

УДК 631.4:550.42:546.1(571.16)

БРОМ В ПОЧВАХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Перминова Татьяна Анатольевна^{1,2},
tatianap1991@yandex.ru/tatianap1991@utt.fr

Барановская Наталья Владимировна¹,
nata@tpu.ru

Бертран Ларатт³,
Bertrand.LARATTE@ensam.eu

Жорняк Лина Владимировна¹,
zhornyak_lina@mail.ru

Судыко Александр Федорович¹,
afs@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

² Технологический университет Труа,
Франция, 10010, г. Труа, ул. Марии Кюри, 12.

³ Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC,
Франция, г. Таланс, F-33400.

Актуальность. На сегодняшний день бром остается одним из наименее изученных элементов, с чем, несомненно, связано отсутствие каких-либо его нормативов в некоторых объектах окружающей среды (почвы, продукты питания). Обладая высокой химической активностью и миграционной способностью, элемент способен легко проникать в живые организмы по трофическим цепям. Высокая токсичность брома, отрицательное его воздействие на физиологические функции живых организмов диктуют необходимость тщательного исследования элемента в окружающей среде. Ввиду того факта, что почва является первичным «производителем» питательных веществ для растений, а следовательно, и для других высших живых организмов (включая человека), необходимость исследования ее химического состава является первостепенной задачей, важность которой не вызывает сомнений.

Цель работы: изучение содержания и закономерностей распределения брома в почвах Томской области.

Методы исследований: основной метод исследования – инструментальный нейтронно-активационный анализ.

Результаты. Представлены результаты исследований химических элементов в почвах населенных пунктов 14 районов Томской области. Выявлены повышенные концентрации брома в почвах отдельных территорий. Проведен сравнительный анализ уровней накопления брома в почвах Томской области с почвами других регионов Российской Федерации и зарубежья, установлены корреляционные взаимосвязи с другими химическими элементами, а также рассмотрены возможные природные и антропогенные факторы, влияющие на накопление данного элемента.

Выводы. В ходе исследования была установлена степень загрязнения почв Томской области и отдельных ее районов согласно расчетам суммарного показателя загрязнения. Выяснено, что бром является единственным элементом, значения коэффициентов концентрации которого превышают 10 единиц для почв практически всех районов области, относительно выбранного условного фона. Выявлено также, что содержания брома в почвах Томской области выше концентраций, установленных для почв мира, кларковых содержаний элемента, а также уровней накопления, обнаруженных в почвах других регионов России. Максимальные содержания брома были обнаружены в почвах Бакчарского района области.

Ключевые слова:

Химические элементы, бром, геохимические ассоциации, почвы, Томская область.

Введение

Исследования, посвященные изучению содержания химических элементов в почвах Сибири, получили весьма широкое развитие еще в 60-х гг. прошлого столетия [1, 2]. Сотрудниками лабораторий агрохимии и биогеохимии почв Института почвоведения и агрохимии СО РАН получены многочисленные данные о закономерностях поведения большого числа элементов в почвах и почвообразующих породах Западной Сибири [3–5 и др.]. Особенности накопления и перераспределения комплекса химических элементов и их соединений

в почвах Томской области показаны в работах ряда ученых, отмечающих специфику их концентрирования в зависимости от типов почв, ландшафтно-геохимических характеристик, а также сложившейся на территории эколого-геохимической ситуации [6–10 и др.]. Тем не менее, несмотря на значительное количество накопившейся информации, некоторые элементы до сих пор остаются малоизученными.

К одним из таких элементов относится бром. Сведения о его геохимических особенностях, в том числе поведение в ассоциациях с другими химиче-

скими элементами на территории Томской области остаются весьма ограниченными. Обладая высокой химической активностью и миграционной способностью, элемент способен легко проникать в живые организмы по трофическим цепям [11] и накапливаться в повышенных концентрациях в различных органах и тканях человека [12]. Несмотря на эссенциальность брома [13], по мнению некоторых авторов, он относится к элементам, чаще других приводящих к риску для здоровья человека, участвуя в формировании и развитии некоторых заболеваний [14–16]. Отрицательное воздействие брома на физиологические функции живых организмов наряду с высокой токсичностью элемента диктуют необходимость тщательного исследования элемента в окружающей среде.

Следует отметить, что, на основе представленных в данной работе результатов, в настоящий момент авторами проводятся детальные исследования по изучению токсичности брома в почвах Томской области и его влияния на экосистемы и здоровье человека посредством современных методов и методик оценки воздействия на почвы [17], а также экологического моделирования.

Методика исследования

Отбор проб почв на территории Томской области проводился в 2004–2015 гг. Пробы были отобраны в 75 населенных пунктах 14-ти муниципальных районов области (Александровский и Каргасокский районы не включены в данное исследование). Общее количество проб составляет 384.

Отбор почвенных образцов проводился в последней декаде апреля – первой декаде мая методом «конверта»: из пяти точек (по углам и в центре прямоугольника приусадебных хозяйств населенных пунктов районов области), глубина которых составляла около 10 см – верхний плодородный слой. При отборе проб фиксировалось наличие/отсутствие использования органических удобрений. В пределах Томского района области пробы почв отбирались также в зонах расположения разнопрофильных промышленных предприятий. Точечные пробы, отобранные на одной пробной площадке, объединялись, чем достигалось их смешение. Пробоподготовка осуществлялась в соответствии с методическими рекомендациями [18] на кафедре геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета.

Подготовленные пробы отправлялись на высокочувствительный инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА), реализованный на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в аккредитованной лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета. Анализ осуществлялся аналитиками с. н. с. А.Ф. Судыко и Л.Ф. Богутской. Измерения проводились на гамма-спектрометре с германий-литиевым детектором. Достоверность анализа подтверждена контрольными определениями, выпол-

нялся внутренний контроль. Статистическая обработка проводилась с использованием программы Statistica 8.0. Расчеты показателей: коэффициента концентрации и суммарного показателя загрязнения почв, проводились согласно методическим рекомендациям [19].

Результаты и обсуждение

На основании полученных аналитических данных по содержанию химических элементов в почвах населенных пунктов Томской области (384 пробы) нами были рассчитаны коэффициенты концентрации каждого отдельного элемента, а также суммарный показатель загрязнения (СПЗ) почв по районам области с учетом 25 других изученных химических элементов. Коэффициенты концентрации рассчитывались относительно фоновых значений по заказнику «Томский» [20].

