

УДК 621.039.9 (571.56)

## Радиоэкологическая обстановка в районе проведения мирного подземного ядерного взрыва “Кратон-3” в 1978 г. (Северо-Западная Якутия)

С. Ю. АРТАМОНОВА

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН,  
проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

E-mail: artam@igm.nsc.ru

(Поступила 13.05.11; после доработки 10.10.11)

### Аннотация

Обсуждаются новые данные по содержанию трития в поверхностных, грунтовых и подземных водах района проведения аварийного мирного подземного ядерного взрыва “Кратон-3” 24 августа 1978 г. Ранее исследования на объекте “Кратон-3” в основном были посвящены определению поверхностного радиоактивного загрязнения таежного ландшафта в момент взрыва и дальнейшего перераспределения и миграции радионуклидов с загрязненных участков под действием экзогенных и биогенных процессов. Впервые рассмотрен вопрос об открытости подземного источника радиоактивности. На основе анализа радиоэкологохимических данных сделан вывод о значительном поступлении радионуклидов из полости взрыва на дневную поверхность земли.

**Ключевые слова:** мирный подземный ядерный взрыв, Якутия, радиоекология, геологическая среда, поверхностные воды, грунтовые воды, подземные воды, радионуклиды и их массоперенос, тритий, экологический риск

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема распространения радионуклидов в природной среде – одна из актуальных экологических задач современности. В период 1965–1988 гг. на территории бывшего СССР было произведено 104 подземных ядерных взрыва (без учета испытаний на спецполигонах): из них 72 – народно-хозяйственного назначения, 32 – с целью сейсмозондирования земли. Эти взрывы получили название “мирные подземные ядерные взрывы” (МПЯВ). Вследствие нештатного выхода активности на поверхность четыре взрыва были признаны аварийными.

Мирный подземный ядерный взрыв “Кратон-3” мощностью 22 кт (в тротиловом эквиваленте) был произведен для сейсмозондирования 24 августа 1978 г. Место взрыва – правый берег р. Мархи в 38 км к востоку от пос.

Айхал (Западная Якутия), глубина – 577 м в глинистых известняках и мергелях среднекембрийского возраста (рис. 1, а). Через один год общая активность в полости взрыва составляла 240 тыс. Ки, а через 31 год (на 02.10.2009 г.) она снизилась до 14.7 тыс. Ки в результате естественного распада [1].

Нарушения в технологии забивки боевой скважины привели к аварийному выбросу через устье скважины около 2 % общей активности, что, по нашим оценкам, составляло примерно 4800 и 294 Ки через один и 31 год соответственно. Радиоактивное газопопылевое облако двигалось в северо-восточном направлении (см. рис. 1, б), и его основная активность пришлась на первые 3–4 км, что привело к гибели прилегающего массива северной тайги. Погибший лес, так называемый мертвый лес, до сих пор представляет собой сухой лиственницы Гмелина

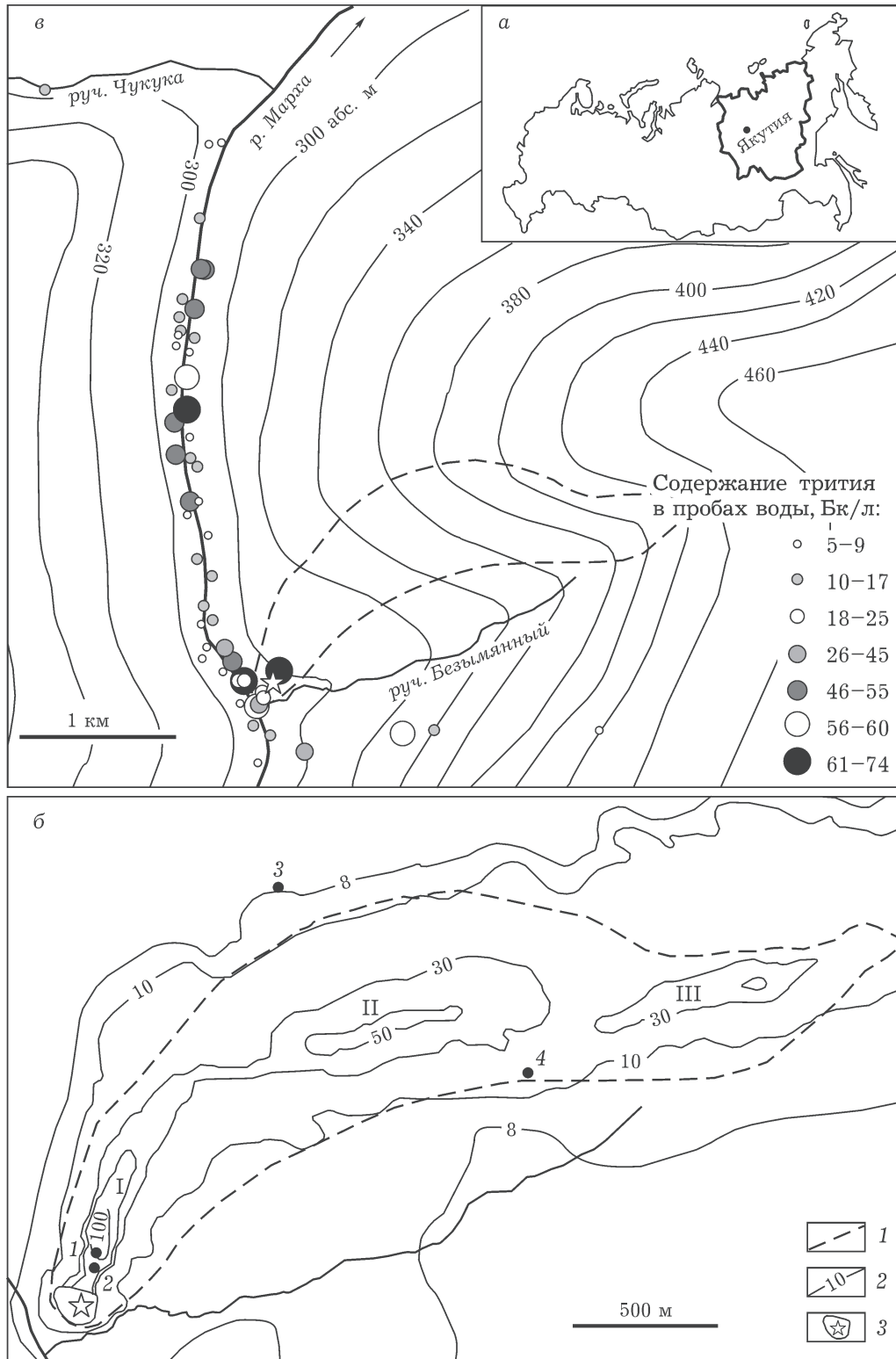


Рис. 1. Схема расположения объекта МПЯВ "Кратон-3" (а) и его радиоактивного следа (б) на правом берегу р. Маржи (в): 1 - граница "мертвого" леса по результатам дешифровки космоснимка Landsat (б, в); 2 - изолинии мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (в мкР/ч) по данным [4] (I - ближний след, II - средний след, III - дальний след); 3 - устье боевой скважины на насыпи; 1-4 - точки пробоотбора почв и мохово-лишайникового покрова (табл. 1).

