

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА И ТОРИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ПРАВОБЕРЕЖЬЯ г. НОВОСИБИРСКА ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ЛИСТЬЕВ ТОПОЛЯ

Д. В. Юсупов<sup>1,2</sup>, Л. А. Дорохова<sup>3</sup>, В. Ф. Рапута<sup>4</sup>, А. С. Торопов<sup>5</sup>,  
А. Ф. Судыко<sup>2</sup>, Е. М. Турсуналиева<sup>2</sup>, Н. В. Барановская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Амурский государственный университет

Благовещенск, Россия, yusupovd@mail.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Томск, Россия, sudykoaf@yandex.ru, natalya.baranovs@mail.ru

<sup>3</sup>Институт геологии и природопользования ДВО РАН

Благовещенск, Россия, liubov.ad@yandex.ru

<sup>4</sup>Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Новосибирск, Россия, raputa@sscc.ru

<sup>5</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Москва, Россия, torop990@gmail.com

## DISPERSION OF URANIUM AND THORIUM ON THE RIGHT BANK TERRITORY OF NOVOSIBIRSK ACCORDING TO ANALYSIS OF POPLAR LEAVES

D. V. Yusupov<sup>1,2</sup>, L. A. Dorokhova<sup>3</sup>, V. F. Raputa<sup>4</sup>, A. S. Toropov<sup>5</sup>,  
A. F. Sudyko<sup>2</sup>, E. M. Tursunaliyeva<sup>2</sup>, N. V. Baranovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Amur State University

Blagoveshchensk, Russia, yusupovd@mail.ru

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University

Tomsk, Russia, sudykoaf@yandex.ru, natalya.baranovs@mail.ru

<sup>3</sup>Institute of Geology and Nature Management FEB RAS

Blagoveshchensk, Russia, liubov.ad@yandex.ru

<sup>4</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia, raputa@sscc.ru

<sup>5</sup>Lomonosov Moscow State University

Moscow, Russia, torop990@gmail.com

In the course of biogeochemical monitoring studies using a set of methods, data were obtained on the distribution of Th and U in the poplar leaves (*P. balsamifera* L.) on the territory of Novosibirsk. In the right-bank part of the megapolopolis, the distribution of Th is influenced by the geologic factor – outcrops of Paleozoic granites characterized by an increased content of natural radionuclides. The U distribution is affected by the technogenic factor localized near the nuclear fuel cycle facility. The quantitative regularities of changes in U concentrations as a result of the transport of aerosols from an unorganized ground source have been established.

### Введение

Новосибирск входит в число городов с радиационно-дестабилизированной обстановкой окружающей среды, обусловленной техногенными (Артамонова, 2020) и природными факторами (Злобина, 2019). Правобережный сектор мегаполиса представляет собой сложно организованную урбанизированную территорию, на которой сочетаются ряд функциональных зон. В результате исследований, проведенных в 1991–1997 гг. «ГПП Березовгеология», в северной части города выделены несколько участков с аномально высоким гамма-полем, вызванным радиоактивным загрязнением, связанным с объектами производственной деятельности крупного предприятия ядерно-топливного цикла, а также в районах размещения карьеров в пределах массива в верхне-

палеозойских гранитов, характеризующиеся повышенными концентрациями естественных радионуклидов (А. А. Анцырев, 1997ф).

Цель работы – оценить проявленность природных и техногенных факторов окружающей среды на территории правобережья г. Новосибирска по содержанию и распределению радиоактивных элементов в листьях тополя в современный период.

### Материалы и методы

Объектом исследования служили листья тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), которые используются как естественный планшет, аккумулирующий пыль и аэрозоли из приземного атмосферного воздуха (Юсупов и др., 2019).

Биогеохимические исследования на территории г. Новосибирска проведены в 2014 и 2017 гг. Пробы листьев отобраны по сети 4 × 4 км (32 пробы) в 2014 г.

и на детальном участке по сети  $1 \times 1$  км (38 проб) со сгущением до 0,5 км вблизи предприятий на территории правобережья в 2017 г. Для упаковки и сушки проб использовали пакеты из крафт-бумаги. Листья не промывали. Часть пробы листьев озоляли (ГОСТ 26929-94).

Содержание 28 химических элементов, включая U и Th, в образцах золы листьев тополя определяли методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) по аттестованной методике (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ) в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в Томском политехническом университете (ТПУ). Масса навески золы составляла  $100 \pm 1$  мг. Навески проб заворачивали в алюминиевую фольгу известного состава и облучали.

