

УДК 504.054

## ИНДИКАЦИЯ КОМПОНЕНТАМИ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ТРАНСГРАНИЧНОГО ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ТЕРРИТОРИЮ ГОРНОГО АЛТАЯ

**Робертус Юрий Владимирович<sup>1</sup>,**  
ariocol@mail.gorny.ru

**Удачин Валерий Николаевич<sup>2</sup>,**  
udachin@mineralogy.ru

**Рихванов Леонид Петрович<sup>3</sup>,**  
richvanov@tpu.ru

**Кивацкая Анна Васильевна<sup>2</sup>,**  
ariocol@mail.gorny.ru

**Любимов Роман Владимирович<sup>4</sup>,**  
iwer@iwer.ru

**Юсупов Дмитрий Валерьевич<sup>3</sup>,**  
yusupovd@mail.ru

<sup>1</sup> Автономное учреждение Республики Алтай «Алтайский региональный институт экологии»,  
Россия, 649100, Республика Алтай, с. Майма, ул. Заводская, 54.

<sup>2</sup> Институт минералогии УрО РАН,  
Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>4</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН,  
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью изучения состояния окружающей среды Алтая, подверженного многолетнему переносу загрязнителей с соседней территории Восточного Казахстана.

**Объекты и методы исследования.** Для изучения характера и масштабов переноса загрязняющих веществ в 2015 г. на четырех региональных профилях с шагом 40–60 км проведено опробование снежного покрова и листьев тополя черного (*Populus nigra* L.) в 15 и 17 пунктах соответственно на территории Республики Алтай и частично Алтайского края. Фильтрат, твердый остаток снега и зола листьев тополя черного изучены методом ICP-MS в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс) на содержание 50 химических элементов.

**Результаты.** Картографированные данные по химическому составу фильтрата, твердого остатка снега и золы листьев тополя черного выявили на территории Горного Алтая крупный ореол пространственно сопряженных пониженных значений pH и повышенных концентраций сульфатов, соединений минерального азота и геохимически отличных ассоциаций породообразующих элементов и элементов полиметаллических руд, перерабатываемых на предприятиях комбината «Казцинк» (г. Усть-Каменогорск, Риддер). Основными элементами рудной ассоциации являются цинк, медь, свинец; второстепенными – кадмий, олово, молибден, вольфрам, сурьма, мышьяк, висмут, селен, теллур, таллий. Для пространственного распределения всех изученных веществ и элементов в снеготалой воде, пыли и листьях тополя характерны однотипные размеры, морфология и северо-восточная ориентировка ореолов их повышенных концентраций. Протяженность обобщенного мегаореола трансграничного загрязнения в пределах Алтая превышает 300 км при его средней ширине 100–120 км и площади более 30 тыс. км<sup>2</sup>.

**Выводы.** Предварительно установлен однотипный характер спектра и уровня содержания элементов рудной ассоциации в снеговой пыли вблизи комбината «Казцинк» (г. Усть-Каменогорск) и в пыли снежного покрова в Горном Алтае, что позволяет считать выбросы комбината источником трансграничного переноса пылеаэрозолей тяжелых металлов и токсичных элементов и их поступления на территорию региона в виде «сухих» и «мокрых» локальных выпадений.

### **Ключевые слова:**

Горный Алтай, Восточный Казахстан, выбросы металлургических предприятий, трансграничный перенос, рудные элементы, загрязнение природных сред.

### **Введение**

Известно, что промышленные центры являются мощными источниками выбросов загрязняющих веществ, которые в результате многолетних

локальных и глобальных выпадений нередко формируют значительные по размерам техногенные биогеохимические провинции с аномальным содержанием широкого спектра токсикантов в депо-

нирующих загрязнение объектах окружающей среды [1–5].

Основными источниками трансграничного загрязнения окружающей среды европейской части России являются страны Центральной и Восточной Европы [6], азиатской части – Казахстан, Монголия и Китай [7–11]. В частности, одними из основных промышленных центров, предположительно влияющих на азиатскую часть России, в том числе на Алтай, являются города Усть-Каменогорск и Риддер в Восточно-Казахстанской области (ВКО), металлургические предприятия которых ежегодно выбрасывают в атмосферу более 2 млн т загрязняющих веществ. Другими источниками загрязнения атмосферного воздуха являются твердые отходы горно-металлургической отрасли ВКО, которых накоплено более 1,5 млрд т [12].

В настоящее время проблема аэрогенного переноса на территорию Алтая тяжелых металлов, присутствующих в выбросах вышеотмеченных предприятий ВКО, изучена в первом приближении [13–15]. Так, при исследовании фильтрата и пыли снежного покрова в 2008–2010 гг. на территории Западного Алтая нами был выявлен крупный геохимический ореол повышенного содержания сульфатов, соединений азота и ассоциации элементов полиметаллических руд на фоне пониженных значений рН, предположительно обусловленный их поступлением с территории ВКО [14].

#### Материалы и методы

Исследование в расширенном средовом варианте (фильтрат и пыль снеговых проб, зола листьев тополя черного) было продолжено в 2015 г. на территории Республики Алтай и, частично, Алтайского края. Опробование снежного покрова проведено в марте по четырем региональным профилям с шагом 40–60 км на 15 пунктах. Опробование листьев тополя проведено в августе на 17 пунктах (рис. 1). Пробы снега брались методом конверта с планшета 10×10 м при помощи пластмассовой трубы диаметром 10 см и в дальнейшем объединялись в одну пробу. Листья тополя отбирались из нижней части кроны 3–5 деревьев и объединялись в одну пробу массой 50–100 г.

Общий химический анализ фильтрата снеготалой воды проведен в лабораториях Горно-Алтайского университета и Института минералогии УрО РАН (г. Миасс). Фильтрат, пыль снеговых проб и зола листьев изучены на 50 элементах методом ICP-MS в Институте минералогии УрО РАН.