(*Larix Gmelinii*) со слабой порослью низкорослых кустарников; почти повсеместно развит мохово-лишайниковый покров (роды *Cladina*, род *Dicranum*, *Hylacomium* и др.).

В 1981 г. на этой территории были проведены дезактивационные работы: в 10–15 м к западу от устья боевой скважины был сооружен котлован объемом около 4000 м<sup>3</sup>, в котором захоронили загрязненное буровое оборудование, технику и верхний слой почвы с рабочей площадки. В 2006 г. над озером, образовавшимся над устьем боевой скважины и могильником, была сформирована насыпь из аллювия местного ручья высотой примерно 1,5 м и площадью 0,731 га.

В период с 1981 г. до 1990-х годов секретный объект "Кратон-3" оставался без наблюдения. В 1984 г. якутские геологи "открыли" участок тайги с радиоцезиевой аномалией непонятого происхождения, однако дальнейшие работы по этому факту не проводились. С 1993 г. на объекте МПЯВ "Кратон-3" начались радиоэкологические исследования [2, 3]. В 2002 г. Министерством охраны природы Республики Саха (Якутия) в пределах "мертвого" леса была проведена детальная пешеходная радиометрическая и гамма-спектрометрическая съемка [4]. Затем последовали работы по изучению распространения <sup>90</sup>Sr, <sup>60</sup>Co, <sup>241</sup>Am, изотопов <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>, <sup>240</sup>Pu и их распределения в компонентах экосистем [5–8].

В течение первого года после взрыва основная масса короткоживущих изотопов наведенной и осколочной активности распалась. Далее, в течение длительного периода времени (до 100 лет после взрыва) одним из основных вкладчиков общей активности является именно тритий, и только потом – долгоживущие осколочные радионуклиды <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs. За истекший период активность трития уменьшилась примерно в пять раз по сравнению с начальной, а общая осколочная активность снизилась на несколько порядков. Литературных данных о формах нахождения трития в полости взрыва нет. В поверхностных условиях тритий находится преимущественно в виде молекулы воды <sup>3</sup>H<sup>1</sup>HO [9], что обеспечивает его высокую подвижность, поэтому в районах МПЯВ тритий может служить индикатором существующих источников и доминирующих направлений водного массопереноса радионуклидов.

Цель настоящей работы – установление взаимосвязи содержания трития в природных водах района МПЯВ "Кратон-3" с общей радиоэкологической обстановкой.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Массовый пробоотбор природных вод в районе МПЯВ "Кратон-3" был проведен в период 2008–2009 годов: шесть проб – в первой декаде августа 2008 г., 59 проб – в первой декаде августа 2009 г. Водные пробы объемом 1 л предварительно отфильтровывались через бумажный фильтр "синяя лента", подкислялись концентрированной азотной кислотой в соотношении 1 мл HNO<sub>3</sub> на 1 л пробы. В лабораторных условиях пробы пропускались через мембранные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм. Активность трития в водных пробах измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра Tri-Carb 2800 (США). Пробы смешивали в пластиковых виалах (V = 20 мл) со сцинтилляционным коктейлем в соотношении проба/коктейль = 8 : 12. Приготовленные смеси выдерживались в прохладном темном месте в течение 48 ч для стабилизации, после чего в них определяли содержание трития согласно [10]. Минимальная детектируемая активность <sup>3</sup>H равна 1 Бк/л, при активности <sup>3</sup>H более 40 Бк/л относительная погрешность не превышает 6 %, при активности 10–40 Бк/л – варьирует в пределах 10–15 %, а при активности до 10 Бк/л относительная погрешность в среднем составляет 34 %.

В первой декаде 2009 г. были отобраны пробы объемом до 80 л каждая для определения в них активности <sup>90</sup>Sr, <sup>239</sup>, <sup>240</sup>Pu, <sup>238</sup>Pu, которые консервировались концентрированной азотной кислотой в соотношении 1 мл HNO<sub>3</sub> на 1 л пробы. В лабораторных условиях пробы предварительно концентрировались радиохимическим методом. Активность <sup>90</sup>Sr определяли по изотопу <sup>90</sup>Y с помощью β-радиометрии на РУБ-01П с использованием низкофонового блока детектирования БДЖБ-06П. Чувствительность метода составляет 0,01 Бк. Относительная погрешность не превышает 10 %. Активность изотопов Pu определяли α-спектрометрическим способом на однока-

нальном  $\alpha$ -спектрометре 7184 фирмы EURISYS MEASURES (Франция) [11]. Для регистрации  $\alpha$ -излучения использовали высоко-разрешающие полупроводниковые детекторы (ППД) типа PLUS 300-15 с активной площадью 300 мм<sup>2</sup> и разрешением 15 кэВ. Пределы обнаружения по изотопам Pu находятся на уровне  $5 \cdot 10^{-4}$  Бк при времени измерения  $2 \cdot 10^5$  с. Использовали стандартные растворы <sup>242</sup>Pu и <sup>236</sup>Pu.

Пробы почв и растительности после предварительного озоления подвергались радиохимическому концентрированию с последующим определением содержания радионуклидов  $\alpha$ -спектрометрическим методом для изотопов Pu и  $\beta$ -радиометрическим – для <sup>90</sup>Sr [11]. Дополнительно в твердых пробах измерена активность <sup>137</sup>Cs с помощью прямой полупроводниковой гамма-спектрометрии с коллоидным ППД EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA фирмы EURISYS MEASURES (Франция). Эффективный объем детектора составлял 220 см<sup>3</sup>, относительная эффективность – 47.5 %. Предел обнаружения радиоцезия равен 1 Бк/кг, относительная погрешность не превышает 10 %. В зависимости от активности пробы время измерения варьировалось от 4 до 24 ч. В районе исследования проведено не менее 2000 наземных измерений мощности экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения (МЭД) с помощью радиометра СРП-68-01. Точки отбора проб и полевых измерений привязаны географически с помощью GPS-навигатора ETRIX и внесены в созданный нами ГИС-проект района на основе космоснимка Landcat 2001 г.

Ионный состав водных проб был определен в 2008 г.: анионы – методом титрования, катионы – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре фирмы Agilent (США). Погрешность определения концентраций ионов не превышает 15 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассчитанная на основе дешифрирования космоснимка Landcat и применения ГИС-технологий площадь погибшего леса составила 1 млн 600 тыс. м<sup>2</sup> (см. рис. 1), протяженность – до 3.6 км, хотя ранее его площадь оценивалась примерно в 1 млн м<sup>2</sup> [3].

Активность в пределах “мертвого леса” распределяется неравномерно: по распределению МЭД выделены три пятна – так называемые ближний, средний и дальний следы (см. рис. 1, б) [4]. Установлено, что в 2008 г. МЭД в ближнем следе составляет от 30 до 130 мкР/ч, в среднем – от 30 до 70 мкР/ч, в дальнем – от 30 до 55 мкР/ч. Наиболее сильно загрязнен ближний след. По мере удаления от скважины МЭД постепенно уменьшается, что подтверждается данными наземной радиометрической съемки и лабораторных анализов (табл. 1).

