

ОТДАЛЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИЙНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ В ЯКУТИИ: ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫМИ НОВООБРАЗОВАНИЯМИ

*В.Н. Кононов, Г.А. Игнатъева, К.А. Петрова, С.Н. Мамаева
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск*

LONG-RANGE CONSEQUENCES OF EMERGENCY UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS IN YAKUTIA: INCIDENCE OF MALIGNANT NEOPLASMS

*V.N. Kononov, G.A. Ignateva, K.A. Petrova, S.N. Mamaeva
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

Реферат

В работе оценена возможность взаимосвязи аварийных подземных ядерных взрывов (ПЯВ) с повышенным уровнем заболеваемости раком среди населения улусов, граничащих с районом аварийных ПЯВ, например, в Сунтарском и Нюрбинском улусах, в которых заболеваемость злокачественными новообразованиями (ЗНО), смертность от злокачественных новообразований выше, чем в среднем по РС (Я). Для этого исследована радиационная обстановка мест ПЯВ “Кратон-3” и “Кристалл”: изучены радионуклидный состав почвы и растительности методом полупроводниковой гамма-спектрометрии и проба воды методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии (ЖСС); проведены дозиметрические измерения: мощности экспозиционных доз. По результатам анализа воды можно определить возможность миграции трития из полостей аварийных ПЯВ. Результаты исследования растительности и почвы показали наличие искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am и следов ^{60}Co . Наблюдается высокие значения удельной активности радиоцезия в нескольких образцах, отобранных вблизи местности “Кратон-3”. Также в данной местности результаты дозиметрических измерений показали незначительное уменьшение уровня гамма-фона, но который до сих пор остаётся повышенным и превышает безопасный уровень в 2,5 раза. Возможно, повышенный уровень заболеваемости в улусах республики, граничащих с областью аварийных ПЯВ, можно рассматривать как их дальние последствия, обусловленные дополнительными дозовыми нагрузками, например, от цезия в течении всего времени после взрывов, т.к. период полураспада цезия составляет примерно 30 лет. Результаты данного исследования можно рассматривать как основу для разработки рекомендаций, возможных нормативных актов, которые могут быть применены в реализации соблюдения норм радиационной безопасности при проведении в будущем подобных испытаний и при добыче полезных ископаемых, в ходе которых могут быть выбросы на поверхность земли естественных радионуклидов.

Ключевые слова: онкологическая заболеваемость, подземные ядерные взрывы, Якутия

Abstract

The paper evaluates the possibility of interrelation of emergency underground nuclear explosions with an increased incidence of cancer among the population of areas bordering the area of emergency underground nuclear explosions, for example, in Suntarsky and Nyurbinsky districts, in which the incidence of malignant neoplasms, mortality from malignant neoplasms is higher than the average in the Republic of Sakha (Yakutia). For this purpose, the radiation situation of the sites of underground nuclear explosions “Kraton-3” and “Kristall” was investigated: the radionuclide composition of soil and vegetation was studied by semiconductor gamma-ray spectrometry and a water sample by liquid scintillation spectrometry; dosimetric measurements were carried out: the power of exposure doses. Based on the results of water analysis, it is possible to determine the possibility of migration of tritium from

the cavities of emergency underground nuclear explosions. The results of the study of vegetation and soil showed the presence of artificial radionuclides ^{137}Cs , ^{241}Am and traces of ^{60}Co . High values of the specific activity of radiocesium are observed in several samples taken near the area "Kraton-3". Also in this area, the results of dosimetric measurements showed a slight decrease in the gamma background level, but which still remains elevated and exceeds the safe level by 2.5 times. It is possible that the increased incidence rate in the districts of the republic bordering the area of emergency underground nuclear explosions can be considered as their long-term consequences due to additional dose loads, for example, from caesium during the entire time after the explosions, since the half-life of caesium is approximately 30 years. The results of this study can be considered as a basis for the development of recommendations, possible regulations that can be applied in the implementation of compliance with radiation safety standards during future similar tests and during mining, during which there may be emissions of natural radionuclides to the earth's surface.

