

**Исследование возможности дальней миграции искусственных радионуклидов из  
полости подземного ядерного взрыва “Кристалл” в карьер алмазной трубки  
“Удачная” в Мирнинском районе Якутии**

*Степанов В.Е., Дьячковский Е.Е., Осипов В.Ю., Шукина Е.А., Наумова К.А.,  
Филатов-Рожин В.М.*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова г. Якутск

Аннотация. Измерены содержания искусственных радионуклидов цезий-137, америций-241, тритий, естественных нуклидов радий-226, радон-222, токсичных химических элементов в дренажных рассолах трубки «Удачная», отобранных в карьере в апреле 2013 года. Установлено, что америций-241 и цезий-137 не мигрируют с солями калия, обнаруженных в дренажных рассолах, возрастание концентрации радия-226 в нижних водоносных горизонтах приводит к имитации возрастания трития в жидкостных сцинтилляционных измерениях. В зимний период в дренажных рассолах карьера трубки Удачная не обнаружено даже следовых количеств искусственных радионуклидов цезий-137, америций-241. Содержания трития соответствуют значениям природного фона, имеющего космогенное происхождение.

Abstract. Measured the content of artificial radionuclides cesium-137 and americium-241, tritium, natural radionuclides - radium-226, radon-222, and toxic chemicals in the drainage tube brines "Ydachnyi", selected in a career in april 2013. Found that americium-241 and cesium-137 does not migrate with potassium salts found in the drainage brines increase in the concentration of radium-226 in the lower aquifer leads to simulate the increase of tritium in liquid scintillation measurements. In winter, the in drainage waters of "Ydachnyi" were, found even trace amounts of artificial radionuclides cesium-137 and americium-241. Tritium content correspond to the natural background of having cosmogenic origin.

#### Введение

В работах Артамоновой С.Ю. и других [2,3,4] в 2011-2012 годах была исследована проблема дальней миграции с подземными водами искусственных радионуклидов из полости подземного ядерного взрыва (ПЯВ) «Кристалл» и ими было сообщено о факте поступления искусственных радионуклидов тритий, цезий-137, стронций-90 и изотопов плутония в дренажные рассолы, поступающие в карьер алмазоносной трубки «Удачная». Настоящая работа посвящена исследованию возможности существования подобного экологически чрезвычайного явления о дальней миграции искусственных радионуклидов из полости ПЯВ «Кристалл» с дренажными рассолами, поступающими в карьер

алмазонасной трубки «Удачная». Исследования, проводимые в зимний период, позволяют в чистом виде исследовать подземные воды без примеси космогенного трития, который поступает на дневную поверхность с атмосферными осадками. Зимой осадки находятся в мерзлой форме в виде льда и снега, поэтому не могут мигрировать. Следовательно, если ядерно-спектральными измерениями в дренажных рассолах карьера трубки «Удачная» будут обнаружены искусственные радионуклиды цезий-137, америций-241, доступные для обнаружения их концентраций измерениями на полупроводниковом гамма-спектрометре с детекторами из особо чистого германия, то будет установлен факт о дренировании полости ПЯВ «Кристалл» в карьер трубки «Удачная» подземными водами. При этом должны быть обнаружены превышающие уровни вмешательства (7600 Бк/л) и фоновые уровни (10 – 100 Бк/л) содержания трития, который также выбрасывается в окружающую среду при термоядерных взрывах типа ПЯВ «Кристалл». Если концентрации трития соответствуют фоновым уровням, имеющим космогенное происхождение, то это обстоятельство будет доказывать факт отсутствия поступления искусственных радионуклидов с дренажными рассолами в карьер трубки «Удачная».

