

# ВЫХОД И ИСТЕЧЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2021 г. Ю. В. Дубасов\*

Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Мурунский пр., д. 28

\*e-mail: dubasov@khlopin.ru

Поступила в редакцию 24.08.2020, после доработки 31.12.2020, принята к публикации 11.01.2021

В период с 1961 по 1990 гг. в СССР было проведено около 500 подземных ядерных испытаний и 124 мирных ядерных взрывов различного назначения и в различных горных породах. В том числе на Семипалатинском полигоне было проведено 340 подземных ядерных взрывов, из них 179 взрывов были полностью камуфлетными, при 145 взрывах наблюдалось слабое истечение радиоактивных благородных газов. На Северном испытательном полигоне, находящемся на архипелаге Новая Земля, было проведено 39 подземных ядерных испытаний, включая испытания мегатонного класса. Рассматриваются случаи истечения газов при проведении подземных ядерных взрывов в мирных целях.

**Ключевые слова:** подземный ядерный взрыв, радионуклиды ксенона, бывший Семипалатинский полигон, мирные ядерные взрывы, Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний

**DOI:** 10.31857/S0033831121060113

## ВВЕДЕНИЕ

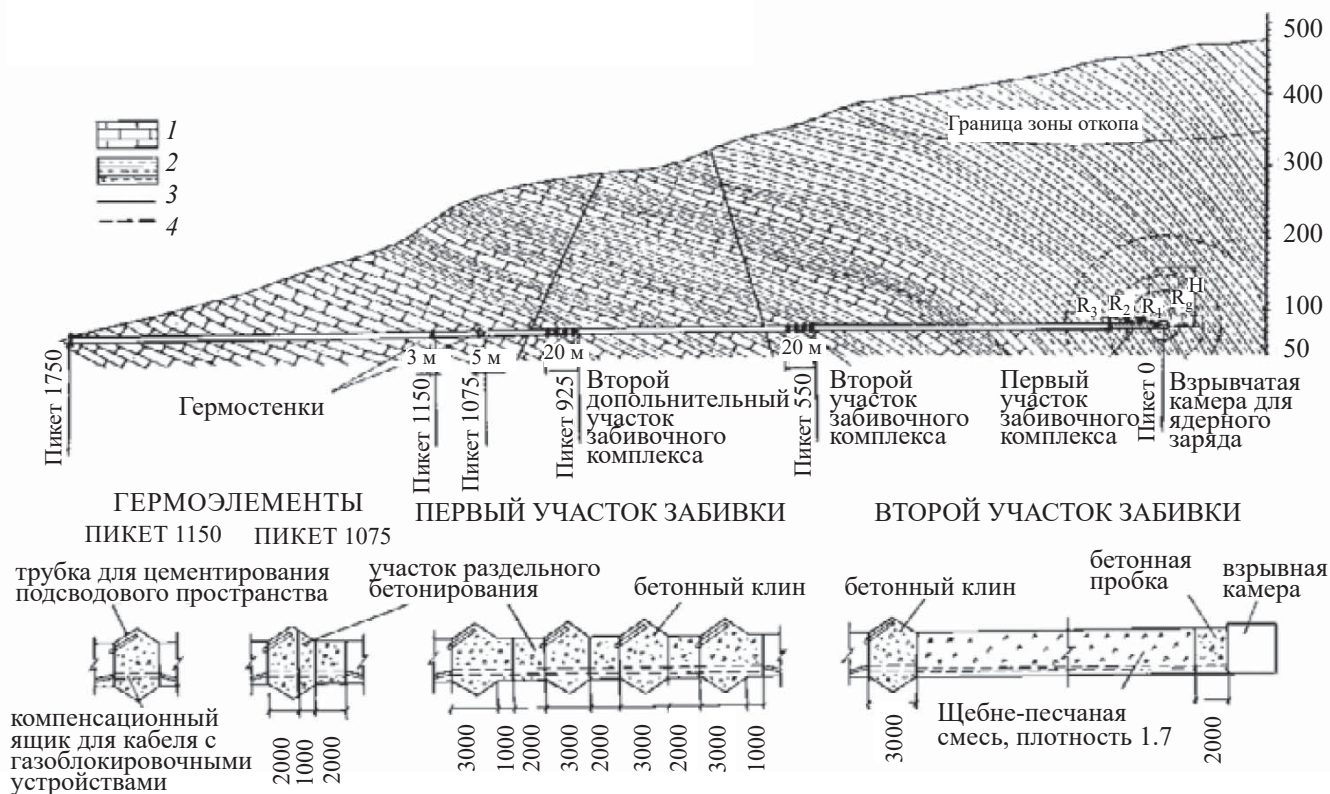
В сентябре 1996 г. на Генеральной Ассамблее ООН был принят для подписания Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), резолюция 50/245 [1]. Договор предусматривает в качестве контроля за его соблюдением сейсмологический и радионуклидный мониторинг, в частности, содержания радионуклидов Хе в атмосферном воздухе. Поэтому данные о процессах истечения радионуклидов Хе при подземных ядерных взрывах (ПЯВ) являются необходимыми для разработки методов мониторинга на международных станциях мониторинга (МСМ) и при проведении инспекции на месте (ИНМ) возможного скрытого ПЯВ в случае получения станциями МСМ данных по сейсмическим явлениям и проявлениям радиоактивности.

В период 1961–1990 гг. в СССР было проведено около 500 ПЯВ различного назначения и в различных горных породах на Семипалатинском и Северном испытательных полигонах. Имеющиеся экспериментальные данные по радиационной обстановке

при проведенных ПЯВ являются первичными данными о процессах истечения радиоактивных благородных газов (РБГ).