В древесине мертвых деревьев содержание <sup>90</sup>Sr составляет всего около 6 Бк/кг, <sup>137</sup>Cs – 10–14 Бк/кг, <sup>239, 240</sup>Pu – 0.041–0.064 Бк/кг [5]. В опавшей коре мертвых деревьев содержание <sup>90</sup>Sr на три порядка больше и равно 200–490 Бк/кг, а содержание <sup>137</sup>Cs и <sup>239, 240</sup>Pu оказалось в среднем выше на порядок (120–140 и 0.6–5.0 Бк/кг соответственно). После опадения загрязненной коры основными депонентами радионуклидов в районе объекта МПЯВ “Кратон-3” служат мохово-лишайниковый покров и почвы, а именно лесная подстилка и верхняя часть гумусового горизонта почв (см. табл. 1). В районе, сложенном ордовикскими и кембрийскими карбонатными породами, развиты маломощные мерзлотные дерново-карбонатные почвы [6, 12]. Мощность лесной подстилки ограничивается 2–3 см, мощность гумусового горизонта составляет всего 1–6 см. Поле МЭД преимущественно формируется за счет наличия в них радиоцезия: коэффициент корреляции между МЭД и содержанием радиоцезия составил 0.87 при выборке 129 параллельных  $\gamma$ -спектрометрических и радиометрических измерений. В почвах и мохово-лишайниковом покрове общая активность <sup>90</sup>Sr почти в два раза больше по сравнению с активностью <sup>137</sup>Cs и примерно на два порядка выше по сравнению с активностью <sup>239, 240</sup>Pu. Активность <sup>238</sup>Pu составляет примерно 5–6 % от активности <sup>239, 240</sup>Pu. Согласно существующей классификации [13], верхние горизонты почв и мохово-лишайниковый покров центральных частей ближнего и среднего следов по содержанию радионуклидов относятся к твердым радиоактивным отходам.

Проведенная радиометрическая съемка позволила определить, что на ненарушенных

ТАБЛИЦА 1

Удельная активность техногенных радионуклидов в пробах объекта МПЯВ "Кратон-3", Бк/кг

Проба, глубина отбора	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{239,240}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}$
<b>Ближний след, МЭД 93 мкР/ч, в 200 м к северу от устья боевой скважины, (см. рис. 1, т. 1)</b>				
Мох	н. д.	12 000±300 <sup>а</sup>	н. д.	н. д.
Лишайник	н. д.	201 100±2700 <sup>а</sup>	7400±700 <sup>б</sup>	390±40 <sup>б</sup>
Лесная подстилка, 0–2 см	44 400±4600 <sup>а</sup>	20 000±2200 <sup>а</sup>	380±20 <sup>б</sup>	23±2 <sup>б</sup>
Гумусовый горизонт, 2–5 см	5800±640 <sup>а</sup>	5030±510 <sup>а</sup>		
Грунт, см:				
5–10	3950±420 <sup>а</sup>	31±41 <sup>а</sup>	н/д	н/д
10–15	1440±160 <sup>а</sup>	15±28 <sup>а</sup>	н/д	н/д
<b>Локальная аномалия у опушки мертвого леса, МЭД 420–460 мкР/ч (см. рис. 1, т. 2)</b>				
Лесная подстилка, 0–2 см	257790 <sup>в</sup>	94579 <sup>в</sup>	5900±300 <sup>б</sup>	290±30 <sup>б</sup>
	188 000±21 000 <sup>а</sup>	86 700±8700 <sup>а</sup>		
Гумусовый горизонт, см:				
2–4	40610 <sup>в</sup>	34089 <sup>в</sup>	н/д	н/д
4–6	8715 <sup>в</sup>	990 <sup>в</sup>	н/д	н/д
6–8	2353 <sup>в</sup>	48 <sup>в</sup>	н/д	н/д
Грунт, см:				
8–14	194 <sup>в</sup>	43 <sup>в</sup>	н/д	н/д
14–21	18 <sup>в</sup>	10 <sup>в</sup>	н/д	н/д
<b>Средний след, северная граница мертвого леса, МЭД 8 мкР/ч, в 1.6 км от устья боевой скважины (см. рис. 1, т. 3)</b>				
Мох	123.5±11.5	250±18	н/д	н/д
Лишайник	44±3.5	135±10	н/д	н/д
Лесная подстилка, 0–2 см	98±4.9	56.2±18	5.1±0.4	<0.05
Гумусовый горизонт, 2–4 см	46±3.3	11.5±1.5	3.8±0.15	<0.05
Грунт, 4–15 см	26±2.5	<1.5	<0.1	<0.05
<b>Средний след, южная граница мертвого леса, МЭД 11 мкР/ч, в 1.75 км от устья боевой скважины (см. рис. 1, т. 4)</b>				
Мох	221±16	3150±220	21±1	<0.05
Лишайник	102±10	1500±100	31±1.5	<0.05
Лесная подстилка, 0–2 см	1233±85	1030±75	15±1.0	<0.05
Гумусовый горизонт, 2–6 см	850±70	740±60	12.5±0.8	<0.05
Грунт, 6–15 см	280±20	35±3.5	<0.1	<0.05
<b>Фоновый участок, МЭД 5 мкР/ч, в 300 м выше по течению р. Мархи, правый берег</b>				
Лишайник	75±6	90±7	2.7±0.5	<0.05
Лесная подстилка, 0–2 см	80±6	50±3.5	2.7±0.5	<0.05
Гумусовый горизонт, 2–5 см	71±5.5	46±3.3	1.2±0.2	<0.05
Грунт, 5–15 см	33±3.0	<1.5	<0.1	<0.05

Примечание. н/д – нет данных.

<sup>а</sup> Пробы 2001 г. [7, 8, 16].<sup>б</sup> Пробы 2002 г. [14].<sup>в</sup> Пробы 2003 г. [6].

природных ландшафтах естественная МЭД равна всего 5–6 мкР/ч, что характерно для известняков и доломитов. Установленные для внешних границ мертвого леса значения МЭД в 8–12 мкР/ч свидетельствуют о наличии радиоактивного загрязнения краевых зон: во мхах содержание  $^{90}\text{Sr}$  достигает ( $123.5 \pm 11.5$ ),  $^{137}\text{Cs}$  – ( $250 \pm 18$ ) Бк/кг; в лесной подстилке содержание  $^{90}\text{Sr}$  составляет ( $98 \pm 4.9$ ),  $^{137}\text{Cs}$  – ( $56.2 \pm 18$ ),  $^{239,240}\text{Pu}$  – ( $5.1 \pm 0.4$ ) Бк/кг (см. табл. 1). Кроме того, такие же значения МЭД (8–12 мкР/ч) зафиксированы на небольших участках живого леса к югу от мертвого, которые представляют собой локальные пятна радиоактивного загрязнения. По-видимому, они сформированы из вещества, занесенного порывами ветра от основного радиоактивного облака, двигавшегося на восток.

Все эти годы под действием экзогенных и биогенных процессов происходило перераспределение активности, снос и переотложение радионуклидов, как в пределах мертвого леса, так и в сопряженные ландшафты, на фоне снижения общего уровня активности в результате естественного распада.