## **1. Подземные воды окрестностей подземного ядерного взрыва (ПЯВ) «Кристалл».**

Геологическое строение окрестностей и характеристики подземных вод вблизи ПЯВ «Кристалл» представлены в книге Алексева С.В [1]. Многолетняя мерзлота имеет несколько ярусов. Верхний ярус простирается до глубины 300 метров, в них вода находится в виде льда. Ниже находится охлажденные породы содержащие высокоминерализованные подземные воды с отрицательной температурой, называемые криопэгами. Подземные водоносные горизонты района представляют собой напорную систему, горизонты которой насыщены рассолами, минерализованность которых возрастает с глубиной горизонтов. ПЯВ «Кристалл» году был произведен 2 октября в 1974 на глубине 98 м.

### **1. Исследование содержания трития, цезия-137 и америция-241 в пробах рассола в карьере трубки «Удачная» и с источника неизвестного происхождения на правом берегу реки Далдын**

#### **1.1. Общие сведения о искусственных радионуклидах (тритий, цезий-137 и америций-241)**

Водород окисляется двумя атомами кислорода, образуя обычную воду, которая в ядерной физике также называется протиевой водой. Тритий соответственно, порождает

тритиевую воду. Тритий образуется в результате распада ядер азота в верхних слоях атмосферы в результате их столкновений с протонами и нейтронами от солнечного ветра. Средние содержания в водоемах варьируют около 10 Бк/л. В водах океана концентрация трития равна 0,11 Бк/л в результате разубоживания атмосферных выпадений морской водой. Однако имеет место широтный эффект, на северных широтах содержание трития возрастает, поскольку магнитосфера земли обуславливает повышенные выпадения заряженных частиц в области северного полюса, что наблюдается в виде полярных сияний. По данным лаборатории радиационной экологии СВФУ в г. Якутске в Лено-Алданском междуречье содержания трития меняются в пределах 10-20 Бк/л, по трассе Мирный – Удачный наблюдаются содержания трития в 10, 26, 56, 200 Бк/л, которые можно объяснить, как проявления широтного эффекта трития естественного космического происхождения.

Период полураспада трития составляет 12 лет. Уровень вмешательства по содержаниям трития составляет 7600 Бк/л. Естественные вариации могут достигать наибольших значений, в 38 раз меньших уровня вмешательства.

Америций-241 – является дочерним продуктом изотопа плутония ( $^{241}\text{Pu}$ ) и имеет период полураспада 432,8 года. Имеет достаточно хорошую растворимость в воде и, следовательно, имеет большую подвижность в окружающей среде. Америций высоко токсичен. Значение ПДК для америция в воздухе около  $1 \cdot 10^{-4}$  Бк/л, в воде водоемов около 70-80 Бк/л. При поступлении  $^{241}\text{Am}$  через органы дыхания отмечается, что изотоп быстро перемещается из легких в кровь и имеет способность к накоплению в скелете и печени человека. При повреждении кожных покровов наблюдается резкое увеличение всасывания  $^{241}\text{Am}$  в 100 – 250 раз. Аккумулируясь в организме человека,  $^{241}\text{Am}$  накапливается в основном в костях и дополнительно в надкостнице.

Цезий-137 - изотоп цезия с периодом полураспада 30,17 лет, который является одним из главных компонентов радиоактивного загрязнения биосферы. Образуется преимущественно при делении ядер в ядерных реакторах и ядерных взрывах. Содержится в радиоактивных выпадениях, радиоактивных отходах, сбросах заводов, перерабатывающих отходы атомных электростанций. Интенсивно сорбируется почвой и донными отложениями; в воде находится преимущественно в виде ионов. В организме животных  $^{137}\text{Cs}$  накапливается главным образом в мышцах и печени. Цезий по химическим свойствам идентичен калию, поэтому может мигрировать с калийными солями в водных растворах.

## 1.2. Обзор работ по обнаружению трития вблизи скважин подземных ядерных взрывов

В работе [5] Голубова Б.Н. и Ушницкого В.Е. сообщено, что в пробе воды из ствола скважины ПЯВ Горизонт-4 концентрация трития равна  $5 \pm 1.1$  Бк/л. С другой стороны они считают, что фоновое содержание трития в природных водах равно 0,11 Бк/л, следовательно в воде из скважины ПЯВ концентрация трития превышает естественный фон в более чем 45 раз.

