

А.Л. Полюдин, Р.И. Юсупов

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ В РФЯЦ ВНИИТФ

A.L. Polyudin, R.I. Yusupov

Investigation of Radioactive Gas-Dynamic Factors in the Trials of Russian Federal Nuclear Center VNIIEF

РЕФЕРАТ

Цель: Изучение закономерностей перераспределения урана во время разовых децентрализованных выбросов.

Материалы и методы: Проводился отбор проб аэрозолей аспирационным и седиментационным способами. Отбирались почвы на расстоянии до 250 м от точек выброса и закладывались почвенные разрезы с учетом элементарных геохимических ландшафтов. В отобранных образцах проб проводилось определение урана стандартным спектрофотометрическим методом с использованием трибутилфосфата и арсеназо III.

Результаты: Среднее содержание урана в воздухе защитных зданий после проведения разового децентрализованного выброса изменялось от 0,40 до 1,56 Бк/м³. Расчетная доза находилась в диапазоне от $2,11 \times 10^{-6}$ до $5,91 \times 10^{-5}$ мЗв. Исследование фракционного распределения аэрозолей показало, что содержание частиц размером до 2 мкм не превышает 46 %. Содержание урана в верхнем пятисантиметровом слое почвы находилось в диапазоне от 32 до 151 мг/кг. Содержание урана в закладываемых почвенных профилях не превышало 360 мг/кг.

Выводы: 1. Среднее содержание урана в воздухе защитных зданий после проведения опыта варьировалось от 0,40 Бк/м³ до 1,84 Бк/м³. Среднее содержание урана в воздухе опытных полей изменялось от 0,15 Бк/м³ до 1,77 Бк/м³. Расчетная доза составляла не более $5,91 \times 10^{-5}$ мЗв. До половины аэрозолей оседало на расстоянии 10 км от точки разового децентрализованного выброса. Доля частиц, определяющих основное поражающее воздействие (т.е. до 2 мкм) достигало 45,7 %.

2. Содержание урана в исследуемых почвах от 6 до 15 раз больше, чем зарегистрированное максимальное природное содержание урана. Максимальные показатели содержания урана в почвах опытного поля связаны с наличием торфяных горизонтов, а также с высокими показателями плотности почвы. Доля водорастворимой формы урана достигала 1 %, а подвижной — 91 %.

3. Уран в верхних горизонтах почвы супераквальной и субаквальной позиции сосредоточен в наиболее мобильной форме (обменной или подвижной), связанной с солями натрия, калия, кальция и водорастворимыми карбонатами. В почвах супераквальной позиции уран в большей степени связывается с полуторными оксидами. В почвах элювиальной позиции уран связан с полуторными оксидами. До 95 % урана в дальнейшем, скорее всего, будет перераспределяться в нижележащие горизонты почвы.

Ключевые слова: долгоживущие радионуклиды, уран, формы нахождения, почвы, выбросы

ABSTRACT

Purpose: The study of the redistribution of uranium during the one-time decentralized emissions.

Material and methods: Were sampled aerosol aspiration and sedimentation processes. Selected soil at a distance of 250 m from the emission points and laid soil profiles, taking into account the elementary geochemical landscapes. In a sample of uranium samples were determined standard spectrophotometric method using tributyl phosphate and arsenazo III.

Result: The average uranium content in the air since the protective buildings decentralized single peak changes from 0.40 to 1.56 Bq/m³. The estimated dose no more $5,91 \times 10^{-5}$ mSv. Investigation showed fractional aerosol distribution of particles up to 2 mm is not more than 46 %. The uranium content in the five-centimeter top layer of soil is in the range of from 32 to 151 mg/kg. The content of uranium in soil profiles pledged not exceed 360 mg/kg.

Conclusion: 1. The average uranium content in the air since the protective buildings experiment varies from 0.40 to 1.84 Bq/m³. The average uranium content in the air pilot fields varies from 0.15 to 1.77 Bq/m³. The estimated dose is not more than $5,91 \times 10^{-5}$ mSv. Up to half of aerosols deposited at a distance of 10 km from the point of a single decentralized output. Fraction of particles that determine the primary effects of exposure (ie up to 2 microns) reaches 45.7 %.

2. The uranium content in the studied soils from 6 to 15 times greater than the maximum recorded natural uranium content. Maximum rates of uranium in soils experimental field associated with the presence of peat horizons, as well as high rates of soil density. Proportion of water-soluble forms of uranium reaches 1 %, and the mobile — 91 %.

