

УДК 550.42:546.49:581.1:504.7(571.14)

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА НОВОСИБИРСКА

Дорохова Любовь Александровна¹,
liubov.ad@yandex.ru

Юсупов Дмитрий Валерьевич²,
yusupovd@mail.ru

Торопов Андрей Сергеевич³,
trop990@gmail.com

Рапута Владимир Федотович⁴,
raputa@sscc.ru

Павлова Людмила Михайловна¹,
pav@ascnet.ru

Радомская Валентина Ивановна¹,
radomskaya@ascnet.ru

Судыко Александр Федорович⁵,
sudykoaf@yandex.ru

Барановская Наталья Владимировна⁵,
nata@tpu.ru

¹ Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
Россия, 675000, г. Благовещенск, пер. Релочный, 1.

² Амурский государственный университет,
Россия, 675027, г. Благовещенск, Игнатъевское шоссе, 21.

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1.

⁴ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева, 6.

⁵ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Биогеохимическая индикация (по растениям) состояния окружающей среды широко применяется в геоэкологических исследованиях территорий. Этот метод позволяет определять источники антропогенного воздействия, границы зон неаварийных выбросов крупных промышленных предприятий, включая объекты ядерно-топливного цикла. Использован комплекс экспериментальных и расчетных математических методов для оценки зоны аэрозольных выпадений U на территории в результате штатной деятельности предприятия ядерно-топливного цикла.

Цель: установить характер распределения, формы нахождения и пути миграции U в зоне влияния предприятия ядерно-топливного цикла (на примере г. Новосибирска) по данным опробования листьев тополя.

Объект: листья деревьев рода тополь (*Populus L.*) – сезонный депонирующий планшет, биомонитор, улавливающий аэрозоли из атмосферы.

Методы. Проведена биогеохимическая съемка территории. Элементный состав золы листьев тополя изучали методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Элементный состав частиц на поверхности листьев изучали на сканирующем электронном микроскопе с рентгеноспектральным анализом. Для определения пути миграции U использовали метод автордиографии. Численный анализ пространственного распределения концентрации урана выполняли на основе соотношений баланса массы легкой примеси в приземном слое атмосферы. Полученные результаты обрабатывали с помощью описательной статистики.

Результаты. Получены данные о закономерностях распределения и путях миграции U в зоне влияния объектов ядерно-топливного цикла на территории г. Новосибирска. В северо-восточной части города выявлены высоконтрастные биогеохимические ореолы U . Установлены количественные изменения концентраций в южных направлениях атмосферных выносов U от хвостохранилища твердых радиоактивных отходов. Изучен характер распределения концентраций U по высоте кроны дерева вблизи предприятия ядерно-топливного цикла – с наветренной стороны от его промышленной площадки концентрация U в пробах листьев тополя в 2–3 раза выше, чем с подветренной. На поверхности листьев обнаружены фазы оксида U размерами от 0,5 до 6 мкм. Установлен ветровой путь поступления U .

Ключевые слова:

уран, аэрозоли, ветровой перенос, листья тополя, Новосибирск, нейтронно-активационный анализ, SEM-EDS, автордиография, математическое моделирование.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха и сопряженных компонентов природной среды аэрозольными примесями стало одной из ключевых экологических проблем в промышленных городах и мегаполисах [1, 2].

Уран – интенсивно мигрирующий радиоактивный химический элемент, обладающий переменной ва-

лентностью, поведение которого зависит от физико-химических особенностей природных процессов и факторов окружающей среды. Выбросы U в атмосферу обуславливают его перераспределение между воздушно-наземной, почвенной и водной средами обитания живых организмов. В почвенной среде под влиянием микробиоты возможна иммобилизация U ,

кристаллизация в биогенных минеральных фазах [3] или его ферментативное восстановление до малорастворимого уранинита [4]. Наиболее распространенными источниками поступления урана в окружающую среду являются горнодобывающая промышленность, подземные воды, удобрения, ядерные и военные объекты [5].

Радиоактивные свойства и химическая токсичность U представляют серьезную угрозу для экосистем и здоровья человека [6]. Согласно эпидемиологическим и лабораторным исследованиям [7–9], U вызывает нарушение физиологических функций организма при поступлении через дыхательную и пищеварительную системы. Небольшое количество U способно изменять баланс иммунной системы человека, оказывать нейротоксическое действие на головной мозг [10–12].

В воздушной среде уран может входить в состав мелкодисперсных техногенных аэрозолей (менее 10 мкм в диаметре) [13]. Частицы от 1 нм до 0,45 мкм считаются более подвижными, чем частицы >0,45 мкм [14]. Аэрозольные частицы, в зависимости от диаметра, могут задерживаться в различных отделах дыхательных путей – частицы размером 1–5 мкм могут достигать периферических ветвей бронхов; частицы размером 0,2–1 мкм попадают в легкие [15] и затем в кровь и лимфу. Поэтому изучение урансодержащих

техногенных аэрозолей весьма актуально из-за связанных с ним рисков для здоровья населения.

В настоящее время проводятся работы по изучению связей минералого-геохимических особенностей урансодержащих пород и продуктов их выветривания с их радиэкологическими показателями и оценке медико-биологических последствий и рисков для населения, проживающего в районах с высокой естественной радиацией [16–18]. Однако о биогеохимическом мониторинге содержания U в аэрозолях сообщается редко. Исследование направлено на определение форм нахождения, характера распределения и путей миграции U в составе техногенных аэрозолей на территории мегаполиса (на примере г. Новосибирска).

Описание района исследований

Новосибирск – третий по численности населения город в России, один из наиболее экономически развитых промышленных городов Западной Сибири, который характеризуется радиационно-дестабилизированной окружающей средой. По данным аэро-гамма-спектрометрической съемки, проведенной государственным геологическим предприятием «Березовгеология» в 1988 г., на правобережной части г. Новосибирска выделены площади с контрастными гамма-аномалиями природного и техногенного радиоактивного воздействия (рис. 1).

