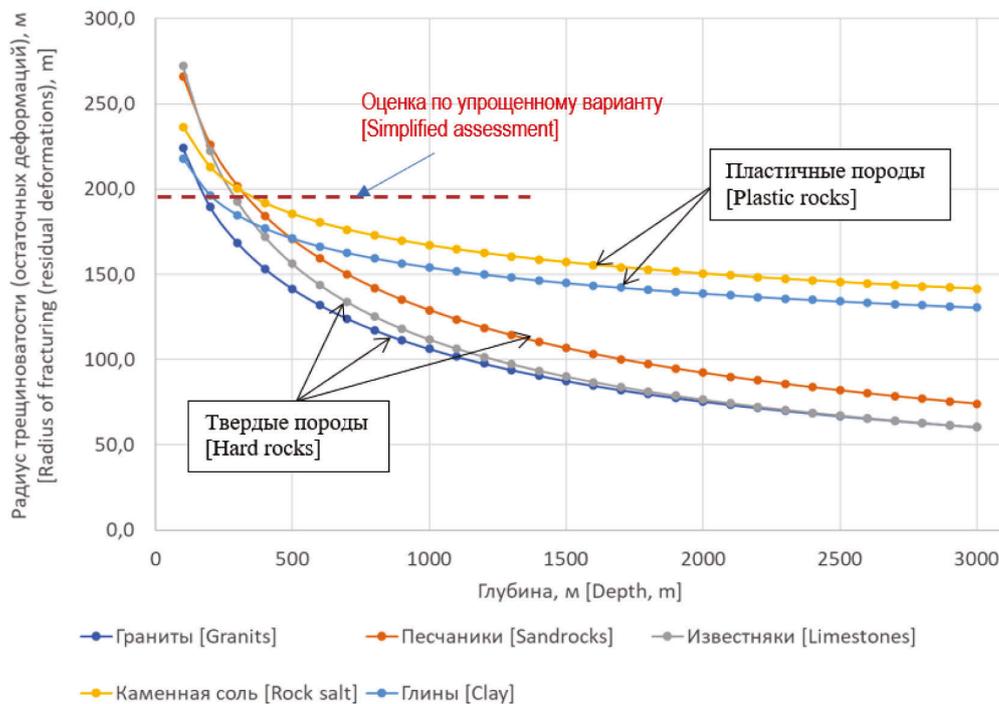


Рис. 4. Зависимость радиуса зоны трещиноватости от глубины заложения заряда в различных горных породах для мощности взрыва 10 кт

[Fig. 4. Dependence of the fracture zone radius on the depth of the charge embedment in different rocks for the 10 kt explosion]

Таблица 6

Результаты оценки минимальных и максимальных радиусов деформаций в зонах проведения камуфлетных мирных ядерных взрывов с использованием различных формул

[Table 6

Results of assessing the minimum and maximum radii of deformation in the zones of camouflage peaceful nuclear explosions using various formulas]

Тип породы [Rock type]	Вариант расчета [Calculation formula]	Минимальный радиус, м [Minimum radius, m]	Максимальный радиус, м [Maximum radius, m]
Твердые породы [Hard rocks]	Формула (13) [Formula (13)]	50	184
	Формула (9) [Formula (9)]	119	240
Пластичные породы [Plastic rocks]	Формула (14) [Formula (14)]	33	235
	Формула (9) [Formula (9)]	60	301

для каждого взрыва с использованием формул (12) и (8) и (13) и (8), можно рассчитать зависимость поправочного коэффициента от глубины взрыва. Графики зависимостей для твердых и пластичных пород представлены на рисунке 5.

С учетом представленных на графике уравнений (см. рис. 5), описывающих зависимость поправочного коэффициента от глубины взрыва, можно предложить для практического использования упрощенный вариант консервативной оценки радиуса деформаций с учетом мощности и глубины взрыва.

Для твердых пород:

$$R_{TP} = 1300 \cdot E^{1/3} \cdot H^{-0.45} \quad (14)$$

Для пластичных пород:

$$R_{def} = 310 \cdot E^{1/3} \cdot H^{-0.2} \quad (15)$$

где:

R_{TP} – радиус зоны трещиноватости, м.;

R_{def} – радиус зоны деформации, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина взрыва, м.