Как видно из табл. 1, почвы разных районов Томской области отличаются специфическими геохимическими ассоциациями элементов. Проведенные учеными-геологами, экологами и геохимиками работы показали, что территория Томской области характеризуется значительной геохимической неоднородностью, обусловленной как природными, так и техногенными факторами. Так, по гидрогеохимическим данным, в Обь-Енисейском междуречье выделяется региональная субмиридональная зона, являющаяся переходной по химическому составу между меловыми захороненными минерализованными морскими хлоридными водами левобережья р. Обь и гидрокарбонатными инфильтрационными водами правобережной части, простирающейся вплоть до р. Енисей [21]. Ширина этой зоны, с осью в районе г. Колпашево, достигает 150–200 км. Она контролирует юго-восточную границу Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, пространственно совпадающей с полосой развития фаций внутреннего шельфа и прибрежно-морских равнин. К ней же приурочены контуры территории распространения железоносных отложений известного уникального по масштабам Западно-Сибирского железорудного бассейна [22, 23]. Сложившаяся геохимическая ситуация предполагает возможность выявления в пределах Чулымо-Енисейской впадины месторождений ураново-полиэлементного состава [22]. Кроме указанного выше крупнейшего месторождения железных руд и перспектив наличия других полезных ископаемых, на территории Томской области разведаны месторождения циркон-ильменитовых песков, а также месторождения углей и торфов [24]. Весь этот природный комплекс оказывает несомненное влияние на геохимическую специализацию почв, а присутствие ряда мелких и крупных разнопрофильных предприятий [6, 7, 9, 10, 12, 20 и др.] завершает полифакторный характер их элементного состава.

Рассчитанный нами суммарный показатель загрязнения почв изменяется от 33 до 76 единиц в разных районах области, что, согласно ориентиро-

Таблица 1. Значения коэффициентов концентраций химических элементов и суммарный показатель загрязнения почв населенных пунктов районов Томской области

Table 1. Values of concentration coefficients of chemical elements and the total soil pollution index (TPI) in the settlements of the districts of Tomsk region

Район/District	Коэффициент концентрации/Concentration coefficient			СПЗ TPI	Вклад Br (%) в СПЗ Br (%) to TPI
	1–5	5–10	>10		
Парабельский Parabelsky	(Ba,Tb) _{4,8} , Ta _{4,4} , Ca _{4,3} , U _{3,8} , Au _{3,3} , Rb _{2,9} , Sb _{2,6} , Cs _{2,3} , (Yb,Hf) _{2,1} , Na _{1,9} , (Cr,Lu) _{1,8} , Co _{1,7} , (Fe,Th) _{1,5} , Ce _{1,3} , (La,Sr,Sm) _{1,2}	Ag _{8,0}	Br _{12,3}	51	24,2
Колпашевский Kolpashevsky	Tb _{4,4} , Sb _{4,2} , Ta _{4,1} , Ca _{4,0} , U _{3,9} , Rb _{3,2} , Na _{2,7} , Hf _{2,6} , Cr _{2,4} , (Lu,Au) _{2,3} , Yb _{2,1} , Cs _{1,7} , (Fe,Co,Sr) _{1,6} , Th _{1,5} , (Ce,Sm) _{1,4} , La _{1,2}	Br _{9,9} , Ag _{8,0} , Ba _{5,8}	–	52	19,1
Чаинский Chainsky	Ba _{4,9} , Sb _{4,4} , Ag _{4,0} , Lu _{3,8} , Yb _{3,7} , Cs _{2,9} , Co _{2,4} , (Na,Fe) _{2,3} , (Cr,Th) _{1,9} , (Hf,La) _{1,7} , Sm _{1,6} , Ce _{1,5} , Sc _{1,3} , Sr _{1,1}	Ta _{8,3} , Rb _{8,0} , Ca _{7,9} , Tb _{7,2} , U _{6,9} , Au _{5,9}	Br _{12,7}	77	16,5
Молчановский Molchanovsky	Sb _{4,5} , Ag _{4,0} , Rb _{3,4} , (Cr,Yb) _{3,2} , Ca _{3,0} , Cs _{2,8} , Lu _{2,6} , Na _{2,4} , (Fe,Co) _{2,2} , Th _{1,8} , (Ce,Sm) _{1,7} , (La,Hf) _{1,6} , (Sr,Au) _{1,4} , Sc _{1,2}	Tb _{8,9} , Ta _{8,9} , U _{6,2} , Ba _{5,4}	Br _{12,1}	64	18,8
Кривошеинский Krivosheinsky	(Rb,Ag) _{4,0} , Cr _{3,6} , U _{3,5} , Yb _{3,1} , Au _{3,0} , Sb _{2,6} , Ca _{2,3} , Cs _{2,2} , (Na,Lu) _{2,1} , (Fe,Co) _{1,9} , Sm _{1,8} , (Ce,Th) _{1,6} , Hf _{1,5} , La _{1,3} , Sc _{1,1}	Ta _{7,7} , Tb _{6,5} , Ba _{5,8}	Br _{14,0}	57	24,5
Шегарский Shegarsky	Sb _{4,5} , Ag _{4,0} , Cs _{3,9} , Rb _{3,2} , Ca _{3,0} , Yb _{2,9} , Cr _{2,7} , Na _{2,4} , Lu _{2,3} , Fe _{2,2} , Co _{2,0} , Au _{1,9} , Th _{1,7} , Ce _{1,6} , (La, Hf) _{1,5} , Sm _{1,4} , Sc _{1,2}	Ta _{7,7} , Tb _{7,5} , U _{6,3} , Ba _{5,5}	Br _{11,9}	61	19,6
Кожевниковский Kozhevnikovsky	Rb _{4,8} , Ca _{3,6} , Cs _{3,4} , Yb _{3,3} , Sb _{3,0} , Cr _{2,6} , Lu _{2,5} , (Fe,Ba) _{2,4} , U _{2,3} , (Na, Co) _{2,2} , Th _{2,1} , (As, Ce) _{1,8} , (La,Hf) _{1,6} , Sc _{1,5} , Ag _{1,4} , Sm _{1,3}	Tb _{5,5} , Ta _{5,3}	Br _{15,1}	52	29,2
Томский Tomsky	U _{4,9} , (Au,Rb) _{4,7} , Ba _{4,4} , Ca _{3,7} , Yb _{3,0} , Cs _{2,9} , Cr _{2,6} , (Na,Lu) _{2,5} , Fe _{2,4} , Co _{2,2} , Th _{2,0} , Hf _{1,8} , Ce _{1,7} , (Sm, La) _{1,5} , Sc _{1,4}	Br _{7,8} , Tb _{7,7} , Sb _{7,1} , Ag _{5,6} , Ta _{5,2}	–	62	12,6
Асиновский Asinovsky	Lu _{4,5} , Yb _{3,6} , Ba _{3,3} , Cs _{2,9} , Na _{2,8} , (Fe,Co) _{2,1} , Ag _{2,0} , Th _{1,7} , (Cr,La,Sm,Hf) _{1,5} , (Sc,As,Ce) _{1,3} , Sr _{1,1}	Ca _{8,2} , Rb _{7,9} , Ta _{7,6} , U _{6,6} , Au _{6,5} , Tb _{5,6} , Sb _{5,4}	Br _{16,4}	76	21,5
Первомайский Pervomaysky	Lu _{4,0} , Yb _{3,4} , Na _{2,6} , Sr _{2,5} , As _{2,2} , (Fe,Co) _{1,5} , (La,Hf) _{1,4} , (Cs,Sm) _{1,2} , Th _{1,1}	Ca _{9,7} , Au _{8,0} , Rb _{7,4} , Ta _{6,6} , Tb _{6,5} , Sb _{6,3} , U _{5,6} , Ba _{5,2}	Br _{13,0}	72	18,0
Верхнекетский Verkhneketsky	Ba _{3,9} , Cr _{3,5} , Ta _{3,3} , Tb _{3,0} , Rb _{2,8} , U _{2,5} , (Na,Ca) _{2,0} , Sb _{1,9} , Au _{1,8} , (Sr,Yb) _{1,5} , (Cs,Lu,Hf) _{1,3}	Ag _{5,3}	Br _{11,3}	34	33,0
Тегульдетский Teguldetsky	(Sb,Tb) _{4,7} , U _{4,6} , As _{3,8} , Ba _{3,7} , Rb _{3,2} , (Cs,Yb) _{2,6} , (Ag,Lu) _{2,0} , Co _{1,9} , (Na,Fe) _{1,6} , Sr _{1,5} , (Hf, Th) _{1,3} , (La, Ce, Sm) _{1,2}	Au _{8,1} , Ca _{7,6} , Ta _{5,8} , Cr _{5,2}	Br _{11,0}	61	18,0
Зырянский Zyryansky	Tb _{4,4} , Ca _{4,2} , Ba _{4,0} , (Rb,U) _{3,7} , Sb _{3,6} , Ta _{3,1} , Cr _{3,0} , Ag _{2,8} , (Yb,Lu) _{2,1} , Cs _{1,9} , Fe _{1,6} , (Na,Co) _{1,4} , Th _{1,3} , (La,Ce) _{1,2} , Hf _{1,1}	Br _{9,0} , Au _{5,6}	–	43	21,2
Бакчарский Bakcharsky	Rb _{4,6} , U _{4,5} , Ag _{4,0} , (Sb,Cs) _{3,4} , (Ca,Ba) _{3,1} , (Co,Yb) _{2,5} , Au _{2,4} , Lu _{2,3} , Cr _{2,2} , Th _{2,1} , Fe _{2,0} , Ce _{1,7} , Na _{1,6} , La _{1,5} , (Sm,Hf) _{1,4} , Sc _{1,3} , Sr _{1,1}	Ta _{7,3} , Tb _{6,0}	Br _{32,9}	75	43,6