Изучение элементного состава микрочастиц на поверхности сухих листьев тополя проводили в отделении геологии ТПУ на сканирующем электронном микроскопе «Hitachi S-3400N» с приставкой «Bruker XFlash 5010», которая обеспечивала проведение рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Для изучения препаратов применяли детектор обратно-рассеянных электронов. Изучение препаратов проводили в режиме низкого вакуума. Нижний предел обнаружения химических элементов РСМА – 0,1 %.

Для изучения пространственного распределения радиоактивных элементов на поверхности листьев тополя использован метод беспленочной автордиографии с фосфорной пластиной высокого разрешения. Для анализа выбраны образцы листьев с максимальным содержанием U по данным ИНАА. Время экспозиции составило от 50 до 100 часов. Сканирование образцов выполняли на приборе «Cyclone Plus Phosphor Imager» в МГУ им. М. В. Ломоносова. Идентифицировали все точки на фотопластине с плотностью распределения частиц люминесцентным откликом  $> 1000$  DLU/mm<sup>2</sup> в час. Точки, лежащие вне площади поверхности листа, учитывались как фоновые.

Для численного анализа данных содержания U в листьях использовали модель реконструкции поля концентрации, основанную на соотношениях баланса массы лёгкой примеси в приземном слое атмосферы:

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

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

Величина параметра  $\theta$  пропорциональна эмиссии источника, значение  $S$  непосредственно зависит от высоты источника и на значительных удалениях от него влияние данного параметра на концентра-

цию 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  $r$ .

Оценки неизвестных параметров  $\theta$  и  $R$  могут быть получены с использованием данных измерений концентраций, например, методом наименьших квадратов.

## Результаты и их обсуждение

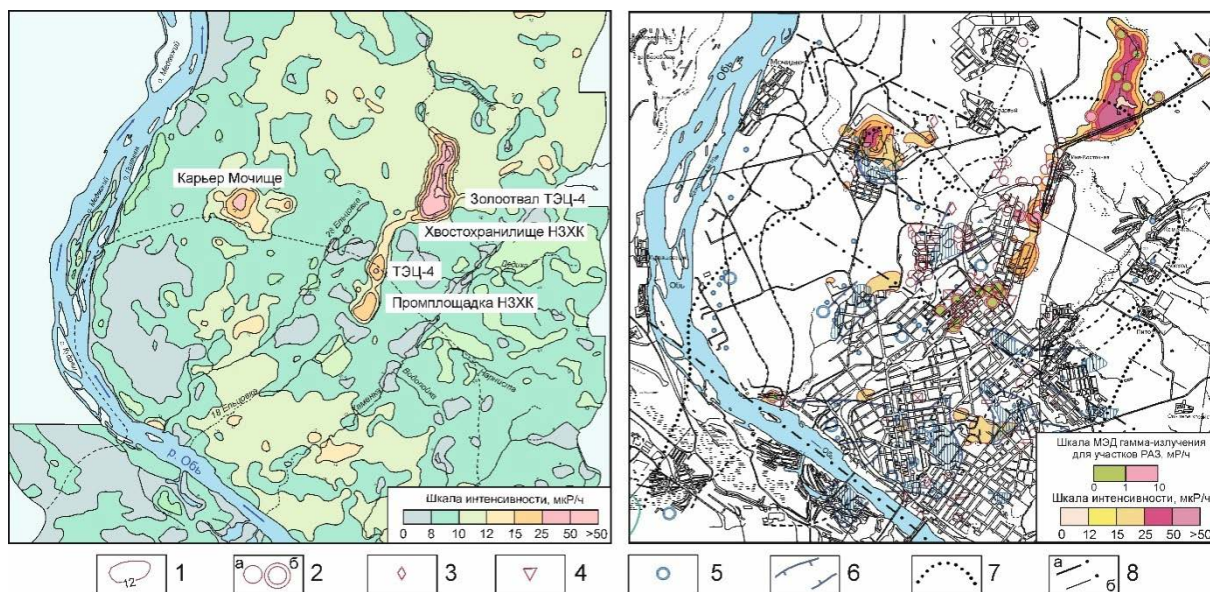
Новосибирск является одним из наиболее освоенных, промышленно развитых и интенсивно заселённых городов Западной Сибири. Последние крупномасштабные комплексные эколого-геологические исследования на всей его территории выполнены в конце XX века государственным геологическим предприятием «Березовгеология». Одним из результатов этих работ явилась оценка природных источников радиации и техногенного радиоактивного загрязнения территории неаварийного характера (рис. 1).