Key words: cancer incidence, underground nuclear explosions, Yakutia

E-mail: vladlenkononov@mail.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2024-101-1-82-87>

Из 12 подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в Республике Саха (Якутия) (РС (Я)) во второй половине 20-го века два стали аварийными – "Кратон-3" и "Кристалл". Взрыв "Кратон-3" мощностью 22 кт был произведен 24 августа 1978 г. в РС (Я), в 40 км от которого находится поселок Айхал. Местность ПЯВ находится на границе между Оленекским и Мирнинским улусами на берегу реки Марха, которая далее протекает через Вилюйские улусы, такие как Мирнинский, Сунтарский и Нюрбинский. В результате аварии произошел выброс радиоактивных продуктов в атмосферу и на поверхность почвы. "Кристалл" – это аварийный ПЯВ мощностью 1,7 кт, произведенный 2 октября 1974 г. в 2,5 километрах к северу от г. Удачный, который также находится у границы Мирнинского улуса. Через 18 лет произвели засыпку места взрыва высотой до двадцати метров [1].

В работе изучена возможность миграции радионуклидов из полости взрывов "Кристалл" и "Кратон-3" в окружающую среду. Для того,

чтобы решить вопрос о наличии или отсутствии миграции трития ($T_{1/2}=12,3$ года) из зон ПЯВ, необходимо получить надежные данные о концентрации трития в водоемах РС (Я) с учетом известного широтного эффекта для северных широт, в которых имеется наибольшее влияние термоядерных реакций на Солнце, порождающих тритиевый дождь с суточными вариациями.

В места ПЯВ "Кратон-3" и "Кристалл" в июле 2023 года была организована экспедиция, целью которой были проведение измерений радиационного фона и сбор проб окружающей среды для определения степени ее загрязнения биологически опасными радионуклидами и выявления примерных границ радиоактивно опасной зоны.

Географические координаты точек отбора проб и полевых измерений были определены с помощью GPS-навигатора PG03 Mini и внесены в карту Google Earth Pro (рис. 1).



Рис. 1. Карта отбора проб: слева – в местности ПЯВ "Кратон-3"; справа – в местности ПЯВ "Кристалл"

Для исследования загрязнения среды были отобраны пробы почвы и местной растительности: мха, лишайника, кипрея (Иван-чая). Все пробы были измерены на полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC с детектором из особо чистого германия типа GEM-40 (ППД). Перед измерением образцы растительности были просушены в муфельной печи при температуре 100°C в течение 6 ч, которые после просушки были озолены в муфельной печи при температуре 250°C в течение 2–3 ч, затем измельчены до состояния порошка. После измерения массы зола помещается в специальный сосуд Denta. Радионуклидный состав подготовленных таким образом проб измерялся с помощью ППД в течение 8–16 ч. Образцы почвы высушивались на воздухе при комнатной температуре, которые затем были очищены от лишнего мусора. Далее полученная масса взвешивалась и помещалась в измерительный сосуд Denta. Результаты измерений, полученные методом ППД представлены в табл. 1.

В ходе исследования в образцах и почвы, и растительности с обоих мест ПЯВ был обнаружен искусственный радионуклид ^{137}Cs – изотоп цезия с периодом полураспада 30,17 лет, который является одним из главных компонентов радиоактивного загрязнения биосферы. Данный изотоп образуется преимущественно при делении ядер в ядерных реакторах и ядерных взрывах. Кроме того, ^{137}Cs может содержаться в радиоактивных выпадениях и отходах, сбросах заводов, перерабатывающих отходы атомных электростанций. Данный радионуклид интенсивно сорбируется почвой и донными отложениями; в воде находится преимущественно в виде ионов. В организме млекопитающих ^{137}Cs накапливается главным образом в мышцах и печени. ^{137}Cs по химическим свойствам идентичен калию, поэтому может мигрировать с калийными солями в водных растворах.