Однако, эти выводы представляются неверными по следующим аргументам. Согласно работе [6] Николина О.А. фоновое содержание трития в океанической воде равно 0,11 Бк/л. Таким образом, в работе [5] содержания трития в морской воде неправильно использовано вместо фоновых данных в речной и озерной воде, которые соответствуют уровням в 10 Бк/л. Нами установлено, что в районе р. Алдан и р.Лена в районе г. Якутска фоновые содержания трития равны 10 Бк/л. Во вторых, работа [5] содержит методическую ошибку, которая состоит в том, что они не измерили фоновые значения трития вблизи скважины ПЯВ в реке Эекит, в водах вблизи г. Якутск и Москва. Если бы они измерили содержания трития в реке, то они получили бы большее значение, чем содержание в 5 Бк/л, характерное для дождевой воды. В работе Артамоновой С.Ю. и др. [7] исследован вопрос о возможной миграции радионуклидов из полости взрыва «Кристалл» в карьер алмазоносной трубки «Удачная». Они сообщают, что в реке Далдын в 400 м ниже ручья Улахан-Бысытта содержания трития равны 5,6 Бк/л, в водах хвостохранилищ обнаружен тритий в 11 – 25 Бк/л. В карьере трубки «Удачная» и в водах из нижних горизонтов шахты и скважин обнаружены сравнительно высокие содержания трития в 61, 41, 146, 117 и 106 Бк/л и авторы эти данные интерпретируют как подтверждение факта о миграции искусственных радионуклидов, в частности трития из полости ПЯВ «Кристалл» с дренажными рассолами в карьер трубки «Удачная». По методике подготовки проб рассолов для измерения трития, изложенной в работе [7], они рассолы только фильтровали через бумажный фильтр синяя лента и измеряли содержания трития на жидкостном сцинтилляционном спектрометре Tri-Carb 2800 (США). Однако в методических рекомендациях по измерению трития предлагается в обязательном порядке измерять тритий в выпаренном дистилляте пробы, при этом тритий выбрасывается в дистиллят на последних стадиях выпаривания мокрой пробы. Принципиальная методическая ошибка работ Артамоновой и других по измерению трития состоит в том, что они вместо выпаривания и получения дистиллята, и поиска трития в дистилляте тритий измеряли в фильтрате рассола. Мы в сухом остатке рассолов из карьера трубки «Удачная» обнаружили большие содержания радия-226. Отсюда следует, что радий в

рассоле приводит к двум альфа распадам, самого радия и его дочернего продукта радона. Поэтому в водах рассолов якобы наблюдаются сравнительно высокие содержания трития, на самом деле обусловленными увеличениями количества сцинтилляций от двойного альфа распада радия-226. С другой стороны, в подземных водах тритий образуется в результате взаимодействия имеющегося в горных породах лития-6 с нейтронами, образующимися при распаде урана-238 и урана-235, они имеются в рассолах, что подтверждается обнаружением нами радия-226 в сухом остатке рассолов.

### **1.3. Результаты измерений содержаний радионуклидов в рассолах из карьера трубки «Удачная».**

Полевые исследования были произведены 04 апреля 2013 г. при сопровождении представителя Удачинского ГОК АК АЛРОСА Федорова А.С.

Из нижних горизонтов карьера трубки «Удачная» отобраны пробы рассола в объеме 20 л, а также выполнены измерения спектров ядерного излучения на полевом полупроводниковом гамма спектрометре «Trans-SPEC-DX-100» с целью детектирования ядерных спектров радионуклидов цезий-137 и америций-241. На дне карьера из-за мороза в 30 градусов по Цельсию удалось сделать экспозицию грунта только в течение 10 минут. За это время пиков искусственных радионуклидов не было обнаружено. Далее в помещении гостиницы была сделана двухчасовая экспозиция полуторалитровой пластиковой бутылки с рассолом из карьера трубки «Удачная». При этом высветились спектры только естественных радионуклидов урана, тория и калия-40. Следовательно, в пределах минимально детектируемых активностей в 1 Бк/кг искусственные радионуклиды в рассолах отсутствуют.