#### Результаты и их обсуждение

**Снеготалая вода.** Данные по химическому составу фильтрата снеговой воды подтверждают установленное в 2008–2010 гг. [13, 14] присутствие на сопредельной с ВКО территории Алтая пониженных значений рН, нитратов, хлоридов и повышенных концентраций щелочных металлов (кальция, натрия, калия), соединений серы и азо-

та (сульфаты, нитриты, аммоний-ион), а также ряда тяжелых металлов, имеющих между собой тесные корреляционные связи.

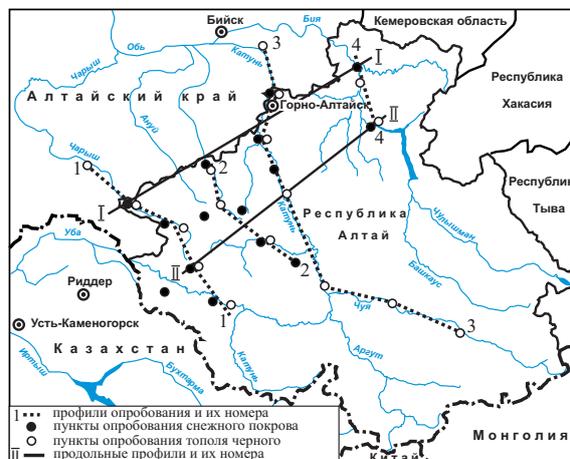


Рис. 1. Обзорная схема изучения объектов окружающей природной среды Алтая в 2015 г.

Fig. 1. Overview diagram of study of Altai natural environment objects in 2015

Значения рН снеговой воды на территории региона, указывающие на нейтральный и слабокислотный ( $\text{pH} < 5,5$ ) характер твердых атмосферных выпадений, не позволяют считать их кислотными осадками, но особенность их распределения свидетельствует о наличии таких осадков на сопредельной территории ВКО.

Интенсивность потока серы из атмосферы в пределах Алтая (до  $16,8 \text{ кг/км}^2\cdot\text{мес.}$ ), рассчитанная авторами по содержанию сульфатов в воде, с учетом влагозапаса и времени залегания снега, в целом выше регионального фона –  $6,35 \text{ кг/км}^2\cdot\text{мес.}$  (по [16]  $5\text{--}10 \text{ кг/км}^2\cdot\text{мес.}$ ). Атмосферный поток азота не превышает фоновый уровень  $2\text{--}9 \text{ кг/км}^2\cdot\text{мес.}$  (табл. 1). Таким образом, несмотря на отмеченный слабоповышенный поток серы, в регионе не наблюдается заметное подкисление атмосферных осадков.

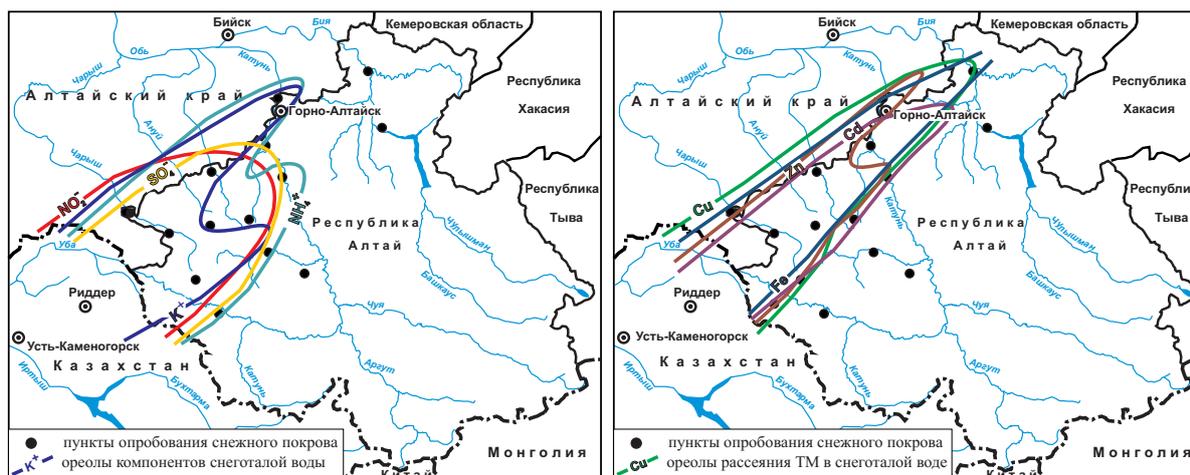
В пространственном распределении показателей макрохимического состава фильтрата снеготалой воды на территории Алтая установлены следующие особенности:

- минимальные значения рН, содержание нитратов и хлоридов проявлены на сопредельной с ВКО территории региона, при удалении от ВКО они возрастают;
- для распределения других катионов и анионов проявлена противоположная тенденция – уменьшения их содержания при удалении от территории ВКО;
- обратное соотношение нитритов и более устойчивых в природных условиях нитратов указывает на повышенную кислотность атмосферных осадков вблизи ВКО;
- пространственно совпадающие области повышенного и пониженного содержания изучен-

**Таблица 1.** Химический состав фильтрата снеговых проб на территории Алтая, мг/дм<sup>3</sup>

**Table 1.** Chemical composition of snow samples filtrate in the territory of Altai, mg/dm<sup>3</sup>

Содержание Content	рН, ед.		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
	2008	2015	2008	2015	2008	2015	2008	2015
min	5,15	5,39	5,3	4,6	0,03	0,01	0,05	0,22
max	6,36	6,17	11,5	7,7	0,43	0,92	0,55	1,56
Среднее/Mean	5,55	5,73	7,6	5,2	0,16	0,27	0,16	0,60
Фон региона/Background	6,4	6,3	5,0	4,5	0,03	0,01	0,8	1,0
Выпадение (сред./max), кг/км <sup>2</sup> ·мес. Snowfall (mean/max), kg/km <sup>2</sup> ·month			33,3/50,3	22,9/33,6	0,7/1,9	1,2/4,0	0,7/2,4	2,6/6,8



**Рис. 2.** Ореолы катионов-анионов (слева) и микроэлементов (справа) в снеготалой воде

**Fig. 2.** Halos of cations and anions (left) and microelements (right) in melt water

ных макрокомпонентов химического состава снеговой воды образуют языкообразный зонально построенный мегаореол, вытянутый в северо-восточном направлении до границы Кемеровской области и Республики Хакасия. На территории Алтая его площадь составляет около 30 тыс. км<sup>2</sup>, протяженность – более 300 км при средней ширине 100–120 км (рис. 2).