Примечание: степени загрязнения согласно Ю.Е. Сае и др. [19]: СПЗ от 0 до 16 – низкая; 16–32 – средняя; 32–128 – высокая; более 128 – очень высокая; СПЗ рассчитывался для элементов, коэффициент концентрации которых превышал 1.

Note: levels of contamination according to Yu.E. Saet et al. [19]: TPI from 0 to 16 – low; 16–32 – average; 32–128 – high; more than 128 – very high; TPI was calculated for the elements, the concentration coefficients of which exceeded 1.

вочной шкале оценки аэрогенных очагов загрязнения [19], характеризует данные почвы как высоко загрязненные. При этом можно отдельно выделить почвы Верхнекетского района, которые очень близки к среднему уровню загрязнения. Среди представленных в табл. 1 элементов особое внимание привлекает бром. Он является единственным элементом, значения коэффициентов концентрации которого превышают 10 единиц для почв практически всех районов области относительно условного фона. Именно данный факт способствовал более детальному рассмотрению геохимических особенностей данного элемента в изучаемых почвах.

Нами был рассчитан вклад брома в суммарный показатель загрязнения почв в каждом изученном районе области (табл. 1). В целом можно отметить, что вклад брома в общий СПЗ значительно варьи-

рует, при этом средний вклад составляет 22,8 %, при минимальном 12,6 %, зафиксированном в почвах Томского района, и максимальном – 43,6 % – в почвах Бакчарского района.

Статистические параметры демонстрируют, что распределение брома в почвах имеет тенденцию к относительной неоднородности при анализе всей территории Томской области и характеризуется локальными участками с несколько более высокими значениями средних содержаний, что формирует вариативность более 70 % (табл. 2) и требует более тщательных исследований. Мы не берем судить о параметрах по изученному элементу для Парабельского, Колпашевского, Молчановского, Кривошеинского, Шегарского и Первомайского районов, где количество проб незначительное для каких-либо выводов, лишь приводим данные как предварительную информацию.

Таблица 2. Статистические показатели содержания брома (мг/кг) в почвах районов Томской области (N=384)

Table 2. Statistical parameters of bromine content (mg/kg) in soils of the districts of Tomsk region (N=384)

Район/District	N	$\bar{X} \pm \lambda$	Min–Max	V, %	Mo	Me
Парабельский Parabelsky	6	14,8±1,7	9,0–22,1	29	–	14,5
Колпашевский Kolpashevsky	6	11,9±2,1	7,5–21,3	43	–	10,4
Чаинский Chainsky	16	15,3±2,0	5,0–31,8	54	5,0	13,1
Молчановский Molchanovsky	5	14,5±1,1	11,1–18,0	17	–	14,4
Кривошеинский Krivosheinsky	2	16,8±3,8	13,0–20,1	32	–	16,8
Шегарский Shegarsky	2	14,3±1,3	13,0–15,6	13	–	14,3
Кожевниковский Kozhevnikovsky	33	18,1±1,5	0,5–35,8	47	–	18,8
Томский Tomsky	177	9,3±0,4	0,5–59,5	63	0,5	9,1
Асиновский Asinovsky	15	19,7±1,8	5,0–31,8	35	23,4	20,8
Первомайский Pervomaysky	5	15,6±3,2	5,0–23,9	46	14,4	14,4
Верхнекетский Verkhneketsky	14	13,6±2,2	4,4–30,1	60	–	10,7
Тегульдетский Teguldetsky	20	13,2±1,4	5,0–28,0	48	5,0	12,4
Зырянский Zyryansky	44	10,8±1,0	3,9–34,4	62	6,1	8,6
Бакчарский Bakcharsky	39	39,4±1,9	12,1–64,9	30	–	41,1
Томская область Tomsk region	384	14,6±0,6	0,5–64,9	78	0,5	11,2

Примечание: N – количество проб; \bar{X} – среднее значение (без учета «ураганных» проб); λ – стандартная ошибка; Min и Max – минимальное и максимальное значения соответственно; V – коэффициент вариации; Mo – мода; Me – медиана.