3. Uranium in the upper soil horizons supraaqual and subaqueous position is concentrated in the most mobile form (exchange or mobile) associated with the salts of sodium, potassium, calcium and soluble carbonates. In soils supraaqual position uranium increasingly. In soils of eluvial position associated with uranium sesquioxide. Up to 95 % of the uranium in the future is likely to be redistributed into the underlying soil horizon.

Key words: long-lived radionuclides, uranium, forms of occurrence, soil emissions

Введение

Российский федеральный ядерный центр «Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина» в процессе своей деятельности

проводит нерегулярные разовые выбросы урана. Фактический годовой выброс урана не превышает установленных нормативов предельно-допустимых выбросов [1].

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: anderggg@mail.ru

E.I. Zababakhin Russian Federal Nuclear Center — Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia. E-mail: anderggg@mail.ru

Вопрос концентрации и распределения радиоактивных аэрозолей имеет большое значение, т. к. определяет воздействие ключевых радиационных факторов, влияющих на получение доз облучения работающим персоналом.

Аэрозоли, особенно радиоактивные, вызывают букет хронических заболеваний: хроническую obstructивную болезнь легких, хроническую лучевую болезнь, пневмосклероз, пневмокониоз, рак легких и пр. [2–4].

Целью работы является изучение особенностей перераспределения урана в ключевых компонентах природной среды.

Материал и методы

Исследование проводилось на территории Челябинской области. Место отбора проб — территория РФЯЦ «ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забахина», которая в рамках административно-территориального деления относится к Каслинскому району Челябинской области, а с точки зрения зонального деления — к горно-лесной зоне [5].

На протяжении пяти лет проводилось исследование содержания и фракционного состава аэрозолей, содержащих уран, непосредственно после выброса. Концентрации урана в воздухе опытных полей района исследований определялись аспирационным методом с использованием аэрозольных пробоотборников ОП–280 ТЦС и фильтров АФА РСП–20. Исследование фракционного состава аэрозолей проводилось с использованием пятикаскадного импактора Р 56 — П 1175. Принцип работы данного прибора заключается в осаждении частиц определенного размера в соответствии с законом Стокса на определенные пластины (покрытые вазелином). Отобранные пробы консервировались и отправлялись для дальнейшего анализа в лабораторию.

Для оценки распределения урана в результате выброса отбирались пробы почвогрунта (глубиной до 5 см) на расстоянии 100 и 250 м от источника выброса и закладывались почвенные разрезы в соответствии с классом элементарных геохимических ландшафтов, который устанавливался методом комплексного физико-географического профилирования [20]. Почвогрунт из почвенных разрезов вынимали слоями с учетом глубины отобранной пробы, после чего высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с ячейкой 1 мм.

Для оценки возможных подходов исследования содержания урана в почвогрунте исследовалось содержание урана в различных вытяжках (дистиллированная вода, 1М HNO₃, 7М HNO₃, предварительно доведенной до pH = 2). Проводилось последовательное выделение 6 форм урана: обменной (выщела-

чивалась 1М CH₃COONa при pH водной вытяжки), подвижной (1М CH₃COONa, pH = 5), восстанавливаемой (0,04М [NH₃OH]Cl, pH = 2), окисляемой (0,008М HNO₃, pH = 2), кислоторастворимой (7М HNO₃) и остаточной (HF + HNO₃) [21, 22].

Определение содержания урана в пробах воздуха и различных вытяжках проводили спектрофотометрическим методом с использованием трибутилфосфата и арсеназо III [6, 7].

Результаты и обсуждение

Средние концентрации урана в пробах воздушной среды после газодинамического эксперимента представлены в табл. 1, рис. 1. Количество взрывчатого вещества (в тротиловом эквиваленте) и массы урана усреднены.

Таблица 1

Усредненная объемная активность урана в пробах воздуха после газодинамического эксперимента

№ группы	Концентрации урана на опытном поле, Бк/м ³	Концентрации урана в защитном здании, Бк/м ³	Факт наличия атмосферных осадков
1	0,15–0,23	0,29–0,39	осадки отсутствовали
2	0,46–0,71	0,21–0,23	осадки отсутствовали
3	0,71–1,77	0,25–1,56	осадки отсутствовали
	0,17–0,30	0,30–0,35	обложные осадки

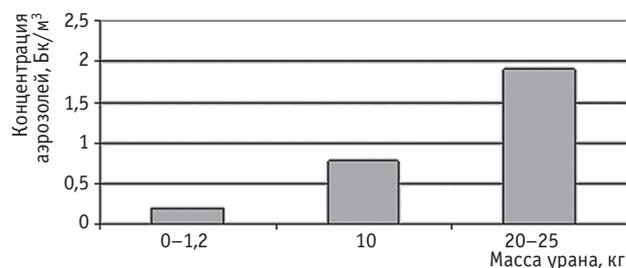


Рис. 1. Содержание аэрозолей урана при нерегулярном разовом выбросе в зависимости от массы урана в выбросе

Среднее содержание урана в воздухе защитных зданий после проведения разового нерегулярного выброса изменялось от 0,40 до 1,56 Бк/м³. Среднее содержание урана в воздухе опытных полей колебалось от 0,15 до 1,77 Бк/м³. Условно все эксперименты можно разделить на 3 группы.