В 2008 г. в 145 м к северу от устья боевой скважины в небольшом замкнутом понижении на пологом склоне, у опушки мертвого леса оконтурена локальная аномалия МЭД величиной в 400–420 мкР/ч (см. рис. 1, б, т. 2). Размер аномалии составляет около  $3 \times 3$  м. В 2001 г. для лесной подстилки и первых верхних сантиметров гумусового горизонта здесь были установлены очень высокие значения активности, Бк/кг:  $^{90}\text{Sr}$  188 000,  $^{137}\text{Cs}$  86 700 [7, 8]. Проведенными в 2003 г. исследованиями [6] установлено, что содержание  $^{90}\text{Sr}$  оказалось на 37 % выше, а  $^{137}\text{Cs}$  – на 9 % по сравнению с 2001 г. (см. табл. 1). Этот факт указывает на продолжающееся накопление радионуклидов, которые выносятся поверхностными стоками с территории мертвого леса. Помимо радиоцезия и радиостронция в почвах этой аномалии в 2002 г. определены и изотопы Pu: активность  $^{239,240}\text{Pu}$  составила 5900,  $^{238}\text{Pu}$  – 290 Бк/кг [14].

Несомненно, аномальный участок у опушки мертвого леса можно рассматривать только лишь как промежуточный этап на пути дальнейшей миграции радионуклидов. Мертвый лес расположен в бассейне водосбора

р. Мархи и руч. Безымянный (см. рис. 1). Детерминируемые местным рельефом (см. рис. 1, в) поверхностные стоки со среднего и дальнего следов попадают в руч. Безымянный; стоки с наиболее загрязненного ближнего следа частично впадают непосредственно в р. Марху, частично – в тот же руч. Безымянный. В ручейке, вытекающем со стороны опушки леса, в 68 м южнее аномальной зоны (рис. 2, т. 6–08) определено высокое содержание трития ( $(68 \pm 8)$  Бк/л), которое почти в 13 раз превышает местный фоновый уровень. Последний, по нашим данным, составляет от ( $5 \pm 2$ ) до ( $6 \pm 2$ ) Бк/л в р. Мархе выше по течению и в мелких ручьях и сопоставим с глобальным уровнем. Так, согласно [9], современный техногенный фон трития в поверхностных водах составляет около 5 Бк/л. Таково же фоновое содержание трития в водах р. Енисей [10].

В воде ручейка (см. рис. 2, т. 6–08) общая  $\beta$ -активность составляет ( $2.11 \pm 0.08$ ) Бк/л, что превышает уровень вмешательства (УВ) более чем в два раза. Общая  $\alpha$ -активность равна ( $0.54 \pm 0.06$ ) Бк/л, что больше УВ почти вдвое [15].

В мае 2002 г. была отобрана проба паводковых вод руч. Безымянный, в которых установлены следующие валовые содержания основных радионуклидов (вместе со взвесью), Бк/л:  $^{90}\text{Sr}$  ( $40.2 \pm 12.9$ ),  $^{137}\text{Cs}$  ( $6.2 \pm 0.6$ ) и ( $5.6 \pm 0.6$ ),  $^{239,240}\text{Pu}$  ( $0.14 \pm 0.01$ ),  $^{238}\text{Pu}$  ( $0.007 \pm 0.001$ ) [8, 16]. В августе 2009 г. для вод этого ручья (в фильтрате) получены следующие данные, Бк/л:  $^{90}\text{Sr}$  ( $0.12 \pm 0.004$ ),  $^{239,240}\text{Pu}$  ( $4 \pm 0.16$ )  $\cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  ( $3.9 \pm 0.15$ )  $\cdot 10^{-3}$ .

В пробах паводковой воды руч. Безымянный, отобранных в 2002 г., как и в 2009 г., получены соотношения радионуклидов  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs} \sim 6.5$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{239,240}\text{Pu} \sim 300$ , которые оказались выше по сравнению с соотношением этих радионуклидов в их основных источниках – почвах и мохово-лишайниковом покрове мертвого леса (~2 и 100 соответственно). Это указывает на высокую водную подвижность радиостронция и его массоперенос с водными потоками преимущественно в растворе, в том числе и в паводковый период.

Соотношение  $^{137}\text{Cs}/^{239,240}\text{Pu}$  в пробах паводковой воды 2002 г. составляет около 40–44, а содержание  $^{238}\text{Pu}$  – примерно 5 % от содер-

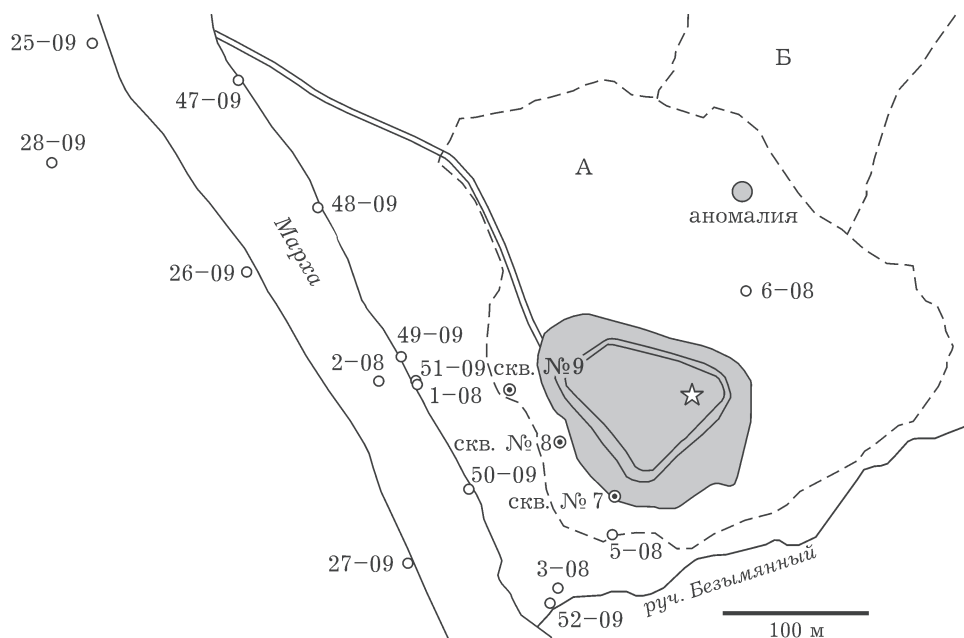


Рис. 2. Схема отбора проб природных вод в районе объекта МПЯВ "Кратон-3". Штриховой линией показаны границы: А – рабочей площадки, Б – мертвого леса; серым фоном показана насыпь, звездой отмечено положение устья боевой скважины. Цифры у кружочков – номера точек отбора проб.

жания  $^{239,240}\text{Pu}$ . Эти данные сопоставимы с соотношениями данных радионуклидов в их основных источниках – компонентах мертвого леса ( $^{137}\text{Cs}/^{239,240}\text{Pu}$  в среднем равно 32–39, содержание  $^{238}\text{Pu}$  составляет 5–6 % от содержания  $^{239,240}\text{Pu}$ ). По-видимому, в паводок в массопереносе  $^{137}\text{Cs}$  и изотопов Pu преобладает механический снос. В остальное время массоперенос радионуклидов преимущественно идет в жидком виде из-за небольших скоростей водотоков в условиях равнинно-холмистого рельефа. При этом для  $^{238}\text{Pu}$  характерна более высокая подвижность. Содержание  $^{238}\text{Pu}$  в пробе воды руч. Безымянный (2009 г.) сопоставимо с таковым в пробе, отобранной весной 2002 г. ( $(3.9 \pm 0.15) \cdot 10^{-3}$  и  $(7 \pm 1) \cdot 10^{-3}$  соответственно) и почти в 10 раз больше по сравнению с содержанием  $^{239,240}\text{Pu}$ . Последний содержится в количестве  $(4 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$  Бк/л в пробе, отобранной летом 2009 г., и  $(0.14 \pm 0.02)$  Бк/л – в пробе паводковой воды 2002 г. (табл. 2).