В целях изучения возможности дальнего подземного переноса радионуклидов от подземного ядерного взрыва «Кристалл» были взяты пробы малосоленой воды с источника неизвестного происхождения на правом берегу р. Далдын в 15 км от карьера трубки «Удачная» в объеме 1,5 л. Далее в г. Якутске были измерены содержания трития на жидкостном сцинтилляционном спектрометре Hidex SL-300 с минимально детектируемой активностью 1 Бк/л. На этом приборе нами уже были исследованы фоновые содержания космического трития в окружающей среде.

Измерены содержания трития в снеговой и водопроводной воде в г. Удачного, получены значения соответственно 11,61 Бк/л и 9,12 Бк/л. Эти значения близки к фоновым данным в районе г. Якутска (снеговая вода-16,7 Бк/л и 10,68 Бк/л) и обусловлены атмосферными осадками. В пробе воды из источника неизвестного происхождения на правом берегу реки Далдын обнаружены типичные фоновые природные содержания трития - 18,99 Бк/л. Следовательно, не существует дальнего

переноса трития на 15 км с подземными водами на эту местность из полости подземного ядерного взрыва «Кристалл».

Измерениями пяти разных проб установлено, что в рассолах до дистилляции наблюдаются сравнительно повышенные содержания трития от 125,2 до 152,8 Бк/л, а после дистилляции они уменьшаются на один порядок, которые варьируют от 14,8 до 17,2 Бк/л. Причина этой разницы состоит в том, что в сухом остатке рассола от выпаривания обнаружено (измерениями на полупроводниковом гамма-спектрометре) содержание радия-226, равное 284,1 Бк/кг. Радий и его продукт распада радон-222 испытывают альфа распад. Период полураспада радия-226 составляет 1600 лет, для радона он равен 24 часам. Таким образом, каждый атом радия приводит к двойному альфа распаду, который, порождая сцинтилляции, детектируется ложно как распады трития. Отношение активностей равновесных концентраций радия-226 и радона-222 равно 1,009 [8]. Арифметическими вычислениями получена суммарная альфа активность радия и радона в 157,5 Бк/л. Следовательно, большая часть активности в рассоле обусловлена двойным альфа распадом радия. Активность трития в дистилляте соответствует фоновым значениям трития, выпадающего с атмосферными осадками и концентрирующегося в рассолах, поскольку период полураспада трития составляет 12 лет.

Таким образом, установлено, что содержания трития в дренажных рассолах трубки «Удачная» обусловлены природным фоном, имеющим космогенное происхождение.

### **1.3. Исследование содержаний химических элементов в рассоле методом рентгено-спектрального анализа**

Пробы для исследований были отобраны в насосной станции системы осушения карьера трубки «Удачная» на отметке – 155 м. Было взято 20 л рассола.

Рентгено-флуоресцентным спектрометром Niton произведен многоэлементный анализ химического состава пробы рассола, определены массовые доли элементов в пробе, которые пересчитаны на массовое содержание элементов в рассоле. Результаты измерений показали высокое массовое содержание прежде всего кальция – 38980 мг/л, калия – 3107 мг/л, натрия – 23500 мг/л, а также токсичных металлов свинца, молибдена, рубидия, теллура, сурьмы.

Измеренное содержание стронция 873 мг/л относится к нерадиоактивному стронцию-88, входящему в состав горных пород и не показывает наличие радиоактивного изотопа стронций-90.