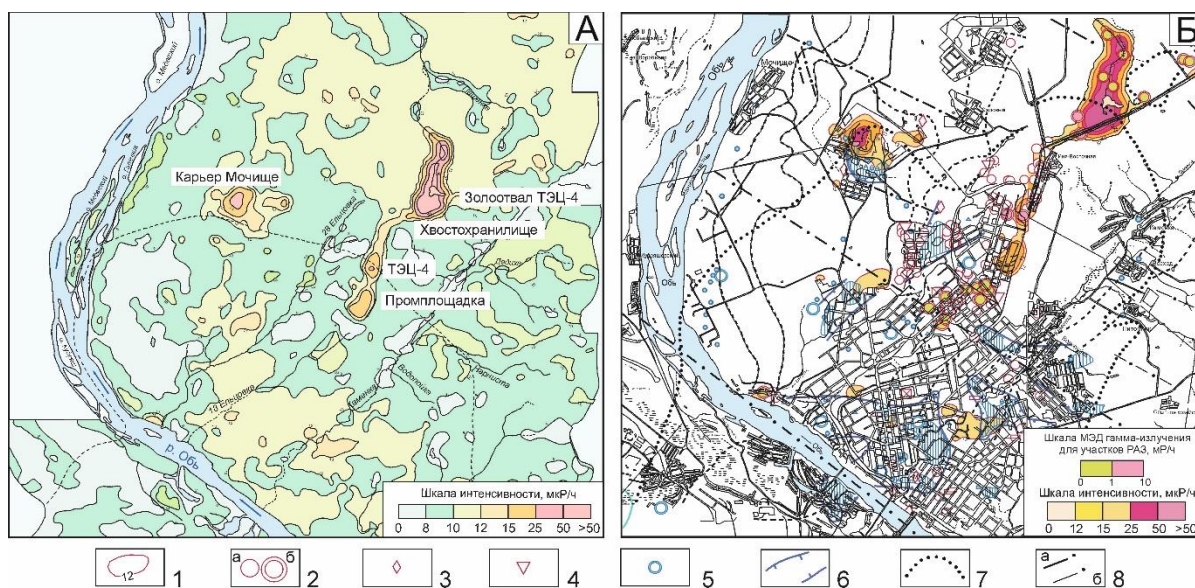


Рис. 1. Картосхемы аэро-гамма поля (А) и радиационной обстановки (Б) правобережной части территории Новосибирска (по материалам ФГУП «Березовгеология»): 1 – участки с повышенной мощностью экспозиционной дозы внешнего гамма-излучения; 2 – участки радиоактивного загрязнения дезактивированные (а), не дезактивированные (б); 3 – повышенные концентрации естественных радионуклидов в стройматериалах; 4 – отходы ядерного производства; 5 – месторождения радоновых вод; 6 – радоноопасные зоны; 7 – контур палеозойских гранитов с повышенным содержанием естественных радионуклидов; 8 – тектонические разломы крупные (а), прочие (б)

Fig. 1. Maps of aero gamma field (A) and radiation situation (B) of the right-bank part territory area of Novosibirsk (according to FSUE «Berezovgeology»): 1 – areas with increased external gamma exposure dose rate; 2 – areas of radioactive contamination decontaminated (a), non-decontaminated (b); 3 – increased concentrations of natural radionuclides in building materials; 4 – waste productions; 5 – radon water deposits; 6 – radon hazardous zones; 7 – contour of Paleozoic granites with increased content of natural radionuclides; 8 – tectonic faults large (a), other (b)

Естественные источники радиоактивности связаны с выходами на дневную поверхность в районах карьеров верхнепалеозойско-раннемезозойских интрузий приобского и барлакского гранитоидных комплексов, характеризующихся высоким содержанием естественных радионуклидов [19]. Ведущая роль в структуре доз облучения населения г. Новосибирска приходится на природные источники ионизирующего излучения за счет облучения Rn и дочерними продуктами его распада. Основными источниками Rn являются специализированные на U высокорadioактивные граниты, проявляющие урановую минерализацию, радоновые воды.

Площади с техногенным радиоактивным воздействием связаны главным образом с функционированием промышленных объектов ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), которые располагаются на правом берегу реки Оби. Здесь локализуются жилые (включая отдельные участки общественно-делового использования) и рекреационные зоны, а на северо-востоке – в промышленной зоне – расположен завод по производству топлива для АЭС и исследовательских реакторов.

В состав предприятия входит промышленная площадка с основным и вспомогательными производствами и территория хвостохранилища. Вопрос, связанный с радиоактивными аэрозольными выбросами от этого предприятия в г. Новосибирске, обсуждался ранее в научной печати [20, 21].

Низкоуровневые радиоактивные отходы предприятия в виде пульпы гидротранспортом передавались в пруд-отстойник овражно-балочного типа. Пруд-отстойник был предназначен для разделения на твердую и жидкую фазы и являлся частью технологического процесса обезвреживания радиоактивных отходов [22, 23]. В донных отложениях в тальвеге заболоченного лога, севернее хвостохранилища, выявлена протяженная геохимическая аномалия U [24]. В настоящее время выполняется комплекс работ по выводу из эксплуатации хвостохранилища. До 2030 г.

планируется осушить пруд-отстойник и засыпать экранирующим слоем золошлаковых отходов. Прогнозируется снижение радиационного воздействия гамма-излучения [25].

Природные и техногенные факторы воздействия на окружающую среду в районе исследований наслаиваются и разделять источники поступления U весьма сложно.

Отбор проб и пробоподготовка

Объектом исследования служили листья деревьев рода тополь (*Populus L.*). Древесная растительность рода тополь широко используется для озеленения жилых и промышленных зон городов России, что позволяет проводить пробоотбор по относительно равномерной сети. Листья тополей являются биомонитором, пассивным планшетом, улавливающим и задерживающим аэрозольные примеси из атмосферы [26].

К преимуществам листовой пластинки тополя как объекта биогеохимических исследований относятся морфологические и анатомические особенности строения: наличие на поверхности клейкого воска, двустороннее расположение устьиц, шероховатая поверхность и относительно большая площадь. По сравнению с другими видами древесной растительности тополь характеризуется наибольшей удельной пылеемкостью и устойчивостью к некоторым загрязнителям, а элементный состав вегетативной массы рекомендуется использовать для определения геохимических особенностей промышленно-урбанизированных территорий [27–30].

Биогеохимические исследования проведены на территории Новосибирска в начале сентября 2014 и 2017 гг. В 2014 г. отобрано 32 пробы на большей части территории города по регулярной сети 4×4 км, в 2017 г. более детально обследовали участки на территории правобережья – 38 проб по сети 1×1 км с локальным сгущением до 0,5×0,5 км. Схема отбора представлена на рис. 2.

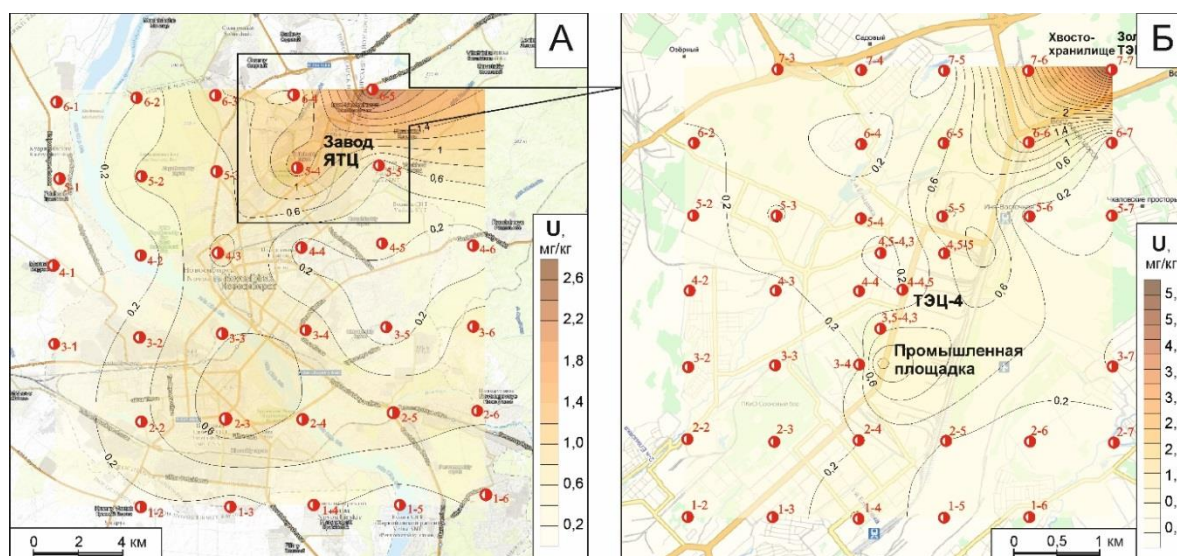


Рис. 2. Биогеохимические ореолы U на территории г. Новосибирска в 2014 г. (А) и 2017 г. (Б). Красные пунсоны – точки отбора проб и их номера [28]

Fig. 2. Biogeochemical halos of uranium concentration in ash from poplar leaves in Novosibirsk in 2014 (A) and 2017 (B). Red punsons – sampling points and their numbers [28]

Для изучения распределения урана по кроне дерева проводили отбор проб листьев с отдельно стоящего дерева по вертикальному профилю кроны (от 2 до 15 м от поверхности земли с интервалом через 1 м). Пробы отбирали с помощью автовышки с западной (подветренной) и восточной (наветренной) сторон относительно направления господствующих ветров. Пробы весом по 100 г отбирали в течение одного дня в сухую погоду после высыхания росы, как детально описано в [28], помещали в крафт-пакеты размером 150×250 мм, затем сушили при комнатной температуре.