В 2008 г. в руч. Безымянный (см. табл. 2, т. 3-08) зафиксирована активность  $^3\text{H}$ , равная  $(30 \pm 5)$  Бк/л, что в два раза меньше, чем в ручейке у опушки мертвого леса (см. рис. 2, т. 6-08). Полученный эффект, возможно, обусловлен высокой водностью руч. Безымянный

и, следовательно, разбавлением стоков. В засушливом 2009 г. ручеек у опушки мертвого леса пересох, и в сильно обмельчавшем руч. Безымянный содержание  $^3\text{H}$  стало почти в два раза выше по сравнению с данными 2008 г. и составило  $(57 \pm 2.8)$  Бк/л (см. табл. 2).

Очевидно, что постоянный водный массоперенос радионуклидов из мертвого леса осуществляется поверхностными водотоками, при этом механический снос для изотопов Pu и  $^{137}\text{Cs}$  значителен только в период паводков.

В водах р. Мархи вблизи объекта МПЯВ "Кратон-3" установлены следующие содержания радионуклидов, Бк/л:  $^{90}\text{Sr}$   $0.078 \pm 0.003$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$   $(6 \pm 0.24) \cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}\text{Pu}$   $(18.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$ ,  $^3\text{H}$   $(13 \pm 2.0) - (52.1 \pm 2.6)$  (см. рис. 2, табл. 2, т. 48-09–50-09). Для вод р. Мархи отношение  $^{90}\text{Sr}/^{239,240}\text{Pu} = 130$ , а содержание  $^{238}\text{Pu}$  31 раз больше содержания  $^{239,240}\text{Pu}$ . Удивительно, но в водах р. Мархи активность  $^{238}\text{Pu}$  в 10–30 раз выше активности  $^{239,240}\text{Pu}$ . Это свидетельствует о большой водной подвижности изотопа  $^{238}\text{Pu}$  (см. табл. 2) и принципиально отличается от данных для лишайников, почв мертвого леса (см. табл. 1) и пробы паводковой воды руч. Безымянный 2002 г. (см. табл. 2). По нашим оценкам, расход р. Мархи примерно в 10–20 раз превосходит расход руч. Безымян-

ТАБЛИЦА 2

Содержание радионуклидов в природных водах, отобранных вблизи устья боевой скважины МПЯВ "Кратон-3" в 1996–2009 гг., Бк/л

Место отбора пробы	Номер пробы	Дата отбора	$^3\text{H}$	Общая $\beta$ -активность <sup>д</sup> ( $^{90}\text{Sr}$ )	Общая $\alpha$ -активность ( $^{239,240}\text{Pu}$ )	$^{238}\text{Pu}$
Поверхностный водоток на опушке мертвого леса						
	6-08	03.08.08	68±8	2.11±0.08 (н/д)	0.54±0.06 (н/д)	н/д
	6а-08	03.08.08	н/д	2.25±0.25 (н/д)	н/д	н/д
руч. Безымянный						
	–	май 2002 г. <sup>а</sup>			(0.14±0.02)	$(7\pm 1) \cdot 10^{-3}$
	3-08	03.08.08	30±5	0.27±0.04 (н/д)	0.023±0.02 (н/д)	н/д
	52-09	10.08.09	57±2.8	(0.12±0.004)	$((4\pm 0.16) \cdot 10^{-4})$	$(3.9\pm 0.15) \cdot 10^{-3}$
Водоем рядом с устьем боевой скважины (до создания насыпи в 2006 г.)						
	–	1996 г. <sup>б</sup>	700±250	н/д	н/д	н/д
	–	2001 г. <sup>б</sup>	320±32	38±6 (н/д)	н/д	н/д
	–	2003 г. <sup>в</sup>	н/д	49±18 (н/д)	н/д	н/д
Поверхностный водоток из-под насыпи боевой скважины						
	5-08	03.08.08	18±5	0.398±0.028 (н/д)	0.29±0.01 (н/д)	н/д
Грунтовые воды скв. № 8, глубина ~1.5 м, западнее насыпи боевой скважины						
	скв. № 8	2007 г. <sup>г</sup>	н/д	(8.75±1.63)	н/д	н/д
Грунтовые воды скв. № 7, глубина ~1.5 м у насыпи боевой скважины						
	скв. № 7	03.08.08	19±6	2.39±0.07 (н/д)	0.16±0.04 (н/д)	н/д
Грунтовые склоновые воды из закопуши на берегу р. Мархи						
	1-08	03.08.08	22±6	2.35±0.07 (н/д)	0.15±0.04 (н/д)	н/д
	51-09	10.08.09	67.2±1.9	(1.99±0.07)	$((4\pm 0.16) \cdot 10^{-4})$	$(7.8\pm 0.3) \cdot 10^{-3}$
р. Марха						
	50-09	10.08.09	13±2.0	н/д	н/д	н/д
	2-08	03.08.08	22±5	2.82±0.03 (н/д)	0.42±0.02 (н/д)	н/д
	49-09	10.08.09	14±1.5	н/д	н/д	н/д
		11.08.09	48±2.4	(0.078±0.003)	$(6\pm 0.24) \cdot 10^{-4}$ (н/д)	$(18.6\pm 0.7) \cdot 10^{-3}$
	48-09	10.08.09	52.1±2.6	н/д	н/д	н/д
		11.08.09	45.2±2.1	н/д	н/д	н/д
	47-09	11.08.09	44.3±2.2	0.011±0.010 (н/д)	0.026±0.013 (н/д)	н/д
	27-09	09.08.09	9±1	н/д	н/д	н/д
	26-09	09.08.09	5±2	н/д	н/д	н/д
	25-09	09.08.09	6±2	н/д	н/д	н/д
Водоток левого берега р. Мархи						
	28-09	09.08.09	7.5±0.5	н/д	н/д	н/д
УВ воды						
			7700	1 (5)	0.2 (0.56)	0.6

Примечания. 1. Номера проб соответствуют точкам на рис. 2. 2. н/д – нет данных.

<sup>а</sup> По данным [16].

<sup>б</sup> По данным [8].

<sup>в</sup> По данным [17].

<sup>г</sup> По данным [18].

<sup>д</sup> Без учета вклада  $^3\text{H}$ .

ный (с учетом измеренных нами скоростей течения, глубины, ширины водотоков). В связи с этим после смешения с водами руч. Безымянный – основным поставщиком радионуклидов – содержание трития должно было составить

всего 8.4–8.8 Бк/л. Однако в водах р. Мархи установлены высокие содержания трития – до 52 Бк/л (см. табл. 2, т. 47-09, 48-09, 49-09), что сопоставимо с его содержанием в стоках с ближнего следа мертвого леса (см. табл. 2,



т. 6-08) и в руч. Безымянный (т. 52-09). Столь высокое содержание трития в полноводной р. Мархе, т. е. отсутствие эффекта разбавления (см. табл. 2), оказалось неожиданным фактом, требующим дальнейших исследований.