Более точные оценки радиусов деформаций могут быть выполнены с помощью формул (12) и (13), где, кро-

ме глубины и мощности взрыва, учитываются физические параметры горных пород, в которых произведены взрывы.

Выводы

1. Выполнен анализ литературных данных по методам расчета радиуса полости МЯВ для различных видов горных пород и размеров деформационных изменений в породах, находящихся за пределами полости, в виде зон дробления, трещиноватости, смятия, остаточных деформаций.

2. В результате сравнительного анализа количественных подходов, позволяющих рассчитать радиус полости МЯВ, выбрано соотношение, которое позволяет дать умеренно консервативную оценку радиусов с учетом широкого набора параметров. На основе выбранного соотношения предложены формулы для расчета максимальных размеров деформаций за пределами полости.

3. Показано, что максимальные рассчитанные значения радиусов деформаций для МЯВ, произведенных на территории РФ в твердых породах, не превышают 200 м, а в пластичных породах – 250 м.

4. Для определения границ охранных зон предложены упрощенные формулы, позволяющие дать консерва-

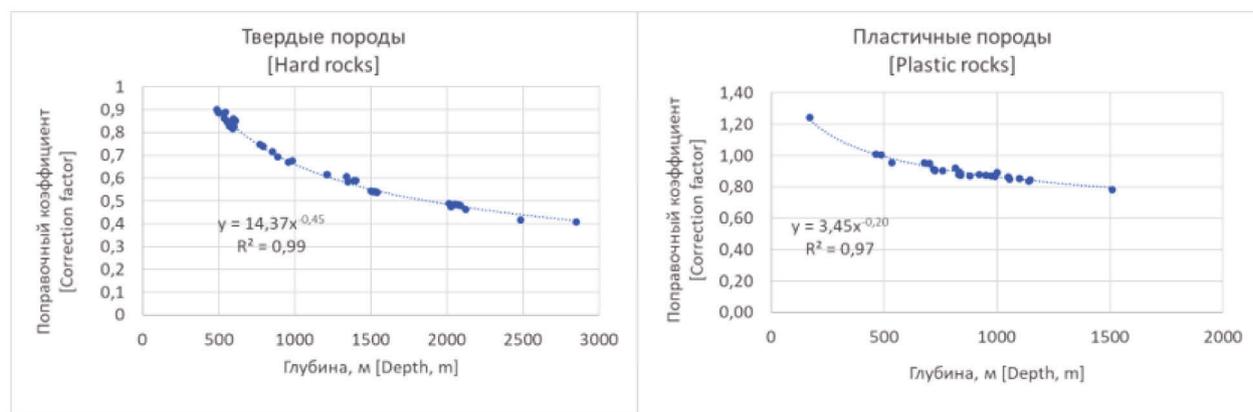


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента от глубины взрыва при использовании упрощенного варианта оценки радиуса деформаций: слева для твердых пород; справа для пластичных пород

[Fig. 5. Dependence of the correction factor on the depth of the explosion when using a simplified version of estimating the radius of deformation. Hard rocks to the left. Plastic rocks to the right]

тивную оценку радиуса ОЗ с учетом мощности и глубины взрыва:

для твердых пород:

$$R_{TP} = 1300 \cdot E^{1/3} \cdot H^{0.45}$$

для пластичных пород:

$$R_{def} = 310 \cdot E^{1/3} \cdot H^{0.2}$$

где:

R_{TP} – радиус зоны трещиноватости, м.;

R_{def} – радиус зоны деформации, м;

E – мощность взрыва, кт;

H – глубина взрыва, м.

Размеры охранных зон могут изменяться в большую сторону при наличии на территории, прилегающей к месту проведения мирного ядерного взрыва, мест захоронения радиоактивного грунта и скважин различного назначения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин В.С. – разработка концепции исследования, руководство выполнением исследования, написание и редактирование промежуточных вариантов и окончательного текста статьи.

Рамзаев В.П. – редактирование и окончательное оформление статьи.

Библин А.М. – сбор и систематизация литературных данных, редактирование промежуточного варианта статьи.

Варфоломеева К.В. – поиск и анализ литературных данных, редактирование промежуточного варианта статьи для публикации.

Зеленцова С. А. – поиск и анализ литературных источников данных, сбор и систематизация материалов исследования, содержательное редактирование текста статьи.

Седнев К.А. – сбор литературных данных, редактирование промежуточного варианта текста статьи.