Для автордиографии листья сушили в гербарной папке. Листья перед аналитическими исследованиями не промывали для сохранения пылевой составляющей. Пробоподготовка образцов для количественного элементного анализа включала их сухую минерализацию согласно ГОСТ 26929-94, отбор и упаковку навески золы 100±1 мг в алюминиевую фольгу.

Методы анализа

Содержание U в золе листьев тополя определяли инструментальным нейтронно-активационным методом анализа (ИНАА) по аттестованной методике (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ) в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (ТПУ).

Элементный состав минеральных частиц на поверхности листьев, их морфологические особенности, распределение U по поверхности образца изучали на сканирующем электронном микроскопе (SEM) Hitachi S-3400N с приставкой Bruker XFlash 5010 для проведения энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (energy-dispersive X-ray spectroscopy – EDS) в МИНОЦ «Урановая геология» имени Л.П. Рихванова (ТПУ). Для получения информации о фазовом составе пробы по контрасту образцы исследовали при ускоряющем напряжении 20,0 kV с применением детектора обратно-рассеянных электронов (back-scattered electron – BSE) в режиме низкого вакуума (50–100 Па).

Для исследования пространственного распределения и локальной концентрации радиоактивных элементов, находящихся в составе микрочастиц и зафиксированных на поверхности листьев тополя, использовали метод беспленочной цифровой автордиографии с фосфорной пластиной высокого разрешения. Были выбраны образцы листьев с максимальным содержанием U по данным ИНАА. Люминофорный экран-планшет фиксирует и сохраняет фотолюминесцентный рисунок образцов, экспонированных аналогично классической радиографии с рентгеновской пленкой. Этим методом были проанализированы листовые пластинки, в которых по данным ИНАА фиксировались максимальные концентрации U. Точки отбора проб листьев с максимальными концентрациями U расположены по лучу регулярной сетки в направлении «северо-восток – юго-запад» (рис. 2, Б).

Образцы листьев на плотной картонной подложке помещались под полиэтиленовую пленку толщиной 5–8 мкм. Подложку с листьями накрывали фосфорной пластиной и помещали для экспозиции в светонепроницаемый бокс со свинцовым корпусом. Время экспозиции составляло от 50 до 100 часов.

Для контроля работы пластины и ориентации изображений образцов использовался стандарт – радиоактивная метка с ориентирующим рисунком. Для установления плотности распределения радиоактивных частиц с люминесцентным откликом идентифицировали все точки на фотопластине с DLU (цифровая световая единица) выше 1000. Точки, лежащие вне площади поверхности листа, учитывались как фоновые. Погрешность измерений площади фона – 10 %. Полученные изображения обрабатывали с помощью программ OptiQuant и ImageJ. Для анализа распределения радиоактивных частиц на поверхности листа использовали такие параметры, как суммарная фотолюминесценция – DLU и плотность фотолюминесценции – DLU/мм².

Для численного анализа данных биогеохимического мониторинга использовали математическую модель реконструкции поля концентрации примесей, основанную на соотношениях баланса массы легкой примеси в приземном слое атмосферы [31]:

$$q(r, \theta, S) = \frac{\theta}{r^2} e^{-\frac{S}{r}}, \quad (1)$$

где $q(r, \theta, S)$ – концентрация примеси; r – расстояние от источника; θ , S – агрегированные параметры, зависящие от величины эмиссии и высоты источника, характеристик скорости ветра и турбулентного обмена в приземном слое атмосферы.

Величина параметра θ пропорциональна эмиссии источника, значение S непосредственно зависит от высоты источника, и на значительных удалениях от него влияние данного параметра на концентрацию примеси существенно снижается. В этом случае для низких источников и сравнительно больших значений r из соотношения (1) следует приближённая формула:

$$q(r, \theta) = \frac{\theta}{r^2}. \quad (2)$$

Если положение источника необходимо уточнить, то соотношение (2) преобразуется к следующему виду:

$$q(r, \theta, R) = \frac{\theta}{(r - R)^2}, \quad (3)$$

где величина R указывает положение источника на оси r .

Оценку неизвестных параметров θ и R получили методом наименьших квадратов с использованием данных измеренных концентраций.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены данные о содержании U в золе листьев тополя на территории г. Новосибирска в 2014 и 2017 гг., средние концентрации которого составляют 0,46 и 0,58 мг/кг соответственно.

Таблица 1. Статистические параметры содержания U (мг/кг) в золе листьев тополя на территории г. Новосибирска

Table 1. Statistical parameters of uranium content (mg/kg) in ash of poplar leaves in Novosibirsk

Статистические параметры Statistical parameters	2014	2017
Среднее/Arithmetic mean ± error of the mean	0,46±0,09	0,58±0,26
Медиана/Median	0,43	0,18
Стандартное отклонение/Standard deviation	0,51	1,62
Минимум–максимум/Minimum–maximum	0,01–2,69	0,05–10,2
Коэффициент вариации Variation coefficient, %	111	280
Количество проб/Number of samples	32	38

Эти показатели превышают среднее региональное содержание (0,15 мг/кг) в 3–4 раза [32]. Максимальные концентрации U (2,69 мг/кг – в 2014 г. и 10,2 мг/кг – в 2017 г.) обнаружены в золе листьев тополя на северо-восточной окраине г. Новосибирска вдоль Восточного шоссе, на расстоянии 0,8–2,0 км от границы территории хвостохранилища. Коэффициент вариации U характеризует крайне неоднородное распределение элемента в выборках.

В 2014 г. по результатам биогеохимического мониторинга был выделен ореол рассеяния U, с максимальными концентрациями в северо-восточной части

города вблизи промышленной площадки завода ЯТЦ и его хвостохранилища, ТЭЦ-4 и золоотвала (рис. 2). На этой территории по результатам ранее проведенной снеговой съемки [21] в твердом осадке было зафиксировано пониженное значение соотношения изотопов $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, равное 116,9 вместо природного 137,9, что говорит о техногенном источнике их поступления; и аномально низкое Th/U отношение, равное 1,6–1,9. Простирание ореола прослеживалось до 70 км в северо-восточном направлении (по розе ветров). По мере удаления от завода ЯТЦ показатель уран-уранового изотопного соотношения увеличивался, по-видимому, за счет снижения доли техногенно-обусловленного изотопа (^{235}U). В 10-километровой зоне вокруг завода ЯТЦ за счет выбросов твердых техногенных частиц сформировался ореол с содержанием U до 1 г/т [21].

Анализ ретроспективных данных и результатов биогеохимического мониторинга показал, что источники U на правобережной части территории г. Новосибирска в течение трех последних десятилетий существенно не изменились [28].

Распределение концентраций U в листьях по высоте кроны отдельно стоящего тополя в 300 м от промышленной площадки завода имеет поперечный (латеральный) характер (рис. 3).