Note: N is the number of samples; \bar{X} is the average value (excluding «hurricane» samples); λ is the standard error; Min and Max are the minimum and maximum values, respectively; V is the variation coefficient; Mo is the mode; Me is the median.

Для территорий с достаточной выборкой обращает внимание наибольшая вариабельность брома в почвах Томского, Зырянского и Верхнекетского районов, которая, однако, не является критичной. Тем не менее, данный разброс может свидетельствовать о наличии дополнительных источников поступления элемента, носящего не только природный характер. Так, согласно исследованиям Л.В. Жорняк [10], в почвах Томского района фиксируются локальные геохимические аномалии по бромю, приуроченные к деятельности таких предприятий, как ОАО «Фармстандарт-Томскхимфарм», ЗАО «Томский приборный завод», а также ОАО «Томский электроламповый завод». Стоит отметить, что на сегодняшний день первый из них не функционирует, но факт использования брома в фармацевтической/химической промышленности широко известен. По-видимому, соединения брома

также используется на определённых производственных этапах двух других заводов. Кроме того, исследованиями сотрудников кафедры ГЭГХ ТПУ было неоднократно показано, что бром может поступать в окружающую среду в результате деятельности Томского нефтехимического комбината (ныне Сибур) и Сибирского химического комбината, расположенных также в пределах данного района. Кроме того, именно в Томском районе области было зафиксировано формирование бромной биогеохимической субпровинции, сформированной в результате комплексного воздействия разнопрофильных предприятий [25].

Зырянский район, с одной стороны, может испытывать на себе влияние близлежащего Томского района с его комплексным техногенным воздействием. С другой же стороны, он характеризуется наличием природных проявлений, которые могут быть богаты бромом. Так, почвы населенного пункта Семеновка, расположенного в пределах распространения Яйского бурогоугольного месторождения, характеризуются несколько более высокими содержаниями данного элемента (18,6 мг/кг) по сравнению с другими изученными поселками, содержание в которых ниже и составляет, например, для почв Иловки – 7,5 мг/кг.

Территория Верхнекетского района характеризуется выходом на поверхность локальных территорий минеральных вод. Так, для населенного пункта Белый яр, относящегося к данному району и имеющему локальный источник минеральных вод, значение брома в почвах составляет 17 мг/кг в отличие от других поселков, среднее содержание в почвах которых не превышает 7,4 мг/кг. Стоит обратить отдельное внимание на наличие наибольшего количества геохимических ассоциаций брома на территории данного района, что требует более детальных исследований (табл. 3).

Результаты расчета коэффициентов парной корреляции, представленные в табл. 3, позволяют установить корреляционные связи брома с другими химическими элементами в почвах районов Томской области. Следует отметить, что рассматривались только те районы области, в которых было отобрано минимум 10 проб.

В почвах населенных пунктов районов Томской области отмечаются различные геохимические связи брома. Это может быть обусловлено многочисленными факторами. Во-первых, каждый район области характеризуется неидентичными природными и техногенными условиями. Во-вторых, почвы в пределах Томской области значительно различаются по своему составу, физико-химическим свойствам, водному режиму, содержанию гумуса и другим факторам [8]. Все это в той или иной степени может влиять как на формы нахождения брома, так и на его миграционную и реакционную способности и, как следствие, на механизмы взаимодействия с химическими элементами и формирования различных соединений. Некоторые связи брома, тем не менее, являются идентичными для гранича-

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции брома с химическими элементами в почвах районов Томской области

Table 3. Coefficients of bromine pair correlation with chemical elements in soils of the districts of Tomsk region

Район/District	Na	Ca	Sc	Cr	Fe	Co	As	Rb	Sr	Ag	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Au	Th	U
Чаинский Chainsky	0,22	0,55	0,92	0,58	0,20	0,13	0,08	0,87	–	–	0,29	0,52	0,28	0,35	0,13	0,34	0,51	0,72	0,22	0,65	0,22	0,13	0,85	0,41	0,64
Кожевниковский Kozhevnikovsky	0,27	0,03	0,24	0,29	0,19	0,13	0,22	0,03	0,37	0,27	0,19	0,11	0,36	0,30	0,36	0,03	0,24	0,17	0,14	0,22	0,42	0,14	0,23	0,18	0,36
Томский Tomsky	0,18	0,40	0,40	0,29	0,42	0,32	0,26	0,37	0,13	0,02	0,07	0,14	0,05	0,50	0,29	0,55	0,34	0,53	0,34	0,46	0,20	0,09	0,40	0,37	0,31
Асиновский Asinovsky	0,34	0,33	0,33	0,10	0,75	0,54	–	0,61	–	–	0,56	0,26	0,19	0,65	0,65	0,06	0,23	0,25	0,55	0,66	0,61	0,73	0,08	0,08	0,60
Верхнекетский Verkhneketsky	0,78	0,75	0,85	0,21	0,80	0,80	0,12	0,02	0,15	0,16	0,03	0,64	0,51	0,86	0,87	0,70	0,54	0,79	0,84	0,91	0,68	0,69	0,08	0,78	0,80
Тегульдетский Teguldetsky	0,19	0,42	0,01	0,54	0,12	0,43	–	0,19	0,18	–	0,08	0,02	0,01	0,48	0,14	0,43	0,50	0,40	0,51	0,43	0,04	0,01	0,04	0,14	0,12
Зырянский Zyryansky	0,11	0,53	0,19	0,36	0,17	0,16	–	0,16	0,22	0,04	0,24	0,15	0,02	0,14	0,05	0,24	0,14	0,13	0,24	0,15	0,02	0,11	0,05	0,17	0,14
Бакчарский Bakcharsky	0,37	0,51	0,37	0,33	0,34	0,21	0,23	0,29	0,28	–	0,26	0,21	0,40	0,49	0,33	0,40	0,23	0,41	0,55	0,39	0,27	0,03	0,06	0,43	0,46

Примечание: уровень вероятности – 95 %; отрицательные корреляционные связи выделены красным цветом; **значимые положительные связи показаны жирным шрифтом.**

Note: probability level is 95 %; negative correlations are highlighted in red; **significant relationships are shown in bold.**

ских районов области. Например, значимая отрицательная связь брома с хромом отмечается для почв Тегульдетского и Зырянского районов; положительные связи характерны для брома с лантаном, европием и иттербием в почвах Тегульдетского и Верхнекетского районов. Большое количество значимых корреляционных связей характерно также для брома в почвах Бакчарского района. Именно в данных почвах отмечаются наибольшие содержания галогена (рис. 1), причем высокие концентрации элемента (выше среднеобластных) характерны для почв всех без исключения изучаемых населенных пунктов данного района (*указаны средние значения в мг/кг*: Бакчар – 42,9; Вавилонка – 45,5; Кенга – 25,4; Крыловка – 45,0; Богатыревка – 52,4; Польшанка – 39,1; Высокий Яр – 33,4; Новая Бурка – 35; Поротниково – 31,6; Парбиг – 46,5; Плотниково – 35,5; Подольск – 35,2; Панычево – 63,7; Чернышевка – 43,5; Чумакаевка – 38,8; Большая Галка – 47,5; Хуторское – 39,9; Кедровка – 45,3). Помимо этого, изучение нескольких болот Томской области показало, что болото Бакчарское, расположенное в Бакчарском районе области, характеризуется также самыми высокими содержаниями брома относительно изучаемых торфов области – 35,4 мг/кг сухого вещества [26]. Возможно, в данном районе существуют специфические геохимические условия или факторы, способствующие аккумуляции элемента.