Статистические параметры содержания U и Th в золе листьев тополя представлены в табл. 1. Среднее региональное содержание в золе листьев тополя установлено (в мг/кг): U – 0,15, Th – 0,37; аномальные содержания: U – 0,70, Th – 0,95 (Юсупов и др., 2019).

Средние содержания радиоактивных элементов в золе листьев тополя на территории Новосибирска превышают средние региональные: U – 4 раза, Th – 1,4–3 раза. Коэффициент вариации U соответствует крайне неоднородной выборке, Th – однородной. Коэффициент парной корреляции между U и Th ( $r = 0,14$ ) ниже критического значения ( $r_{кр} \approx 0,30$ ) и свидетельствует об отсутствии значимой связи между ними.

Ореол с максимальными концентрациями U (2,7 и 10,2 мг/кг) в золе листьев тополя локализован в северо-восточной части на окраине города вблизи хвостохранилища Новосибирского завода химконцентратов (НЗХК) и золоотвала ТЭЦ-4 (рис. 2).

По данным снеговой съёмки в этом районе наблюдается наибольшая плотность выпадения U с пониженным отношением  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  (Артамонова, 2020). Здесь изучены биогенные факторы формирования техногенных геохимических аномалий U (Сафонов и др., 2019). На поверхности листьев тополя (точки 7-6 и 7-7, 2017 г.) обнаружены микрочастицы оксидов U



**Рис. 1.** Картограммы аэрогамма поля (слева) и радиационной обстановки (справа) территории г. Новосибирска (А. А. Анцырев, 1997)

1 – участки с повышенной мощностью экспозиционной дозы (МЭД) внешнего гамма-излучения по данным аэро съемки; 2 – участки радиоактивного загрязнения дезактивированные (а), недеактивированные (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 нарушения (разломы) крупные (а), прочие (б).

**Таблица 1.** Содержание урана, тория (мг/кг) и их соотношение в золе листьев тополя на территории правобережья г. Новосибирска

Химический элемент	2014 г.		2017 г.	
	Содержание (среднее/min–max)	Коэффициент вариации, %	Содержание (среднее/min–max)	Коэффициент вариации, %
Th	$0,51 \pm 0,06$ (0,23–0,94)	44	$1,11 \pm 0,07$ (0,22–1,88)	42
U	$0,59 \pm 0,15$ (0,05–2,69)	106	$0,58 \pm 0,26$ (0,05–10,2)	281
Th/U	0,9		1,9	

размером от 0,5 до 6 мкм (рис. 3А). Средний размер частиц U составил ~ 1,5 мкм с содержанием U от 30 до 83 %.

На поверхности листьев тополя (точка 5-4, 2014 г.) обнаружены частицы с торием (рис. 3Б) размером 3–17 мкм, по составу близкие к монациту. Монацит-(Ce) с Th определен в биотит-роговообманковых гранитах из близко расположенного карьера.

Методом автордиографии листьев проб с максимальным содержанием U по данным ИНАА установлено распределение предположительно радиоактивных микрочастиц на их поверхности (табл. 2). В ходе экспериментов существенной разницы между абаксиальной и адаксиальной сторонами не обнаружено. Погрешность измерений площади фона – 10 %. Средняя плотность распределения частиц в пределах площади листьев составила от 10 до 30 %, что выше, чем плотность распределения частиц на участках

фона. Характерный рисунок треков не совпадает с анатомическими частями листа и носит спонтанный характер, что подтверждает гипотезу авторов о преобладающем механизме поступления урана и тория с аэрозольными частицами.

Анализ данных биогеохимического мониторинга показал наличие области повышенных концентраций U в зоне вероятного сочетанного влияния хвостохранилища НЭХК и золоотвала ТЭЦ-4. По мере удаления к югу от объектов наблюдается монотонное снижение концентраций U в листьях, что даёт основание к использованию для численного анализа модели реконструкции в виде соотношения (3).