Первая группа: содержание урана в выбросе не превышало 1,5 кг. Содержание аэрозолей в воздухе опытного поля не превышало фоновых значений и составляло на опытном поле 0,218 Бк/м³ и 0,396 Бк/м³ в защитном здании. Расчетная доза составляла не более $2,11 \times 10^{-6}$ мЗв.

Вторая группа: масса урана 10 кг. Содержание урана составляло в защитном здании $0,21 \text{ Бк/м}^3$, на опытном поле — до $0,77 \text{ Бк/м}^3$, что больше фоновых значений в 1,5–2 раза. Расчетная доза не более $2,11 \times 10^{-5} \text{ мЗв}$.

Третья группа: содержание урана в выбросе более 20 кг. Содержание урана составляло в защитном здании до $1,57 \text{ Бк/м}^3$, на опытном поле — $1,77 \text{ Бк/м}^3$. Расчетная доза составляет не более $5,91 \times 10^{-5} \text{ мЗв}$. Концентрации урана на опытном поле, представленные в табл. 1, сохранялись в течение 20–30 мин после опыта, после чего содержание урана в аэрозолях приходило к фоновым значениям. Поэтому при расчете дозы внутреннего облучения и оценке допустимой объемной активности для персонала использовался промежуток времени 30 мин.

В течение указанного периода проводилось исследование фракционного состава аэрозолей. Усредненные результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Усредненные концентрации урана в пробах воздушной среды после выброса

№	D, мкм аэроз.	Осаждение аэрозолей при выбросе, км	Концентрации урана на опытном поле, Бк/м ³	Доля фракции, %
1	30,50	8,3	$0,35 \pm 0,01$	40,8
2	13,50	42,0	$0,04 \pm 0,03$	4,3
3	5,90	220,0	$0,08 \pm 0,01$	9,1
4	2,00	$1,9 \times 10^3$	$0,19 \pm 0,02$	22,1
5	0,76	13×10^3	$0,17 \pm 0,01$	20,2
6	0,28	98×10^3	$0,03 \pm 0,03$	3,4
	Сумма		0,85	

Таблица 3

Содержание урана в пробах почвы на расстоянии 100 и 250 м от точки разового децентрализованного выброса урана

№	Расстояние и направление от точки взрыва	Содержание урана, мг/кг				Плотность почвы, г/см ³	рН	
		в почве	в водной вытяжке	7M HNO ₃	1M HNO ₃		H ₂ O	KCl
1	100 / запад	$77,98 \pm 0,82$	$0,12 \pm 0,09$	$21,12 \pm 0,34$	$19,14 \pm 2,11$	2,81	6,61	5,08
2	100 / северо-запад	$64,00 \pm 0,42$	$0,15 \pm 0,01$	$44,83 \pm 0,88$	$42,11 \pm 4,81$	3,04	5,99	4,08
3	100 / север	$97,40 \pm 0,31$	$0,26 \pm 0,03$	$74,96 \pm 0,21$	$73,28 \pm 0,34$	1,91	6,14	4,65
4	100/северо-восток	$114,00 \pm 0,81$	$0,01 \pm 0,01$	$14,67 \pm 0,12$	$12,61 \pm 0,49$	4,49	5,52	3,64
5	100 / восток	$151,26 \pm 10,17$	$0,09 \pm 0,02$	$18,01 \pm 0,61$	$16,34 \pm 0,88$	4,28	5,33	3,77
6	100 / юго-восток	$82,82 \pm 1,18$	$0,27 \pm 0,05$	$41,28 \pm 0,71$	$39,16 \pm 1,14$	4,05	5,60	4,18
7	100 / юг	$77,02 \pm 3,86$	$0,13 \pm 0,05$	$39,82 \pm 0,66$	$34,88 \pm 2,03$	2,94	5,52	3,83
8	100 / юго-запад	$87,00 \pm 3,77$	$0,23 \pm 0,18$	$33,79 \pm 0,11$	$29,81 \pm 0,35$	2,26	4,92	4,25
9	250 / запад	$83,83 \pm 2,34$	$0,13 \pm 0,01$	$18,67 \pm 0,19$	$19,73 \pm 0,92$	1,92	5,36	3,92
10	250 / северо-запад	$79,00 \pm 0,13$	$0,01 \pm 0,02$	$26,46 \pm 0,33$	$24,62 \pm 0,32$	2,48	5,43	4,08
11	250 / север	$165,00 \pm 1,38$	$0,12 \pm 0,09$	$70,14 \pm 0,54$	$68,30 \pm 0,16$	0,92	4,41	3,77
12	250/северо- восток	$79,00 \pm 2,54$	$0,01 \pm 0,01$	$42,77 \pm 0,31$	$43,18 \pm 0,05$	3,26	5,31	4,30
13	250 / восток	$176,96 \pm 1,36$	$0,12 \pm 0,01$	$38,45 \pm 0,73$	$47,61 \pm 0,41$	2,62	5,83	4,47
14	250 / юго-восток	$32,24 \pm 2,18$	$0,27 \pm 0,04$	$29,37 \pm 0,99$	$24,88 \pm 1,82$	2,83	4,24	3,81
15	250 / юг	$102,98 \pm 0,34$	$0,18 \pm 0,05$	$25,82 \pm 0,22$	$21,59 \pm 0,36$	2,26	5,08	3,76
16	250 / юго-запад	$72,67 \pm 0,77$	$0,13 \pm 0,09$	$61,32 \pm 0,54$	$58,83 \pm 0,58$	3,04	4,88	4,33