При ПЯВ в случае истечения газовой фазы происходит изменение радиационной обстановки на технологической площадке. Продукты ядерного деления – радионуклиды Кг и Хе, распадаясь, превращаются соответственно в радионуклиды Sr и Cs, которые в зависимости от массового номера имеют различные периоды полураспада ( $T_{1/2}$ ) и, следовательно, выпадая на местности, задают продолжительность существования очага радиоактивного загрязнения. При проведении ядерных испытаний в СССР существовали предельно допустимые нормы по концентрации РБГ в воздухе на открытой местности для персонала и ограниченной части населения [2], которыми руководствовались службы радиационной безопасности (РБ) полигонов.

В отечественной практике ПЯВ характеризовались следующим образом согласно радиационной обстановке, возникавшей на технологической площадке при взрыве:



**Рис. 1.** Типовая горная выработка (штольня) с забивочным комплексом на Северном испытательном полигоне [6]: 1 – кварцевые песчаники; 2 – слоистые сланцы; 3 – тектонические трещины; 4 – прогнозируемые зоны механического воздействия взрыва.  $R_g$  – радиус полости взрыва,  $R_1$  – радиус зоны дробления,  $R_2$  – радиус зоны макротрещин,  $R_3$  – радиус зоны микротрещин.

ВКП (взрыв камуфлетный полный) – подземный взрыв полного внутреннего действия, сопровождающийся образованием подземной полости с соответствующим уплотнением, дроблением и растрескиванием горной породы вокруг нее, но породный целик препятствует выходу или истечению газообразных продуктов;

ВНК (РБГ) (взрыв неполного камуфлета) – взрыв полного внутреннего действия, сопровождающийся соединением зон трещиноватости и откольного разрушения поверхности земли в гипоцентральной зоне взрыва и вентиляционным, как правило, незначительным, истечением в атмосферу короткоживущих РБГ. Классификация всех ПЯВ на Семипалатинском полигоне дана в работе [3].

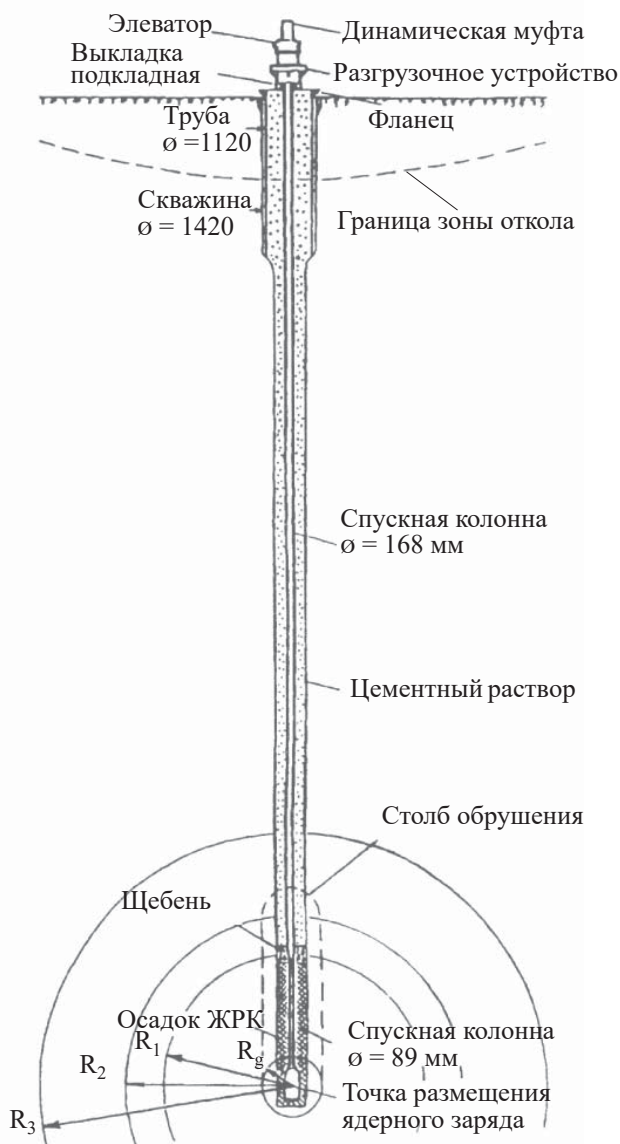
**Методы контроля и анализа радиационной обстановки.** Контроль за радиационной обстановкой при каждом испытании осуществлялся службами РБ ядерных полигонов Минобороны СССР,

а на площадках проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ) – специалистами ВНИПИПромпроект и Радиового института им. В.Г. Хлопина. Время и место истечения радионуклидов определяли как воздушными средствами, так и приборами наземной разведки. В ближней зоне использовали вертолеты дозиметрической разведки Ми-8Т, а для контроля в дальней зоне – летающие лаборатории, размещенные на специальных самолетах АН-24РР и АН-30РР. На вертолетах устанавливались рентгенометры типа «Воздух-2М» с пределами измерения мощности дозы от 0.05 МГр/ч до 5 Гр/ч (5 мР/ч–500 Р/ч) [4]. Автоматизированный аэро-гамма-спектрометрический комплекс АГСК, устанавливавшийся на самолетах, позволял определять радионуклидный состав и место истечения газо-аэрозольной смеси, регистрировать динамику истечения РБГ, определять контуры радиоактивного облака в атмосфере.