В р. Марху стекают не только стоки из загрязненного мертвого леса, но и стоки из могильника загрязненной техники, расположенного рядом с устьем боевой скважины. В 2008 г. на поверхности ручейка, вытекающего из-под насыпи, обнаружены разноцветные пятна горюче-смазочных материалов, что, вероятнее всего, обусловлено вымыванием из могильника захороненной техники. В пробе из этого ручейка (см. рис. 2, т. 5-08, табл. 2) установлены следующие значения радиоактивности, Бк/л: содержание трития – 18, общая  $\beta$ -активность –  $(0.398 \pm 0.028)$ , что меньше УВ [15] почти в 2 раза;  $\alpha$ -активность –  $(0.29 \pm 0.01)$ , что выше УВ [15].

В водоеме, сформировавшемся после взрыва рядом с устьем боевой скважины и существовавшем вплоть до строительства в 2006 г. насыпи, в 1996 г. была установлена активность трития в  $(700 \pm 250)$  Бк/л, а в 2001 г. – уже в  $(320 \pm 32)$  Бк/л [8]. В 2001 г. и 2003 г. в этом водоеме содержание  $^{90}\text{Sr}$  составило  $(38 \pm 6)$  [8] и  $(49 \pm 18)$  Бк/л соответственно [17], что почти в 7.5–10 раз превышает УВ. Ниже по склону, в грунтовых водах, в 2007 г. установленное содержание растворенного  $^{90}\text{Sr}$   $(8.75 \pm 1.63)$  Бк/л почти в 1.5 раза превышало УВ [18]. В 2008–2009 гг. в грунтовых водах (см. рис. 2, т. 1-08 и 51-09) нами установлены следующие содержания радионуклидов, Бк/л:

$^{90}\text{Sr}$   $(1.99 \pm 0.07)$ ,  $^3\text{H}$   $(22 \pm 6) - (67.2 \pm 1.9)$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$   $(4 \pm 0.16) \cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}\text{Pu}$   $(7.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$ . Полученные данные меньше УВ (см. табл. 2). Помимо стоков из мертвого леса и могильника, может существовать и третий источник радионуклидов. Вспомним, что аварийный объект МПЯВ "Кратон-3" – это сложный радиогеоэкологический объект. По сути, полость взрыва представляет собой неконтролируемый подземный пункт размещения радиоактивных отходов, откуда на поверхность могут просачиваться радионуклиды. Далее рассмотрим ионный состав природных вод.

Местные поверхностные воды – слабощелочные гидрокарбонатные магниевые-кальциевые (табл. 3), обусловленные составом подстилающих пород района – известняками и доломитами. Формула Курлова описывает их следующим образом:

$$M170 - 190 \frac{\text{HCO}_3^- 100}{\text{Ca}^{2+} 74 \text{Mg}^{2+} 25 (\text{Na}^+, \text{K}^+) 1} \text{pH } 7.2 - 8.0$$

При одинаковом ионном составе наблюдается последовательное снижение минерализации от малого водотока к большему, мг/л: стоки из мертвого леса – 430, руч. Безымянный – 330–390, р. Марха – 290–170, – что можно объяснить эффектом разбавления по мере увеличения расхода водотоков в этой цепи.

Три наблюдательные скважины у насыпи объекта МПЯВ "Кратон-3" пробурены всего на глубину до 2.5–3 м (см. рис. 2), из которых только скважины № 7 и 8 захватывают воды сезонно-талого слоя. Последние формируются в основном поверхностными и метеорными

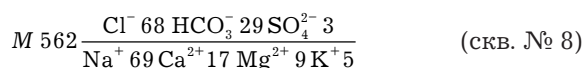
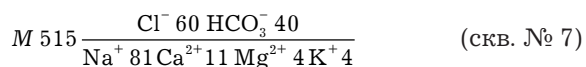
ТАБЛИЦА 3

Общий химический состав природных вод района МПЯВ "Кратон-3", мг/л

Место отбора проб	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	M
Водоток на опушке мертвого леса	8.0	63.5	27.95	<0.125	0.85	335.6	<1	3.55	432
руч. Безымянный	8.22	53.3	26.7	<0.125	0.25	311	<1	1.8	393
Скважина № 7	н/д	11.5	6.4	145	4.25	98	<1	250	515
Скважина № 8	н/д	20.6	17	143	5.55	73	4.94	298	562
Водоток из под насыпи	н/д	51.5	25.65	2.65	0.9	311.2	<1	3.55	315
Склоновый сток	н/д	73.9	35	2.28	0.53	360	<1	39	511
р. Марха	7.65	39	22	<0.125	0.43	229	<1	1.8	292

Примечание. н/д – нет данных, M – минерализация вод.

водами, и то преимущественно в годы с превышением среднесуточного уровня осадков (многоводные годы). Третья скважина (№ 9) заложена неудачно (сухая). В грунтовых водах двух скважин (см. табл. 3, рис. 2) при их минерализации 515–560 мг/л обнаружены высокие концентрации хлоридов (до 250–298 мг/л) и натрия (до 143–145 мг/л); тип вод – гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-натриевый:



Известно [19], что в регионе развиты напорные соленые подземные водоносные горизонты. Данные по ионному составу вод из наблюдательных скважин свидетельствуют о просачивании этих подземных соленых вод по стволу боевой скважины на поверхность. Другого объяснения появления хлоридов натрия в грунтовых водах под насыпью объекта МПЯВ “Кратон-3” у автора нет. Наличие в значимых концентрациях  $Cl^-$  и  $Na^+$  в ручейке из-под насыпи (см. рис. 2, т. 5-08) и в грунтовых водах из закопуши на подножье склона на берегу р. Мархи (т. 1-08, 51-09) также указывает на следы просочившихся подземных соленых вод после их смешения с пресными грунтовыми водами.

Таким образом, анализ имеющихся данных свидетельствует о том, что активность вод

руч. Безымянный и мелких поверхностных водотоков у опушки мертвого леса (выше по рельефу от насыпи) формируется в результате загрязнения из зоны мертвого леса – очевидного поверхностного источника радиоактивности. По-видимому, в активность поверхностных и грунтовых вод у боевой скважины и ниже по склону могут вносить свой вклад и другие источники: существующий под насыпью радиоактивный могильник, подземные соленые воды, просочившиеся по стволу скважины (в случае, если последние загрязнены от подземного источника – полости взрыва).

