

**А.Л. Полудин**

## **ФОРМЫ ТЕХНОГЕННОГО УРАНА В ПОЧВАХ БЕРЕГА ОЗЕРА СИНАРА КАСЛИНСКОГО РАЙОНА ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ**

**A.L. Polyudin**

### **Forms of Technogenic Uranium in the Soil of the Shore of the Lake Cinara, Kaslinsky District, Chelyabinsk Region**

РЕФЕРАТ

ABSTRACT

**Цель:** Исследование форм нахождения, накопления, распределения урана в почвах зоны влияния ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ» и факторы, определяющие особенности почвы как основной депонирующей среды.

**Материал и методы:** Закладывались почвенные разрезы с учетом элементарных геохимических ландшафтов. В исследуемых образцах проб проводилось последовательное селективное выделение физико-химических форм урана и последующий их анализ спектрофотометрическим методом с использованием трибутилфосфата и арсеназо III. Также определялись кислотность почвы, окислительно-восстановительный потенциал, гранулометрический состав, плотность почвы, плотность твердой фазы почвы и рассчитывался коэффициент фильтрации в ней.

**Результаты:** Актуальная кислотность находится в диапазоне от 5,5 до 7,4. Окислительно-восстановительный потенциал — от 273 до 348 мВ. Показатель, демонстрирующий интенсивность протекания процессов ( $rH_2$ ), характеризует исследуемые почвы, как среду, периодически создающую восстановительную обстановку. В данных условиях уран обладает сильной миграционной способностью. А элементы, влияющие на способность почв фиксировать уран (железо и марганец), находятся в переходных степенях окисления.

Исследуемые почвы имеют легкий гранулометрический состав и плохо задерживают поллютанты, преобладающей фракцией исследуемых почв является мелкий песок (0,25–0,05 мм). Коэффициент фильтрации можно оценить как высокий для почв элювиальной и трансэлювиальной позиции и исключительно высокий — для почв супераквальной позиции.

Содержание урана достигало 20 мг/кг в почве трансэлювиальной позиции, его экстракционный критерий, характеризующий антропогенную компоненту в почвах трансэлювиальной позиции, доходит до 93 %. Уран сконцентрирован преимущественно в почвах трансэлювиальной позиции, связан с водорастворимыми карбонатами и глинистыми минералами. В почвах супераквальной и элювиальной позиции уран — в стабильных и слабоподверженных миграции кислоторастворимой (связанной с полуторными оксидами) и остаточной формах. Доля потенциально подвижной формы от общего содержания урана находится в диапазоне от 25 до 89 %. Максимальное содержание наблюдается на глубине 20–25 см преимущественно в форме, связанной с полуторными оксидами и минеральной компонентой почвы. Потенциально-подвижная форма в структуре экстракционного критерия имеет пик содержания на глубине 8–12 см и обусловлена преимущественно с формами урана, связанными с водорастворимыми карбонатами и глинистыми минералами.

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

**Purpose:** To study the modes of occurrence, accumulation, distribution of uranium in the soil of the area of influence of Russian Federal Nuclear Center, to study the features, determining the peculiarities of the soil as the main storage medium

**Material and methods:** Soil profiles were laid according to the elementary geochemical landscapes. In the samples consecutively selective recovery of physical and chemical forms of uranium and the subsequent analysis by spectrophotometry with the usage of tributyl phosphate and arsenazo III were carried out. Also soil acidity, redox potential, particle size distribution, soil density, the density of the solid phase of the soil were determined and filtration coefficient in the soil was calculated as well.

**Results:** Actual acidity is in the range from 5.5 to 7.4. Redox is in the range from 273 to 348 mV. The indicator shows the intensity of the processes ( $rH_2$ ), and characterizes the soil as an environment, periodically reducing atmosphere. Under these conditions uranium, has a strong migratory ability. And the elements that affect the ability of soils to capture the element (iron and manganese) are in transitional oxidation. The soils that were studied have an easy size distribution and bad detained pollutants, the predominant fraction of the soils is a fine sand (0.25–0.05 mm). Filtration coefficient can be assessed as a high one for the soil of the eluvial and transluvial position and extremely high for the soil of the supraqual position. The uranium content was 20 mg/kg in the soil of the transluvial position, its characterizing anthropogenic component in the soils of the transluvial position came to 93 %. Uranium was concentrated mainly in the soils of the transluvial position and tied to water-soluble carbonates and clay minerals. In the soils of the eluvial and supraqual position uranium is in a stable and minimal migration of the acid ( tied to sesquioxide), and also in the remaining forms. Potentially movable mold of the total content of uranium is in the range of 25 to 89 %. The maximum content is observed at the depth of 20–25 cm in the form predominantly connected to the sesquioxide and mineral components of the soil. Potentially mobile forms in the structure of the extraction criterion is the content of the peak at the depth of 8–12 cm, owing to the forms of uranium tied to the water-soluble carbonates and clay minerals.

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

### **Введение**

ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ» в процессе своей деятельности проводит нерегулярные разовые выбросы урана. Фактический годовой выброс данного эле-

мента не превышает установленных нормативов [1]. В связи с особой значимостью почвы, как основной депонирующей среды, и в соответствии с пунктом 15.15 СанПиН 2.6.1.07-03, [2], предполагается контроль ее радиационной обстановки.