**Результаты контроля истечения РБГ.** Истечение газов, в том числе РБГ, при ПЯВ зависит от многих факторов, к которым относятся глубина заложения заряда  $H_{прив} = H/W^{0.33}$  (м/кт<sup>1/3</sup>), так называемая линия наименьшего сопротивления (ЛНС), составляющая для ядерных испытаний обычно 90–120 м/кт<sup>1/3</sup>, надежность забивочного комплекса, механические и физико-химические свойства непосредственно прилегающей породы. Для этого выбирали породу с минимальной влажностью и газовостью, отсутствием тектонических трещин и нарушений, а также техногенных трещин [5–7]. На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены схемы забивочных комплексов на Северном полигоне (архипелаг Новая Земля) для испытаний в горизонтальной штольне и вертикальной скважине [6]. На Семипалатинском полигоне взрывы в штольнях проводили в гранитоидных породах, а испытания в скважинах на площадке Балапан в породах, представленных песчаниками, алевритами и глинистыми и углисто-глинистыми сланцами .

*Испытания на Семипалатинском полигоне.* В соответствии с предметом исследования представляют интерес взрывы ВНК (РБГ), сопровождающиеся незначительным истечением благородных газов. В табл. 1 показано распределение взрывов в соответствии с классом радиационной обстановки при взрыве.

При взрывах типа ВНК наблюдалось как раннее (до ~1 ч) начало истечения РБГ, так и более позднее – от 1 до 28 ч после взрыва. Иногда просачивание газов продолжалось в течение нескольких суток, причем оно протекало попеременно либо через устье штольни, либо через гипоцентральную зону в зависимости от температуры наружного воздуха и атмосферного давления. Истечение РБГ после взрывов в скважине происходило либо через оголовок испытательной скважины по межкабельному пространству, либо по трещинам затрубного пространства или по образовавшимся трещинам в грунте гипоцентральной зоны; иногда газы выпу-



**Рис. 2.** Типовая вертикальная горная выработка (скважина) для ядерных испытаний на Северном полигоне [6].  $R_g$  – радиус полости взрыва,  $R_1$  – радиус зоны дробления,  $R_2$  – радиус зоны макротрещин,  $R_3$  – радиус зоны микротрещин.

скались через специальную пробоотборную магистраль для анализов.

*Испытания в штольнях в горном массиве Дегелен* [5, 8]. На примере некоторых испытаний рассмотрим развитие радиационной ситуации при взрывах типа ВНК (РБГ) в штольнях.

**Таблица 1.** Распределение камуфлетных взрывов на Семипалатинском полигоне по характеру радиационной обстановки [3]

Тип испытания	Количество взрывов	ВКП	ВНК (РБГ)
Взрывы в скважинах	127	56 (44%)	71 (56%)
Взрывы в штольнях	209	126 (60%)	83 (40%)

Таблица 2. Характеристики некоторых испытаний в штольнях

Испытание	Дата	Мощность $W$ , кТ т.э.	Радиационная обстановка и истечение РБГ
Штольня 11П*	28.05.67	2 заряда, $W = 0.001-20$ каждый	Через 1–3 мин произошел динамический прорыв парогазовой смеси продуктов взрыва в штольню. РБГ и некоторые летучие радионуклиды в том числе I, вышли через портал штольни. Мощность дозы (МД) у портала достигала 75 Зв/ч. Остаточное загрязнение в 1996 г. было невелико и обусловлено $^{90}\text{Sr}$ и $^{137}\text{Cs}$ [8]. Взрыв ВНК (НРС).
Штольня 13	19.10.1966	$W = 20-150$	РБГ обнаружены через 11.5 мин в гипоцентральной зоне, МД при импульсном истечении достигала 2.5 мЗв/ч. Взрыв ВНК (РБГ).
Повторный взрыв в штольне 13П	02.09.1967	$W = 0.001-20$	Низкая концентрация энергии и наличие влаги в штольне обусловили прорыв продуктов взрыва в штольню. Порция газов появилась у портала через 15 мин. МД в месте истечения РБГ не превышала 2 мЗв/ч. РБГ обнаружены в атмосфере, но только в пределах полигона. Испытание классифицируется как ВНК (РБГ). В 1996 г. МД у портала штольни равнялась 0.25 мкЗв/ч, плотность загрязнения по $^{137}\text{Cs}$ составляла 0.1 Бк/см <sup>2</sup> [8].
Штольня 19	25.03.1967	2 заряда, $W = 0.001-20$ каждый	Выход РБГ был поздним и малоинтенсивным. Испытание характеризуется как ВНК (РБГ), истечение РБГ было в гипоцентральной зоне при температуре наружного воздуха большей, чем внутри штольни. Через 5 ч МД в гипоцентральной зоне не превышала 4 мЗв/ч. Продукты взрыва в атмосфере не обнаружены.
Штольня 19П	04.04.1969	$W = 0.001-20$	Проброс продуктов взрыва в штольню произошел из-за низкой концентрации энергии в концевом (зарядном) боксе. Газообразные продукты через 3 мин достигли портала штольни, МД > 10 Зв/ч. РБГ обнаружены в атмосфере в пределах границ полигона. По радиационному эффекту испытание классифицируется как ВНК (РБГ). МД в 1996 г. около портала штольни составляла 0.025 мкЗв/ч [8].
Штольня 506П	30.10.1969	$W = 0.001-20$	Первая порция РБГ подошла к portalу штольни через ~3 мин, что обусловлено низкой концентрацией энергии в концевом боксе, МД около 0.7 Зв/ч. Струя газов распространилась в СЗ направлении до 19 км. Взрыв классифицируется как ВНК (РБГ). Вследствие раннего истечения газов у портала штольни сохранилось остаточное загрязнение, МД в 1996 г. почти в 10 раз превышала естественный фон [8].
Штольня 18	04.08.1967	2 заряда, $W = 0.001-20$ каждый	Примерно через 7.5 ч произошло позднее истечение РБГ через портал штольни, МД в районе портала достигала 15 мЗв/ч
Штольня 18П	27.11.1977	$W = 0.001-20$	Второй взрыв в штольне спустя 10 лет, классифицируется как ВНК (РБГ). Истечение РБГ произошло через несколько минут, МД у портала штольни < 0.2 Зв/ч. Струя РБГ прослеживалась до 50 км в СЗ направлении в пределах полигона. На площадке около портала штольни МД в 1996 г. не превышала 0.25 мкЗв/ч. Остаточное загрязнение обусловлено в основном, $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ [8].