Кроме того, отличительной особенностью почв Бакчарского и Верхнекетского районов является наличие геохимических ассоциаций брома с натрием, железом, кальцием и барием. Отмечается, что образование комплексных соединений с галоидами характерно для железа. Иллювиальные, обогащенные оксидами и гидроксидами железа почвы обладают значительной бромфиксирующей способностью [5], что может объяснять геохимические ассоциации брома с железом. Геохимические

связи брома с барием и кальцием в почвах Бакчарского района, где отмечаются наибольшие концентрации элемента, возможно, указывают на связь брома с карбонатами, которые создают естественный геохимический барьер на пути миграции элемента и способствуют его аккумуляции. Эта информация находит подтверждение в работах Г.А. Конарбаевой [5], причем автором детализируется, за счет каких процессов это может происходить: сорбция, окклюзия и реакция обмена. Можно также рассмотреть гипотезу о флюидном влиянии миграционных потоков [27], которые могут приводить к повышенным концентрациям брома в почвах Бакчарского района.

Помимо описанных выше природных факторов, которые в той или иной степени способны влиять на аккумуляцию элемента в почвах, нельзя исключать и антропогенный характер его поступления. Отмечается, что на юге Сибири, в том числе в Томской области, часто фиксируется загрязнение компонентов окружающей среды продуктами ракетного топлива. Бром, а именно пентафторид брома, часто используется как окислитель ракетного топлива [28], с чем могут быть связаны повышенные уровни накопления элемента в Бакчарском, а также частично в Кожевниковском районах области.

Согласно результатам кластерного анализа, в почвах Томской области выделяется значимая ассоциация брома с танталом, которая вызывает вопросы и требует дальнейших исследований (рис. 2). Следует отметить, что данная ассоциация тяготеет к группе тесно взаимосвязанных элементов, включающих Rb и Cs, Co и Fe, а также Th, Ce, Sc.

Интерпретация результатов по содержанию брома в почвах во многом затруднена отсутствием каких-либо нормативов для данного элемента в изучаемом объекте природной среды. Для оценки уровней концентрирования брома в почвах нами предла-

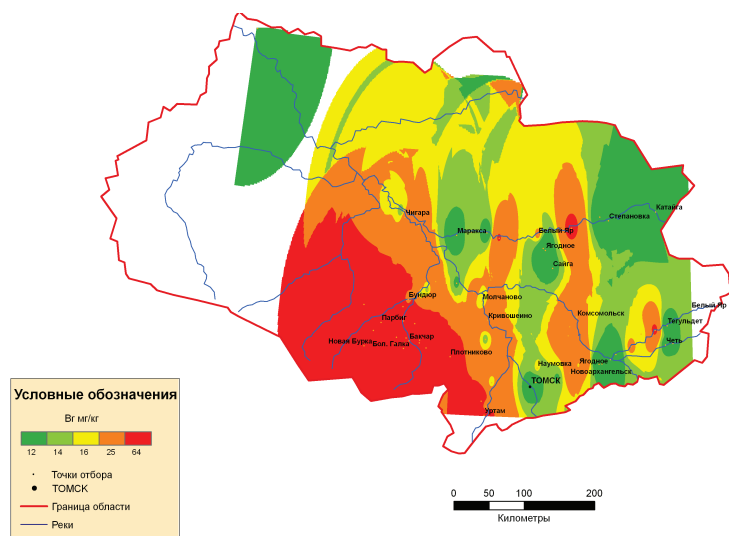


Рис. 1. Карта-схема распределения брома (мг/кг) в почвах Томской области

Fig. 1. Schematic map of bromine distribution (mg/kg) in soils of Tomsk region

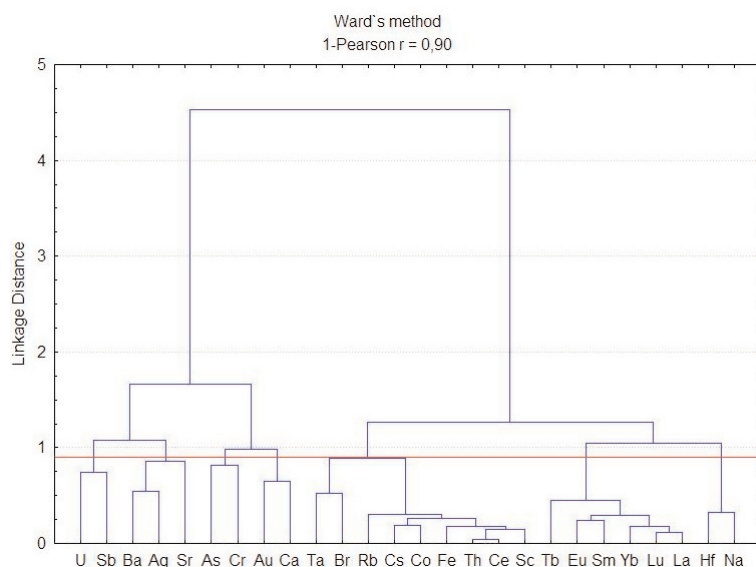


Рис. 2. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в почвах населенных пунктов Томской области (1 – Pearson $r (0,05)=0,90$; объем выборки – 384 проб)

Fig. 2. Correlation matrix dendrogram of geochemical spectrum of elements in soils of the settlements of Tomsk region (1 – Pearson $r (0,05)=0,90$; 384 samples)

гается сравнительный анализ, основанный как на литературных данных, так и на результатах собственных исследований. Так, из рис. 3 видно, что содержания брома в различных регионах России и мира варьируются в широких пределах. Содержания брома в почвах Томской области выше концентраций, установленных для почв мира, кларковых содержаний элемента, урбанизированных почвогрунтов г. Томска, формирующихся под влиянием объектов техногенеза, а также уровней накопления, обнаруженных в почвах других регионов России.