ВНИИ технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск. E-mail: anderggg@mail.ru

E.I. Zababakhin Russia Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia. E-mail: anderggg@mail.ru

Для оценки воздействия на окружающую среду анализ содержания, накопления и распределения урана в почве — основной депонирующей среде, характеризующей перераспределение и накопление аэрозольных выпадений урана, — является наиболее актуальным [3].

Большую сложность представляет изучение поведения соединений различных металлов техногенного происхождения в почвах. Изучение исключительно общего (валового) содержания поллютантов в почвах является недостаточным. Подобные исследования могут отражать лишь направление некоторых процессов, например, миграции (вынос или накопление вещества). Делать выводы о возможных механизмах трансформации техногенных форм в почве и об их дальнейшей судьбе в данном случае затруднительно. Наличие разных форм нахождения исследуемых элементов, отличающихся как подвижностью и биологической доступностью, так и механизмами их закрепления в почве, диктует необходимость их более детального изучения [4].

Основными свойствами почвы, предполагающими вынос урана в водные объекты, являются окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), кислотность почвы (рН), гранулометрический состав, фильтрующая способность почв.

Так, почвы более тяжелого гранулометрического состава (глинистые) лучше аккумулируют тяжелые металлы, чем легкие (песчаные). Используя данные гранулометрического состава, плотности почвы, плотности твердой фазы почвы, можно рассчитать коэффициент фильтрации (КФ) почвы по Салаи. Данный показатель имеет большое значение, поскольку в гумидных регионах (регионах с избыточным увлажнением) содержание урана составляет около 0,1 мг/кг, что связано с вымыванием данного элемента из коры выветривания [5, 6]. Кислотность почвы и ОВП играют определяющую роль в оценке степени подвижности урана [7]. Так, при показателях от 100 до 300 мВ уран находится преимущественно в четырехвалентном состоянии и характеризуется низкой подвижностью. При показателях более 300 мВ уран находится в шестивалентном состоянии и характеризуется высокой миграционной способностью, такой же, как у стронция, натрия, кальция. Используя показатель  $gH_2$ , объединяющий в себе показатели кислотности и ОВП, можно говорить об интенсивности протекающих процессов окисления или восстановления в почвах [8].

### Материал и методы

Исследование проводилось на территории Челябинской области. Место отбора проб — берег озера Синара — зона влияния ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», которая в рамках ад-

министративно-территориальной принадлежности относится к Каслинскому району Челябинской области, а с точки зрения зонального деления — к горнолесной зоне [9].

Для оценки распределения урана, сформированного в результате выброса, закладывались почвенные разрезы в соответствии с классом элементарных геохимических ландшафтов, которые устанавливались методом комплексного физико-географического профилирования [10]. Почвы из почвенных разрезов вынимали слоями с учетом глубины отобранной пробы, после чего высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с ячейками 1 и 3 мм с определением плотности почвы [11].

Проводилось определение гранулометрического состава почвы методом пипетки. Рассчитывался коэффициент фильтрации по Козени [12]. Кислотность почвы (актуальная и обменная), а так же ОВП, плотность почвы и плотность твердой фазы почвы определялись стандартным методом [13]. Более подробно химический состав исследуемых почв представлен в работе [14].

Для оценки возможных подходов к исследованиям распределения урана в почве анализировалось содержание искомого элемента в различных вытяжках. Проводилось последовательное выделение 6 форм урана: обменной (выщелачивалась 1М  $CH_3COONa$  при рН водной вытяжки), подвижной (1М  $CH_3COONa$ , рН = 5), восстанавливаемой (0,04М  $[NH_3OH]Cl$ , рН = 2), окисляемой (0,008М  $HNO_3$ , рН = 2), кислоторастворимой (7М  $HNO_3$ ) и остаточной ( $HF + HNO_3$ ). Обменная и подвижная формы выщелачивают преимущественно уран, связанный с водорастворимыми карбонатами, восстанавливаемая — преимущественно с глинистыми минералами, окисляемая — с органическим веществом почвы, кислоторастворимая — с полутонными оксидами, остаточная — форма урана, связанная с кристаллической решеткой минеральной компоненты почвы и не выщелачиваемая в рамках данной методики. Кислоторастворимая и остаточная форма условно не подвержены вымыванию из почвенного профиля [15, 16]. Определение содержания урана в различных вытяжках проводили спектрофотометрическим методом с использованием трибутилфосфата и арсената III [17].

Заклаывались три разреза глубиной по 80 см каждый. Первый располагался на расстоянии 1,5 км от оз. Синара. Отобранные пробы относились к почвам элювиальной позиции. Относительный перепад высот составлял около 60 м. Второй разрез закладывался на расстоянии 50 м от берега оз. Синара и относился к почвам трансэлювиальной позиции. Относительный перепад высот не превышал 20 м от уреза воды. Третий — на расстоянии 8 м от берега оз. Синара и относился к почвам суперэлювиальной позиции. Относительный перепад высот около 1 м.