Скорость оседания примесей рассчитана в соответствии с предложенной ранее методикой расчета [8], средней высотой пограничного слоя исследуемой местности [9] и средней скоростью ветра на высоте более 200 м, равной примерно 8 м/с. [10].

До половины аэрозолей оседало на расстоянии 10 км от точки разового децентрализованного выброса. Доля частиц, определяющих основное воздействие на здоровье человека (т.е. до 2 мкм), достигала 45,7 % [4].

Проводились исследования содержания урана в почвогрунте. Пробы отбирались на расстоянии 100 и 250 м от точки взрыва с учетом ландшафтных особенностей территории с целью оценки влияния деятельности института на содержание, накопление и распределение урана в наиболее консервативном элементе экосистемы, определяющем перераспределение выбросов в объектах окружающей среды. Отбор проб производился до глубины 5 см. Измерялись: плотность почвы, гранулометрический состав, рН водной и солевой вытяжек. Результаты представлены в табл. 3.

Среднее содержание урана 5 см слоя подзолистой почвы лесной зоны Русской равнины составляла, по данным различных источников, от $1,2 \times 10^{-4}$ до $5,05 \times 10^{-4} \text{ мг/кг}$ [11–13]. Максимальная концентрация урана в почве — 11,7 мг/кг [14]. Средняя фоновая концентрация урана в почве — около 2 мг/кг [15]. Содержание урана в «фоновом» участке — 0,2 мг/кг. Видно, что содержание урана в почвогрунте от 6 до 17 раз больше, чем зарегистрированное максимальное природное содержание урана, и до 370 раз больше, чем содержание урана на «фоновом» участке.

Плотность почвогрунта значительно превосходит типичные показатели [16] (в 3–4 раза), характерные для данного гранулометрического состава, что, вероятно, обусловлено использованием тяжелой техники при проведении работ.

Максимальное содержание урана в отобранных пробах зафиксировано в точках 4 и 11, а также 5 и 13. Точки 4, 11, 15 — это заболоченный участок, характеризующийся наличием торфа. Точки 4, 5, 6 и 13 характеризуются максимальными значениями плотности почвы, в связи с чем в точке 5 отсутствует растительный покров (следствие работы тяжелой техники).

Исследование водной вытяжки — один из способов изучения почвенных растворов, связанных, особенно при полупромывном и промывном типе водного режима, с грунтовыми водами. Доля водорастворимой формы урана варьировалась от 0,01 до 1 %. Схожие работы, проводившиеся в 30-км зоне ЧАЭС, показали переход урана из почв в дистиллят не более $3,2 \times 10^{-3} \%$ [17].

Доля подвижной формы урана, вымываемая 1M HNO₃, может быть качественным индикатором загрязнения территории. В естественных условиях она

не превышает 20–30 % [18]. В нашем случае показатель варьируется от 11 до 91 %. Он не превышает только в точках 1, 9 (точки, находящиеся непосредственно за защитным зданием для персонала).