Для пространственного распределения содержания большинства из 50 изученных микроэлементов (МЭ) снеговой воды присущи вышеотмеченные особенности положения, размеров, морфологии и внутреннего строения ореолов. Для них также проявлена тенденция уменьшения их содержания по мере удаления от территории ВКО.

Предварительно установлено, что число корреляционных связей между МЭ в снеговой воде увеличивается в ряду типовых геохимических ассоциаций: Cu, Cd (по 1-й значимой связи) – As, Sb (2) – Zn, Pb (3) – Mo, W (6 связей). Возможной причиной их формирования являются различия данных МЭ в степени сродства к кислороду и сере.

**Твёрдофазный осадок снега.** Установлено, что на изученной территории Алтая ореол слабо повышенной пылевой нагрузки 10–20 кг/км<sup>2</sup>·сут на фоне 5 кг/км<sup>2</sup>·сут ориентирован в северо-восточном направлении и в целом совпадает по перечислен-

ным выше параметрам с мегаореолом повышенных концентраций макрокомпонентов и МЭ в снеговой воде. С этим ореолом пылевой нагрузки пространственно совпадают ореолы аномально повышенного присутствия всего комплекса изученных МЭ в снеговой пыли, для большинства из которых, особенно для породообразующих МЭ, присуще увеличение их содержания при приближении к территории ВКО (рис. 3).

В то же время эпицентры ореолов основных и второстепенных элементов полиметаллических руд (Zn, Cu, Pb, Cd, Bi, As, Sb, Se, Te, Mo, Sn, W) нередко смещены относительно границы ВКО и иногда полностью находятся в пределах Алтая (Te, Sn, Cd, Pb и др.), что говорит о большой дальности переноса аэрозолей этих высоколетучих МЭ.

Показатель суммарного загрязнения (СПЗ) снеговой пыли элементами 1–3 классов опасности на изученной территории Алтая варьируется от 35 до 84 (высокий уровень загрязнения). Доля рудных МЭ в СПЗ увеличивается при удалении от ВКО в северо-восточном направлении (от 20–40 % до 60–70 % и более), что указывает на их более дальний перенос по сравнению с породообразующими МЭ.

Величина отношения фильтрат/пыль у рудных и сопутствующих им МЭ (W, Mo, Tl, La, U и др.) к

S

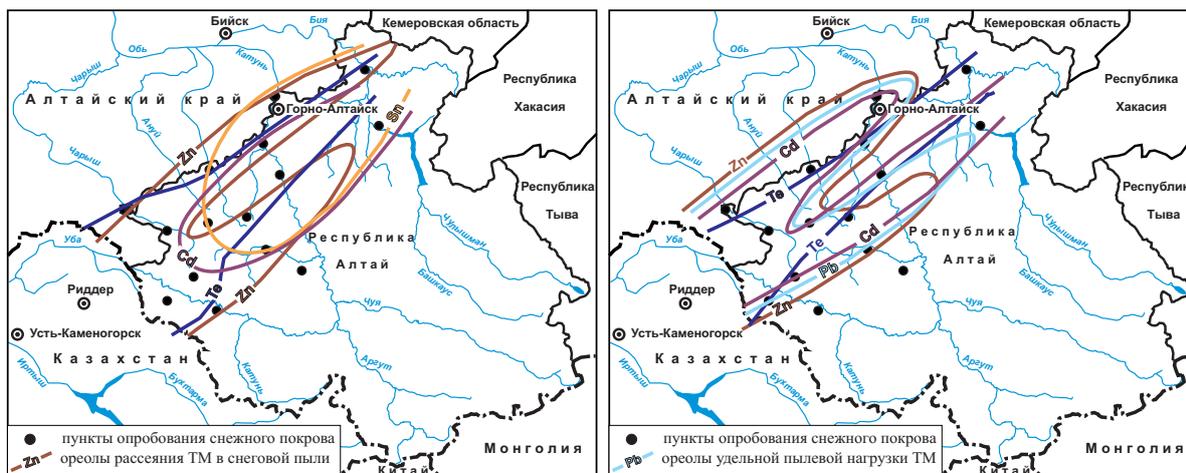


Рис. 3. Ореолы МЭ в пыли снега (слева), ореолы пылевой нагрузки МЭ (справа)

Fig. 3. Halos of microelements (ME) in snow dust (left), halos of ME dust load (right)

Таблица 2. Отношение содержания МЭ в фильтрате и пыли снежного покрова Алтая

Table 2. Ratio of ME content in the filtrate and dust of snow cover of Altai

МЭ ME	Фильтрат/пыль, ед. Filtrate/dust, unit			МЭ ME	Фильтрат/пыль, ед. Filtrate/dust, unit			МЭ ME	Фильтрат/пыль, ед. Filtrate/dust, unit		
	max	среднее mean	фон background		max	среднее mean	фон background		max	среднее mean	фон background
Al	0,0005	0,0002	0,0001	<b>Zn</b>	0,2462	0,0902	0,01	<b>Tl</b>	0,1002	0,0458	0,005
V	0,0037	0,0015	0,0015	<b>Pb</b>	0,0251	0,0086	0,001	Li	0,0418	0,0050	0,001
Cr	0,0075	0,0032	0,002	<b>Cd</b>	0,1254	0,0615	0,01	Be	0,0032	0,0018	0,001
Fe	0,0009	0,0003	0,0001	<b>Mo</b>	0,0737	0,0252	0,005	<b>La</b>	0,0100	0,0032	0,0004
Ni	0,0655	0,0095	0,003	<b>Bi</b>	0,0216	0,0058	0,001	Th	0,0012	0,0006	0,0003
Co	0,0146	0,0051	0,004	<b>W</b>	0,1615	0,0268	0,001	<b>U</b>	0,1265	0,0126	0,001

Примечание. Жирным шрифтом выделены МЭ, у которых значение отношения фильтрат/пыль превышает фоновое значение в 5 раз и более.