Установлено, что в рассоле имеются повышенные содержания токсичных тяжелых металлов, для них превышения ПДК равны: для свинца -38, молибдена – 50, рубидия – 3300, теллура – 3740, сурьмы – 266.

В результатах содержатся два радиационно значимых аспекта. Первый связан с высоким содержанием стабильного калия – 39, равным 3107 мг/л. Искусственный радионуклид цезий-137 имеет близкие с калием химические свойства. Следовательно, если бы радионуклиды из полости подземного ядерного взрыва «Кристалл» поступали в карьер трубки «Удачная», то они были бы легко обнаружены на полевом и лабораторном полупроводниковом гамма-спектрометрах, из которых последний имеет минимально детектируемую активность в 1 Бк/л. 1 Бк/л равен по определению одному распаду в секунду. То есть полупроводниковые спектрометры имеют очень высокую чувствительность определять содержание по одному атому в секунду. Таким образом, миграции цезия-137 из полости подземного ядерного взрыва «Кристалл» с калием в рассолах не существует. Во-вторых, в рассоле обнаружены высокие содержания кальция, имеющего близкие химические свойства с радиоактивным стронцием-90. Бета распады стронция – 90 порождают сцинтилляции, отсутствие радиостронция установлено измерениями на жидкостном сцинтилляционном спектрометре.

#### **1.4. Результаты исследования содержаний естественных и искусственных радионуклидов в рассоле из карьера трубки «Удачная» на лабораторном полупроводниковом гамма-спектрометре.**

Неизмененные и выпаренные сухие остатки рассола измерены по отдельности на лабораторном полупроводником гамма-спектрометре с ОЧГ детектором GEM40 с экспозицией в 24 часа.

При наборе спектров были определены пики только естественных радионуклидов калия-40, свинца- 214 и радия-226, удельные активности которых составили соответственно: 298,4 Бк/кг, 210,0 Бк/кг и 9,5 Бк/кг в рассоле и 4435,2, 1824,9, 284,1 Бк/кг в сухом остатке.

Большая разница (29 раз) в удельной активностях радия-226 в рассоле и сухом остатке объясняется самопоглощением гамма квантов радия с энергией в 186 Кэв в воде.

Искусственные радионуклиды цезий-137 и америций-241 не обнаружены. Следовательно, в зимний период искусственные радионуклиды не мигрируют в карьер трубки «Удачная».

## 1. Исследование содержания радиоцезия в почве г. Удачный

На выезде из Старого Удачного в Новый Удачный на взято две пробы почвы на глубину 20 см для определения поверхностного загрязнения почвы цезием-137 и америцием-241. Отобраны пробы из разных слоев – верхний растительный слой из мха, гумусный слой и материнский грунт из глины.

В результате исследований в поверхностных слоях обнаружены естественные радионуклиды калия, свинца, радия и искусственный цезий-137.

Удельная активность калия -40 варьирует от 250 до 1370 Бк/кг, свинца-214 от 280 до 1130 Бк/кг, радия от 20 до 67 Бк/кг, цезия-137 от 0,7 до 33, 7 Бк/кг.

Поверхностная активность цезия -137 по слоям составила: во мхе-21 Бк/м<sup>2</sup>, в гумусе- 319,6 Бк/м<sup>2</sup>, в почве- 67,3 Бк/м<sup>2</sup> и в глине-9,7 Бк/м<sup>2</sup>.

Суммарная поверхностная активность цезия-137 варьирует от 33,5 до 417 Бк/м<sup>2</sup>.