Ильичев В.А. – экспертная оценка литературных источников, научное редактирование отдельных частей статьи.

Касаткин А.В. – обобщение собственных и литературных данных, редактирование и окончательное оформление статьи.

Касаткин В.В. – сбор и анализ литературных источников, организация работы авторов АО «ВНИПИПромтехнологии», координация написания статьи, редактирование статьи для публикации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовке данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 г. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

1. Библин А.М., Храмцов Е.В., Репин В.С. и др. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 149–161. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161.
2. Рамзаев В.П., Библин А.М., Репин В.С. и др. Загрязнение тритием поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 6–26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26.
3. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 27–33.
4. Рамзаев В.П., Травникова И.Г., Басалаева Л.Н. и др. О влиянии подземных ядерных взрывов «Кратон-3» и «Кристалл» на радиационно-гигиеническую обстановку в близлежащих населенных пунктах // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 2. С. 14–19.
5. Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air // Journal of Environmental Radioactivity. 2011. Vol. 102, № 7. P. 672–80. DOI:10.1016/j.jenvrad.2011.04.003.
6. Храмцов Е.В., Репин В.С., Библин А.М. и др. Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111–123. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
7. Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др. Механическое действие ядерного взрыва. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 382 с.
8. Васильев А.П., Ильичев В.А., Касаткин В.В. и др. Ядерные взрывные технологии: эксперименты и промышленные применения. Снежинск.: РФЯЦ-ВНИИФ, 2017. 508 с.
9. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007. 585 с.
10. Адушкин В.В., Спивак А.А., Чернышев А.К. Физическая картина подземного ядерного взрыва // На благо России, к 75-летию академика РАН Ю.А. Трутнева. Саров, 2002. С. 170–194.
11. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 439 с.
12. Boardmen Ch. R. Engineering effects of underground nuclear explosions. Symposium on engineering with nuclear explosives. Las Vegas. Las Vegas. Nevada; 1970. Vol. 1. Springfield; P. 43–67.
13. Артамонова С.Ю., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Мерзлотно-гидрогеологическое строение района мирного подземного ядерного взрыва «Кратон» (Якутия) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 5. С. 722–736.
14. Clossman P.J. On the prediction of cavity radius produced by an underground nuclear explosion // Journal of Geographical research. 1969. Vol. 74, No. 15. P. 3935–3939 DOI: 10.1029/JB074i015p03935.
15. Ядерные испытания СССР. Том 4. Использование ядерных взрывов для решения народнохозяйственных задач и научных исследований. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. 200 с.
16. Васильев А.П. Ядерные взрывные технологии в мирных ядерных взрывах / Сборник материалов XIII Международной конференции. Снежинск, 20–24 марта 2017 года. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени Е.И. Забабахина, 2017. С. 10.
17. Касаткин В.В., Касаткин А.В., Ильичев В.А. и др. Этапы перевода объекта использования ядерного заряда в мирных целях «Глобус-1» в пункт консервации особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2014. Т. 116, № 3. С. 157–161.

18. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Клишин В.И. Создание санитарно-защитной зоны объекта «Тайга» // Безопасность окружающей среды. 2009. № 4, С. 88–91.
19. Клишин В.И., Приходько Н.К., Камнев Е.Н. и др. Основные положения концепции специального горного отвода вокруг центральных зон подземных ядерных взрывов. Труды Международной конференции Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий. Москва 5–6 декабря 2005 г. Том 3. Воздействие радиоактивного загрязнения на антропогенные и сельскохозяйственные экосистемы. Дозы облучения населения в результате радиоактивного загрязнения окружающей среды при ядерных взрывах и авариях. Стратегии и контрмеры. СПб., 2006, С. 444–448.
20. Особые радиоактивные отходы. ИБРАЭ РАН. М.: ООО «САМ полиграфист», 2015. 240 с.
21. Касаткин В.В., Касаткин А.В., Василенко Е.М. и др. Концепция обращения с особыми радиоактивными отходами–мирными ядерными взрывами // Вестник РАЕН. 2017. Т. 17, № 2. С. 39–42.
22. Касаткин В.В., Камнев Е.Н., Ильичев В.А., Касаткин А.В. Экспертная оценка радиационного риска объектов мирных ядерных взрывов (МЯВ) на основе выбранных эмпирических критериев // Горный информационно–аналитический бюллетень. 2013. № 8. С. 196–201.
23. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Камнев Е.Н. и др. Георадиоэкологические проблемы объектов мирных ядерных взрывов – пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5, С. 289–293.
24. Дубасов Ю.В. Выход и истечение радиоактивных благородных газов при подземных ядерных взрывах различного назначения // Радиохимия. 2021. Т. 63, № 6. С. 591–600.
25. Абрамсон М.Г., Байдюк Б.В., Зарецкий В.С. и др. Справочник по механическим и абразивным свойствам горных пород нефтяных и газовых месторождений. М.: Недра, 1984. 207 с.
26. Капитонов А.М., Васильев В.Г. Физические свойства горных пород западной части Сибирской платформы. Красноярск: Сиб. федер. ун–т, 2011. 424 с.
27. Справочник по буровзрывным работам. Под редакцией Друкованого М.Ф. М.: Недра, 1976. 631 с.
28. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под редакцией Мельникова Н.В., Ржевского В.В., Протодьякова М.М. М.: Недра, 1975. 279 с.
29. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: Учебник для вузов – 4–е изд. М: Недра, 1984. 379 с.
30. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов: учебник для вузов. 2–е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2002. 672 с.