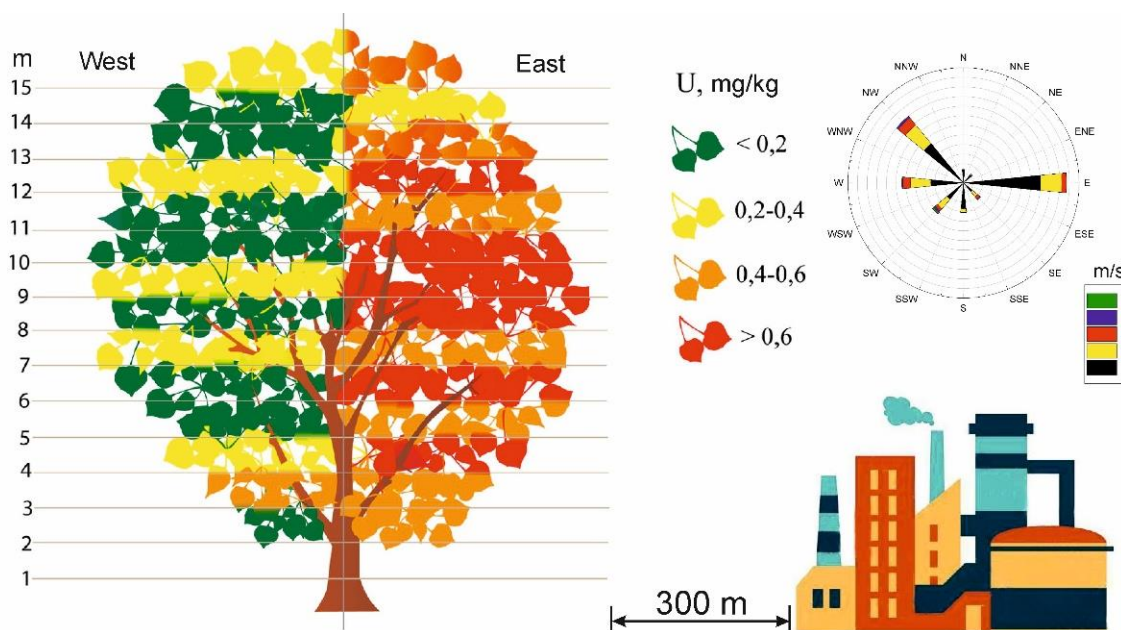


Рис. 3. Распределение U по высоте кроны дерева (мг/кг). Справа – летняя роза ветров
Fig. 3. U distribution through the tree crown height (mg/kg). The summer wind rose is on the right [20]

Содержание U в листьях с наветренной стороны по отношению к источнику в среднем в 2–3 раза выше его содержания с подветренной стороны, что подтверждает высокую пылеулавливающую способность древесной растительности. Максимальные концентрации U отмечены на высоте 4–10 м от поверхности земли. На высоте 14 м с наветренной стороны отмечено уменьшение количества U.

Полученные результаты показывают, что листья тополя служат эффективным комплексным (механическим и фитобиогеохимическим) барьером для тех-

ногенных частиц U в атмосферном воздухе. Деревья аккумулируют загрязняющие вещества намного эффективнее, чем травянистые растения, из-за различий в скорости оседания частиц. По сообщению [33] древесные растения задерживают до 75 % аэрозолей и пыли от общего объема, а травянистые – до 25 % (до четверти). Высокий барьер из зеленых насаждений (до 10 м) может снижать степень загрязнения воздушной среды на 50 %. Мелкие частицы ($d < 10$ мкм) сохраняются преимущественно в неровностях поверхности листовой пластины и в кутикулярном слое

листа. Частицы диаметром $<2,5$ мкм характеризуются наибольшей скоростью движения, как показано в [34]. Мельчайшие частицы легко задерживаются поверхностью листа, закупоривая поры и устьица.

С помощью SEM-EDS анализа на поверхности листьев тополя выявлены микрочастицы оксида U размером от 0,5 до 6 мкм (рис. 4, А, В). В частицах содержание U варьируется в пределах 30–83 %. Углерод входит в состав органического материала и частично присутствует в атмосфере камеры при изучении образцов в низком вакууме,

поэтому в расчетах не учитывался и указан как элемент деконволюции. Для уточнения элементного состава частиц U последовательно снимали два энергетических спектра – спектр частицы (рис. 4, С, Е) и спектр матрицы (рис. 4, D). Этот методический прием позволяет частично нивелировать рассеяние электронного пучка до и после взаимодействия с поверхностью исследуемого образца. Дальнейшее сравнение спектров дает возможность определить вклад матрицы в спектре интересующих частиц.

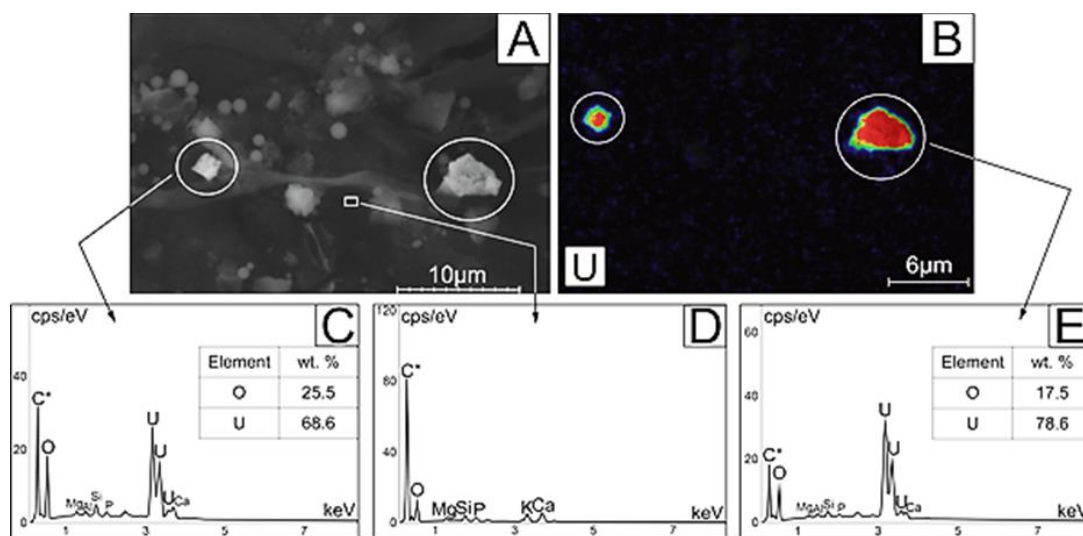


Рис. 4. Микрочастицы оксида U на поверхности листа тополя в зоне влияния хвостохранилища завода ЯТЦ (А) и их EDS-спектры (С, Е), EDS-спектр матрицы листа (D); распределение U в частицах (В)

Fig. 4. Microparticles of uranium oxide on the surface of a poplar leaf in the zone of influence of the NFC plant tailing pond (A) and their EDS-spectra (C, E), EDS-spectrum of the leaf matrix (D); uranium distribution in particles (B)

Таблица 2. Плотность распределения точек с люминесцентным откликом на поверхности листьев тополя в районе хвостохранилища завода ЯТЦ

Table 2. Density of distribution of points with a luminescent response on the poplar leaves surface in the area of the tailings of the NFC plant

Точка отбора пробы Sampling point	Количество листьев (измерений) Number of leaves (measurements)	Описание/Description	
		Количество точек Number of points	DLU/mm ² в час DLU/mm ² per hour
5-5	4	1	2000
		3–4	~1000–1200
		5–10	~200–500
		10–50	~10–20
7-6	3	1	7000
		2–3	~1000–2000
		5–7	~500–900
		10–15	~100–400
7-7	3 (6)*	1	аналогично т. 7-6 с максимумом 4000
		2–3	similar to point 7-6 with a maximum of 4000
		5–7	
		10–15	
Фон Background	10 для каждой серии экспериментов 10 for each series of experiments	1–2	~400–500
		10–20	~40–50
		10–20	~10–15

* – измерения проводились с двух сторон листа
 measurements were taken on both sides of the leaf.