В районе г. Якутска поверхностное загрязнение почвы цезием-137 варьирует в пределах 500-1000 Бк/м<sup>2</sup>. В Новосибирской области характерны значения в 2000 Бк/м<sup>2</sup>, в Подмосковье обнаруживаются 3000 Бк/м<sup>2</sup>. Все эти данные обусловлены глобальными радиоактивными выпадениями от испытаний ядерного оружия в атмосфере в 1958-1963 гг. В районе г. Удачный установлено поверхностное загрязнение по цезию-137 в пределах 33-417 Бк/м<sup>2</sup>. Спутник плутония-239 радионуклид америций-241 не обнаружен в составе почвы. Следовательно, в лесу между Старым и Новым Удачным обнаружены только глобальные радиоактивные выпадения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования возможной миграции радионуклидов из полости ПЯВ «Кристалл» в карьер трубки «Удачная» установлено:

1. Содержание трития в рассоле из карьера обусловлено фантомной активностью радия-226 и радона-222. Тритий обнаружен в дистилляте рассола в количествах, соответствующих природным фоновым содержаниям. Следовательно, в рассоле содержится естественный тритий, который не может быть связан с подземным ядерным взрывом «Кристалл». При этом необходимо уточнить вклад трития в рассолы от естественного лития-6, содержащегося в горных породах.
2. В пробе воды из источника неизвестного происхождения на правом берегу реки Далдын обнаружены типичные фоновые природные содержания трития. Дальнего



переноса трития на 15 км из полости подземного ядерного взрыва «Кристалл» не существует.

3. В дренажном рассоле из карьера трубки «Удачная» обнаружены высокие содержания калия, химического родственника цезия-137, но сам цезий-137 в рассоле отсутствует. Отсутствие цезия-137 в рассоле является доказательством отсутствия миграции радионуклидов из полости подземного ядерного взрыва «Кристалл».

4. Установлено, что в рассоле и его сухом остатке отсутствуют цезий-137 и америций-241.

5. Содержание цезия-137 в лесу у г. Удачный соответствует глобальным радиоактивным выпадениям от испытаний ядерного оружия в 60-х гг. прошлого столетия и даже меньше содержания радиоцезия в почве в районе г. Якутска. Следовательно, радиационная обстановка в г. Удачный является нормальной и не представляет опасности для проживания людей.

6. Необходимо выполнить подробные радиоэкологические исследования содержания радия-226 и трития в водах скважин в окрестностях г. Удачный и в карьере трубки «Удачная», окрестностей ПЯВ «Кристалл» с целью проверки гипотезы Артамоновой о возможности существования летней миграции радионуклидов из полости ПЯВ «Кристалл» в карьер трубки «Удачная».

#### **Список использованной литературы**

1. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции, Академическое изд-во «Гео», Новосибирск, 2009, 319 с.
2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Артамонова С.Ю. Геоэлектрический разрез в районе подземного ядерного взрыва «Кристалл» по данным метода переходных процессов. // Геология и геофизика, 2012, Т. 53, №2, с.237 – 249.
3. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ. – 2-е, изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 336 с.
4. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. Изд./В.А. Баженов, Л.А. Булдаков, И.Я. Василенко и др.; - Л.: Химия, 1990. 464 с.
5. Голубов Б.Н., Ушницкий В.Е. Признаки длительного горения угленосных толщ кряжа чекановского (Якутия) и радиоактивного загрязнения его ландшафтов в зоне ПЯВ «Горизонт-4» в сравнении со сходными последствиями взрывов семипалатинского испытательного полигона (Казахстан) // Радиационная безопасность Республики Саха

(Якутия), материалы 3-й республиканской науч.-практ. конф., 18-20 октября 2011. – Якутск, 2012. с. 260-293

6. Николин О.А. Тритий в водных экосистемах Уральского региона.// Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук, Екатеринбург 2008.

7. Артамонова С.Ю., Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Бондарева Л.Г. Современная геоэкологическая обстановка в районе объекта мирного ПЯВ «Кристалл» // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия), материалы 3-й республиканской науч.-практ. конф., 18-20 октября 2011. – Якутск, 2012. с. 211-238.

8. Рудык А.Ф., Казимиров А.С. Определение активности естественных радионуклидов в объектах окружающей среды. МНПП «АКП», Киев, 1992г. 35 с.