## Результаты и обсуждение

Результаты гранулометрического анализа методом пипетки [12] приведены на рис. 1. В исследуемых почвах преобладала фракция 0,25–0,05 мм. В почвах элювиальной позиции доля фракции варьировала от 47 до 53 %. В почвах трансэлювиальной позиции – от 39 до 62 %, супераквальной позиции – от 21 до 70 %. Значимую долю составляла фракция 0,01–0,005 мм, которая в почвах элювиальной позиции достигала 31 %, в супераквальной позиции – 23 %.

По содержанию скелетных элементов элювиальные и трансэлювиальные почвы относятся к среднекаменистым, супераквальные – к сильнокаменистым. Классифицируя исследуемые почвы по гранулометрическому составу, можно сказать, что почвы элювиальной позиции относятся к суглинку среднему, а трансэлювиальной и супераквальной позиции – к супеси.

Показатели плотности почвы, плотности твердой фазы почвы, ОВП, кислотности и коэффициента фильтрации представлены в табл. 1. Плотность исследуемых почв находится в диапазоне от 0,4 до 0,6 г/см<sup>3</sup> в верхних горизонтах, что характеризует ее как вспушенную и богатую органическим веществом. Общая (актуальная) кислотность всех исследуемых почв от 5,5 до 7,4, характеризуется от слабокислой до нейтральной среды. Обменная кислотность во всех почвах находилась в диапазоне от 4,6 до 5,5, что описывает ее как слабо-среднекислую.

Показатели плотности твердой фазы почвы – от 2,2 до 2,5 г/см<sup>3</sup>, что соответствует типичным показателям для серой лесной и подзолистой почвы.

Одним из главных параметров, определяющих миграционную способность урана, является его ОВП. Данный показатель для почв элювиальной позиции – от 273 мВ до 323 мВ, трансэлювиальной позиции составляет от 299 до 304 мВ, в почвах супераквальной позиции, а в верхних – от 278 до 348 мВ. Для всех исследованных почв характерен умеренно восстановительный режим.

Для характеристики интенсивности протекания процессов восстановления или окисления используется показатель  $rH_2$ . Если данный показатель больше 27, то в почве преобладают окислительные процессы, если в диапазоне 22–25, то это означает, что создается восстановительная обстановка, а если менее 20 – восстановительные процессы протекают с высокой интенсивностью. Все данные  $rH_2$  свидетельствуют о наличии восстановительной среды и создании восстановительной обстановки. При наличии контрастной или умеренно восстановительной (как и в нашем случае) среды уран характеризуется как элемент, обладающий сильной миграционной способностью [5].

Данные ОВП позволяют также охарактеризовать валентность некоторых других веществ, влияющих на возможность окисления урана VI до урана IV. Так, для железа данные показатели являются переходными и свидетельствуют о наличии  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ , а также что в исследуемых почвах присутствует как  $Mn^{4+}$ , так и  $Mn^{2+}$  (в системе  $Mn^{4+} - Mn^{2+}$  ион  $Mn^{2+}$  в кислой среде присутствует во всех диапазонах ОВП, в нейтральной – только в значениях, приближенных к 300 мВ) [8].

Таблица 1

**Данные физико-химических свойств почв элювиальной, трансэлювиальной и супераквальной позиций**

№	Мощность, см	Плотность твердой фазы почвы, г/см <sup>3</sup>	Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>	Коэф. фильтр, см/сут (КФ)	pH <sub>нон</sub>	pH <sub>КЛ</sub>	ОВП, мВ	rH <sub>2</sub>
Элювиальной позиции								
1	7	2,29 ± 0,02	0,68	55,8	5,27	4,15	323,7	21,33
2	11	2,50 ± 0,01	0,80	36,6	5,48	4,22	329,6	21,95
3	22	2,51 ± 0,02	0,94	26,0	6,14	4,48	312,0	22,68
4	32	2,44 ± 0,01	0,76	25,0	6,51	5,02	308,0	23,29
5	52	2,56 ± 0,02	0,75	33,3	7,41	6,16	273,3	23,93
Трансэлювиальной позиции								
1	7	2,00 ± 0,03	0,62	73,9	6,55	4,07	299,5	23,08
2	11	2,29 ± 0,04	0,87	40,1	6,51	4,12	300,5	23,04
3	22	2,21 ± 0,02	1,04	11,9	6,49	3,63	302,9	23,08
4	32	2,27 ± 0,03	1,16	7,7	6,46	3,75	301,8	22,98
5	52	2,11 ± 0,03	1,02	12,9	6,47	3,87	303,9	23,07
Супераквальной позиции								
1	7	2,16 ± 0,03	0,46	390,3	5,44	4,79	278,0	20,15
2	11	2,41 ± 0,02	0,60	146,7	5,54	4,52	299,3	21,06
3	22	2,79 ± 0,02	0,73	184,3	5,40	4,21	295,3	20,64
4	32	2,27 ± 0,02	1,16	3,7	5,51	4,06	350,3	22,70
5	52	2,52 ± 0,02	1,12	10,9	5,56	4,12	348,1	22,72