Плотность распределения радиоактивных микрочастиц на поверхности листьев тополя определена методом бесплёночной автордиографии (табл. 2). Были выбраны листья в точках отбора с максимальным содержанием U по результатам ИНАА.

Для точек отбора на северо-востоке г. Новосибирска отмечено максимальное превышение количества треков с высоким люминесцентным откликом на поверхности листа по сравнению с фоном. Средняя плотность частиц, рассчитанная в пределах площади листа в расчете на среднюю поверхность листа, от 10 до 30 % выше, чем плотность частиц на участках фона. Размеры таких частиц не более 20 мкм. Существенной разницы между абаксиальной (нижней) и адаксиальной (верхней) сторонами листовых пластинок не выявлено. Характерный рисунок микрочастиц с люминесцентным откликом не совпадает с анатомическим строением листа и носит рассеянный характер (рис. 5), что свидетельствует о преобладающем аэрозольном поступлении U.

В целом показано, что метод бесплёночной радиогграфии может быть использован как диагностический для подтверждения природы радиоактивных частиц на поверхности биогеохимических планшетов. Расширенное использование автордиографии с эффективным экранированием альфа- или бета-излучения, применением количественных стандартов может су-

ществено улучшить качество информации о характере распределения радиоактивных частиц и даже

дать общее представление об их нуклидном составе.

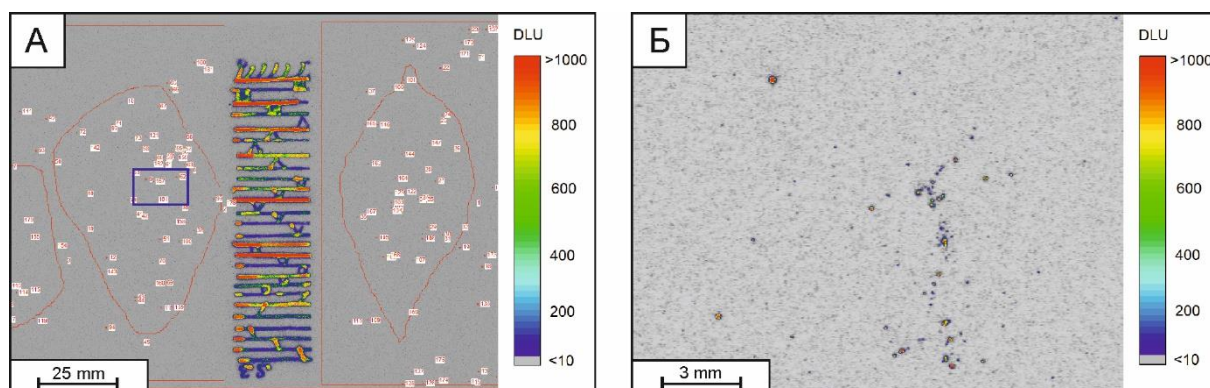


Рис. 5. Результаты автордиографии листьев тополя, отобранных на северо-восточной окраине г. Новосибирска: А) участок пластины с контрольным образцом и листьями (силуэт листьев обведен красной линией), красные точки с цифрой – точки с люминесценцией >1000 DLU; Б) участок пластины, обозначенный синим прямоугольником на рис. 2, А, с максимальной плотностью точек с люминесцентным откликом выше 1000 DLU

Fig. 5. Results of autoradiography of poplar leaves selected on the northeastern outskirts of Novosibirsk: А) section of the plate with a control sample and leaves (the silhouette of the leaves is circled with a red line), red dots with a digit – points with luminescence >1000 DLU; Б) section of the plate indicated by a blue rectangle in Fig. 2, А, with a maximum density of dots with a luminescent response above 1000 DLU

Оценивать состояние воздушного бассейна позволяют методы математического моделирования процессов рассеяния элементов с аэрозолями. Комплекс информации о выбросах загрязняющих веществ, закономерностях их рассеивания в атмосфере, объединенной в математической модели, позволяет оценить существующие уровни загрязнения и спрогнозировать динамику их развития.

По мере удаления от хвостохранилища завода ЯТЦ на юг наблюдается достаточно монотонное снижение

концентраций U в листьях тополя, что дает основание для выявления локализации источника выноса U. Для этого использовали метод численного анализа модели реконструкции полей выпадений аэрозольных примесей в виде соотношения (3) и предположение о малой высоте источника, в связи с чем использовали дополнительные опорные точки наблюдений. Такой подход был ранее успешно апробирован на ряде других объектов [31]. Численное восстановление концентраций U было проведено для двух направлений (рис. 6).

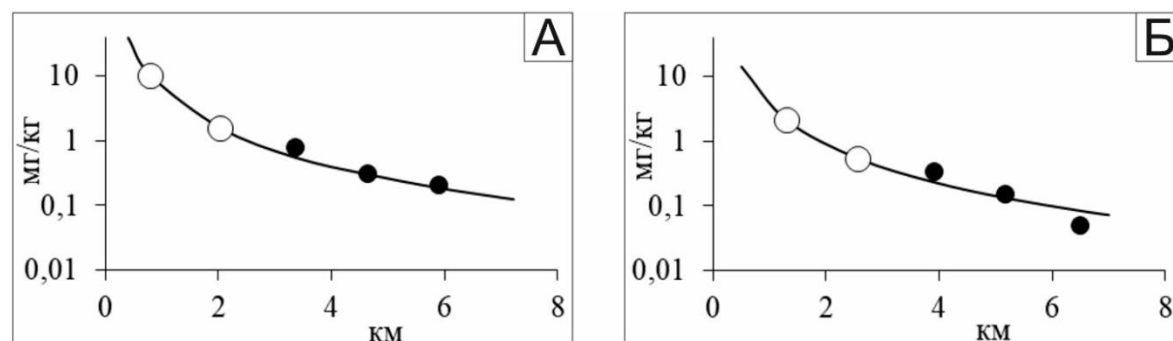


Рис. 6. Измеренные и численно восстановленные содержания U в листьях тополя в направлении 1 (А) и направлении 2 (Б); ○, ● – опорные и контрольные точки измерений, ———— – результаты моделирования

Fig. 6. Measured and numerically reconstructed U contents in poplar leaves in direction 1 (А) and direction 2 (Б); ○, ● – reference and control points of measurements; ———— – simulation results

Первое направление включало точки (7-7), (6-6), (5-5), (4-4), (3-3), опорные точки (7-7) и (6-6). Второе направление включало точки (7-6), (6-5), (5-4), (4-3), (3-2) с опорными точками (7-6) и (6-5). Для проведения оценки выноса аэрозолей U были использованы результаты измерений в опорных точках. Применительно к направлению 1 были получены следующие оценки параметров модели (3): $\theta_1=6,53$, $R_1=0,8$ км; для направления 2 – $\theta_2=3,57$, $R_2=1,31$ км. С помощью

оценки и сравнения параметров θ_1 и θ_2 установлено, что вынос U в направлении 2 в 1,8 раза ниже, чем в направлении 1; оценка параметров R_1 и R_2 показала, что точка пересечения линий направлений 1 и 2 соответствует примерному положению источника эмиссии U.

Предложенную модель реконструкции полей выпадений аэрозольных примесей можно применять для оперативного контроля атмосферных поступлений U

от наземных источников с использованием небольшого числа опорных точек биогеохимического мониторинга. В табл. 3 приведено сравнение результатов оценки по математической модели (формула (3)) с результатами измерений концентраций U на двух маршрутах наблюдений.