Таблица 2. (Продолжение)

Испытание	Дата	Мощность $W$ , кт т.э.	Радиационная обстановка и истечение РБГ
Штольня 810	07.01.1968	$W = 0.001-20$	Взрыв (ВНК-НРС) с нештатной радиационной ситуацией. Через 1.5 мин произошел динамический прорыв парогазовой смеси. РБГ и некоторые летучие радионуклиды, включая радионуклиды I, вышли через портал штольни. МД около портала была $>10$ Зв/ч. Остаточное загрязнение в 1996 г. обусловлено в основном $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ [8].
Штольня 104	28.07.1978	Одновременный взрыв заряда $W = 20-150$ и 4 зарядов с $W = 0.001-20$	Испытание характеризовалось как ВНК (РБГ) с поздним малоинтенсивным истечением. МД у портала штольни была менее 7 мЗв/ч.
Штольня 204ПП	05.12.1980	$W = 0.001-20$	Третье испытание в штольне 204. Через 1 мин произошло напорное истечение РБГ через гипоцентральную зону, где МД составила $\sim 3$ Зв/ч. Взрыв классифицирован как ВНК (НРС).
Штольня 184	14.08.1981	Одновременный взрыв 3 зарядов $W = 0.001-20$ каждый	Данное испытание классифицируется как ВНК (РБГ). Через 10 мин после взрыва произошло раннее истечение РБГ в гипоцентральной зоне, МД не превышала 0.12 мЗв/час. Характер истечения был обусловлен недостаточной глубиной заложения заряда и разницей температур наружного и внутреннего воздуха, составлявшей $12^\circ\text{C}$ . Остаточное загрязнение на момент обследования в 1996 г. обусловлено $^{137}\text{Cs}$ , но оно ниже допустимого для помещений постоянного пребывания – 2000 частиц/( $\text{см}^2 \times \text{мин}$ ) [8].

\*П – повторное использование штольни для следующего испытания.

*Взрыв в штольне В-1 (11.10.61).* Это было первое подземное ядерное испытание в СССР, мощность взрыва  $W \approx 1$  кт. В связи с поздним малоинтенсивным истечением РБГ (через 3–4 ч) через гипоцентральную зону и забивочный комплекс взрыв В-1 классифицирован как ВНК (РБГ) [4, 7]. Выход РБГ с суммарной активностью  $\sim 5 \times 10^{15}$  Бк, (0/07% от всей активности РБГ) произошел через гипоцентральную зону. Существенного остаточного загрязнения вблизи портала штольни и в гипоцентральной зоне не произошло, так как предшественники долгоживущих радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  ( $^{90}\text{Kr}$ ,  $T_{1/2} = 32.3$  с) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{137}\text{Xe}$ ,  $T_{1/2} = 3.84$  мин) к началу истечения значительно распались. В августе 1964 г. через обходной штрек штольни нам удалось проникнуть в центр полости, определить ее радиус и отобрать пробы радиоактивного стекла и шлаков для исследований.

Из приведенных данных следует, что при 8 испытаниях истечение РБГ происходило через портал

штольни, а при 4 – через трещины в гипоцентральной зоне в районе ЛНС.

*Испытания на площадке Балапан.* Ядерные взрывы на площадке Балапан проводились в скважинах, как правило, на приведенной глубине  $H_{\text{прив}} = 120-150$  м/кт<sup>0.33</sup>.

Из вышеприведенных данных по 16 испытаниям 26 зарядов на Семипалатинском полигоне следует, что при 10 испытаниях наблюдалось истечение в период от 1 до 15 мин после взрыва, а в 5 испытаниях истечение РБГ фиксировалось позже, чем через 15 мин, в основном через 2–8 ч. Истечение газов в большинстве случаев было малоинтенсивным. Радиоактивная составляющая струй в основном была представлена смесью  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ . В ряде испытаний выход РБГ наблюдался на поверхности, но не был обнаружен приборами авиационной разведки.