^{241}Am в данном исследовании встречается только в образце почвы с места ПЯВ “Кратон-3”, который является дочерним продуктом изотопа плутония (^{241}Pu) и имеет период полураспада 432,8 года. Имеет достаточно хорошую растворимость в воде и, следовательно, имеет большую подвижность в окружающей среде. ^{241}Am высокотоксичен. Значение предельно допустимой концентрации для америция в воздухе около $1 \cdot 10^{-4}$ Бк/л, в водоемах – около 70–80 Бк/л. При поступлении ^{241}Am через органы дыхания отмечается, что изотоп быстро перемещается из легких в кровь и имеет способ-

ность к накоплению в скелете и печени человека. При повреждении кожных покровов наблюдается резкое увеличение всасывания ^{241}Am в 100–250 раз. Аккумулируясь в организме человека, ^{241}Am накапливается в основном в костях и дополнительно в надкостнице.

Также в почвах, отобранных из местности ПЯВ “Кратон-3”, были выделены в незначительной концентрации радионуклид ^{60}Co – изотоп кобальта с периодом полураспада 5,27 лет, который является активационным изотопом, образующийся в результате бомбардировки стабильного изотопа ^{59}Co тепловыми нейтронами элементов конструкции ядерного заряда. Поражает в основном желудочно-кишечный тракт, нижние отделы толстой кишки, легкие.

В образцах воды из обеих местностей аварийных ПЯВ было исследовано наличие трития, вызывающего радиационное поражение кожи и лучевую болезнь при попадании внутрь организма через органы пищеварения и дыхания. Это радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада 12 лет, который обычно образуется в результате распада ядер азота в верхних слоях атмосферы после их столкновения с протонами и нейтронами от солнечного ветра, а также в результате ядерных испытаний и в ходе эксплуатации атомных электростанций. Кроме того, для исследования радиоэкологической обстановки, а именно для определения содержания трития, были отобраны пробы воды из рек Марха, Улахан Бысыттаах, также из ручьев, вытекающих из саркофагов.

Для измерения трития использовался низкофоновый жидкостной сцинтилляционный альфа-бета спектрометре фирмы HIDEX SL-300, минимально детектируемая концентрация трития при измерениях на данном приборе составляет ~1 Бк/л. Содержание трития в пробах измеряется методом тройных и двойных совпадений в жидком сцинтилляторе. Информация от трех ФЭУ, установленных под углом 120° друг к другу, анализируется с помощью двух многоканальных анализаторов. Измерение и учет соотношения тройных и двойных совпадений (TDCR) позволяет учитывать гашение любого измеряемого образца непосредственно в процессе измерения, получать информацию об активности образца без какой-либо предварительной калибровки и существенно уменьшить помехи от космических лучей.