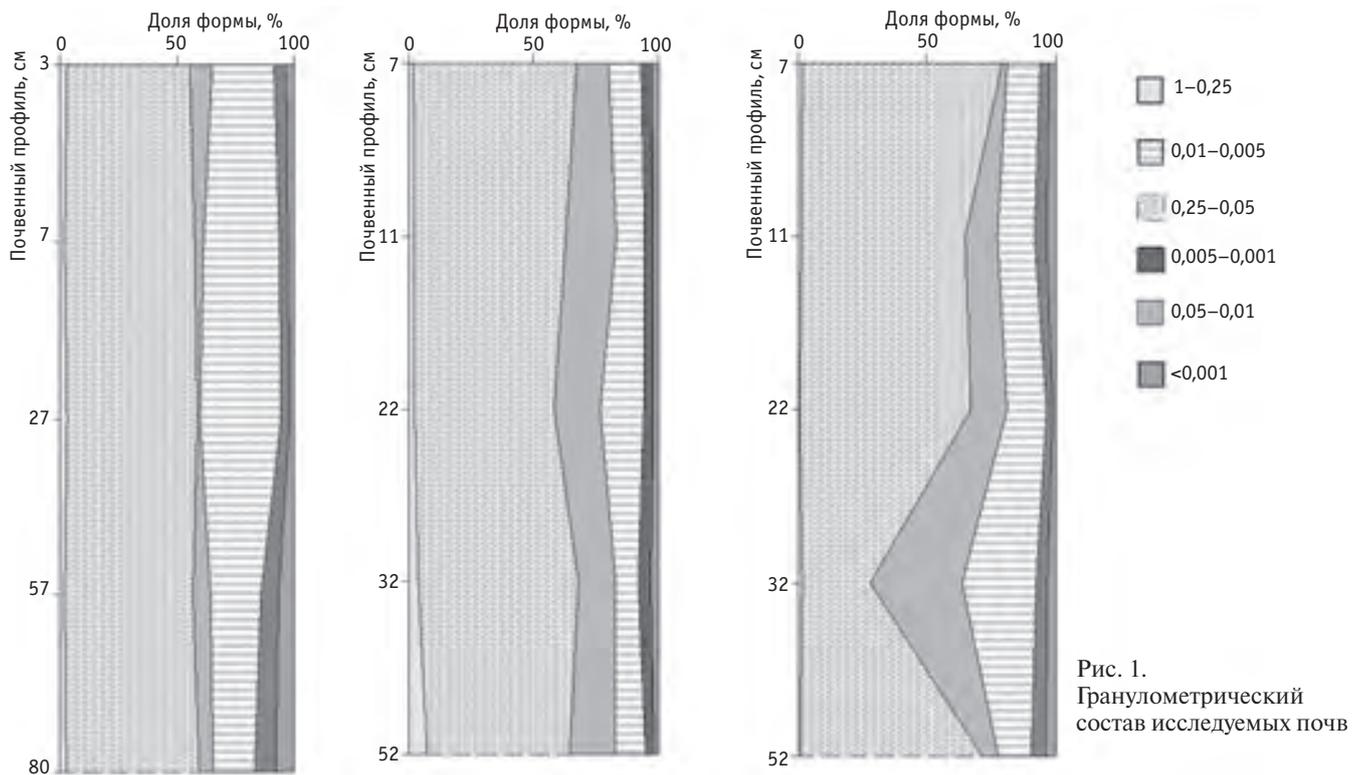


Рис. 1.  
Гранулометрический состав исследуемых почв

Для почвы элювиальной позиции КФ находится в диапазоне от 25 до 55 см/сут, для почвы трансэлювиальной позиции – до 74 см/сут, суперэлювиальной позиции – 390 см/сут. Данные результаты можно охарактеризовать (по Зайдельману) как высокие для почв элювиальной и трансэлювиальной позиции и исключительно высокие для суперэлювиальной позиции.

Содержание урана (табл. 2, 3, 4, рис. 2) в почве элювиальной позиции изменялось от 3 до 10 мг/кг, в почве трансэлювиальной – от 8 до 20 мг/кг, в почве суперэлювиальной – от 8 до 12 мг/кг.

Уран в почвах элювиальной позиции сконцентрирован преимущественно в кислоторастворимой (связанной с полуторными оксидами) – от 1,48 до 4,93 мг/кг и остаточной (от 0,51 до 3,00 мг/кг) формах. В почвах трансэлювиальной позиции: подвижной (связанной с водорастворимыми карбонатами) – от 1,1 до 5,21 мг/кг, восстанавливаемой (связанной с глинистыми минералами) – от 0,52 до 14,04 мг/кг и остаточной – от 0,90 до 7,93 мг/кг формах. В почвах суперэлювиальной позиции: восстанавливаемой (связанно с глинистыми минералами) – от 0,51 до 4,07 мг/кг