По литературным данным, спецификой децентрализованных выбросов может являться выпадение труднорастворимых, более крупных частиц аэрозолей ближе к точке взрыва. Более мелкие частицы, входящие в подвижную форму, выпадают дальше от точки взрыва [18]. Роза ветров на данной территории характеризуется увеличением повторяемости ветра по направлениям: северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток. По данным направлениям идет увеличение доли подвижной формы урана в пробе почвогрунта на расстоянии 250 м. По другим направлениям — 100 м.

Для анализа нахождения урана в почвогрунтах также проводилось определение форм данного элемента [21, 22]. Результаты определения форм нахождения урана приведены в табл. 4–6 и рис. 2 и 3.

Закладывались три разреза глубиной по 50 см каждый. Первый располагался на расстоянии 100 м юго-западнее точки выброса. Отобранные пробы относились к почвогрунтам супераквальной позиции.

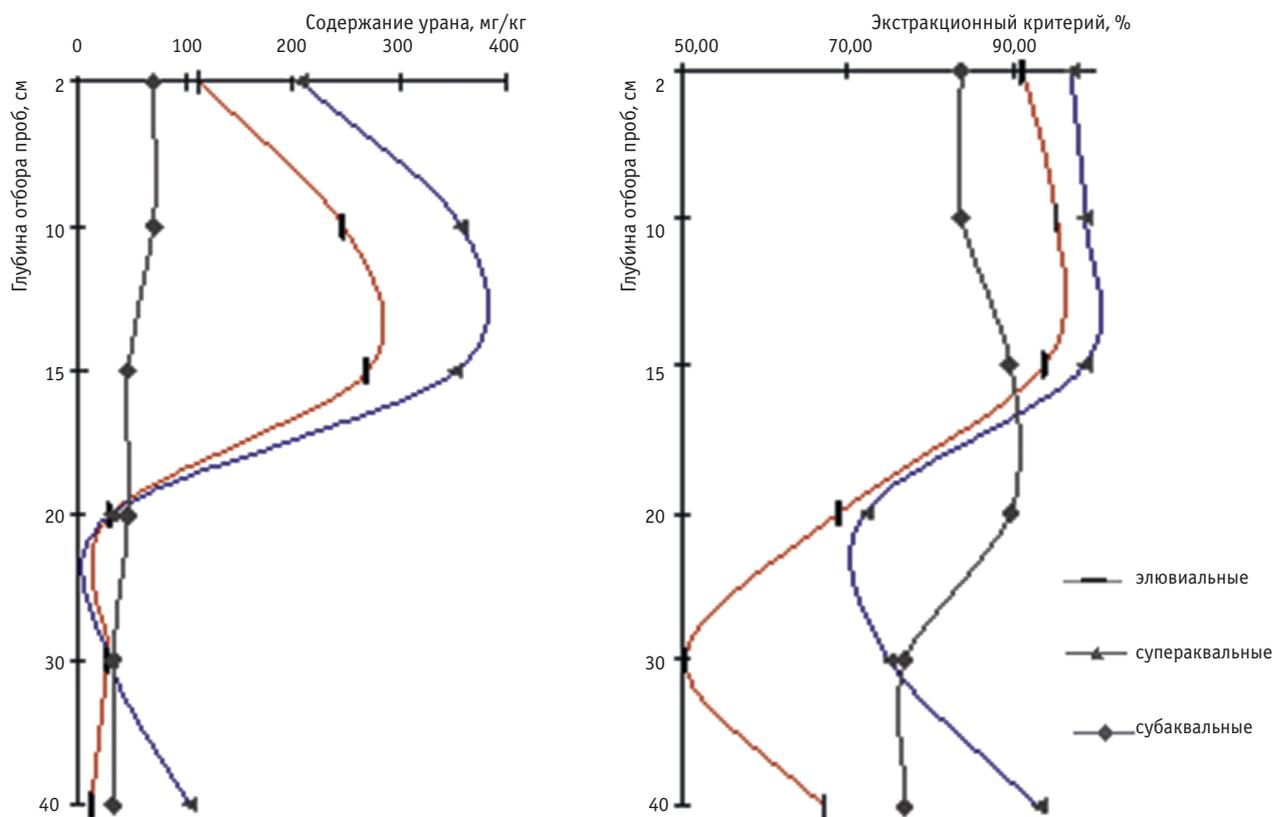


Рис. 2. Распределение общего содержания урана и экстракционный критерий исследуемых почв внутреннего полигона