Поступила: 31.10.2023 г.

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Библин Артем Михайлович – старший научный сотрудник, руководитель Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Варфоломеева Ксения Владимировна – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Зеленцова Светлана Александровна – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Ильичев Вячеслав Алексеевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Ведущего проектно-исследовательского и научно-исследовательского института промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Касаткин Андрей Владимирович – начальник управления Ведущего проектно-исследовательского и научно-исследовательского института промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Касаткин Владимир Викторович – кандидат технических наук, начальник лаборатории радиационной безопасности Ведущего проектно-исследовательского и научно-исследовательского института промышленной технологии Государственной корпорации «Росатом», Москва, Россия

Для цитирования: Репин В.С., Рамзаев В.П., Библин А.М., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Ильичев В.А., Касаткин А.В., Касаткин В.В. Анализ возможностей оценки размеров охранных зон мирных ядерных взрывов на основе количественных закономерностей деформации земных недр // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, No 4. С. 134–147. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-134-147

Estimation of the protected zone sizes for peaceful nuclear explosions based on quantitative patterns of the Earth's interior deformation

Victor S. Repin¹, Valery P. Ramzaev¹, Artem M. Biblin¹, Kseniya V. Varfolomeeva¹, Svetlana A. Zelentsova¹,
Konstantin A. Sednev¹, Vyacheslav A. Ilyichev², Andrey V. Kasatkin², Vladimir V. Kasatkin²

¹Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

²ROSATOM State Atomic Energy Corporation, Joint-stock company VNIPIpromtekhologii, Moscow, Russia

The designation of peaceful nuclear explosions as special radioactive waste imposes serious requirements to the territory of the explosion, its boundaries, and stakeholders informing about the prohibition of economic activities within these boundaries. The acting Sanitary Norms and Rules SanPiN 2.6.1.2819–10 “Ensuring radiation safety of the population living in areas where nuclear explosions were conducted (1965–1988) for peaceful purposes” do not define the size of the boundaries of protected zones. The aim of this paper is to analyze the scientific literature on the structure of deformation changes in the Earth's interior due to peaceful nuclear explosions and to justify quantitative ratios on the basis of which the size of protected zones can be estimated. The quantitative ratios were selected on the basis of a comparative analysis of the literature data. Using the ratios values made it possible to calculate the radii of deformation changes (cavities, crushing zones, fracturing zones, and zones of residual deformations) in various rocks. It is shown that the maximum values of fracturing radii for peaceful nuclear explosions carried out on the territory of the Russian Federation in hard rocks and in plastic rocks do not exceed 200 m and 250 m, respectively.

Key words: protected zone, peaceful nuclear explosions, underground nuclear explosions, special radioactive waste, rock formations, explosion cavity, cracking, crushing zone, destruction zone.

Authors' personal contribution

Repin V.S. – developed the research concept, supervised the research execution, wrote and edited the interim version and final version of the article.

Ramzaev V.P. – edited and finalized the article.

Biblin A.M. – collected and systematized literature data, edited the interim version of the article.

Varfolomeeva K.V. – collected and systematized literature data, edited the interim version of the article.