Note. ME with ratio filtrate/dust >5 than background value are highlighted in bold.

их местному фону в целом выше, чем значения этого параметра для породообразующих МЭ (табл. 2). На основании этого можно предполагать, что растворимость в воде МЭ и их соединений, содержащихся в выбросах металлургических предприятий, выше, чем в пылевой фракции природных атмосферных выпадений.

Сравнение средних концентраций породообразующих МЭ в снеговой пыли на территории Алтая с их содержанием в пыли подфакельных проб снега вблизи свинцово-цинкового комбината (СЦК) «Казцинк» (г. Усть-Каменогорск) показывает, что они примерно равны или различаются не более чем в два раза.

Для ассоциации рудных МЭ содержание в пыли подфакельных проб СЦК в 6,3–450,4 раза выше, чем в снеговой пыли на территории Алтая. Величина убывания этого отношения образует ряд: Cd > Zn > Te > Sb > Cu > Pb > As > Ta > Tl > Se > W > Sn (табл. 3).

Таблица 3. Содержание МЭ в твёрдофазном осадке снега у СЦК «Казцинк» (C<sub>1</sub>) и на Алтае (C<sub>2</sub>)

Table 3. ME content in dust of snow from LZP «Kaztsinc» (C<sub>1</sub>) and in Altai (C<sub>2</sub>)

Элементы Elements	Среднее содержание в пыли, мг/кг Average content in dust, mg/kg		C <sub>1</sub> /C <sub>2</sub> , ед.	Отношение, ед. Ratio, unit	
	C <sub>1</sub> (n=2)	C <sub>2</sub> (n=10)		C <sub>1</sub> /C <sub>Te</sub>	C <sub>2</sub> /C <sub>Te</sub>
Zn	48686,6	259,5	187,6	4309	2884
Cu	5384,4	101,0	53,3	476	1122
Pb	4730,7	92,7	51,0	419	1030
Cd	805,4	1,8	450,4	71	20
As	616,4	16,1	38,3	55	179
Sb	258,8	2,8	92,7	23	31
Sn	73,3	11,6	6,3	6	129
Se	50,6	5,2	9,8	4	58
W	23,0	3,4	6,7	2	38
Te	11,3	0,09	125,6	1	1

Нормирование средних концентраций МЭ в снеговой пыли на содержание теллура (минимальное для рудных МЭ) дает следующий убывающий ряд: Zn>Cu>Pb>As>Sn>Se>W>Sb>Cd>Te. Почти идентичная последовательность проявлена для пыли у комбината «Казцинк»: Zn>Cu>Pb>Cd>As>Sb>Sn>Se>W>Te.

Близость отношения рудных МЭ в снеговой пыли вблизи СЦК «Казцинк» и на изученной площади прямо указывает на привнос пыли предприятия на территорию Алтая. Примечательно, что в процессе аэрогенного переноса выбросов комбината уровень концентрации рудных МЭ относительно теллура в снеговой пыли становится заметно выше (в 3–21 раз), кроме цинка и кадмия, что предположительно объясняется увеличением доли тонкодисперсных рудных частиц в аэрозолях.

Удельная пылевая нагрузка является наиболее информативной и объективной характеристикой особенностей распределения изученных МЭ в снежном покрове на территории региона. Полученные данные однозначно свидетельствуют о локализации максимальной удельной пылевой нагрузки всех изученных МЭ вблизи границы с ВКО, а также об их значительном превышении местного фона. Примечательно, что для породообразующих МЭ эти превышения (80–170 раз при среднем 125 раз) заметно выше превышений ассоциации рудных элементов, которые варьируют в пределах 16–87 раз при среднем 50 раз (табл. 4).

**Таблица 4.** Величина зимних выпадений МЭ на территории Алтая, г/км<sup>2</sup>·мес.

**Table 4.** Magnitude of ME winter precipitation in the territory of Altai, g/km<sup>2</sup>·month

МЭ/ME	max		Фон/Background		max/фон		max/background				
	max	Фон/Background	max	Фон/Background	max	Фон/Background	max	Фон/Background			
Al	15190	150	101	Li	11,5	0,07	164	<b>Cd</b>	0,16	0,005	32
Fe	9900	80	124	Be	0,5	0,003	167	<b>Bi</b>	0,14	0,002	70
Ti	400	5	80	Th	1,7	0,01	170	<b>Sb</b>	0,45	0,01	45
Cr	20	0,2	100	U	0,36	0,04	90	<b>Sn</b>	0,59	0,02	30
V	27	0,2	135	<b>Cu</b>	26	0,3	87	<b>Mo</b>	0,24	0,005	48
Ni	10	0,1	100	<b>Zn</b>	51	0,7	73	<b>W</b>	0,23	0,005	46
Co	4	0,03	133	<b>Pb</b>	12	0,2	60	<b>Tl</b>	0,08	0,005	16

Примечание. Отношение max/фон дано в единицах; жирным выделены элементы полиметаллических руд.

Note. Ratio max/background is given in units; base metal elements are highlighted.

Предположительно, превышение доли породообразующих МЭ над рудными МЭ в удельной пылевой нагрузке обусловлено разными источниками поступления на территорию Алтая породных (алюмосиликатов горных пород) и рудных составляющих пылеаэрозолей [17].

Предварительно можно констатировать, что особенностями выявленных геохимических ореолов летучих рудных и сопутствующих им МЭ (Te, Cd, Sn, W и др.) являются: их большая протяженность (ореолы более вытянуты на северо-восток) и менее контрастные («размытые») границы, чем у ореолов породообразующих МЭ. Несмотря на это, ореолы удельной пылевой нагрузки, включающие породообразующие и рудные МЭ, в основном совпадают с их ореолами в снеговой воде и пыли.