*Содержание РБГ в грунте и почве испытательной площадки Балапан.* Образующиеся при взрыве

Таблица 3. Характеристики некоторых испытаний в скважинах

Испытание	Дата	Мощность $W$ , кТ т.э.	Радиационная обстановка и истечение РБГ
Скважина 1355	13.12.1987	2 заряда $W = 0.001-20$ и $W = 20-150$	Данное испытание классифицируется как ВНК (РБГ). Истечение газов началось через 5–10 мин после взрыва, МД = 3 мкГр/ч была зафиксирована через 1 ч на высоте 50 м и на удалении 2 км, ширина струи 2 км. На вторые сутки струя с уровнем 0.01 мкГр/ч обнаруживалась на удалении 50 км
Скважина 1350	14.09.1988	$W = 100-150$	Совместный с США эксперимент по контролю пороговой мощности подземных взрывов (СЭК). Аналогичное испытание прошло на Невадском полигоне США 17.08.1988. Взрыв классифицируется как ВКП, остаточное загрязнение отсутствует.
Скважина 1366	12.02.1989	$W = 20-150$	Данное испытание классифицируется как ВНК (РБГ). Истечение РБГ началось через ~2 ч по пробоотборным магистралям, через 5.5 ч после взрыва газы стали просачиваться в гипоцентральной зоне по трещинам. Струя РБГ распространялась на высоте 50–200 м. На следующий день струя регистрировалась на удалении 230 км от места взрыва, концентрация РБГ была менее 3.7 Бк/л. Истечение прекратилось на 4-й день [4]. Анализ газов, отобранных из трещин в гипоцентральной зоне, показал, что в пробах присутствуют только $^{133}\text{Xe}$ и $^{135}\text{Xe}$ .

РБГ под воздействием возникающего в центральной зоне взрыва давления газов стремятся к выходу на дневную поверхность через создавшуюся систему трещин и микротрещин. Радиус зоны простираения микротрещин от центра взрыва оценивается величиной  $R_{\text{тр}} = 70-100 W^{1/3}$  [м/кТ<sup>1/3</sup>] [4]. Если зона откольных явлений, проявляющаяся в виде подъема грунта вокруг оголовка скважины, соединяется с зоной микротрещин, то они могут служить путями миграции РБГ на дневную поверхность.

Проведенные экспедицией Радиевого института в 1989–1990 гг. исследования по поиску и измерению РБГ в подпочвенном газе вокруг испытательных скважин указали на возможность использования данного метода при контроле за соблюдением ДВЗЯИ в порядке проведения ИНМ.

Для отбора подпочвенного воздуха бурились пробоотборные скважины диаметром 130 мм и глубиной 6–12 м на различных расстояниях от испытательных скважин. Скважину закрывали специальной заглушкой, откачивали 2–3 свободных объема воздуха для продувки и после этого отбирали пробу воздуха объемом 0.6–1.0 м<sup>3</sup>. Результаты анализа отобранных проб подпочвенного газа представлены в табл. 4 и 5.

Из данных, представленных в табл. 4 и 5, следует, что  $^{133}\text{Xe}$  обнаружен в подпочвенном газе на

всех площадках на удалениях вплоть до 500 м. Концентрация  $^{133}\text{Xe}$  находилась в интервале значений от 0.3 до 2.6 Бк/м<sup>3</sup>.  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ , образующийся по изобарной цепочке распада из  $^{131}\text{I}$ , появлялся в подпочвенном газе не ранее чем через 60 сут. Он присутствовал в подпочвенном газе вплоть до 288 сут, может и дольше.

Отношение активностей  $^{133}\text{Xe}/^{131\text{m}}\text{Xe}$  в пробах подпочвенного газа выше, чем ожидаемое значение согласно их кумулятивным выходам, поэтому можно считать, что пробы газа обеднены  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  [9]. Это могло произойти из-за различия в физико-химических свойствах I и его предшественников, а также времени схлопывания полости. Вышедшие за пределы полости газы содержали в основном фракцию  $^{131}\text{I}$ , а  $^{131}\text{Te}$  и его предшественники  $^{131}\text{Sn}$  и  $^{131}\text{Sb}$  были локализованы в полости взрыва, т.е. цепочка радиоактивного распада-накопления (1) оказалась разорванной при схлопывании и обрушении полости.

$$^{131}\text{Sn} [1.38\%](39 \text{ с}) \rightarrow ^{131}\text{Sb} [1.49\%](23 \text{ мин}) \rightarrow$$

$$^{131\text{m}}\text{Te} [0.22\%](1.35 \text{ сут}) \rightarrow ^{131}\text{Te} [0.075\%](25 \text{ мин}) \rightarrow$$

$$^{131}\text{I} [0.001\%](8.04 \text{ сут}) \rightarrow ^{131\text{m}}\text{Xe} [2.4 \times 10^{-7}\%]$$

$$(11.9 \text{ сут}) \rightarrow ^{131}\text{Xe} (\text{стаб.})$$

После символов радионуклидов в цепочке с массовым числом 131 в квадратных скобках указаны их независимые выходы в случае мгновенного

**Таблица 4.** Концентрация радионуклидов Хе в подпочвенном газе на различных расстояниях от испытательных скважин 1346, 1350, 1352 и 1410 [9]

Скважина, расстояние, азимут	Мощность взрыва $W$ , кт т.э.	Время после взрыва, сут	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>		Отношение активностей $^{133}\text{Xe}/^{131\text{m}}\text{Xe}$
			$^{131\text{m}}\text{Xe}$	$^{133}\text{Xe}$	
1346, 100 м, З	2 заряда $W = 20\text{--}150$ и $0.001\text{--}20$	185	5.2	0.8	0.15
1346, 500 м, ЮВ	То же	198	16.0	2.6	0.16
1350, 10 м, В	$20\text{--}150$	288	8.6	1.0	0.12
1352, 200 м, З	» »	55	–	0.41	–
1352, 500 м, ЮВ	» »	56	–	$\leq 0.037$	–
1352, 250 м, З	» »	60	–	0.48	–
1410, 5 м, С	$0.001\text{--}20$	5	–	1.4	–
1410, 100 м, С	» »	5	–	0.34	–