Таблица 3. Измеренные и рассчитанные концентрации U (мг/кг) в юго-западных направлениях выноса от хвостохранилища завода ЯТЦ

Table 3. Measured and calculated U concentrations (mg/kg) in the south-western directions of removal from the NFC plant tailings dump

Номер точки Point number	Расстояние от источника, км Distance from the source, km	Измерение/расчёт Measurement/calculation	Номер точки Point number	Расстояние от источника, км Distance from the source, km	Измерение/расчёт Measurement/calculation
(7-7)*	0,8	10,2/-	(7-6)*	1,31	2,08/-
(6-6)*	2,04	1,54/-	(6-5)*	2,57	0,54/-
(5-5)	3,37	0,81/0,55	(5-4)	3,90	0,34/0,24
(4-4)	4,63	0,31/0,31	(4-3)	5,16	0,15/0,13
(3-3)	5,89	0,21/0,19	(3-2)	6,49	0,05/0,09

* – опорные точки/reference points.

Анализ полученных данных (табл. 3) показывает достаточно высокий уровень согласия расчетов с результатами биогеохимического мониторинга в контрольных точках наблюдений. Определенные расхождения могут быть связаны с несовпадением положения источника с маршрутом отбора проб.

Комплексное использование результатов биогеохимического мониторинга, полученных аналитических измерений и математического моделирования является наиболее эффективным подходом для оценки и описания распространения загрязнителей в воздушной среде, что создает возможность для разработки и корректировки планов размещения объектов капитального строительства и проведения санитарно-гигиенических мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голохваст К.С. Нано- и микроразмерные частицы атмосферных взвесей и их экологический эффект (на примере городов юга Дальнего Востока): дис. ... д-ра биол. наук. – Владивосток, 2014. – 310 с.
2. Alemayehu Y.A., Asfaw S.L., Terfie T.A. Exposure to urban particulate matter and its association with human health risks // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 24. – P. 1–16.
3. Formation and geological sequestration of uranium nanoparticles in deep granitic aquifer / Y. Suzuki, H. Mukai, T. Ishimura, T.D. Yokoyama, S. Sakata, T. Hirata, T. Iwatsuki, T. Mizuno // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – P. 1–6.
4. Bioreduction of uranium: environmental implications of a pentavalent intermediate / J.C. Renshaw, L.J.C. Butchins, F.R. Livens, I. May, J.M. Charnock, J.R. Lloyd // *Environmental science & technology*. – 2005. – V. 39 (15). – P. 5657–5660.
5. Emerging health risks and underlying toxicological mechanisms of uranium contamination: Lessons from the past two decades / M. Ma, R. Wang, L. Xu, M. Xu, S. Liu // *Environment International*. – 2020. – V. 145. – P. 106–107.
6. Remediation techniques for uranium removal from polluted environment – review on methods, mechanism and toxicology /

Заключение

В северо-восточной части территории г. Новосибирска (в промышленной зоне завода ЯТЦ и его хвостохранилища на окраине города) по результатам биогеохимического мониторинга выявлен ореол аэрозольного рассеяния U, среднее содержание которого превышает региональный уровень концентрации в 3–4 раза. Вертикальное распределение аэрозолей U (до 14 м) зависит от розы ветров и расположения биомонитора относительно источника выбросов – с наветренной стороны содержание U в листьях тополя выше, чем с подветренной – в 2–3 раза.

Ветровой перенос урансодержащих аэрозолей подтвержден методами электронной микроскопии, автордиографии и хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных по изменению концентрации U в листьях тополя расстоянием от потенциального источника его эмиссии.

Оценка состояния воздушной среды с помощью численного анализа модели реконструкции выпадения аэрозолей показала согласование измеренных концентраций U в ходе биогеохимического мониторинга и вычисленных в контрольных точках наблюдений и их распространения.

Результаты биогеохимических исследований и данные математического моделирования рассеяния U позволили установить распределение и пути миграции U, обусловленные ветровым переносом. Предложенная численная модель полей выпадений аэрозольных примесей может применяться для оперативного контроля атмосферных поступлений U от наземных источников с использованием небольшого числа опорных точек биогеохимического мониторинга.

Отбор и количественный анализ биогеохимических проб частично были выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров. Математическая обработка данных выполнялась в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН (0251-2021-0003). Интерпретация результатов выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 20-64-47021). Изучение форм нахождения урана на поверхности листьев методом автордиографии выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60030.

7. S. Akash, B. Sivaprakash, V.C.V. Raja, R. Rajamohan, G. Muthusamy // *Environmental Pollution*. – 2022. – V. 302. – P. 1–15.
7. Uranium concentration in umbilical cord may increase the risk for orofacial clefts / Y. Guo, L. Liu, W. Nia, Y. Pana, Y. Chena, Q. Xieb, Y. Liub, L. Jina, Z. Lia, A. Rena, L. Wang // *Environmental Research*. – 2020. – V. 182. – P. 1–6.
8. Lin Y.W. Uranyl binding to proteins and structural-functional impacts // *Biomolecules*. – 2020. – V. 10. – P. 1–16.
9. Depleted uranium induces disruption of energy homeostasis and oxidative stress in isolated rat brain mitochondria / F. Shaki, M. Hosseini, M. Ghazikhansari, J. Pourahmad // *Metallomics*. – 2013. – V. 5 (6). – P. 736–744.
10. Differential response of human T-lymphocytes to arsenic and uranium / E.J. Dashner-Titusa, J.R. Schilzb, K.A. Simmons, T.R. Duncana, S.C. Alvarezc, L.G. Hudsona // *Toxicology Letters*. – 2020. – V. 333. – P. 269–278.
11. Cytoplasmic aggregation of uranium in human dopaminergic cells after continuous exposure to soluble uranyl at non-cytotoxic concentrations / A. Carmona, F. Porcaro, A. Somogyi, S. Roudeau, F. Domart, K. Medjoubi, M. Aubert, H. Isnard, A. Nonell, A. Rinzel, E. Paredes, C. Vidaud, V. Malard, C. Bresson, R. Ortega // *NeuroToxicology*. – 2021. – V. 82. – P. 35–44.