Иная картина наблюдается при сравнении содержаний брома в почвах Томской области с зарубежными территориями. По-видимому, специфическую роль в накоплении элемента играют геоморфологические, климатогеографические и другие характеристики рассматриваемых территорий, которые значительно отличаются от природных условий Томской области. Наибольшие концентрации брома обнаруживаются в почвах Великобритании и Японии, где они могут достигать 500 мг/кг. Для обеих стран характерна близость к морю [35] и процессы вулканогенного привноса материала [36]. Возможно, влияние древних морских отложений на территории Томской области также обусловило высокое накопление брома в почвах и неоднородность его распределения на территории.

ческую роль в накоплении элемента играют геоморфологические, климатогеографические и другие характеристики рассматриваемых территорий, которые значительно отличаются от природных условий Томской области. Наибольшие концентрации брома обнаруживаются в почвах Великобритании и Японии, где они могут достигать 500 мг/кг. Для обеих стран характерна близость к морю [35] и процессы вулканогенного привноса материала [36]. Возможно, влияние древних морских отложений на территории Томской области также обусловило высокое накопление брома в почвах и неоднородность его распределения на территории.

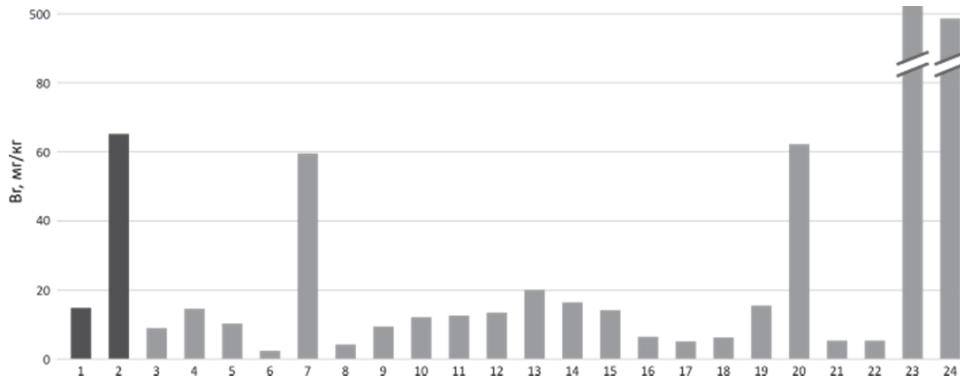


Рис. 3. Содержание брома в почвах регионов России и зарубежья (мг/кг): 1 – Томская область (средние содержания)*, 2 – Томская область (максимальные содержания)*, 3 – г. Томск [10]; 4 – г. Челябинск*, 5 – г. Павлодар*, 6 – респ. Бурятия*, 7 – Западная Сибирь [5]; 8 – Васюганская равнина [5]; 9 – Кулундинская равнина (чернозем) [5]; 10 – Юго-Восточное Забайкалье [5]; 11 – Барабинская равнина [5]; 12 – Приобское плато (чернозем) [5]; 13 – г. Пиза [10]; 14 – г. Ливорно [10]; 15 – Норвегия*; 16 – Франция*; 17 – Китай [29]; 18 – США [30]; 19 – Иордания (без фумигантов) [31]; 20 – Иордания (с фумигантами) [31]; 21 – почвы мира [32]; 22 – кларк для почв [33]; 23 – Великобритания [30]; 24 – Япония [34]; * – результаты собственных исследований

Fig. 3. Bromine content in soils of the regions of Russia and foreign countries (mg/kg): 1 – Tomsk region (average values)*, 2 – Tomsk region (maximum values)*, 3 – Tomsk [10]; 4 – Chelyabinsk*, 5 – Pavlodar*, 6 – the Buryat Republic*, 7 – Western Siberia [5]; 8 – the Vasyugan plain [5]; 9 – the Kulunda plain (black soil) [5]; 10 – South-East Transbaikalia [5]; 11 – the Baraba plain [5]; 12 – the Ob plateau (black soil) [5]; 13 – Pisa [10]; 14 – Livorno [10]; 15 – Norway*; 16 – France*; 17 – China [29]; 18 – the USA [30]; 19 – Jordan (without fumigants) [31]; 20 – Jordan (with fumigants) [31]; 21 – worldwide soils [32]; 22 – soil Clarke value [33]; 23 – Great Britain [30]; 24 – Japan [34]; * – results of own research

Таким образом, существенное влияние на накопление элемента в почвах оказывает ряд факторов, включающих как природные, так и техногенные источники, что обуславливает возможное формирование на территории области локальных геохимических аномалий.

Заключение

Авторами были рассмотрены особенности накопления брома в почвах населенных пунктов Томской области, а также выявлены геохимические ассоциации элемента в пределах административных районов и всей области в целом. На наш взгляд, геоморфологические, климатические, ги-

дрогеологические и другие условия имеют исключительные по своему значению геохимические последствия, влиявшие и влияющие и по сей день на характер накопления брома в почвах районов Томской области. Высокие содержания брома в почвах области носят преимущественно природный характер, за исключением некоторых из них, в которых присутствуют также и антропогенные источники элемента. Исследования брома в почвах является важной задачей, требующей дальнейшего изучения. Результаты, представленные в работе, служат базовыми материалами более детального исследования, проводимого авторами по изучению токсичности брома в почвах Томской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашнева Г.Е. Микро- и некоторые редкие элементы в почвах Томской области: автореф. дисс. ... канд. наук. – Томск, 1967. – 22 с.
2. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязей микроэлементов в системе почва–растение в условиях юга Западной Сибири. – Омск: Вариант-Омск, 2013. – 232 с.
3. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.
4. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 227 с.
5. Конарбаева Г.А. Галогены в почвах юга Западной Сибири. – Новосибирск: СО РАН, 2004. – 200 с.
6. Рихванов Л.П., Язиков Е.Г., Сарнаев С.И. Содержание тяжелых металлов в почвах. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 1993. – 85 с.
7. Состояние компонентов природной среды Томской области по данным эколого-геохимического мониторинга и здоровье населения / Л.П. Рихванов, Е.Г. Язиков, Н.В. Барановская и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 1 (85). – С. 29–37.
8. Евсеева Н.С., Пашнева Г.Е., Квасникова З.Н. Делювиальный процесс в агроландшафтах юга Томской области и его эколого-геоморфологические аспекты // Вестник ТГУ. Биология. – 2013. – № 4 (24). – С. 7–19.
9. Ecological Dangers of Chemical Contamination of Urban Areas Soils: Case study of Tomsk // N.A. Osipova, L.V. Zhorniyak, E.G. Yazikov, A.A. Syskina // Procedia Chemistry. – 2014. – V. 10. – P. 508–512.
10. Geochemical peculiarities of soils in Tomsk areas of industrial enterprises locations / L.V. Zhorniyak, N.A. Osipova, E.G. Yazikov, K.E. Demidova, K.Y. Osipov // Proc. SPIE. 10035. 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100354H. – November 29, 2016. [p1]
11. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: в 6 кн. Кн. 3. Редкие р-элементы / под ред. Э.К. Бурнекова. – М.: Недра, 1994. – 352 с.