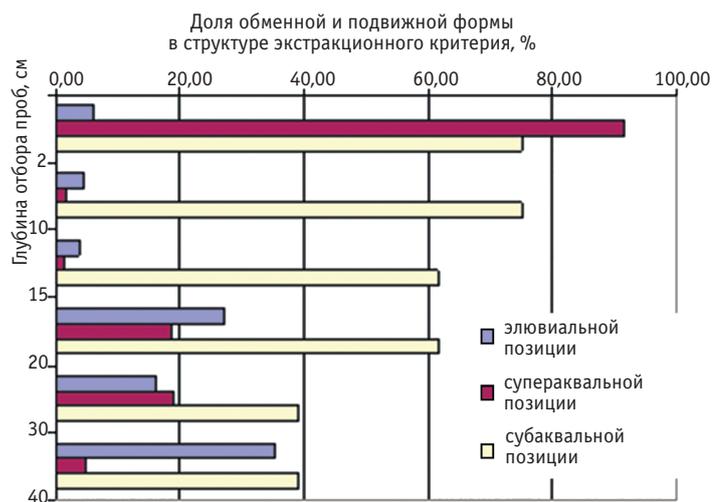


Рис. 3. Доля обменной и подвижной формы в структуре экстракционного критерия почв внутреннего полигона РФЗЦ ВНИИТФ, %

Второй разрез закладывался на расстоянии 120 м западнее и относился к почвогрунтам субаквальной позиции. Третий — на расстоянии 250 м юго-западнее

точки выброса. Отобранные образцы относятся к почвогрунтам элювиальной позиции.

Первый разрез отбирался в лесу, относительный перепад высот от уреза болота не превышал 0,5 м. Второй отобран на болоте. Третий — на расстоянии 100 м от уреза воды, относительный перепад высот 20 м.

В почвах элювиальной позиции содержание обменной фракции урана варьировалось от 1,1 до 8,12 мг/кг, подвижной — от 1,00 до 3,08 мг/кг, восстанавливаемой — от 1,54 до 9,41 мг/кг, окисляемой — от 1,09 до 1,30 мг/кг, кислоторастворимой — от 3,44 до 234,13 мг/кг, остаточной — от 4,33 до 17,29 мг/кг. Общее содержание урана в исследуемых пробах находилось в диапазоне от 13,25 до 271,26 мг/кг.

Для обменной, подвижной и восстанавливаемой фракций видно отчетливое преобладание данных фракций в верхней части исследуемых почв.

В почвах супераквальной позиции содержание обменной фракции урана колебалось от 1,12 до 176,32 мг/кг, подвижной — от 2,33 до 8,11 мг/кг, восстанавливаемой — от 2,28 до 37,60 мг/кг, окисляемой — от 3,82 до 20,11 мг/кг, кислотораствори-

Таблица 4

Формы нахождения урана в пробах почвогрунта разреза № 1, мг/кг

№	Глубина отбора пробы почвогрунта, см	Обменная	Подвижная	Восстанавливаемая	Окисляемая	Кислоторастворимая	Остаточная	Сумма
1	2	176,32 ± 0,38	8,11 ± 0,19	2,36 ± 0,94	3,82 ± 3,18	10,84 ± 0,31	6,43 ± 0,34	207,87
2	6	2,34 ± 0,15	2,49 ± 1,34	3,25 ± 0,88	9,00 ± 4,48	337,27 ± 0,26	4,81 ± 0,48	359,15
3	10	2,13 ± 0,67	2,33 ± 0,38	3,41 ± 0,73	11,54 ± 0,55	328,76 ± 0,74	5,24 ± 0,56	353,41
4	17	1,09 ± 0,44	3,03 ± 0,97	2,33 ± 0,53	7,70 ± 0,64	7,76 ± 0,65	8,52 ± 0,18	30,43
5	25	1,12 ± 0,51	3,04 ± 0,56	2,28 ± 0,73	7,37 ± 0,88	8,16 ± 0,31	7,33 ± 0,37	29,30
6	40	1,47 ± 0,64	3,19 ± 0,71	37,60 ± 0,91	20,11 ± 0,37	35,09 ± 0,28	7,31 ± 0,33	104,77

Таблица 5

Формы нахождения урана в пробах почвогрунтов разреза № 2, мг/кг

№	Глубина отбора пробы почвогрунта, см	Обменная	Подвижная	Восстанавливаемая	Окисляемая	Кислоторастворимая	Остаточная	Сумма
1	10	9,47 ± 0,71	35,57 ± 0,34	6,30 ± 0,57	2,90 ± 0,53	5,66 ± 0,42	11,66 ± 0,51	71,57
2	22	4,97 ± 0,38	20,93 ± 0,86	5,54 ± 0,76	5,76 ± 0,88	4,84 ± 0,34	4,87 ± 0,72	46,90
3	37	2,55 ± 0,55	7,70 ± 0,73	1,98 ± 0,99	8,87 ± 0,81	5,00 ± 0,65	7,79 ± 0,52	33,89