Таблица 2

**Формы нахождения урана в пробах почв элювиальной позиции, мг/кг**

№	Глубина отобранной пробы почвы, см	Формы нахождения урана						Сумма
		Обменная	Подвижная	Восстанавливаемая	Окисляемая	Кислоторастворимая	Остаточная	
1	1,5	0,14 ± 0,03	0,12 ± 0,01	0,46 ± 0,08	0,27 ± 0,06	1,69 ± 0,08	1,76 ± 0,11	4,45
2	3	0,19 ± 0,06	0,14 ± 0,05	1,06 ± 0,06	0,13 ± 0,06	1,29 ± 0,11	0,51 ± 0,05	3,33
3	5	0,35 ± 0,08	0,22 ± 0,08	0,53 ± 0,15	0,12 ± 0,01	1,46 ± 0,07	1,42 ± 0,05	4,10
4	7	0,30 ± 0,17	0,22 ± 0,08	1,31 ± 0,11	0,12 ± 0,03	1,68 ± 0,08	1,63 ± 0,06	5,26
5	12	0,29 ± 0,05	0,11 ± 0,03	1,57 ± 0,12	0,13 ± 0,03	2,71 ± 0,03	2,62 ± 0,19	7,44
6	17	0,36 ± 0,09	0,16 ± 0,05	1,61 ± 0,08	0,23 ± 0,07	1,85 ± 0,07	3,63 ± 0,19	7,85
7	22	0,13 ± 0,03	0,22 ± 0,09	1,52 ± 0,09	0,62 ± 0,09	1,93 ± 0,04	1,77 ± 0,25	6,20
8	27	0,27 ± 0,09	0,28 ± 0,08	1,43 ± 0,07	0,59 ± 0,13	4,93 ± 0,07	2,55 ± 0,27	10,05
9	33	0,24 ± 0,10	0,35 ± 0,08	1,43 ± 0,08	0,28 ± 0,14	1,96 ± 0,05	3,00 ± 0,08	7,26
10	39	0,27 ± 0,11	0,29 ± 0,09	1,17 ± 0,73	0,14 ± 0,07	3,23 ± 0,10	2,93 ± 0,10	8,02
11	45	0,19 ± 0,08	0,23 ± 0,08	1,23 ± 0,06	0,24 ± 0,07	3,44 ± 0,09	3,33 ± 0,10	8,66
12	50	0,17 ± 0,08	0,68 ± 0,08	1,19 ± 0,07	0,13 ± 0,02	2,29 ± 0,05	3,97 ± 0,14	8,44
13	55	0,23 ± 0,07	0,50 ± 0,15	1,23 ± 0,07	0,13 ± 0,06	1,48 ± 0,07	1,78 ± 0,07	5,35
14	64	0,48 ± 0,07	0,39 ± 0,06	1,19 ± 0,08	0,39 ± 0,07	2,39 ± 0,13	2,66 ± 0,20	7,52
15	77	0,55 ± 0,08	0,28 ± 0,01	1,19 ± 0,08	0,52 ± 0,10	3,05 ± 0,18	2,41 ± 0,13	7,99

Таблица 3

**Формы нахождения урана в пробах почв трансэлювиальной позиции оз. Синара, мг/кг**

№	Глубина отобранной пробы почвы, см	Формы нахождения урана						Сумма
		Обменная	Подвижная	Восстанавливаемая	Окисляемая	Кислоторастворимая	Остаточная	
1	2	—	0,96 ± 0,24	2,45 ± 0,49	1,34 ± 0,40	1,68 ± 0,31	2,17 ± 0,54	8,60
2	4	0,80 ± 0,16	1,23 ± 0,29	2,36 ± 0,53	0,52 ± 0,22	2,80 ± 0,64	1,96 ± 0,61	9,67
3	7	—	1,12 ± 0,32	14,04 ± 3,65	0,63 ± 0,15	0,66 ± 0,13	3,20 ± 0,67	19,65
4	11	—	4,77 ± 1,12	6,90 ± 1,38	1,18 ± 0,27	0,68 ± 0,15	0,90 ± 0,21	14,43
5	15	0,50 ± 0,11	2,50 ± 1,18	6,77 ± 0,67	0,85 ± 0,17	1,69 ± 0,34	2,96 ± 0,62	15,27
6	19	—	5,31 ± 1,16	6,39 ± 1,91	1,26 ± 0,39	1,28 ± 0,24	2,87 ± 0,66	17,11
7	22	—	4,88 ± 1,26	5,12 ± 1,05	1,25 ± 0,26	2,98 ± 0,65	2,23 ± 0,53	16,46
8	26	—	3,31 ± 0,99	10,64 ± 1,59	1,04 ± 0,28	2,36 ± 0,41	3,33 ± 0,76	20,68
9	30	—	2,01 ± 0,38	5,44 ± 1,41	1,77 ± 0,32	1,07 ± 0,33	7,93 ± 1,51	18,22
10	33	0,58 ± 0,10	3,80 ± 0,87	2,33 ± 0,48	0,82 ± 0,17	1,28 ± 0,28	2,47 ± 0,54	11,28
11	43	—	5,15 ± 1,04	2,90 ± 0,61	0,83 ± 0,18	0,66 ± 0,14	3,69 ± 0,78	13,23
12	53	—	6,68 ± 0,77	1,39 ± 0,43	1,02 ± 0,31	1,09 ± 0,23	4,33 ± 0,91	14,51
13	63	—	5,68 ± 1,14	0,52 ± 0,21	1,85 ± 0,47	1,52 ± 0,36	4,47 ± 1,02	14,04
14	73	—	1,10 ± 0,22	0,60 ± 0,12	1,18 ± 0,28	1,44 ± 0,37	5,22 ± 1,25	9,54

и остаточной – 3,29 мг/кг – 7,98 мг/кг. Содержание урана на фоновом участке составляет 0,2 мг/кг.