12. Биогеохимические особенности накопления брома в организме человека (на примере жителей Томской области) / Н.В. Барановская, Т.А. Перминова, Б. Ларатт, Д.В. Наркович, О.А. Денисова // Вестник ОмГАУ. – 2016. – № 3 (23). – С. 155–165.
13. Bromine is an essential trace element for assembly of collagen IV scaffolds in tissue development and architecture / S. McCall et al. // Cell. – 2014. – V. 157. – P. 1380–1392.
14. Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study / A. Valdés et al. // Environmental Health. – 2012. – V. 11. – 82 p. [p2]
15. Ehmman W.D., Vance D.E. Studies of trace element involvement in human disease by in vitro activation analysis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1996. – V. 203. – № 2. – P. 429–445.
16. Instrumental neutron activation analysis of urinary calculi / S.M. Lin et al. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1985. – V. 96. – № 2. – P. 153–160.
17. Methods for land use impact assessment: a review / Т. Perminova, В. Laratte, N. Sirina, N. Baranovskaya, L. Rikhvanov // Environmental Impact Assessment Review. – 2016. – V. 60. – P. 64–74.
18. Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 336 с.
19. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саев, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
20. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.
21. Назаров А.Д. Нефтегазовая гидрохимия юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. – М.: Идея-Пресс, 2004. – 288 с.
22. Критерии ураноносности Западно-Сибирской плиты / В.А. Домаренко, Е.А. Воробьев, А.К. Мазуров и др. // Уран: Ресурсы и производство: тезисы второго международного симпозиума. – М., 26–28 ноября 2008. – М.: ВИМС, 2008. – С. 40–42.
23. Соболев И.С., Чернев Е.М. Отражение глубинного строения юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в элементном составе осадочных пород дневной поверхности // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 3. – С. 21–29.
24. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: Д-Принт, 2007. – 468 с.
25. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем: автореф. дис. ... д-ра наук. – Томск, 2011. – 46 с.
26. Межибор А.М. Экогеохимия элементов-примесей в верховых торфах Томской области: автореф. дис. ... канд. наук. – Томск, 2009. – 22 с.
27. Соболев И.С. О возможности изучения элементного состава снежного покрова при геохимическом картировании зон и областей внедрения глубинных флюидов (нефтегазопойсковый аспект) // Геология нефти и газа. – 2013. – № 1. – С. 68–77.
28. Bromine Compounds / D. Yoffe, R. Frim, S. Ukeles et al. // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. – P. 1–31.
29. 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.
30. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 438 с.
31. Bromine residues in the soil and fruits of certain crops after soil fumigation with methyl bromide / I.K. Nazer, A.B. Hallak, W.I. Abu-Gharbieh, N.S. Saleh // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1982. – V. 74. – № 1–2. – P. 113–116.
32. Bowen H.J.M. Environmental chemistry of the elements / H.J.M. Bowen. – London: Academic Press, 1979. – 333p.
33. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 230 с.
34. Yuita K. Iodine, bromine and chlorine contents in soils and plants of Japan // Soil Science and Plant Nutrition. – 1983. – V. 29. – P. 403–428.
35. NSI topsoil Bromine Concentrations. URL: <http://www.ukso.org/nsi/Bromine.html> (дата обращения: 01.02.2017).
36. Bichler M., Poljanc K., Sortino F. Determination and speciation of minor and trace elements in volcanic exhalations by NAA // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles. – 1995. – V. 192. – № 2. – P. 183–194.

Поступила 07.02.2017 г.

Информация об авторах

Перминова Т.А., аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; аспирант Технологического университета Труа.

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ларатт Б., PhD, преподаватель-исследователь Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC.

Жорняк Л.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Судыко А.Ф., инженер кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 631.4:550.42:546.14(571.16)

BROMINE IN THE SOILS OF TOMSK REGION

Tatiana A. Perminova^{1,2},
tatianap1991@yandex.ru/tatianap1991@utt.fr

Natalia V. Baranovskaya¹,
nata@tpu.ru

Bertrand Laratte³,
Bertrand.LARATTE@ensam.eu

Lina V. Zhornyak¹,
zhornyak_lina@mail.ru

Alexander F. Sudyko¹,
afs@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Technological University of Troyes, 12, Mari Curie street, 10010, Troyes, France.

³ Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC,
UMR 5295, F-33400 Talence, France.

The research relevance. Nowadays bromine remains one of the least studied chemical elements that, evidently, leads to the absence of any standards in some environmental media such as soil or food. Having high reactivity and migration capacity, bromine can easily penetrate to living organism through the food chain. High toxicity of bromine and its negative effects on physiological functions of living organisms define the necessity of detailed researches on this issue to be conducted. Since the soil is the primary «producer» of nutrients for plants, and, consequently, for other living organisms (including a human), the need to study its chemical composition is a high-priority objective.

The main aim is to study bromine content and its distribution particularities in soils of Tomsk region.

The methods used: the main method of the research is Instrumental neutron activation analysis.

Results. The paper introduces the results of the study of chemical elements in the soils of settlements in 14 districts of Tomsk region. High concentrations of bromine in the soils of certain territories were found. The comparative analysis of bromine accumulation levels in soils of Tomsk region with soils of other regions of Russia and foreign counties was carried out. Correlations of Br with other chemical elements were established. The authors have discussed possible natural and anthropogenic factors influencing the accumulation of the element.

Findings. The authors determined the pollution level of soils in Tomsk region and its individual districts according to the calculation of the total soil pollution index. It was found out that bromine is the only element, the values of the concentration coefficients of which exceed 10 units for soils in almost all districts of the region. It was found that the bromine contents in soils of Tomsk region are above the soil concentrations specified for soils of the world, the Clarke contents of the element as well as levels found in soils of other regions of Russia. The maximum bromine concentrations were found in the soils of Bakcharsky district.

Key words:

Chemical elements, bromine, geochemical associations, soils, Tomsk region.