12. Exploring the toxicology of depleted uranium with *Caenorhabditis elegans* / M. Lu, H. Li, Y. Li, Y. Lu, H. Wang, X. Wang // *ACS Omega*. – 2020. – V. 5. – P. 12119–12125.
13. Monitoring of ultra-trace uranium and thorium in six-grade particles / X. Shao, Y. Xu, Y. Zhang, L. Yin, X. Kong, Y. Ji // *Chemosphere*. – 2019. – V. 233. – P. 76–80.
14. Lind O.C., Tschiersch J., Salbu B. Nanometer-micrometer sized depleted uranium (DU) particles in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – V. 211. – P. 1–8.
15. A review of biological effects and treatments of inhaled depleted uranium aerosol / Y. Ran, S. Wang, Y. Zhao, J. Li, X. Ran, Y. Hao // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – V. 222. – P. 1–11.
16. Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов / А.Н. Злобина, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, И.М. Фархутдинов, Н. Ванг // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 111–125.
17. Distribution of radioactive and rare-earth elements in ferralsols of the Guangdong Province (China) / A.N. Zlobina, L.P. Rikhvanov, N.V. Baranovskaya, N. Wang, I.M. Farhutdinov // *Eurasian Soil Science*. – 2019. – V. 52. – № 6. – P. 644–653.
18. The nature of high soil radioactivity in Chinese Province Guangdong / L.P. Rikhvanov, A.N. Zlobina, N. Wang, I.A. Matveenko // *Procedia Chemistry*. – 2014. – V. 10. – P. 460–466.
19. Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции*. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. – С. 461–464.
20. Артамонова С.Ю. Уран в техногенных аэрозолях промышленных районов Новосибирска // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2012. – Т. 20. – № 5. – С. 507–513.
21. Артамонова С.Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223.
22. Геохимическое моделирование поведения урана в подземных водах вблизи шламохранилищ при биоремедиации / А.В. Сафонов, А.Е. Богуславский, К.А. Болдырев, О.Л. Гаськова, О.С. Наймушина, Н.М. Попова // *Геохимия*. – 2021. – Т. 66. – № 1. – С. 63–72.
23. Биогенные факторы формирования геохимических урановых аномалий в районе шламохранилища Новосибирского завода химконцентратов / А.В. Сафонов, А.Е. Богуславский, К.А. Болдырев, Л.В. Зайцева // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – № 6. – С. 644–650.
24. Богуславский А.Е. Формирование вторичных геохимических аномалий в зоне воздействия пунктов хранения РАО (на примере хвостохранилища ПАО «НЗХК») // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции*. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. – С. 129–133.
25. Отчёт по экологической безопасности ПАО «НЗХК» за 2020 год // Новосибирский завод химконцентратов: официальный сайт. – Новосибирск, 2021. URL: <http://www.nccp.ru/press/archiv/econccp-2020.pdf> (дата обращения: 10.07.2022).
26. Дорохова Л.А., Юсупов Д.В., Рихванов Л.П. Геохимические и минералогические индикаторы ветровой дефляции на урбанизированных территориях с использованием листьев тополя // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 137–146.
27. Ташекова А.Ж., Торпов А.С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 114–124.
28. Юсупов Д.В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 344 с.
29. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis / D.V. Yusupov, N.V. Baranovskaya, Yu.V. Robertus, V.V. Radomskaya, L.M. Pavlova, A.F. Sudyko, L.P. Rikhvanov // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – V. 27. – P. 27111–27123.
30. Дорохова Л.А. Биогеохимическая индикация влияния алюминиевого и уранодобывающего производств на прилегающие территории по данным изучения листьев тополя: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 19 с.
31. Экспериментальные исследования и численный анализ процессов атмосферных выносов урана с территорий хвостохранилищ / В.Ф. Рапута, Д.В. Юсупов, Т.В. Ярославцева, Л.А. Дорохова // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции*. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – Т. 1. – С. 499–503.
32. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, Н.В. Барановская, Л.А. Дорохова // *Разведка и охрана недр*. – 2019. – № 2. – С. 61–68.
33. Assessment of the ability of roadside vegetation to remove particulate matter from the urban air / B. Kończak, M. Cempa, Ł. Pierzchała, M. Deska // *Environmental Pollution*. – 2020. – V. 268. – P. 1–36.
34. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment // *Environmental Pollution*. – 2005. – V. 113. – P. 157–167.

Поступила 05.08.2022 г.

Прошла рецензирование 18.11.2022 г.

Информация об авторах

Дорохова Л.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Юсупов Д.В., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и природопользования Амурского государственного университета.

Торпов А.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории дозиметрии и радиоактивности окружающей среды кафедры радиохимии химического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Рапута В.Ф., доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Павлова Л.М., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Радомская В.И., кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Судыко А.Ф., инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.42:546.49:581.1:504.7(571.14)

ANALYSIS OF URANIUM DISTRIBUTION IN AEROSOL DEPOSITS ON THE TERRITORY OF NOVOSIBIRSK

Lyubov A. Dorokhova¹,
liubov.ad@yandex.ru

Dmitry V. Yusupov²,
yusupovd@mail.ru

Andrey S. Toropov³,
trop990@gmail.com

Vladimir F. Raputa⁴,
raputa@sscc.ru

Lyudmila M. Pavlova¹,
pav@ascnet.ru

Valentina I. Radomskaya¹,
radomskaya@ascnet.ru

Alexander F. Sudyko⁵,
sudykoaf@yandex.ru

Natalia V. Baranovskaya⁵,
nata@tpu.ru

¹ Institute of Geology & Nature Management FEB RAS,
1, Relochniy lane, Blagoveshchensk, 675000, Russia.

² Amur State University,
21, Ignatievskoe highway, Blagoveshchensk, 675027, Russia.

³ Lomonosov Moscow State University,
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia.

⁴ Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
6, Akad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁵ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Biogeochemical indication (by plants) of the state of the environment is widely used in geoecological studies of territories. It allows identifying the sources of anthropogenic impact, the boundaries of the zone of non-accidental emissions of large industrial enterprises, including nuclear fuel cycle facilities. A complex of laboratory and mathematical methods was used to estimate U aerosol deposition on the urbanized territory as a result of the regular activity of the nuclear fuel cycle enterprise.

The aim of the research is to establish the nature of distribution, forms of location and pathways of migration of uranium in the zone of influence of the nuclear fuel cycle enterprise (on the example of Novosibirsk) according to the sampling of poplar leaves.

Methods. Biogeochemical survey of the territory was carried out. The elemental composition of poplar leaf ash was studied by instrumental neutron activation analysis. The elemental composition of particles on the leaf surface was studied using a scanning electron microscope with X-ray spectral analysis. U migration pathway was determined by autoradiography. Numerical analysis of the spatial distribution of uranium concentration was performed based on the mass balance ratios of a light impurity in the surface layer of the atmosphere. The results obtained were processed using descriptive statistics.

Results. The data on the distribution patterns and migration pathways of U in the zone of influence of nuclear fuel cycle facilities in the territory of Novosibirsk were obtained. Highly contrasting biogeochemical halos of U were identified in the northeastern part of the city. Quantitative changes of U concentrations in the southern directions of atmospheric U removal from the solid radioactive waste tailing pond were determined. The character of distribution of U concentrations over the height of tree crowns in the vicinity of the nuclear fuel cycle enterprise was studied – on the windward side from its industrial site the U concentration in samples of poplar leaves is 2–3 times higher than on the leeward side. Mineral phases of U oxide with sizes from 0,5 to 6 microns were fixed on the leaves surface. The windward pathway of U entry was established.

Key words:

uranium, aerosols, wind transport, poplar leaves, Novosibirsk, neutron activation analysis, SEM-EDS, autoradiography, mathematic modeling.

Selection and quantitative analysis of biogeochemical samples were partially performed as part of the program for increasing TPU competitiveness among the world's leading research centers. Mathematical data processing was carried out within the framework of the state task for ICMMG SB RAS (no. 00251-2021-0003). The interpretation of the results – within the framework of the grant of the Russian Science Foundation (project no. 20-64-47021). The study of the uranium forms on the leaves surface using by autoradiography was supported by the RFBR, project no. 19-33-60030.

REFERENCES

1. Golohvast K.S. *Nano- i mikrorazmernye chastitsy atmosferykh vzvesey i ikh ekologicheskiy effekt (na primere gorodov yuga Dalnego Vostoka)*. Dis. Dokt. nauk [Nano- and micro-sized particles of atmospheric suspension and their environmental effects (by example of cities in the South of the Far East)]. Dr. Diss.]. Vladivostok, 2014. 310 p.
2. Alemayehu Y.A., Asfaw S.L., Terfie T.A. Exposure to urban particulate matter and its association with human health risks. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 24, pp. 1–16.