Экстракционный критерий, характеризующий антропогенную компоненту (рис. 2) и включающий обменную, подвижную, восстанавливаемую, окисляемую и кислоторастворимую формы урана, находится в диапазоне для элювиальных почв от 2,7 до 7,5 мг/кг (53–75 %), для почв трансэлювиальной позиции – от 4,3 до 17,4 мг/кг (45–93 %), для почв суперэлювиальной позиции – от 3,24 до 12,47 мг/кг (40–65 %).

Сумма обменной и подвижной формы, связанной с водорастворимыми карбонатами для почв элювиальной позиции – от 0,26 до 0,85 мг/кг (4,7–13,9 %), почв трансэлювиальной позиции – от 1,1 до 6,7 мг/кг

(5,7–46 %), суперэлювиальной позиции – от 0,8 до 8,1 мг/кг (6,8–40,5 %).

Содержание потенциально подвижной формы (рис. 3), (суммы обменной, подвижной, восстанавливаемой и окисляемой форм) для почв элювиальной позиции находится в диапазоне от 1,00 до 2,53 мг/кг, трансэлювиальной – от 2,88 до 14,99 мг/кг и суперэлювиальной позиции от 2,30 до 9,19 мг/кг. Доля потенциально подвижной формы в структуре экстракционного критерия (рис. 4) для почв элювиальной позиции составляет от 35 до 56 %, трансэлювиальной – от 66 до 96 % и суперэлювиальной от 36 до 87 %.

Уран сконцентрирован на глубине 20–25 см преимущественно в форме, связанной с полуторны-

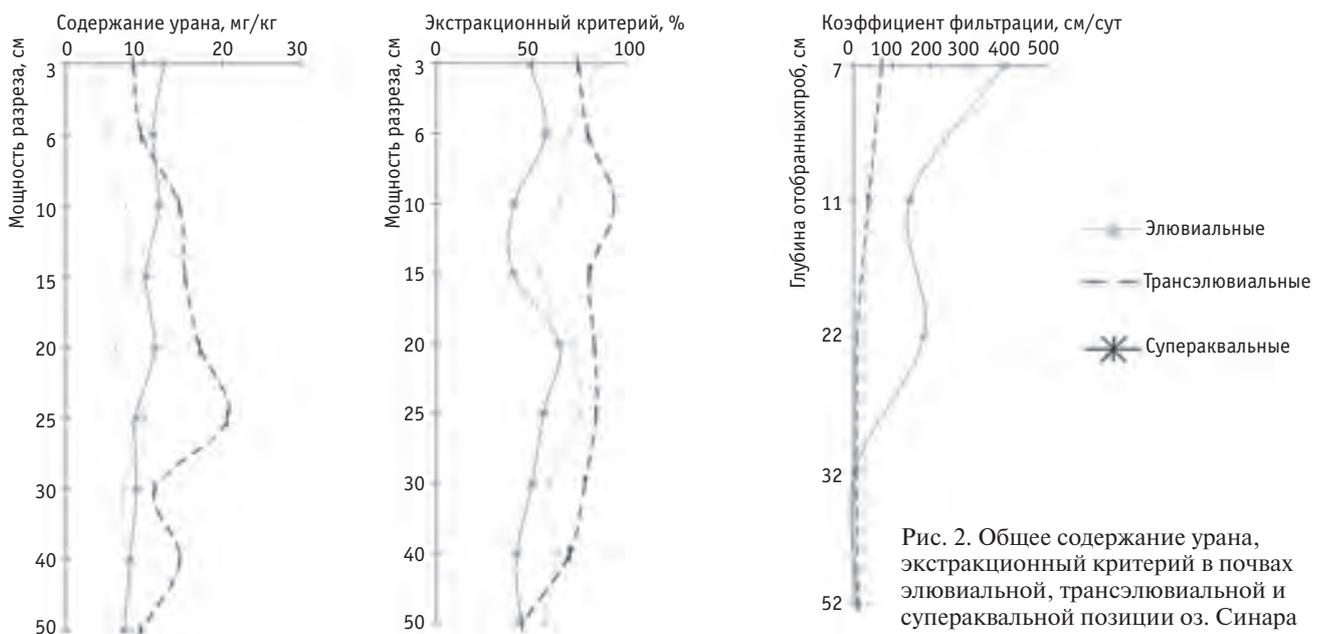


Рис. 2. Общее содержание урана, экстракционный критерий в почвах элювиальной, трансэлювиальной и суперэлювиальной позиции оз. Синара