В р. Мархе, куда стекают грунтовые воды со склона, содержание радионуклидов даже выше, чем в грунтовых склоновых водах, Бк/л:  $^{239,240}Pu$   $(6 \pm 0.24) \cdot 10^{-4}$ ,  $^{238}Pu$   $(18.6 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$ , тритий  $(52.1 \pm 2.6)$  (см. рис. 2, табл. 2, т. 48-09, 49-09), т. е. концентрация радионуклидов не снижается. Если высокие активности радионуклидов в грунтовых водах склона ожидаемы и логичны, то их высокие содержания в речной воде невозможно объяснить только поверхностными склоновыми стоками. Можно предположить, что существует второй путь просачивания радионуклидов из подземного источника – полости взрыва – по столбу обрушения, образовавшемуся вследствие взрыва, и по трещиноватой зоне тектонического разлома с выходом в реку под землей. И именно наличие этого постоянного подводного выхода активности под склоном р. Мар-

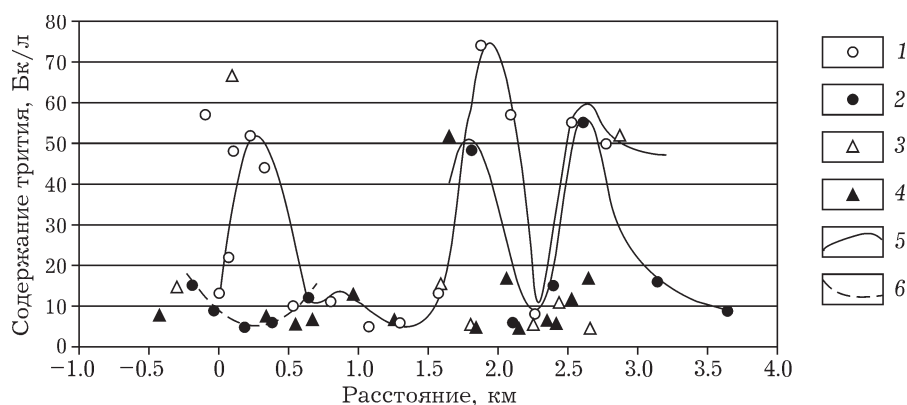


Рис. 3. Распределение содержания трития в природных водах в долине р. Мархи (за нулевую точку отсчета принята т. 50-09, расположенная под склоном у устья боевой скважины: 0–4 – расстояния ниже по течению, 0...–1 – выше по течению): 1 – речная вода с правого берега, 2 – речная вода с левого берега, 3 – воды мелких ручейков и бочажин, стекающих с правого берега р. Мархи, 4 – воды мелких ручейков и бочажин, стекающих с левого берега р. Мархи; 5, 6 – кривые аномалий, установленных по данным о содержании трития в пробах воды, отобранных со стороны правого (5) и левого (6) берегов.

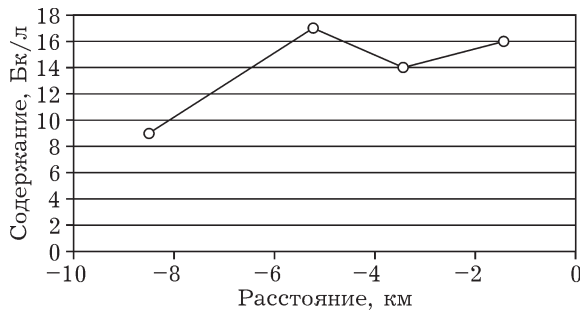


Рис. 4. Содержание трития в речной воде р. Чукуки вверх от устья, расположенного в 4 км севернее от объекта МПЯВ "Кратон-3" и принятого за точку отсчета расстояния.

хи, скорее всего, и определяет высокое содержание радионуклидов в речной воде и слабый эффект разбавления речной водой.

По мнению авторов [20], МПЯВ "Кратон-3" был произведен в непосредственной близости от тектонического разлома северо-северо-западного простирания (выявленного при дешифрировании аэроснимков), проходящего по руслу р. Мархи. Известно, что при бурении боевой скважины в 1977 г. на глубине 165–186 м был пройден трещиноватый горизонт, поглощающий промывочную жидкость, который, по нашему мнению, и был зоной разлома. В результате аварийного МПЯВ "Кратон-3" сильно изменился не только поверхностный ландшафт, но и недра и, кроме того, мог раскрыться тектонический разлом. Факт просачивания на поверхность радионуклидов из полости взрыва по трещиноватой зоне тектонического разлома можно установить путем массового отбора природных вод района и определения в них содержания трития или проведения так называемой тритиевой съемки.

В 2009 г. проанализировано 59 проб из бочажин и ручейков у подножия бортов р. Мархи и речной воды с обоих берегов на протяжении до 3.6 км вниз и до 400 м выше по течению от боевой скважины МПЯВ "Кратон-3" (см. рис. 1, в, кривая 3). На рис. 3 показано распределение содержания трития в долине р. Мархи, причем за нулевую отметку по оси абсцисс принята т. 50-09, поскольку она расположена по прямой от устья боевой скважины МПЯВ "Кратон-3". В речной воде в т. 50-09 активность  $^3\text{H}$  составляет всего  $(13 \pm 2.0)$  Бк/л (см. табл. 2 и рис. 2). Примерно в 100 м ниже по течению от т. 50-09 зафик-

сирован первый пик высокой активности  $^3\text{H}$  (44–52 Бк/л), который прослеживается ниже по течению на протяжении еще 225 м. В водах со стороны противоположного (левого) берега этого участка реки выявлены низкие активности трития – 5–15 Бк/л, среднее – 9.4 Бк/л. Максимальная активность  $^3\text{H}$  в 74 Бк/л установлена в речной воде со стороны правого берега в 1.9 км ниже по течению от объекта МПЯВ. В речной воде со стороны левого берега примерно на том же месте (в 1.8 км ниже по течению) наблюдается также резкий пик активности трития – до 48 Бк/л при фоновом уровне 5–6 Бк/л. Рядом в ручейке зафиксирована активность в 52 Бк/л.

Третий пик активности трития зафиксирован ниже по течению в 2.5–2.85 км от т. 50-09: в речной воде с обоих берегов установлены активности в 50–55 Бк/л. Активность  $^3\text{H}$  в бочажине правого берега здесь также составила 52 Бк/л (см. рис. 1, в, 3). Полученные данные свидетельствуют о постоянном поступлении радионуклидов из локального источника, однако стоки из мертвого леса в данном случае исключаются из-за особенностей рельефа местности (см. рис. 1, в). Кроме того, обнаружены повышенные содержания трития (до 17 Бк/л) в водах р. Чукуки – левого притока р. Мархи, впадающего в него в 4 км ниже по течению от объекта МПЯВ. Это может указывать на поток радионуклидов из полости взрыва по тектоническому разлому, выходящему по руслу р. Мархи и, возможно, связанному с р. Чукукой. Уровень трития в водах р. Чукуки снижается до 9 Бк/л только на расстоянии в 8.5 км выше ее устья (рис. 4).

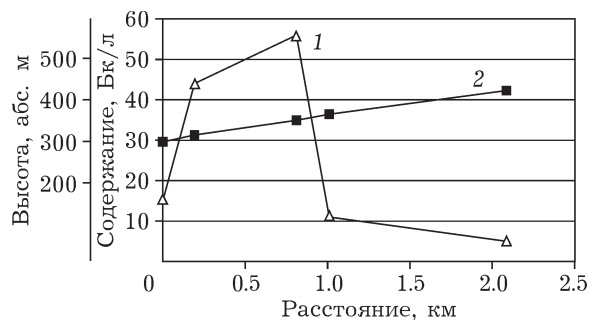


Рис. 5. Данные по содержанию трития в бочажинах по профилю "водораздел – долина" правого берега р. Мархи в 500 м южнее объекта МПЯВ "Кратон-3" (1) и абсолютным высотам точек пробоотбора (2).