**Таблица 5.** Концентрация РБГ в подпочвенном газе вокруг скважины 1366 [9]

Расстояние, направление	Время после взрыва, сут	Объемная активность, Бк/м <sup>3</sup>			Отношение активности $^{133}\text{Xe}/^{131\text{m}}\text{Xe}$
		$^{85}\text{Kr}$	$^{131\text{m}}\text{Xe}$	$^{133}\text{Xe}$	
110 м, З	131	$\leq 3.7$	$\leq 0.15$	1.6	$\geq 10$
170 м, Ю	132	$1 \times 10^6$	$4.8 \times 10^3$	$9.5 \times 10^3$	2.0
300 м, СВ	135	$3.3 \times 10^6$	240	$1.7 \times 10^3$	7.1
Атмосферный воздух, в 5 м от скважины	135	$\leq 3.7$	$\leq 0.15$	0.62	$\geq 4$

деления  $^{235}\text{U}$  нейтронами делительного спектра [10], в круглых – периоды полураспада.

В некоторых случаях, например, после взрыва в скважине 1366 (табл. 3), истечение РБГ продолжалось 4 сут, концентрация радионуклидов Kr и Хе в подпочвенном газе была высокой (табл. 5). Неизвестно, когда  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  появился в подпочвенном газе, но спустя 132 сут после взрыва его объемная активность была в несколько раз меньше, чем  $^{133}\text{Xe}$ . В атмосферном воздухе концентрация  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  была  $\leq 0.15$  Бк/м<sup>3</sup>.

Уровень концентраций  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  в подпочвенном газе оказался намного порядков выше, чем чувствительность нашей мобильной установки РИНГА-Ф по  $^{133}\text{Xe}$ , равной  $0.35$  мБк/м<sup>3</sup> [11]. Таким образом, в случае проведения ИНМ в районе возможного скрытого ПЯВ наличие радионуклидов Хе в подпочвенном газе может быть надежно измерено.

Возможность обнаружения РБГ вдали от точки истечения зависит от метеорологической обстановки, объемной активности  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  и скоро-

сти их истечения. Если доля выходящих РБГ после взрыва мощностью 1 кт составляет от 1 до 10%, то  $^{133}\text{Xe}$  с концентрацией 1 мБк/м<sup>3</sup> может быть зафиксирован на удалении от 30 до 100 км соответственно [12].

*Испытания на Северном испытательном полигоне.* На Северном испытательном полигоне СССР, расположенном на архипелаге Новая Земля, в период с 1964 по 1989 гг. было проведено 39 самых мощных подземных ядерных испытаний. Испытаны 118 зарядов различной мощности вплоть до 10 Мт т.э., и в целом общая мощность составила  $\sim 26$  Мт [6]. Испытания в скважинах (6 испытаний) проводили в южной части Южного острова, а в штольнях – в северной части острова в горных массивах Лазарева и Моисеева. В табл. 6 приведена информация о некоторых испытаниях.

Взрывы на Северном полигоне в штольнях 15 были классифицированы как ВКП, случаи истечения отмечались относительно чаще и наблюдались при 27 испытаниях класса ВНК (РБГ). После 14 испытаний РБГ выходили за пределы полигона, при этом общая активность вышедших из горного мас-

**Таблица 6.** Характеристики некоторых испытаний на Северном полигоне [6]

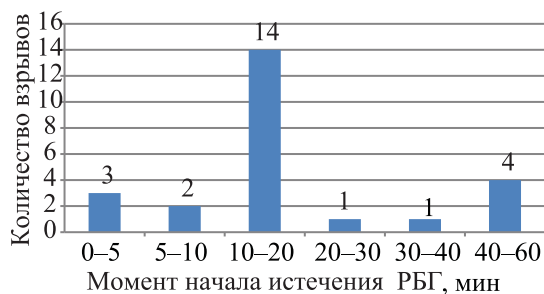
Испытание	Дата	Мощность $W$ , кт т.э.; $H_{прив} = M/кт^{1/3}$	Радиационная обстановка и истечение РБГ
Скважины Ю-6Н и Ю-7	27.10.1975	2 заряда с $W = 150-1500$ каждый, $W = 150-1500$ ; $H_{прив} = 110-120$	Взрыв в скважине Ю-7 был ВКП. Просачивание РБГ в гипоцентральной зоне скважины Ю-6Н началось через 30 мин и было незначительным. МД в районе технологической площадки была $\sim 4$ мЗв/ч.
Штольня А-10	23.08.1975	4 заряда с $W = 150-1500$ , 2 заряда с $W = 20-150$ и 2 заряда с $W = 0.001-20$ ; $H_{прив} = 90$	Класс испытания ВНК (РБГ). Просачивание РБГ в атмосферу было поздним (через 50 мин) и мало-интенсивным. На территории технологической площадки МД не превышала 15 мЗв/ч. За пределами полигона РБГ не обнаружены.
Штольня А-18	10.08.1978	1 заряд с $W = 20-150$ и 5 зарядов с $W = 0.001-20$ ; $H_{прив} = 110$	Испытание характеризуется как ВНК (РБГ). Просачивание РБГ было через 10 мин в гипоцентральной зоне и через портал штольни на $\sim 17$ мин, МД на приустьевой площадке до 0.1 Зв/ч. Преимущественное распространение РБГ прослеживалось средствами авиаразведки на ЮВ с последующим разворотом над акваторией Карского моря на СВ.
Штольня А-25	11.10.1980	2 заряда с $W = 20-150$	Класс испытания в штольне А-25 – ВКП. Испытание в штольне А-30 характеризуется как ВНК (РБГ).
Штольня А-30		5 зарядов с $W = 0.001-20$ ; $H_{прив} = 120, 140$	Малоинтенсивное истечение РБГ через 10 мин в гипоцентре, на $\sim 20$ мин – через портал штольни. На приустьевой площадке выпало $\sim 1.8 \times 10^{11}$ Бк $^{137}\text{Cs}$ , МД была 80 мЗв/ч.