Анализ особенностей распределения удельной пылевой нагрузки МЭ на продольных профилях I-I (Коргон-Турочак) и II-II (Кырлык-Артыбаш) показал отличие в уровне снижения пылевой нагрузки породообразующих и рудных МЭ по мере удаления от ВКО (рис. 1). Так, содержание рудных МЭ на северо-восточных флангах профилей относительно их юго-западных флангов в 3–5 раза выше, чем у породообразующих МЭ (табл. 5).

Содержание рудных МЭ уменьшается в следующем обобщенном ряду выделяемого нами «рудно-алтайского» типа миграции: Te>Sn>W>Mo>Pb>Cd>Bi>Sb>Zn>Cu, в целом отражающего степень аэрозольной летучести соединений этих элементов по [18].

**Таблица 5.** Распределение удельной нагрузки МЭ на продольных профилях I-I и II-II, ед.

**Table 5.** Distribution of specific load of ME major associations on the profiles I-I and II-II

Породообразующие МЭ Rock-forming ME	Профиль I-I Турочак/Коргон* Turochak/Korgon	Профиль II-II Артыбаш/Кырлык** Artybash/Kyryk	Рудные МЭ Ore ME	Профиль I-I Турочак/Коргон* Turochak/Korgon	Профиль II-II Артыбаш/Кырлык** Artybash/Kyryk
Al	0,009	0,074	Cu	<b>0,060</b>	0,035
V	0,008	0,080	Zn	<b>0,070</b>	0,047
Cr	0,016	0,070	Pb	<b>0,043</b>	<b>0,177</b>
Fe	0,010	0,070	Cd	<b>0,051</b>	<b>0,160</b>
Ni	0,020	0,060	Sb	<b>0,031</b>	<b>0,124</b>
Co	0,009	0,060	Sn	<b>0,141</b>	<b>0,498</b>
Be	0,008	0,010	Mo	0,024	<b>0,198</b>
Th	0,006	0,100	Bi	<b>0,036</b>	<b>0,160</b>
U	0,014	0,074	W	<b>0,031</b>	<b>0,240</b>
Среднее Mean	0,012	0,074	Среднее Mean	<b>0,060</b>	<b>0,203</b>

Примечание. Выделены значения удельной элементной нагрузки более 0,03 ед. (\*) и более 0,1 ед. (\*\*).

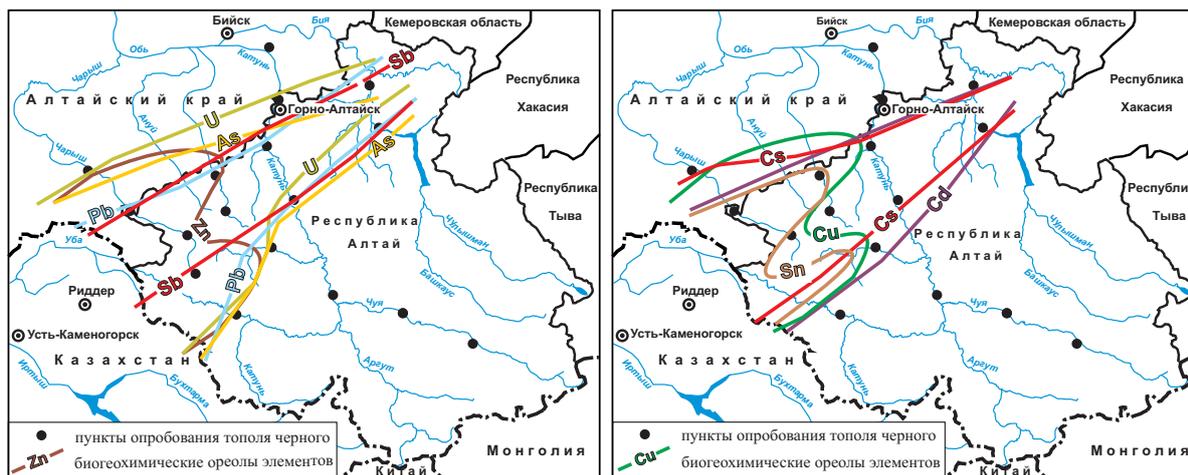
Note. Values of specific load of ME major associations (0,03 unit (\*) and >0,1 unit (\*\*)) are highlighted.

Следует отметить, что для удельной пылевой нагрузки рудных МЭ характерна повышенная вариабельность ( $V>50\%$ ) по сравнению с породообразующими МЭ ( $V=10-30\%$ ). Корреляционные связи в ассоциации рудных МЭ в компонентах снежного покрова заметно ниже, чем у породообразующих МЭ.

**Таблица 6.** Среднее содержание МЭ в золе листьев тополя черного на территории Алтая, мг/кг

**Table 6.** ME average content in ash of black poplar leaves in Altai territory, mg/kg

Содержание/Content	Fe	Mn	Ti	V	Ni	Co	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Sb	Mo	Sn
max	396	138	8,3	0,60	1,64	1,07	6,3	22,6	0,56	0,76	0,20	0,21	4,19	0,10
Среднее/Mean	255	85	4,1	0,30	0,77	0,52	4,8	9,2	0,41	0,30	0,09	0,05	0,72	0,03
Фон региона/Background	70	40	1,0	0,05	0,15	0,20	3,0	4,0	0,20	0,10	0,02	0,01	0,15	0,01
Сред./фон, ед./Mean/background (units)	3,6	2,1	4,1	6,0	5,1	2,6	1,6	2,3	2,0	3,0	4,5	5,0	4,8	3,0



**Рис. 4.** Положительные (слева) и отрицательные биогеохимические ореолы МЭ (справа) на Алтае

**Fig. 4.** Positive (left) and negative biogeochemical halos of ME (right) in Altai

**Листья тополя.** Сравнение средних концентраций элементов в золе листьев тополя черного (*Populus nigra* L.) на изученной территории Алтая с их средним содержанием в г. Усть-Каменогорске [19–21] показало, что в пределах города, особенно в районе нахождения СЦК «Казцинк», они заметно выше для большинства МЭ. Максимальное превышение отмечено для рудных и сопутствующих им элементов – цинк (51,5 раза), кадмий (14,1), сурьма (9,1), мышьяк (5,3 раза).