Таблица 6

Формы нахождения урана в пробах почвогрунта разреза № 3, мг/кг

№	Глубина отбора пробы почвогрунта, см	Обменная	Подвижная	Восстанавливаемая	Окисляемая	Кислоторастворимая	Остаточная	Сумма
1	2	3,16 ± 0,48	3,08 ± 0,34	9,41 ± 0,81	1,30 ± 0,79	86,24 ± 0,24	10,14 ± 0,31	113,33
2	6	8,12 ± 1,85	2,35 ± 0,41	8,36 ± 0,32	1,01 ± 0,34	217,36 ± 0,18	12,16 ± 0,17	249,36
3	10	7,21 ± 3,12	2,11 ± 0,11	9,34 ± 0,51	1,18 ± 0,91	234,13 ± 0,11	17,29 ± 0,67	271,26
4	17	1,55 ± 0,51	3,18 ± 0,18	6,55 ± 0,06	1,24 ± 0,88	8,18 ± 0,33	9,31 ± 0,39	30,01
5	25	1,18 ± 0,88	1,00 ± 0,37	2,11 ± 0,03	1,09 ± 0,34	9,21 ± 0,21	14,34 ± 0,57	28,93
6	40	1,74 ± 0,34	1,03 ± 0,61	1,54 ± 0,54	1,17 ± 0,51	3,44 ± 0,72	4,33 ± 0,22	13,25

мой — от 7,76 до 337,27 мг/кг, остаточной — от 4,81 до 8,52 мг/кг. Общее содержание урана в исследуемых пробах находилось в диапазоне от 29,30 до 359 мг/кг.

В почвах субаквальной позиции содержание обменной фракции урана варьируется от 2,55 до 9,47 мг/кг, подвижной — от 7,70 до 38,57 мг/кг, восстанавливаемой — от 1,98 до 6,30 мг/кг, окисляемой — от 2,90 до 8,87 мг/кг, кислоторастворимой — от 4,84 до 5,00 мг/кг, остаточной — от 4,87 до 11,66 мг/кг. Общее содержание урана в исследуемых пробах находилось в диапазоне от 30,89 до 71,57 мг/кг.

Уран сконцентрировался преимущественно в верхних горизонтах почвы. Основная доля урана приходится на антропогенную часть данной почвы и описывается экстракционным критерием.

Исследование форм нахождения урана показало, что уран в элювиальной и супераквальной позициях исследуемых почвогрунтов сконцентрирован преимущественно в кислоторастворимой форме (связан с полуторными оксидами). В почвах супераквальной позиции значительный вклад в верхних горизонтах почвы вносит обменная форма. Содержание урана в почвах субаквальной позиции формировалось за счет подвижной формы урана.

Доля обменной и подвижной фракции в структуре экстракционного критерия приведена на рис. 3. В пробах почв субаквальной и супераквальной позиции данная доля достигает почти 100 %, в отличие от проб элювиальной позиции, где данная форма, вероятнее всего, выносится как в нижележащие горизонты, так и в подчиненные формы рельефа (супераквальную и субаквальную позиции).

Содержание урана в почве не нормируется. Почва является депонирующей средой, влияющей на содержание данного элемента в прочих компонентах природной среды. Исходя из имеющихся подходов, характеризующих вымывание урана из почвы грунтовыми водами (первый подход — вымывание урана дистиллированной водой, второй — растворами, имитирующими грунтовые воды (в данной ситуации сумма обменной и подвижной формы), третий — вымывание потенциально подвижной формы урана (сумма обменной, подвижной, восстанавливаемой и окисляемой форм)), содержание данного элемента превышало 0,3 мг/кг (допустимый уровень вмешательства по содержанию урана в питьевой воде).

Выводы

1. Среднее содержание урана в воздухе защитных зданий после проведения опыта варьировалось от 0,40 до 1,84 Бк/м³. Среднее содержание урана в воздухе опытных полей изменялось от 0,15 до 1,77 Бк/м³. Данные показатели превышали допустимый уровень, составляющий 1,1 Бк/м³, что тре-

бует использования средств защиты органов дыхания при проведении работ. Расчетная эффективная доза составляла не более $5,91 \times 10^{-5}$ мЗв за опыт.