сива РБГ, была несколько больше чем  $3.7 \times 10^{14}$  Бк, но максимальная активность РБГ не превышала  $3.7 \times 10^{17}$  Бк (испытание 27.10.1966 г. мегатонного класса в штольнях А-1 и А-2, два заряда с  $W = 150-1500$  кт каждый). Доля вышедших РБГ при указанном испытании 27.10.1966 г. была менее 0.013% от их общей активности, что эквивалентно 4%-ной доле от взрыва мощностью 1 кт. На рис. 3 представлена статистика распределения количества испытаний по моменту начала истечения РБГ

*Мирные камуфлетные ядерные взрывы в СССР.* В СССР в период с 1965 по 1989 гг. была осуществлена большая программа по использованию энергии подземного ядерного взрыва в мирных целях. При осуществлении этой программы было проведено 124 ПЯВ; в некоторых случаях происходило истечение РБГ [14, 15]. С 1966 г. на площадке «Галит» (Казахская ССР) осуществлялась программа по проведению ПЯВ в каменной соли с целью разработки технологии получения весовых количеств трансурановых радионуклидов и отработки технологии создания емкостей для хранения углеводородного сырья. При первых взрывах отмечалось истечение РБГ, начинавшееся через 15–40 мин и продолжавшееся от 1 до 20 сут, что было обуслов-

лено проведением специальных технологических операций, а также произвольным заполнением образовавшейся полости подземными водами. Большинство ПЯВ в мирных целях было проведено в вертикальных скважинах, и только 2 взрыва – в горизонтальных штольнях на объекте «Днепр», располагавшемся на апатитовом руднике «Новый» в горном массиве Куэльпорр, Мурманская обл.; целью двух опытно-промышленных взрывов являлось дробление апатитовой руды [16].

Взрыв «Днепр-1» (04.09.1972 г.) в горизонтальной выработке,  $W = 2.1$  кт, взрывное устройство с очень малым вкладом в мощность взрыва реакции ядерного деления. Через 20 с после взрыва произо-



**Рис. 3.** Распределение ядерных испытаний на Северном испытательном полигоне по моменту начала истечения РБГ.



шло напорное истечение РБГ в районе ЛНС, 130 м от точки взрыва, МД в точке выхода через 3 мин равнялась 8 мГр/ч, а через 9 ч – 3.5 мкГр/ч [16]. Распространение струи контролировалось нами на вертолете МИ-4 в течение 4 сут и сотрудниками Института прикладной геофизики на самолете ИЛ-14. Через 1.5 ч после взрыва на удалении 50 км концентрация  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{133}\text{Xe}$  составляла  $1.5 \times 10^5$  и  $2.6 \times 10^3$  Бк/м<sup>3</sup> соответственно. Расход РБГ в струе на удалении 45–50 км составил  $2.2 \times 10^{15}$  и  $4.1 \times 10^{14}$  Бк/ч через 4.5 и 24 ч соответственно. Через 9 ч истечение РБГ уменьшилось на 3 порядка, а через 70 ч истечение газов прекратилось совсем.

Второй взрыв «Днепр-2» (27.08.1984 г.) осуществлен в двух горизонтальных выработках, сходящихся в одну общую камеру захоронения (два ядерных изделия с  $W = 1.7$  кт с малой долей мощности за счет реакции ядерного деления), приведенная глубина взрывов ЛНС составила 123 и 148 м/кт<sup>1/3</sup> [16]. Слабонапорное истечение РБГ по трещинам в районе ЛНС, носившее импульсный характер, началось через 8 ч. Мощность источника на удалении 25 км через 24 ч не превышала  $4 \times 10^{13}$  Бк/ч. РБГ на удалении 120 км не обнаруживались. Концентрация  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{133m}\text{Xe}$  через 85 ч на удалении 25 км составила  $3.7 \times 10^3$ ,  $1.3 \times 10^5$  и  $3 \times 10^3$  Бк/м<sup>3</sup> соответственно. Слабонапорное импульсное истечение прекратилось через 10 сут [16, 17].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика проведения ядерных испытаний и мирных взрывов была такова, что контроль за истечением РБГ осуществлялся для контроля радиационной безопасности персонала и населения за границами полигонов и экспериментальных площадок, а также нарушения условий Московского договора 1963 г. о запрещении испытаний в трех средах.

Можно утверждать, что для скрытного проведения ПЯВ, исключая истечение РБГ, необходимо обладать специальными технологиями и большим инженерно-техническим потенциалом, что возможно для страны, имеющей большой опыт в этой области. Первые же испытания как в СССР, так и в других странах, происходили, как правило, с истечением, по крайней мере, РБГ.

В США на Невадском полигоне было проведено 824 подземных испытания, из них только 67 в штольнях, остальные в скважинах [18]. Из 723 ПЯВ, проведенных после подписания Московского договора 1963 г., при 433 испытаниях (~60%) происходило истечение РБГ, при 52 испытаниях РБГ и аэрозоли были обнаружены за пределами полигона [19].