Содержание МЭ в золе листьев тополя на площади выявленного мегаореола загрязнения в 1,6–6 раз (в среднем в 3,5 раза) выше местного фона (среднее содержание МЭ на незагрязненной территории республики), при этом заметных различий в превышении фона для породообразующих и рудных МЭ не наблюдается (табл. 6).

Число корреляционных связей у рудных МЭ в листьях тополя, как и в снеговой воде и пыли, в среднем в 2,2 раза меньше, чем у породообразующих МЭ, что также указывает на обособленный характер поступления этих ассоциаций МЭ на территорию Алтая.

На территории региона породообразующие МЭ в листьях тополя черного – одного из наиболее представительных биоиндикаторов антропогенного воздействия [22] – образуют в основном положительные биогеохимические ореолы, в то время как для ряда рудных МЭ присущи и отрицательные ореолы. Их положение, размеры, морфология и

внутреннее строение в целом совпадают с вышеотмеченными характеристиками геохимических ореолов в снежном покрове.

Наиболее отчетливо отрицательные ореолы проявлены для кадмия и олова, содержание которых в листьях тополя в эпицентре мегаореола в 2–5 раза ниже их фона, и в меньшей степени для меди, лантана, цезия и др. (рис. 4). Возможной причиной их формирования является избирательная способность тополя к поглощению привнесенных концентраций различных химических элементов.

Приведенная выше характеристика пространственного распределения широкого спектра химических элементов в изученных природных средах однозначно подтверждает существование на трансграничной с ВКО территории Алтая обширного ориентированного в северо-восточном направлении ореола (мегаореола) наложенного тяжелометалльного загрязнения, обусловленного переносом воздушными массами выбросов металлургических предприятий ВКО.

Обобщенная продольная ось этого мегаореола совпадает с линией Усть-Каменогорск – Риддер – Усть-Кан – Артыбаш. Северо-западная граница мегаореола довольно отчетливая и расположена вдоль административной границы Республики Алтай и Алтайского края, а юго-восточная граница более расплывчатая, предположительно из-за влияния ветров западных и северо-западных румбов, преобладающих в теплый период года.

Протяженность мегаореола трансграничного загрязнения в пределах Алтая превышает 300 км при его средней ширине 100–120 км и площади более 30 тыс. км<sup>2</sup>.

#### Заключение

Результаты проведенного исследования позволяют:

- выделить в изученных природных средах ассоциации породообразующих (в основном литофильных и сидерофильных) и рудных халькофильных и геохимически близких к ним элементов (Cu, Zn, Pb, Cd, Bi, As, Sb, Se, Te, Mo, Sn, W, Mo, Tl);
- считать идентичными спектры и содержание рудных элементов в пыли подфакельных проб комбината «Казцинк» и в снеговой пыли на территории Алтая;
- подтвердить наличие в снежном покрове и листьях тополя на территории Алтая аномально повышенных концентраций элементов, участвующих в переносе полиметаллических руд на предприятиях ВКО;
- утверждать, что СЦК «Казцинк» является основным источником эмиссии и последующего трансграничного переноса на территорию Алтая широкого комплекса опасных для окружающей среды и высоко биодоступных для населения химических элементов, присутствующих в перерабатываемых рудах;
- выделить специфический «рудноалтайский» тип атмосферной миграции тонкодисперсных выбросов предприятий пирометаллургического цикла ВКО;
- полагать, что рудные МЭ поступают с подкисленными соединениями серы с атмосферными осадками, реже с «сухими» аэрозолями, особенностью которых является преобладание тонкодисперсных частиц, в том числе наноразмерного уровня;
- считать близким между собой вещественный состав атмосферной пыли в «сухих» и «мокрых» атмосферных выпадениях;
- предполагать, что рудные МЭ сорбируются на породном носителе (атмосферной неорганиче-

ской пыли) в виде тонкодисперсных частиц, возможно субмикронного размера, и фракционно выпадают при его переносе;

- утверждать, что дальность переноса рудных МЭ значительно выше, чем породообразующих химических элементов;
- предполагать наличие зависимости между содержанием водорастворимых форм рудных элементов, длительностью переноса и степенью увлажнения аэрозолей.

Вышеизложенное дает основание считать, что в результате многолетнего трансграничного переноса выбросов предприятий металлургического цикла ВКО загрязнение элементами полиметаллических руд должно быть проявлено и в других объектах окружающей среды на территории Алтая. На это указывают данные, полученные в разные годы при изучении стратифицированных природных образований в регионе, в основном горного оледенения, учеными ИВЭП СО РАН [23], Томского государственного университета [24], Томского политехнического университета и Алтайского регионального института экологии [25].