Zelentsova S.A. – collected and systematized literature data, edited the interim version of the article.

Sednev K.A. – collected literature data, the interim version of the article.

Ilyichev V.A. – expert assessment of literary sources, scientific editing of individual parts of the article,

Kasatkin A.V. – generalization of own and literature data, editing and finalization of the article.

Kasatkin V.V. – literature sources collection and analysis, organization of the authors of JSC “VNIPIpromtekhologii”, coordination of article writing, editing of the article for publication.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025. “Scientific

substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Improving and developing methods for monitoring environmental objects in areas where peaceful nuclear explosions are carried out. Radiation-hygienic characteristics of sources of drinking water supply.”

References

1. Biblin AM, Khramtsov EV, Repin VS, Ivanov SA, Varfolomeeva KV, Sednev KA, et al. Radiation situation at the “Pirit” peaceful underground nuclear explosion site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 149–161. DOI: 10.21514/1998–426X–2022–15–4–149–161. (In Russian).
2. Ramzaev VP, Biblin AM, Repin VS, Khramtsov EV, Varfolomeeva KV. Tritium contamination of surface and ground waters at the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(1): 6–26. DOI: 10.21514/1998–426X–2022–15–1–6–26. (In Russian).
3. Ramzaev VP, Repin VS, Khramtsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2):27–33. (In Russian).
4. Ramzaev VP, Travnikova IG, Basalaeva LN, Bruk GYa, Golikov VYu, Mishin AS, et al. On influence of the underground nuclear explosions Crystal and Kraton–3 on radiological situation in the nearest settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(2):14–19. (In Russian).
5. Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khramtsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting ra-