Таблица 4

**Формы нахождения урана в пробах почв супераквальной позиции оз. Синара, мг/кг**

№	Глубина отобранной пробы почвы, см	Формы нахождения урана					Сумма	
		Обменная	Подвижная	Восстанавливаемая	Окисляемая	Кислоторастворимая		Остаточная
1	2	0,62 ± 0,15	0,26 ± 0,05	3,78 ± 0,28	0,64 ± 0,11	0,85 ± 0,09	6,37 ± 0,13	12,52
2	6	0,51 ± 0,08	0,29 ± 0,04	4,07 ± 0,86	0,39 ± 0,04	1,11 ± 0,27	4,66 ± 0,11	11,05
3	10	0,55 ± 0,10	0,25 ± 0,01	1,21 ± 0,20	0,29 ± 0,03	2,55 ± 0,46	6,99 ± 0,11	11,85
4	16	0,74 ± 0,13	0,23 ± 0,03	1,47 ± 0,17	0,29 ± 0,05	1,35 ± 0,06	6,13 ± 0,55	10,23
5	20	0,88 ± 0,16	0,26 ± 0,04	3,43 ± 0,25	0,32 ± 0,04	0,94 ± 0,08	7,29 ± 0,89	13,13
6	23	0,65 ± 0,04	0,32 ± 0,11	3,84 ± 0,16	0,31 ± 0,05	2,22 ± 0,09	3,98 ± 0,09	11,33
7	25	0,72 ± 0,17	0,34 ± 0,04	3,19 ± 0,12	0,68 ± 0,09	0,92 ± 0,15	3,29 ± 0,05	9,14
8	31	0,55 ± 0,09	0,41 ± 0,10	1,78 ± 0,39	0,48 ± 0,09	1,76 ± 0,15	3,91 ± 0,09	8,89
9	37	0,69 ± 0,07	0,37 ± 0,05	1,40 ± 0,11	0,58 ± 0,08	1,43 ± 0,08	4,47 ± 0,09	8,96
10	43	1,21 ± 0,21	0,32 ± 0,07	1,56 ± 0,39	0,55 ± 0,09	0,64 ± 0,08	5,17 ± 0,08	9,45
11	54	1,32 ± 0,36	0,32 ± 0,05	0,74 ± 0,18	0,63 ± 0,07	0,46 ± 0,05	4,74 ± 0,09	8,22
12	65	1,16 ± 0,29	0,27 ± 0,03	0,51 ± 0,13	0,69 ± 0,12	0,60 ± 0,07	4,16 ± 0,09	7,40
13	73	7,80 ± 0,48	0,26 ± 0,04	0,51 ± 0,06	0,62 ± 0,06	3,28 ± 0,07	7,43 ± 0,14	19,90
14	81	1,08 ± 0,18	0,29 ± 0,04	0,59 ± 0,09	0,79 ± 0,12	4,974 ± 0,09	7,98 ± 0,06	15,70

ми оксидами и минеральной компонентой почвы. Потенциально-подвижная форма в структуре экстракционного критерия имеет пик содержания урана на глубине 8–12 см и обусловлена преимущественно формами урана, связанными с водорастворимыми карбонатами и глинистыми минералами.

Экстракционный критерий, характеризующий антропогенную компоненту, от 45 до 93 % в почвах трансэлювиальной позиции. Данные результаты могут быть связаны с перераспределением потенциально-подвижной формы урана из главных форм рельефа (почв элювиальной позиции) в подчиненные (почвы трансэлювиальной и супераквальной позиции). Выход на передний план экстракционно-

го критерия почв элювиальной позиции свидетельствует скорее о сравнительно небольшом содержании остаточной формы урана. Это может быть связано, как отмечают некоторые авторы, с проникновением подвижной формы урана в кристаллическую решетку минералов и формированием за счет этого остаточной формы урана [18, 19].

Совокупность результатов проведенных анализов образцов почвы позволяет охарактеризовать исследуемую депонирующую среду с точки зрения вымывания урана из почвы грунтовыми водами и показывает, что содержание данного элемента превышало 0,3 мг/кг (допустимый уровень вмешательства по содержанию урана в питьевой воде).

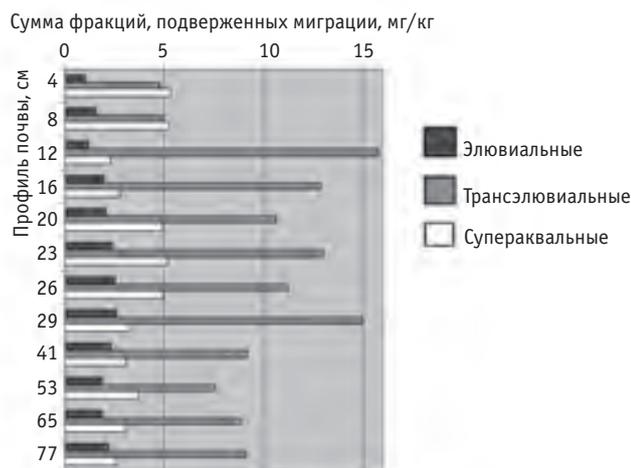


Рис. 3. Содержание суммы фракций, подверженных миграции в почвах с учетом ландшафтных особенностей территории элювиальной, трансэлювиальной и супераквальной позиции