Для выделения трития из проб окружающей среды пробы дистиллировали и смешива-

Таблица 1

**Результаты измерения удельной активности проб из окрестностей ПЯВ
“Кратон-3” и “Кристалл”**

№ в соответствии с точками, обозначенными на карте	Наименование пробы	Объект	Координата сбора	Удельная активность (Бк/кг)		
				¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am
2	Иван-чай	Кратон-3		1,05 ± 0,1		
3	Mох Pleurozium schreberi	Кристалл		14,65 ± 1,1		
4	Лишайник Cladonia stellaris	Кратон-3	65°55'23.30"N 112°19'58.97"E	4,72 ± 0,86		
5	Лишайник	Кристалл	66°45'55.48"N 112°39'85.23"E	35,76 ± 1,68		
6	Почва рядом с саркофагом	Кристалл	66°45'54.48"N 112°39'85.23"E	0,31 ± 0,006		
7	Почва за пределами саркофага	Кристалл	66°45'55.48"N 112°39'83.23"E	6,59 ± 0,48		
8	Лишайник Cladonia rangiferina	Кратон-3	65°55'21.32"N 112°19'56.90"E	7,76 ± 0,7		
9	Лишайник Cladonia rangiferina	Кратон-3	65°55'24.32"N 112°19'56.90"E	10,09 ± 0,86		
10	Почва	Кратон-3		40,17 ± 0,72		
12	Лишайник Cladonia rangiferina	Кратон-3	65°55'40.93"N 112°20'09.51"E	663,3 ± 4,64		
13	Почва на засыпке	Кратон-3	65°55'32.67"N 112°19'58.65"E	8010,33 ± 8,01	1,75±0,37	
14	Мох	Кратон-3	65°55'23.26"N 112°19'59.19"E	4,86 ± 1,01		
15	Мох	Кристалл	66°45'55.48"N 112°39'85.23"E	3,88 ± 0,4		
16	Mох Pleurozium schreberi	Кратон-3	65°55'23.23"N 112°19'58.13"E	17,61 ± 1,34		
17	Мох	Кристалл	66°27'21.97"N 112°29'1.90"E	6,37 ± 1,15		
18	Мох	Кратон-3	65°55'41.37"N 112°20'8.19"E	617,74 ± 6,2		
22	Мох	Кратон-3	65°55'23.28"N 112°19'59.18"E	6,42 ± 1,16		
23	Мох	Кристалл	66°27'21.97"N 112°24'01.90"E	8,62 ± 1,93		
24	Мох	Кратон-3	65°55'23.23"N 112°19'58.13"E	11,73 ± 1,3		
25	Мох	Кратон-3	65°55'23.24"N 112°19'59.21"E	1,24 ± 0,12		
27	Мох	Кратон-3	65°55'40.61"N 112°19'38.03"E	26,75 ± 2,3		
30	Мох	Кратон-3	65°55'40.61"N 112°19'38.68"E	16,96 ± 1,89		
31	Мох	Кратон-3	65°55'23.96"N 112°19'57.74"E	8,86 ± 1,27		
32	Мох	Кристалл	66°45'55.48"N 112°39'85.23"E	5,33 ± 1,4		
33	Почва	Кратон-3	65°55'42.82"N 112°19'34.71"E	28,08 ± 0,83		
34	Почва	Кратон-3	65°55'24.34"N 112°19'57.74"E	24,22±0,87		
35	Почва	Кратон-3	65°55'32.71"N 112°19'56.90"E	10431±20,87	1,95±0,8	18,8±7,1

Таблица 2

**Результаты измерения содержания трития в водах вблизи окрестностей объектов
“Кристалл” и “Кратон-3”**

№	Наименование пробы	Объемная активность с вычетом фона, Бк/л	Погрешность, %
1	Вода из реки Марха -1	0,64	5,4
2	Вода из реки Улахан Бысытгаах	0,01	3,74
3	Ручеек из саркофага ПЯВ «Кратон-3»	0,46	4,21
4	Вода в лужах внутри территории саркофага ПЯВ «Кристалл»	2,94	3,14
5	Ручеек вблизи ПЯВ «Кратон-3»	1,78	3,21
6	Ручеек из саркофага ПЯВ «Кристалл»	4,84	3,41
7	Вода в лужах внутри саркофага ПЯВ «Кристалл»	0,01	5,38
8	Ручеек из саркофага ПЯВ «Кристалл»	1,55	5,16
9	Вода из реки Марха-2	3,16	4,54

ли с сцинтилляционным коктейлем Ultima Gold LLT в соотношении 1:1. Это необходимо для того, чтобы исключить присутствие в пробе природной воды естественных и искусственных (например, ^{90}Sr) β -излучающих радионуклидов. Смесь объемом 20 мл хранили в холодильнике в течение 24 ч. Пробу измеряли 10 раз по 180 с. Погрешности определяли в виде среднеквадратичного отклонения.

Результаты измерения проб воды, отобранных вблизи ПЯВ “Кристалл” и “Кратон-3”, отражены в табл. 2. Видно, что все полученные значения по объемной активности трития соответствуют фоновым значениям, что доказывает отсутствие возможности дальнейшей миграции трития из полостей ПЯВ “Кристалл” и “Кратон-3”. По результатам данного исследования тритий в пробах не был обнаружен, т.е. значение концентрации было ниже, чем фоновое (табл. 2). Известно, что в норме концентрация трития в пресных водоемах определяется примерно, как 10 Бк/л, а в океанах концентрация трития значительно меньше, чем в пресных водоемах, и равна 0,11 Бк/л [2].

Мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) на местности ПЯВ “Кратон-3” по данным 2004 года колебалась от 0,124 до 1,628 мкЗв/ч [3], а через 19 лет, по данным наших измерений, находится в пределах от 0,15 до 1,2 мкЗв/ч. В результате дозиметрических измерений видно, что произошло незначительное уменьшение и наблюдается превышение безопасного уровня гамма-фона в 2,5 раза. Аналогичная ситуация наблюдается на местности объекта ПЯВ “Кристалл”, где относительно высокое значение МАЭД в 2002 году составляло 0,2 мкЗв/ч, а по данным измерений в 2023 году – 0,16 мкЗв/ч, также не

наблюдается нарушение безопасного уровня гамма-фона.

Как видно из табл. 1, наибольшее значение удельной активности (УА) ^{137}Cs – 10431 Бк/кг обнаружено в почве (проба №35), отобранной вблизи насыпи ПЯВ “Кратон-3”, что в 10 раз превышает допустимые значения. Кроме того в этой же пробе обнаружены следы ^{60}Co и ^{241}Am . Также в пробе №13 имеются высокие показания УА ^{137}Cs 8010,33 Бк/кг, что в 8 раз выше допустимых уровней вмешательства и следы ^{60}Co . В соответствии с данными радиоактивного следа взрыва “Кратон-3”, представленными в работе Яковлевой В.Д. [3], показано, что точки отбора, в которых определены наибольшие значения УА ^{137}Cs , ^{241}Am и ^{60}Co , находятся в зоне образования радиоактивного облака сразу после взрыва.

Высокие содержания ^{137}Cs получены в пробах мха №18 и лишайника №12 которые произрастают в зоне ПЯВ “Кратон-3”, что связано со способностью мхов и лишайников аккумулировать радионуклиды, содержащихся в почве. В остальных пробах растительности по результатам гамма-спектрометрического анализа получены данные по радиоцезию, соответствующие глобальным выпадениям.

При исследованиях, проведенных после бомбардировки Хиросимы и Нагасаки (рис. 2), показано, что увеличивается вероятность заболевания лейкозом в первые годы после облучения жителей соседних с ними населенных пунктов малыми дозами. В течение последующих лет после получения однократной дозы в 0,01 Гр повышается риск заболевания другими видами рака, через 40 лет вероятность достигает пикового значения. В данное время прошло более 40 лет с момента аварийных ПЯВ “Кри-



Рис. 2. Относительная среднестатистическая вероятность заболевания раком после получения однократной дозы в 1 рад (0,01 Гр) при равномерном облучении всего тела

сталл” и “Кратон-3”. Жители близлежащих сел в первый период аварии, вероятно, получили определенную дозу облучения.

В настоящее время сохраняется высокий уровень заболеваемости раком в Сунтарском и Нюрбинском улусах. В частности, заболеваемость злокачественными новообразованиями, смертность от злокачественных новообразований на 100 тыс. населения выше, чем в среднем по РС (Я). Возможно, повышенный уровень заболеваемости в этих улусах республики име-

ет взаимосвязь с аварийным ПЯВ, т.е. в настоящее время эти показатели можно рассматривать как дальние последствия аварийного ПЯВ – дополнительные дозовые нагрузки.

Результаты исследования определения радиоактивного уровня в местах аварийного ПЯВ во взаимосвязи с уровнем заболеваемости злокачественными новообразованиями как явления дальних последствий радиационных аварий можно рассматривать в качестве основы для разработки рекомендаций, возможных нормативных актов, которые могут быть применены как меры радиационной безопасности при проведении в будущем подобных испытаний и при добыче полезных ископаемых, в ходе которых могут быть выбросы на поверхность земли естественных радионуклидов.

Список литературы

1. Бурцев ИС. Якутия радиоактивная. Якутск: “Сахаада” – 2021.
2. Батурин ВА и др. Тритий – это опасно. Челябинск. – 2001. – С. 25-26.
3. Яковлева ВД, Степанов ВЕ. Радиоэкологические проблемы мирных подземных ядерных взрывов в Якутии. М.: Спутник. – 2013.