Таким образом, есть основания считать, что в случае проведения скрытного ядерного взрыва, осуществленного в вертикальной скважине и без явного истечения РБГ, пробы подпочвенного газа могут содержать остатки РБГ, что позволит международной инспекционной группе сделать определенные выводы при проведении ИНМ. В случае проведения ИНМ в районе подозреваемого ПЯВ, выполненного в горизонтальных штольнях, следует ориентироваться на анализ проб атмосферного воздуха в инспектируемом районе [20] и состояние горного массива.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Подготовительная комиссия Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Вена, 1997.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ-69, 1972, 2-е изд., НРБ-76/87, 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1988. 2-е изд.
3. Горин, В.В., Красилов Г.А., Куркин А.И. // Бюлл. центра общественной информации по атом. энергии. Спец. вып. № 9. М.: ЦНИИАтоминформ, 1993. С. 21.
4. Ядерные испытания СССР. Т. 2: Технология ядерных испытаний. Воздействие на окружающую среду. / Под ред. В.Н. Михайлова, В.В. Адушкина, И.А. Андрушина, Н.П. Волошина, Ю.В. Дубасова, Р.И. Илькаева, А.А. Спивака, А.К. Чернышева. ВНИИЭФ, 1997. 302 с.
5. Ядерные испытания СССР / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: ИздАт, 1997. 303 с.
6. Ядерные взрывы в СССР. Северный испытательный полигон. Справочная информация / Под ред.

- В.Н. Михайлова, Ю.В. Дубасова, А.М. Матущенко. СПб.: Радиевый ин-т, 1999. 2-е изд. 162 с.
7. Ядерные испытания СССР. Семипалатинский полигон / Под ред. В.А. Логачева, Н.П. Волошина, А.К. Гуськова. М.: ИздАт, 1997. 319 с.
  8. Дубасов Ю.В., Бирюков Е.И., Гаврилин С.С., Баранов Ю.И., Васильев В.И., Малахов П.Б., Матущенко А.М. Радиологическое исследование 30 штольневых порталов в горном массиве Дегелен Республики Казахстан. Итоговый отчет о полевых работах: Отчет Радиевого ин-та им. В.Г. Хлопина, СПб., 1996. 53 с.
  9. Dubasov Yu. Development of radioactive noble gases sampling and measurement system for OSI: Presentation for On-Site Inspection Workshop-9. Hiroshima, 30 June–04 July, 2003. Vienna: Preparatory Commission for CTBTO, 2003.
  10. England T.R., Rider B.F. Yields Evaluated and Compiled for Los Alamos Rep. LA-UR-94-3106 (ENDF-349). October 1994. 295 p.
  11. Dubasov Yu.V., Golubev V., Kamentsev A., Pakhomov S. Mobile laboratory for noble gases analysis in atmospheric air: Presentation T3.2-01 for The CTBT: Science and Technology 2017 Con. (SnT2017). Vienna, 26–30 June, 2017. Vienna: Preparatory Commission for CTBTO, 2017. P. 35.
  12. Chernyshev A.K., Biryukov E.I., Dubasov Yu.V., Pinaev V.S. The assessment of  $^{133}\text{Xe}$  and  $^{133\text{m}}\text{Xe}$  detection possibility for on-site inspection: Presentation for On-Site Inspection Workshop-8. Vienna, 24–28 June, 2002. Vienna: Preparatory Commission for the CTBTO, 2002.
  13. Грешилов А.А., Колобашкин В.М., Дементьев С.И. Продукты мгновенного деления U-235, U-238, Pu-239 в интервале 0–1 ч. М.: Атомиздат, 1969. 98 с.
  14. Ядерные взрывы в СССР. Вып. 4: Мирное использование ядерных взрывов / Под ред. В.Н. Михайлова, О.Л. Кедровского, А.С. Кривохатского. М.: ВНИПИ-Промтехнологии, 1994. 162 с.
  15. Дубасов Ю.В. Вещественные изменения горных пород при подземных ядерных взрывах и радиоактивное загрязнение горного массива: Заключительный технический отчет по проекту МНТЦ № 520–97. СПб.: Радиевый ин-т им. В.Г. Хлопина, 1998. 50 с.
  16. Ядерные испытания СССР. Мирные ядерные взрывы, обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Под ред. Н.П. Волошина, Ю.В. Дубасова, Э.П. Корниловича, Б.В. Литвинова, В.А. Логачева, А.М. Матущенко. М.: ИздАт, 2001. 518 с.
  17. Васильев А.П., Дубасов Ю.В., Ильичев В.А., Касаткин В.В., Приходько Н.К., Солодилов Л.Н., Чернышов А.К. Ядерные взрывные технологии: эксперименты и промышленные применения. Снежинск, ВНИИТФ, 2017. 507с.
  18. United States Nuclear Tests. July 1945 through September 1992: Rep. US Department of Energy, Nevada Operations Office. DOE/NV-209 (Rev. 14). 1994.
  19. Radiological Effluents Released from US Continental Tests 1961 through 1992: Rep. US Department of Energy, Nevada Operations Office. DOE/NV-317 (Rev. 1). UC-702. 1996.
  20. Dubasov Yu.V., Biryukov E.I., Popov Yu.S. Radionuclide method for detection of clandestine nuclear explosions by on-site inspection: Presentation for On-Site Inspection Workshop-1. Vienna, 30 July–4 August, 1997. Vienna, Preparatory Commission for the CTBTO, 1997.