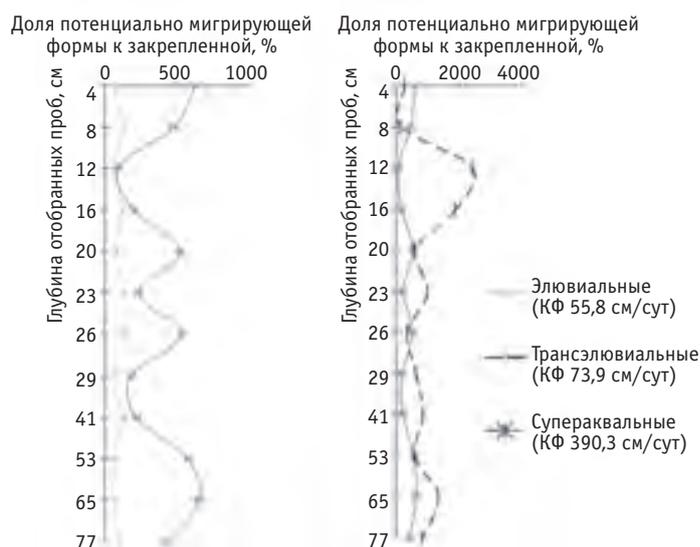


Рис. 4. Содержание доли потенциально мигрирующей антропогенной компоненты к закрепленной антропогенной компоненте (в структуре экстракционного критерия)

## Выводы

1. В исследуемых почвах уран обладает сильной миграционной способностью, а элементы, влияющие на способность почв фиксировать его (железо и марганец), находятся в переходных степенях окисления.

2. Исследуемые почвы имеют легкий гранулометрический состав и плохо задерживают поллютанты, преобладающей фракцией в исследуемых почвах является мелкий песок (0,25–0,05 мм). Показатели коэффициента фильтрации характеризуются как высокие и исключительно высокие.

3. Содержание урана достигает 20 мг/кг, что до 100 раз превышает содержание урана фонового участка. Экстракционный критерий, характеризующий антропогенную компоненту исследуемых почв, находится в диапазоне от 45 до 93 %.

6. Уран, сконцентрированный преимущественно в почвах трансэлювиальной позиции, связан с водорастворимыми карбонатами и глинистыми минералами. В почвах супераквальной и элювиальной позиции он находится в стабильных и слабоподверженных миграции кислоторастворимой (связанной с полуторными оксидами) и остаточной формах.

5. Максимальное содержание урана наблюдается на глубине 20–25 см преимущественно в форме, связанной с полуторными оксидами и минеральной компонентой почвы. Потенциально-подвижная форма в структуре экстракционного критерия имеет пик содержания на глубине 8–12 см и обусловлена преимущественно формами урана, связанными с водорастворимыми карбонатами и глинистыми минералами. Доля потенциально подвижной формы от общего содержания урана доходит до 89 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полюдин 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. Разрешение 2115.
2. СанПиН 2.6.1.07-03. Гигиенические требования к проектированию предприятий и установок атомной промышленности. М.: Атомиздат. 2003. С. 32
3. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеоиздат. 1980. 183 с.
4. Малашенко А.В. Рак легкого у шахтеров урановых рудников осадочного месторождения // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2007. Т. 50. № 6. С. 10–12.
5. Евсеева Л.С. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М.: Гос. изд-во литературы в области науки и техники. 1962. 239 с.

6. Андреева О.С., Бадьин В.Н., Корнилов А.Н. Природный и обогащенный уран. Радиационно-гигиенические аспекты. М.: Атомиздат. 1979. 216 с.
7. Виноградов А.П. Основные черты геохимии урана. М.: АН СССР. 1963. 352 с.
8. Мамонтов В.Г., Панов Н.П., Кауричев И.С. Общее почвоведение. М.: КолосС. 2006. 456 с.
9. Козаченко В.П. Обоснование приемов рационального использования, обработки и мелиорации земель сельскохозяйственного назначения Челябинской области. Челябинск: ЧелГУ. 1999. 134 с.
10. Протасов Н.А. Геохимия природных ландшафтов. Воронеж. Полиграф. центр Воронежского гос. ун-та. 2008. 36 с.
11. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат. 1985. 351 с.
12. Вадюнина А.Ф., Корчагина В.А. Методы определения физических свойств и грунтов. М.: Высшая школа. 1961. 345 с.
13. Синявский В.А. Физические, физико-химические и химические методы анализа в экологии почв. Челябинск: ЧелГУ. 2004. 36 с.
14. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации. Доклад научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной ассамблеи за 1988 г. НКДАР ООН. М.: Мир. 1993. 728 с.
15. 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.
16. Tessier A. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Analit. Chem. 1979. Vol. 51. P. 844–851.
17. 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.
18. Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: миграция и биологическое действие на популяции и биоценозы. М.: Наука. 1990. 368 с.
19. Ковалевский А.Л. О физиологических барьерах поглощения у растений по отношению к большим концентрациям урана в питательной среде // В сб.: «Теоретические и практическое действие малых доз ионизирующей радиации». Сыткыквар. 1973. С. 92–94.

Поступила: 18.05.2015

Принята к публикации: 14.12.2015