К числу первоочередных задач по дальнейшему изучению на территории региона вещественных и других особенностей и медико-экологических последствий охарактеризованного трансграничного переноса, по нашему мнению, относятся:

- оценка аэрозольного загрязнения атмосферы региона и ВКО по данным космического мониторинга;
- изучение размерности и вещественного состава твердофазных частиц аэрозолей;
- оценка загрязнения стратифицированных природных образований – ледников, донных осадков озер, годовых колец деревьев и др.;
- разработка модели трансграничного переноса, выпадения и миграции загрязняющих веществ;
- организация мониторинговых наблюдений объектов окружающей среды, в том числе на метеостанциях региона;
- комплексная оценка медико-экологических последствий трансграничных переносов в регионе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heavy metals in birch leaves around a nickel-copper smelter at Monchegorsk, northwestern Russia / M.V. Kozlov, E. Haukioja, A.V. Bakhtiarov, D.N. Stroganov // *Environmental Pollution*. – 1995. – V. 90. – № 3. – P. 291–299.
2. Sklyarova O.A., Sklyarov E.V., Menshagin Yu.V. Concentration of trace elements in small lakes of the Ingoda basin (Chita Region, Russia) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2012. – V. 53. – № 12. – P. 1324–1334.
3. Kashulina G., Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the «Severonikel» industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // *Atmospheric Environment*. – 2014. – V. 89. – P. 672–682.
4. Investigation of spatial and historical variations of air pollution around an industrial region using trace and macro elements in tree components / M. Odabasi, D. Tolunay, M. Kara, E.O. Falay, G. Tuna, H. Altiook, Y. Dumanoglu, A. Bayram, T. Elbir // *Science of the Total Environment*. – 2016. – V. 550. – P. 1010–1021.
5. Востоков Е.Н. Минеральная основа техносферы и тенденции ее совершенного развития // *Геоэкологические исследования и охрана недр*. – 1995. – № 1. – С. 3–16.
6. Water chemistry in small lakes along a transect from boreal to arid ecoregions in European Russia: Effects of air pollution and climate change / T.I. Moiseenko, B.L. Skjelkvale, N.A. Gashkina, A.D. Shalabodov, V.Yu. Khoroshavin // *Applied Geochemistry*. – 2013. – V. 28. – P. 69–79.

7. Bulatov V.I. Nuclear resource management and radioactive pollution in Russia // *Geography and Natural Resources*. – 2015. – V. 36. – № 2. – P. 116–123.
8. Kondrat'ev I.I., Kubai B.V., Semykina G.I. Impact of transboundary and natural factors on chemical composition of precipitation in the Far East of Russia // *Russian Meteorology and Hydrology*. – 2013. – V. 38. – № 10. – P. 681–687.
9. Onishchuk N.A., Khodzher T.V., Chebykin E.P. Lead and its isotopic ratios in atmospheric precipitation in the Baikal region and Primorski Krai // *Geography and Natural Resources*. – 2009. – V. 30. – № 4. – P. 345–349.
10. Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N.S. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – V. 73. – № 2. – P. 663–680.
11. Уран и торий в пылевых аэрозолях на трансграничной (Россия-Китай) урбанизированной территории / Л.М. Павлова, В.И. Радомская, Д.В. Юсупов, А.А. Лукичев // *Экология урбанизированных территорий*. – 2014. – № 2. – С. 102–108.
12. Данилова Н.Г., Чапаева Г.В. Экологический мониторинг состояния окружающей среды Восточно-Казахстанской области в 1999 году // Наш общий дом Алтай: материалы международной конференции. – Барнаул: Изд-во СО РАН, 2000. – С. 27–29.
13. Робертус Ю.В., Рихванов Л.П., Пузанов А.В. О проблеме трансграничного переноса отходов предприятий Восточного Казахстана на территорию Алтая // *Мир науки, культуры, образования*. – 2010. – № 4 (23). – С. 287–289.
14. Робертус Ю.В. Новые данные о трансграничном переносе загрязняющих веществ на территорию Алтая // *Проблемы региональной экологии*. – 2010. – № 5. – С. 27–31.
15. Робертус Ю.В., Рихванов Л.П., Любимов Р.В. Дендрогеохимическая индикация трансграничных переносов экотоксикантов на территорию Алтая // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 173–177.
16. Обзор загрязнения окружающей природной среды в Российской Федерации за 2014 г. / отв. ред. д.г.н., проф. Г.М. Черногаева. – М.: Росгидромет, 2015. – 214 с.
17. Удачин В.Н., Аминов П.Г., Филиппова К.А. Геохимия горно-промышленного техногенеза Южного Урала. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. – 252 с.
18. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник. В 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. – М.: Недра, 1996. – Кн. 3. Редкие р-элементы. – 352 с.
19. Ялалтдинова А.Р., Барановская Н.В., Рихванов Л.П. Влияние выбросов промышленных предприятий г. Усть-Каменогорска на формирование элементного состава листьев тополя // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2014. – № 2 (85). – С. 108–113.
20. Элементный состав листвы тополя как биогеохимический индикатор промышленной специализации урбасистем / Л.П. Рихванов, Д.В. Юсупов, Н.В. Барановская, А.Р. Ялалтдинова // *Экология и промышленность России*. – 2015. – Т. 19. – № 6. – С. 58–63.
21. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, А.Р. Ялалтдинова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 25–36.
22. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecological approach to biomonitoring and biorecovery. – М.: GEOS, 2005. – 457 p.
23. Фролова Н.С., Зинченко Г.С., Папина Т.С. Влияние региональных атмосферных процессов на формирование слоев пылевого загрязнения в ледниковых отложениях г. Белуха // *Метеорология и гидрология*. – 2007. – № 3. – С. 93–99.
24. Ревакин В.С., Галахов В.П., Голещин В.П. Горноледниковые бассейны Алтая. – Томск: Изд-во ТГУ, 1979. – 302 с.
25. Особенности распределения химических элементов в талой воде ледника Большой Актру (Горный Алтай) / Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, А.В. Таловская, Р.В. Любимов, А.Ю. Шатилов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 97–103.

Поступила 05.08.2016 г.

#### Информация об авторах

**Робертус Ю.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, директор автономного учреждения Республики Алтай «Алтайский региональный институт экологии».

**Удачин В.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Института минералогии УрО РАН.

**Рихванов Л.П.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кивацкая А.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник автономного учреждения Республики Алтай «Алтайский региональный институт экологии».