3. Suzuki Y., Mukai H., Ishimura T., Yokoyama T.D., Sakata S., Hirata T., Iwatsuki T., Mizuno T. Formation and geological sequestration of uranium nanoparticles in deep granitic aquifer. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 1–6.
4. Renshaw J.C., Butchins L.J.C., Livens F.R., May I., Charnock J.M., Lloyd J.R. Bioreduction of uranium: environmental implications of a pentavalent intermediate. *Environmental science & technology*, 2005, vol. 39 (15), pp. 5657–5660.
5. Ma M., Wang R., Xu L., Xu M., Liu S. Emerging health risks and underlying toxicological mechanisms of uranium contamination: lessons from the past two decades. *Environment International*, 2020, vol. 145, pp. 106–107.
6. Akash S., Sivaprakash B., Raja V.C.V., Rajamohan R., Muthusamy G. Remediation techniques for uranium removal from polluted environment – review on methods, mechanism and toxicology. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 302, pp. 1–15.
7. Guo Y., Liu L., Nia W., Pana Y., Chen A., Xie Q., Liub Y., Jina L., Lia Z., Rena A., Wang L. Uranium concentration in umbilical cord may increase the risk for orofacial clefts. *Environmental Research*, 2020, vol. 182, pp. 1–6.
8. Lin Y.W. Uranyl binding to proteins and structural-functional impacts. *Biomolecules*, 2020, vol. 10, pp. 1–16.
9. Shaki F., Hosseini M., Ghazikhansari M., Pourahmad J. Depleted uranium induces disruption of energy homeostasis and oxidative stress in isolated rat brain mitochondria. *Metallomics*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 736–744.
10. Dashner-Titusa E.J., Schilzb J.R., Simmons K.A., Duncana T.R., Alvarez S.C., Hudson L.G. Differential response of human T-lymphocytes to arsenic and uranium. *Toxicology Letters*, 2020, vol. 333, pp. 269–278.
11. Carmona A., Porcaro F., Somogyi A., Roudeau S., Domart F., Medjoubi K., Aubert M., Isnard H., Nonell A., Rincel A., Paredes E., Vidaud C., Malard V., Bresson C., Ortega R. Cytoplasmic aggregation of uranium in human dopaminergic cells after continuous exposure to soluble uranyl at non-cytotoxic concentrations. *Neurotoxicology*, 2021, vol. 82, pp. 35–44.
12. Lu M., Li H., Li Y., Lu Y., Wang H., Wang X. Exploring the toxicology of depleted uranium with *Caenorhabditis elegans*. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, pp. 12119–12125.
13. Shao X., Xu Y., Zhang Y., Yin L., Kong X., Ji Y. Monitoring of ultra-trace uranium and thorium in six-grade particles. *Chemosphere*, 2019, vol. 233, pp. 76–80.
14. Lind O.C., Tschiersch J., Salbu B. Nanometer-micrometer sized depleted uranium (DU) particles in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 211, pp. 1–8.
15. Ran Y., Wang S., Zhao Y., Li J., Ran X., Hao Y. A review of biological effects and treatments of inhaled depleted uranium aerosol. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 222, pp. 1–11.
16. Zlobina N.A., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Farkhutdinov I.M., Wang N. Radioecological hazard for the population living in the regions with high radioactive granites. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 111–125. In Rus.
17. Zlobina A.N., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Wang N., Farhutdinov I.M. Distribution of Radioactive and Rare-Earth Elements in Ferral soils of the Guangdong Province (China). *Eurasian Soil Science*, 2019, vol. 52, no. 6, pp. 644–653.
18. Rikhvanov L.P., Zlobina A.N., Wang N., Matveenko I.A. The Nature of High Soil Radioactivity in Chinese Province Guangdong. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 460–466.
19. Roslyakov N.A., Zhmodik S.M., Pakhomov V.G. Estestvennye radionuklidy v geologicheskoy srede Novosibirskoy oblasti [Natural radionuclides in the geological environment of the Novosibirsk region]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in environment. Proc. of IV International conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013, pp. 461–464.
20. Artamonova S.Yu. Uran v tekhnogenykh aerolyakh promyshlennykh rayonov Novosibirsk [Uranium in technogenic aerosols from industrial areas of Novosibirsk]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2012, vol. 20, no. 5, pp. 507–513.
21. Artamonova S.Yu. Uranium and thorium in aerosol fallout of Novosibirsk city and its vicinity (West Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 212–223. In Rus.
22. Safonov A.V., Popova N.M., Boguslavsky A.E., Gaskova O.L., Naimushina O.S., Boldyrev K.A. Geochemical modeling of the uranium behavior in groundwater near the sludge storages during bioremediation. *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 1, pp. 56–65.
23. Safonov A.V., Boguslavskii A.E., Boldyrev K.A., Zayceva L.V. Biogenic factors of formation of geochemical uranium anomalies near the sludge storage of the Novosibirsk chemical concentrate plant. *Geochemistry International*, 2019, vol. 57, no. 6, pp. 709–715.
24. Boguslavskiy A.E. Formirovaniye vtorichnykh geokhimicheskikh anomalii v zone vozdeystviya punktov khraneniya RAO (na primere khvostokhranilishcha PAO «NZKHK») [Formation of secondary geochemical anomalies in the impact zone of RW storage facilities (by the example of PJSC NCCP tailings pond)]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in environment. Proc. of V International conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2016, pp. 129–133.
25. Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO «NZKHK» za 2020 god [Environmental Safety Report of PJSC «NCCP» for 2020]. *Novosibirskiy zavod khimkontsentratov*. Novosibirsk, 2021. Available at: <http://www.nccp.ru/press/archiv/> (accessed 10 July 2022).
26. Dorokhova L.A., Yusupov D.V., Rikhvanov L.P. Geochemical and mineral indicators of deflation in urban areas using poplar leaves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 33, no. 11, pp. 137–146. In Rus.
27. Tashekova Ah.Zh., Toropov A.S. Application of leaves as bio-indicators of urban environment state. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 114–124. In Rus.
28. Yusupov D.V. *Metodologiya biogeokhimicheskoy indikatsii urbanizirovannykh i gornopromyshlennykh territoriy na osnove analiza drevnesnoy rastitelnosti*. Diss. Dokt. nauk [Methodology of biogeochemical indication of urbanized and mining areas based on analysis of woody vegetation. Dr. Diss.] Tomsk, 2020. 344 p.
29. Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Yu.V., Radomskaya V.V., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 27111–27123.
30. Dorokhova L.A. *Biogeokhimicheskaya indikatsiya vliyaniya aluminievogo i uranodobyvayushchego proizvodstva na prilagayushchie territorii po dannym izucheniya listev topolya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Biogeochemical indication of the impact of aluminum and uranium mining on adjacent areas based on the study of poplar leaves. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2022. 19 p.
31. Raputa V.F., Yusupov D.V., Yaroslavtseva T.V., Dorokhova L.A. Eksperimentalnye issledovaniya i chislenny analiz protsessov atmosferykh vynosov urana s territoriy khvostokhranilishch [Experimental studies and numerical analysis of atmospheric processes of uranium removal from tailings]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in environment. Proc. of VI International conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2021. Vol. 1, pp. 499–503.
32. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F., Baranovskaya N.V., Dorokhova L.A. Radioactive elements (thorium, uranium) in the poplar leaves on urban areas and their indicator role. *Prospect and protection of mineral resources*, 2019, no. 2, pp. 61–68. In Rus.
33. Kończak B., Cempa M., Pierzchała Ł., Deska M. Assessment of the ability of roadside vegetation to remove particulate matter from the urban air. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 268 (Pt B), pp. 1–36.
34. Freer-Smith P.H., Beckett K.P., Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *tricarpa* ‘Beaupré’, *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2005, vol. 113, pp. 157–167.

Received: 5 August 2022.

Reviewed: 18 November 2022.

Information about the authors

Lyubov A. Dorokhova, Cand. Sc., research scientist, Institute of Geology & Nature Management FEB RAS.

Dmitry V. Yusupov, Dr. Sc., professor, Amur State University.

Andrey S. Toropov, Cand. Sc., senior researcher, Lomonosov Moscow State University.

Vladimir F. Raputa, Dr. Sc., chief researcher, Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS.

Lyudmila M. Pavlova, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology & Nature Management FEB RAS.

Valentina I. Radomskaya, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology & Nature Management FEB RAS.

Alexander F. Sudyko, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.