На правом берегу р. Мархи в 500 м к югу от боевой скважины в пределах ненарушенного живого леса (МЭД 5–6 мкР/ч, иногда до 8–9 мкР/ч) нами опробованы воды бочажин по профилю длиной около 2 км. Оказалось, что здесь активность трития изменяется также в широком диапазоне – от 5 до 56 Бк/ч (рис. 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных данных следует, что объект МПЯВ “Кратон-3” представляет собой сложный радиогеоэкологический объект и служит поверхностным и подземным источниками радиоактивности.

1. Мохово-лишайниковый слой, лесная подстилка и первые несколько сантиметров гумусового горизонта почв являются основными депонентами поверхностной активности в пределах мертвого леса; высокое содержание в них  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  на ближнем и среднем следах позволяют отнести их к твердым радиоактивным отходам.

2. Выявлен постоянный водный массоперенос радионуклидов, представленных в основном  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239,240}\text{Pu}$ ,  $^3\text{H}$  из зоны мертвого леса поверхностными водотоками. В условиях равнинно-холмистого рельефа из-за небольших скоростей водотоков массоперенос радионуклидов осуществляется преимущественно в жидком виде, за исключением весенних паводков, во время которых механический снос изотопов  $\text{Pu}$  и  $^{137}\text{Cs}$  становится значительным. Содержание  $^{90}\text{Sr}$ , изотопов  $\text{Pu}$  и трития в пробах вод р. Мархи и руч. Безымянный, отобранных в 2009 г., намного меньше УВ [15], но превышают фоновые уровни для сибирских рек на 1–3 порядка [10].

3. Смещение соотношений активностей радионуклидов позволило установить, что изотопам  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  свойственна высокая водная подвижность.

4. Пространственное распределение содержания трития и других радионуклидов в природных водах района указывает на несомненный смыв радионуклидов из подземного могильника, расположенного рядом с устьем боевой скважины, а также на постоянный выход радионуклидов из полости взрыва на по-

верхность земли вместе с напорными солеными подземными водами. При этом выход активности из недр осуществляется следующим образом: 1) по ослабленной зоне ствола боевой скважины объекта МПЯВ “Кратон-3” с выходом на поверхность рядом с устьем скважины; 2) по трещиноватой зоне тектонического разлома, протяженного вдоль русла р. Мархи, с выходом на поверхность вдоль русла р. Мархи как рядом с объектом МПЯВ “Кратон-3”, так и на удалении до 3 км. Просачивание активности из недр, возможно, идет и в долине р. Чукуки – левого притока р. Мархи в 4 км ниже по течению от объекта МПЯВ “Кратон-3”, так как в ней содержание трития в 3.5. раза выше по сравнению с глобальным уровнем.

Работа выполнена в рамках Республиканской целевой программы “Охрана окружающей среды Республики Саха (Якутия) на 2007–2011 годы” (госзаказ № 43(76-08)) при поддержке отдела радиационной безопасности Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Артамонова С. Ю., Дубинин В. П., Кожевников Н. О., Разворотнева Л. И., Руденко В. В., Середович А. В., Чернышев А. К. Разработка проекта специального горного отвода на объектах мирных подземных ядерных взрывов “Кристалл” и “Кратон-3” (Мириинский район): отчет ИГМ СО РАН по госзаказу № 43(76-08) Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) / Отв. исполнитель С. Ю. Артамонова. Новосибирск, 2009. 160 с.
- 2 Гедеев А. Д., Кулешова И. Н., Бакушкина Л. П. Радиационное загрязнение территории Республики Саха (Якутия): проблемы радиационной безопасности: материалы I Республ. науч.-практ. конф. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 1993. С. 214–232.
- 3 Бурцев И. С., Колодезникова Е. Н. Радиационная обстановка в алмазонасных районах Якутии. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1997. 52 с.
- 4 Ковалев В. К. Оконтуривание участка загрязнения искусственными радионуклидами по значениям МЭД гамма-излучения с использованием спутникового навигатора для привязки наблюдений и дальнейшего мониторинга загрязнения на объекте “Кратон-3”: отчет Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) / Отв. исполнитель В. К. Ковалев. Якутск, 2002. 27 с.
- 5 Гедеев А. Д., Булатенков Ю. В., Шкряев В. Ю. // Радиационная безопасность Республики Саха (Якутия): материалы II Республ. науч.-практ. конф. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. С. 168–180.
- 6 Чевычелов А. П., Собакин П. И., Молчанова И. В. // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1512–1519.
- 7 Ramzaev V., Mishine A., Basalaeva L., Brown J. // J. Environ. Radioact. 2007. No. 95. P. 107–125.

- 8 Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. // *J. Environ. Radioact.* 2009. No. 100. P. 1092–1099.
- 9 Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учеб. пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.
- 10 Bolsunovsky A. Ya., Bondareva L. G. // *J. Environ. Radioactivity*, 2003. Vol. 66, Issue 3. P. 285–294.
- 11 Сухоруков Ф. В., Дегерменджи А. Г., Белолипецкий В. М., Болсуновский А. Я., Ковалев С. И., Косолапова Л. Г., Мельгунов М. С., Рапута В. Ф. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Гео, 2004. 286 с.
- 12 Еловская Л. Г., Петрова Е. И., Тетерина Л. В. Почвы Северной Якутии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
- 13 СанПиН 2.6.1.2612–10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). М., 2010. 82 с.
- 14 Геденов А. Д. Оценка уровней радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды на объектах "Кристалл" и "Кратон-3" в Республике Саха (Якутия): отчет ЗАО "Научно-производственная фирма ТреМ" по заказу Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) // Отв. исполнитель А. Д. Геденов. СПб., 2003. 40 с.
- 15 СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности. М., 2009. 116 с.
- 16 Рамзаев В. П. Радиационная безопасность республики Саха (Якутия): оценка текущих и реконструкция накопленных доз облучения населения вследствие проведения подземных ядерных взрывов "Кристалл" и "Кратон-3" с целью обоснования мер социальной защиты: отчет НИР ГУ НИИРГ Минздрава России по госзаказу № 2-2001 Министерства охраны природы РС(Я) / Отв. исполнитель В. П. Рамзаев. СПб., 2002. 115 с.
- 17 Ушницкий В. Е. Радиоэкологическое (мониторинговое) обследование состояния промплощадок МПЯВ "Кратон-3", "Кристалл" (с оформлением радиоэкологических паспортов): отчет Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) // Отв. исполнитель В. Е. Ушницкий. Якутск, 2004. 94 с.
- 18 Новгородов П. Г., Александров А. Р., Никашина В. С., Кац Э. М., Серова И. Б. Разработка технологии строительства защитного геохимического барьера на основе цеолита месторождения Хонгуруу на объекте ПЯВ "Кратон-3": отчет Института проблем нефти и газа СО РАН по госзаказу № 10 Министерства охраны природы Республики Саха (Якутия) / Отв. исполнитель П. Г. Новгородов. Якутск, 2008. 146 с.
- 19 Климовский И. В., Готовцев С. П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 168 с.
- 20 Микуленко К. И., Чомчоев А. И., Готовцев С. П. Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республика Саха (Якутия). Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. 196 с.