REFERENCES

1. Pashneva G.E. *Mikro- i nekotorye redkiye elementy v pochvakh Tomskoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Micro- and some trace elements in the soils of the Tomsk region. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1967. 22 p.
2. Azarenko Yu.A. *Zakonomernosti sodержaniya, raspredeleniya, vzaimosvyazey mikroelementov v sisteme pochva–rasteniye v usloviyakh yuga Zapadnoy Sibiri* [Peculiarities of trace elements content, distribution and relationships in the system soil–plant in the South of Western Siberia]. Omsk, Variant-Omsk Publ., 2013. 232 p.
3. Ilin V.B., Syso A.I. *Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoy oblasti* [Trace elements and heavy metals in the soils of Novosibirsk region]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2001. 229 p.
4. Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri* [Laws of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. 227 p.
5. Konarbaeva G.A. *Galogeny v pochvakh yuga Zapadnoy Sibiri* [Halogens in soils of the south of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2004. 200 p.
6. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Sarnayev S.I. *Soderzhaniye tyazhelykh metallov v pochvakh* [Heavy metals content in soils]. Tomsk, TPU Publ., 1993. 85 p.
7. Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Baranovskaya N.V. The state of environmental components of Tomsk region according to ecological and geochemical monitoring and public health. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2008, no. 1 (85), pp. 29–37. In Rus.
8. Evseyeva N.S., Pashneva G.E., Kvasnikova Z.N. Deluvial process in agricultural landscapes of the south of Tomsk region and its ecological-geomorphological aspects. *Vestnik TGU. Biologiya*, 2013, no. 4 (24), pp. 7–19. In Rus.

9. Osipova N.A., Zhorniyak L.V., Yazikov E.G., Syskina A.A. Ecological Dangers of Chemical Contamination of Urban Areas Soils: Case study of Tomsk. *Procedia Chemistry*, 2014, vol. 10, pp. 508–512.
10. Zhorniyak L.V., Osipova N.A., Yazikov E.G., Demidova K.E., Osipov K.Y. Geochemical peculiarities of soils in Tomsk areas of industrial enterprises locations. *Proc. SPIE. 10035. 22nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100354H*. November 29, 2016.
11. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: spravochnik. Kn. 3. Redkiye p-elementy* [Environmental geochemistry of elements: a handbook. B. 3. Rare p-elements]. Ed. by E.K. Burnekova. Moscow, Nedra Publ., 1994. 352 p.
12. Baranovskaya N.V., Perminova T.A., Laratt B., Narkovich D.V., Denisova O.A. Biogeochemical features of bromine accumulation in the human body (example of Tomsk region). *Vestnik OmGAU*, 2016, no. 3 (23), pp. 155–165. In Rus.
13. McCall S. Bromine is an essential trace element for assembly of collagen IV scaffolds in tissue development and architecture. *Cell*, 2014, vol. 157, pp. 1380–1392.
14. Valdés A. Elemental concentrations of ambient particles and cause specific mortality in Santiago, Chile: a time series study. *Environmental Health*, 2012, vol. 11, 82 p.
15. Ehmann W.D., Vance D.E. Studies of trace element involvement in human disease by in vitro activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1996, vol. 203, no. 2, pp. 429–445.
16. Lin S.M. Instrumental neutron activation analysis of urinary calculi. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1985, vol. 96, no. 2, pp. 153–160.
17. Perminova T., Laratte B., Sirina N., Baranovskaya N., Rikhvanov L. Methods for land use impact assessment: a review. *Environmental Impact Assessment Review*, 2016, vol. 60, pp. 64–74.
18. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu. *Geoekologicheskii monitoring* [Geological monitoring]. Tomsk, TPU Publ., 2003. 336 p.
19. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
20. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhorniyak L.V. *Otsenka ekologo-geokhimicheskogo sostoyaniya territorii g. Tomsk po dannym izucheniya pyleaerozoley i pochvu* [Evaluation of ecological and geochemical state of Tomsk city, according to the study of dust aerosols and soils]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Press, 2010. 264 p.
21. Nazarov A.D. *Neftegazovaya gidrokhimiya yugo-vostochnoy chasti Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provintsii* [Oil and gas hydrochemistry of the South-Eastern part of the West Siberian oil and gas province]. Moscow, Ideya-Press, 2004. 288 p.
22. Domarenko V.A., Vorobyev E.A., Mazurov A.K. Kriterii uranonochnosti Zapadno-Sibirskoy plity [Criteria for uranium-bearing aspects of the West Siberian Plate]. *Uran: Resursy i proizvodstvo. Tezisy vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma* [Uranium: Resources and production. Theses of the Second International Symposium]. Moscow, 26–28 November 2008. Moscow, VIMS Publ., 2008. pp. 40–42.
23. Sobolev I.S., Chernev E.M. Reflecting the deep structure of the south-eastern part of the West Siberian oil and gas province in the elemental composition of sedimentary rocks of the earth's surface. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2010, no. 3, pp. 21–29. In Rus.
24. Arbuzov S.I., Ershov V.V. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in Siberian coals]. Tomsk, D-Print Publ., 2007. 468 p.
25. Baranovskaya N.V. *Zakonomernosti nakopleniya i raspredeleniya khimicheskikh elementov v organizmakh prirodnykh i prirodno-antropogennykh ekosistem*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Patterns of storage and distribution of chemical elements in organisms of natural and natural-anthropogenic ecosystems. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 46 p.
26. Mezhibor A.M. *Ekogeokhimiya elementov-primesev v verkhovyykh torfakh Tomskoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecogeochemistry of elements in peat of Tomsk region. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2009. 22 p.
27. Sobolev I.S. On the possibility of studying the elemental composition of snow cover during geochemical mapping of zones and areas of deep fluids (oil and gas exploration aspect). *Geology of oil and gas*, 2013, no. 1, pp. 68–77. In Rus.
28. Yoffe D., Frim R., Ukeles S. Bromine Compounds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. pp. 1–31.
29. Vinogradov A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and trace elements in soils]. Moscow, AN SSSR Press, 1957. 230 p.
30. 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.
31. Kabata-Pendias A., Pendias X. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Mir Publ., 1989. 438 p.
32. Bowen H.J.M. *Environmental chemistry of the elements*. London, Academic Press, 1979. 333 p.
33. Nazer I.K., Hallak A.B., Abu-Gharbieh W.I., Saleh N.S. Bromine residues in the soil and fruits of certain crops after soil fumigation with methyl bromide. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1982, vol. 74, no. 1–2, pp. 113–116.
34. Yuita K. Iodine, bromine and chlorine contents in soils and plants of Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1983, vol. 29, pp. 403–428.
35. *NSI topsoil Bromine Concentrations*. Available at: <http://www.ukso.org/nsi/Bromine.html> (accessed 1 February 2017).
36. Bichler M., Poljanc K., Sortino F. Determination and speciation of minor and trace elements in volcanic exhalations by NAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1995, vol. 192, no. 2, pp. 183–194.

Received: 7 February 2017.

Information about the authors

Tatiana A. Perminova, PhD student, National Research Tomsk Polytechnic University; Technological University of Troyes.

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

Bertrand Laratte, PhD, associate professor, Arts et Métiers ParisTech, I2M-IMC.

Lina V. Zhorniyak, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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