Численное восстановление концентраций U проведено для двух направлений (рис. 2Б). Первое направление включало точки (7-7), (6-6), (5-5), (4-4), (3-3), второе направление – точки (7-6), (6-5), (5-4),



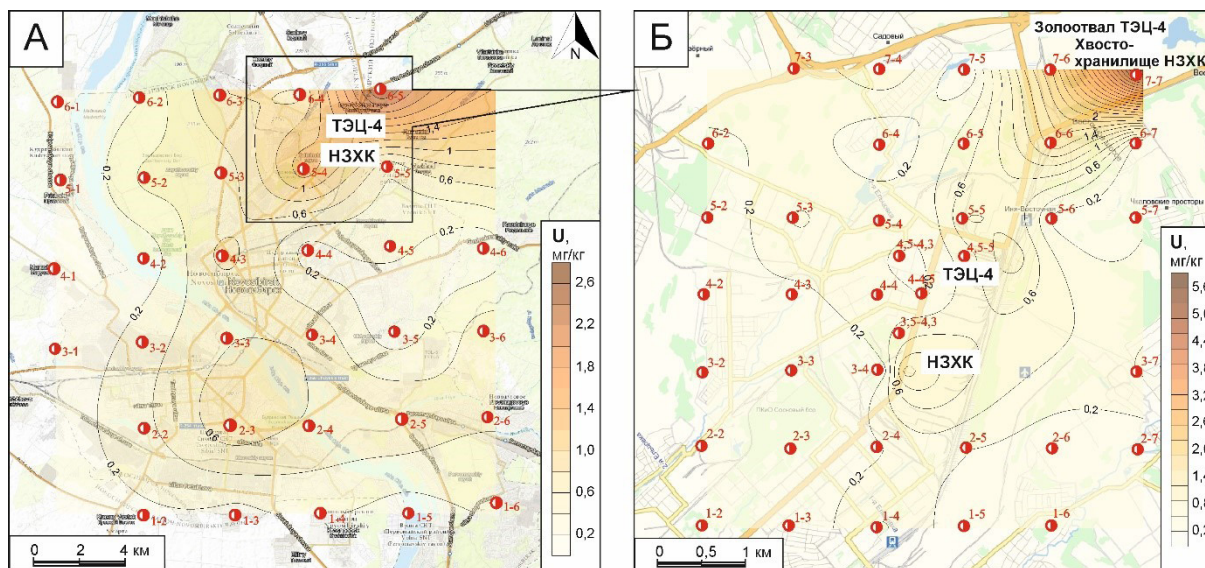


Рис. 2. Биогеохимические ореолы урана территории правобережья г. Новосибирска по данным опробования листьев тополя в 2014 (А) и 2017 г. (Б)

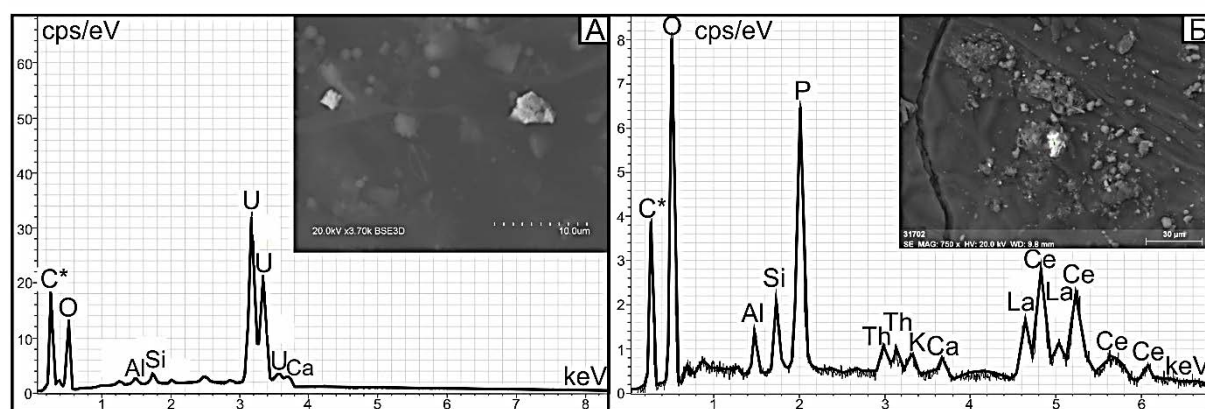


Рис. 3. Микрочастицы, содержащие уран (точка 7-7; 2017 г.)

(А), торий (точка 5-4; 2014 г.) (Б) на поверхности листьев тополя (Al, Si, Ca – матричные элементы).