Viktor S. Repin

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru

- dionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011;102(7): 672–80. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.04.003
6. Khramtsov EV, Repin VS, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Ivanov SA. Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 111–123. (In Russian.) DOI: 10.21514/1998–426X–2021–14–1–111–123.
 7. Arkhipov VN, Borisov VA, Budkov AM, Valko VV, Galiev AM, Goncharova OP, et al. Mechanical Action of Nuclear Explosion. Ministry of Defense of the Russian Federation. Central Institute of Physics and Technology. Moscow: FIZMATLIT; 2003. 382 p. (In Russian).
 8. Vasiliev AP, Dubasov YuV, Ilyichev VA, Kasatkin VV, Myasnikov KV, Prihodko NK, et al. Nuclear explosive technologies: experiments and industrial applications. Snezhinsk: RFNC–VNITF; 2017. 508 p. (In Russian).
 9. Adushkin VV, Spivak AA. Underground explosions. Moscow: Nauka; 2007. 585 p. (In Russian).
 10. Adushkin VV, Spivak AA, Chernyshev AK. Physical view of the underground nuclear explosion. For the benefit of Russia. To the 75th anniversary of Academician of the Russian Academy of Sciences YuA Trutnev. 2002. p. 170–194. (In Russian).
 11. Sadovsky MA. Selected works: Geophysics and physics of explosion. Moscow: Nauka; 2004. 439 p. (In Russian).
 12. Boardmen ChR. Engineering effects of underground nuclear explosions. Proc. Symp. Eng. Nucl. Explos. Las Vegas, Nev.; 1970. Vol. 1. Springfield. 1970. P. 43–67.
 13. Artamonova SY, Kozhevnikov NO, Antonov EY. Permafrost and groundwater settings at the site of “Kraton–3” peaceful underground nuclear explosion (Yakutia), from TEM data. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*. 2013;54(5): 555–565. (In Russian). DOI: 10.1016/j.rgg.2013.04.007.
 14. Clossman PJ. On the prediction of cavity radius produced by an underground nuclear explosion. *Journal of Geographical Research*. 1969;74(15): 3935–3939. DOI: 10.1029/JB074i015p03935.
 15. Nuclear Tests of the USSR. Volume 4. Application of Nuclear Explosions for Solving National Economic Problems and Scientific Research. Sarov: RFNC–VNIIEF; 2000. 200 p. (In Russian).
 16. Vasiliev AP. Nuclear explosive technologies in peaceful nuclear explosions. Proceedings of the XIII International Conference. 2017. Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after E.I. Zababakhin. Snezhinsk, March 20–24, 2017. 10 p. (In Russian).
 17. Kasatkin VV, Kasatkin AV, Ilyichev VA, Sedov NS, Samorodova TS. Stages for reclassifying Globus-1 peaceful nuclear explosion object as a site for preserving special radwastes. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2014;116(3): 157–161. (In Russian). DOI: 10.1007/s10512-014-9841-0.
 18. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Klishin VI. Creation of the sanitary protection zone of the Taiga object. *Bezopasnost okruzhayushchey sredy = Environmental Safety*. 2009;(4): 88–91. (In Russian).
 19. Klishin VI, Prihodko NK, Kamnev EN, Kasatkin VV, Ilyichev VA. Main statements of the concept of special mining allotment around the central zones of underground nuclear explosions. Proceedings of the International Conference Radioactivity after Nuclear Explosions and Accidents. Moscow, December 5–6, 2005, Vol. 3. Impact of radioactive contamination on anthropogenic and agricultural ecosystems. Doses to the population as a result of radioactive contamination of the environment in nuclear explosions and accidents. Strategies and Countermeasures. St. Petersburg; 2006. P. 444–448. (In Russian).
 20. Special radioactive waste. IBRAE RAS. Moscow: SAM Polygraphist LLC; 2015. 240 p. (In Russian).
 21. Kasatkin VV, Kasatkin AV, Vasilenko EM, Samorodova TS, Sedov NS. The concept of treatment of special radioactive waste (RW) – peaceful nuclear explosions (PNES). *Vestnik RAEN = Bulletin of the RANS*. 2017;17(2): 39–42. (In Russian).
 22. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Kamnev EN, Kasatkin AV. Expert assessment of radiation risk of objects of peaceful nuclear explosions (PNE) on the basis selected empirical criteria. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin*. 2013;(8): 196–201. (In Russian).
 23. Kasatkin VV, Ilyichev VA, Kamnev EN, Kasatkin AV, Samorodova TS. Geological and radioecological problems of the objects formed by peaceful nuclear explosions – special radwaste repositories. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2012;113(5): 289–293. (In Russian).
 24. Dubasov YV. Egress and outflow of radioactive noble gases in varied-purpose underground nuclear explosions. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2021;63:851–860. (In Russian). DOI: 10.1134/S1066362221060187.
 25. Abramson MG, Baidyuk BV, Zaretsky VS, Kirsanova AT, Matveeva AM, Pyankov NYa, et al. Reference book on mechanical and abrasive properties of rocks of oil and gas fields. Moscow: Nedra; 1984. 207 p. (In Russian).
 26. Kapitonov AM, Vasiliev VG. Physical properties of rocks of the western part of the Siberian Platform. Krasnoyarsk: Siberian federal university; 2011. 424 p. (In Russian).
 27. Reference book on drilling and blasting operations. Edited by Drukovanyi MF. Moscow: Nedra; 1976. 631 p. (In Russian).
 28. Reference book (cadastre) of physical properties of rocks. Edited by Melnikov NV, Rzhnevsky VV, Protodyakov MM. Moscow: Nedra; 1975. 279 p. (In Russian).
 29. Rzhnevskiy VV, Novik GYa. Fundamentals of rock physics: Textbook for universities. 4th ed. Moscow: Nedra; 1984. 379 p. (In Russian).
 30. Timoshenko SP, Gere J. Mechanics of materials: textbook for universities. 2nd ed. Saint-Petersburg: “Lan”; 2002. 672 p. (In Russian).

Received: October 31, 2023

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)

Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher, External Exposure Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Artem M. Biblin – Head of the Information and Analytical Center, Senior Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Kseniya V. Varfolomeeva – Junior Researcher, Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Svetlana A. Zelentsova – Junior Researcher, Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Konstantin A. Sednev – Acting Junior Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Vyacheslav A. Ilyichev – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Joint-stock company «VNIPIpromtekhnologii», Moscow, Russia

Vladimir V. Kasatkin – Candidate of Technical Sciences, head of the radiation safety laboratory, Joint-stock company «VNIPIpromtekhnologii», Moscow, Russia

Andrey V. Kasatkin – Head of department, Joint-stock company «VNIPIpromtekhnologii», Moscow, Russia

For citation: Repin V.S., Ramzaev V.P., Biblin A.M., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Ilyichev V.A., Kasatkin A.V., Kasatkin V.V. Estimation of the protected zone sizes for peaceful nuclear explosions based on quantitative patterns of the Earth's interior deformation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No 4. P.134-147. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-134-147