2. До половины аэрозолей осело на расстоянии 10 км от точки разового децентрализованного выброса. Доля частиц, определяющих основное воздействие на здоровье человека (т.е. до 2 мкм) достигала 45,7 %.
3. Превышение содержания урана в исследуемых почвогрунтах достигает 370 раз над его содержанием на «фоновом» участке, и 6–15 раз — над зарегистрированным максимальным природным содержанием данного элемента. Максимальные показатели содержания урана в верхнем 5-см слое почвогрунтов связаны с наличием торфяных горизонтов, а так же с высокими показателями плотности.
4. Доля водорастворимой формы урана достигала 1 %, подвижной — 91 %. Доля урана, характеризующего антропогенную составляющую (сумма обменной, подвижной, восстанавливаемой, окисляемой и кислоторастворимой), достигала 98 %.
5. Уран в верхних горизонтах почвы супераквальной и субаквальной позиции сосредоточен в наиболее мобильной форме (обменной или подвижной), связанной с солями натрия, калия, кальция и водорастворимыми карбонатами. Общее содержание урана (образцы почвогрунтов элювиальной и супераквальной позиции) обусловлено наличием кислоторастворимой формы (формы антропогенного происхождения, условно неподвижной и связанной с полуторными оксидами).
6. Содержание урана в почве/почвогрунтах не нормируется. Доля урана, вымываемого грунтовыми водами, при любом подходе к данному вопросу превышает 0,3 мг/кг (допустимый уровень вмешательства по содержанию урана в питьевой воде).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полудин А.Л., Файзрахманов Ф.Ф.* Исследование концентрации радионуклидов в воздушной среде опытных полей при газодинамических исследованиях. // В сб.: «Промышленная безопасность и экология». — Саров, 2010, С. 3–8.
2. *Малашенко А.В.* Многофакторный генезис профессиональной легочной патологии у горнорабочих урановых шахт. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2009, **54**, № 2, С. 5–12.
3. *Малашенко А.В.* Рак легкого у шахтеров урановых рудников осадочного месторождения. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2007, **52**, № 6, С. 10–12.
4. *Мордашаева В.В.* Длительность поступления урана и его распределения в органах и тканях человека. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2004, **49**, № 2, С. 5–12.

5. *Козаченко В.П.* Обоснование приемов рационального использования, обработки и мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Челябинской области. — Челябинск: ЧелГУ, 1999, 134 с.
6. *Марей Н.А., Зыкова А.С.* Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. — М.: Вторая типография, 1980, 336 с.
7. *Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б.* Аэрозоли. — М.: Атомиздат, 1964, 359 с.
8. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. — М.: Изд-во академии наук СССР, 1955, 340 с.
9. *Безуглая Э.Ю.* Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. — СПб.: Гидрометеоздат, 1983, 328 с.
10. *Бызова Н.Л.* Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте. — М.: Московское отделение гидрометеоздата, 1982, 69 с.
11. *Виноградов А.П.* Основные черты геохимии урана. — М.: АН СССР, 1963, 352 с.
12. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: АН СССР, 1957, 238 с.
13. *Гуськова В.Н.* Уран. Радиационно-гигиеническая характеристика. — М.: Атомиздат, 1972, 215 с.
14. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации. Доклад научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной ассамблее за 1988 г. НКДАР ООН. — М.: Мир, 1993, 728 с.
15. Пределы поступления радионуклидов для работающих с радиоактивными веществами в открытом виде. Публикация 30 МКРЗ. Часть 3. — М.: Энергоатомиздат, 1984, 540 с.
16. *Шейн Е.В., Гончаров В.М.* Агрофизика. — Ростов на Дону: Феникс, 2006, 400 с.
17. *Смирнова Е.А.* Выщелачивание радионуклидов из почвы и частиц радионуклидных выпадений 30-километровой зоны ЧАЭС. // Труды Радиевого ин-та им. В.Г. Хлопина. 2009, XIV, С. 311–317.
18. *Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в почвах — проблемы и методы изучения. // Почвоведение, 2002, № 6, С. 682–692.
19. *Протасов Н.А.* Геохимия природных ландшафтов. — Воронеж: Полиграфический центр Воронежского гос. ун-та, 2008, 36 с.
20. *Уралбеков Б.М., Сатыбалдиев Б.С., Назаркулова Ш.Н.* Уран и радий в минеральных составляющих почв месторождения Курдай. // В сб.: «Материалы международной конференции по аналитической химии и экологии». — Алматы: КазНУ, 2010, С. 86–93.
21. *Tessier A.* Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. // Analytical Chemistry, 1979, 51, P. 844–851.

Поступила: 13.03.2015

Принята к публикации: 27.05.2015