Таблица 2. Плотность распределения микрочастиц с люминесцентным откликом на поверхности листьев тополя на территории правобережья г. Новосибирска (2017 г.)

Точка отбора пробы	Количество листьев (измерений)	Описание	
		Количество точек	DLU/mm <sup>2</sup> в час
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
		10-20	> 50
7-7	3 (6)*	-  -	аналогично точке 7-6
Фон	10 для каждой серии экспериментов	1-2	~ 400-500
		10-20	~ 40-50
		10-20	~ 10-15

\* – измерения проводились с двух сторон листа.

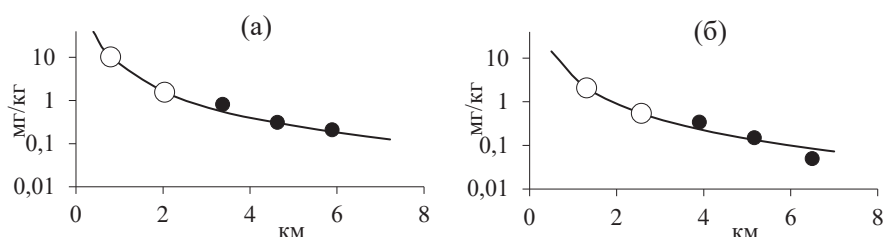


Рис. 4. Измеренные и численно восстановленные содержания урана в листьях тополя в направлении 1 (а) и направлении 2 (б). о, ● – опорные и контрольные точки измерений

(4-3), (3-2). Применительно к направлению 1 получены следующие оценки параметров модели (3):  $\theta_1 = 6,528$ ,  $R_1 = 0,8$  км.

Для проведения оценивания использованы результаты измерений в точках (7-7) и (6-6) (опорные точки). Для направления 2 оценивание проводилось также по двум опорным точкам: (7-6) и (6-5). В этом случае получены следующие оценки:  $\theta_2 = 3,569$ ,  $R_2 = 1,31$  км. Из сравнения оценок параметров и вытекает, что вынос U в направлении 2 в 1,8 раза ниже, чем в направлении 1. Точка пересечения линий направлений 1 и 2 соответствует примерному положению источника эмиссии U, вытекающему из оценок  $R_1$  и  $R_2$ .

Результаты численного восстановления распределений концентраций U в направлениях 1 и 2 представлены на рис. 4. Анализ графиков показывает удовлетворительное согласие измеренных и вычисленных концентраций U в контрольных точках наблюдений и вполне соответствует динамике распространения лёгкой примеси от низкого источника.

## Литература

1. 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.
2. Геолого-экологические условия Новосибирского промышленного района: отчет о геолого-экологических исследованиях масштаба 1 : 200000, выполненных геоэкоцентром в 1991–97 гг. / Министерство природных ресурсов РФ. Территориальный комитет по геологии и использованию недр Новосибирской и Омской областей (Центросибгеолком). Государственное геологическое предприятие «Березовгеология». – Исполн.: Анцырев А. А. и др. – Н., 1997. – 254 с.
3. Злобина А. Н. Граниты с повышенным радиационным фоном и некоторые радиоэкологические

## Заключение

Результаты проведённых исследований показали, что участки с источниками эмиссии радиоактивных элементов в северной части г. Новосибирска спустя четверть века не изменились. Анализ экспериментальных биогеохимических исследований и данных численного моделирования позволяет оценить радиоэкологическую ситуацию в городах, выявить факторы природного и техногенного характера, локализовать источники поступления опасных примесей. В конечном итоге, это создает возможности для разработки и корректировки планов размещения объектов капитального строительства и санитарно-гигиенических мероприятий. Предложенная модель реконструкции может применяться для оперативного контроля атмосферных поступлений урана от наземных источников с использованием небольшого числа опорных точек биогеохимического мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области (проект № 19-47-540008).

проблемы в районах их распространения: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2019. – 22 с.

4. Сафонов А. В., Богуславский А. Е. Болдырев К. А., Зайцев Л. В. Биогенные факторы формирования геохимических урановых аномалий в районе шламохранилища Новосибирского завода химконцентратов // Геохимия, 2019. – Т. 64. – № 6. – С. 644–650.
5. Юсупов Д. В., Рихванов Л. П., Судыко А. Ф., Барановская Н. В., Дорохова Л. А. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль // Разведка и охрана недр, 2019. – № 2. – С. 61–68.