**Любимов Р.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

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

UDC 504.054

## INDICATION BY ENVIRONMENTAL COMPONENTS THE POLLUTANT TRANSBOUNDARY TRANSFER TO GORNY ALTAI

**Yuriy V. Robertus<sup>1</sup>,**  
ariocol@mail.gorny.ru

**Valeriy N. Udachin<sup>2</sup>,**  
udachin@mineralogy.ru

**Leonid P. Rikhvanov<sup>3</sup>,**  
richvanov@tpu.ru

**Anna V. Kivatskaya<sup>1</sup>,**  
ariocol@mail.gorny.ru

**Roman V. Lyubimov<sup>4</sup>,**  
iwep@iwep.ru

**Dmitry V. Yusupov<sup>3</sup>,**  
yusupovd@mail.ru

<sup>1</sup> Autonomous Institution of the Altai Republic «Altai Regional Institute of Ecology»,  
54, Zavodskaya Street, Maima, Altai Republic, 649100, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Mineralogy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,  
Ilmen reserve, Miass, 456317, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>4</sup> Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
1, Molodezhnaya Street, Barnaul, 656038, Russia.

**Relevance** of the work is caused by the necessity to study the environmental conditions in Altai exposed to long term migration of pollutants from adjacent territory of East Kazakhstan.

**Objects and methods of research.** To explore the nature and extent of pollutants transfer in 2015 the authors have tested snow cover and leaves of black poplar (15 and 17 points respectively) in the territory of the Altai Republic and partially within Altai territory at four regional transects with a pitch of 40–60 km. Filtrate, solid residue of snow and ash of poplar leaves (*Populus nigra* L.) were studied by ICP-MS at the Institute of Mineralogy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (Miass) on content of 50 chemical elements.

**Results.** The mapped data on chemical composition of filtrate, solid residue of snow and ash of leaves of black poplar found out on the territory of Gorny Altai a large halo of spatially conjugate low pH and elevated concentrations of sulfates, compounds of mineral nitrogen and geochemically different associations of rock-forming elements and elements of polymetallic ores, processed at the enterprises of the plant «Kaztsink» (Ust-Kamenogorsk, Ridder). Zinc, copper, lead are the main elements of ore association; cadmium, tin, molybdenum, tungsten, antimony, arsenic, bismuth, selenium, tellurium and thallium are the secondary ones. Similar size, morphology and North-East orientation of the halos of their increased concentrations are typical for spatial distribution of all investigated substances and elements in melt water, dust and leaves of poplar. The length of the generalized mega halo of transboundary pollution within Altai exceeds 300 km with its average width of 100–120 km and area over 30 km<sup>2</sup>.

**Conclusions.** The authors predetermined the similar type of range and level of elements content of the ore association in snow dust near the plant «Kaztsink» (Ust-Kamenogorsk) and in snow cover dust in Gorny Altai, which makes the emissions of the plant the source of transboundary transfer of dust aerosols of heavy metals and toxic elements and their input to the region in the form of local dry and wet deposition.

### Key words:

Gorny Altai, Eastern Kazakhstan, emissions of metallurgical enterprises, transboundary transfer, ore elements, pollution of natural environments.

### REFERENCES

1. Kozlov M.V., Haukioja E., Bakhtiarov A.V., Stroganov D.N. Heavy metals in birch leaves around a nickel-copper smelter at Monchegorsk, northwestern Russia. *Environmental Pollution*, 1995, vol. 90, no. 3, pp. 291–299.
2. Sklyarova O.A., Sklyarov E.V., Menshagin Yu.V. Concentration of trace elements in small lakes of the Ingoda basin (Chita Region, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 12, pp. 1324–1334.
3. Kashulina G., Caritat P., Reimann C. Snow and rain chemistry around the «Severonikel» industrial complex, NW Russia: Cur-

- rent status and retrospective analysis. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 89, pp. 672–682.
4. Odabasi M., Tolunay D., Kara M., Falay E.O., Tuna G., Altioğ H., Dumanoglu Y., Bayram A., Elbir T. Investigation of spatial and historical variations of air pollution around an industrial region using trace and macro elements in tree components. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 550, pp. 1010–1021.
  5. Vostokov E.N. Mineralnaya osnova tekhnosfery i tendentsii ee sovershennogo razvitiya [Mineral-based technosphere and trends of modern development]. *Geokol. issledov. i okhrana nedr*, 1995, no. 1, pp. 3–16.
  6. Moiseenko T.I., Skjelkvale B.L., Gashkina N.A., Shalabodov A.D., Khoroshavin V.Yu. Water chemistry in small lakes along a transect from boreal to arid ecoregions in European Russia: Effects of air pollution and climate change. *Applied Geochemistry*, 2013, vol. 28, pp. 69–79.
  7. Bulatov V.I. Nuclear resource management and radioactive pollution in Russia. *Geography and Natural Resources*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 116–123.
  8. Kondrat'ev I.I., Kubai B.V., Semykina G.I. Impact of transboundary and natural factors on chemical composition of precipitation in the Far East of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, no. 10, pp. 681–687.
  9. Onishchuk N.A., Khodzher T.V., Chebykin E.P. Lead and its isotopic ratios in atmospheric precipitation in the Baikal region and Primorski Krai. *Geography and Natural Resources*, 2009, vol. 30, no. 4, pp. 345–349.
  10. Chalov S.R., Jarsjö J., Kasimov N.S. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 73, no. 2, pp. 663–680.
  11. Pavlova L.M., Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Lukichev A.A. Uranium and thorium in dust aerosols on the cross-border (Russia-China) urbanized territory. *Ecology of Urban Areas*, 2014, no. 2, pp. 102–108. In Rus.
  12. Danilova N.G., Chapaeva G.V. Ekologichesky monitoring sostoyaniya okruzhayushchey sredy Vostochno-Kazakhstanskoy oblasti v 1999 godu [Environmental monitoring of the East Kazakhstan region in 1999]. *Materialy mezhd. konf. Nash obshchaya dom Altay* [Proc. of the international conference. Our common home Altai]. Barnaul, 2000. pp. 27–29.
  13. Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P., Puzanov A.V. O probleme transgranichnogo perenosa otkhodov predpriyaty Vostochnogo Kazakhstana na territoriyu Altaya [On the issue of transboundary transport of enterprises wastes of the East Kazakhstan to the Altai territory]. *The world of science, culture and education*, 2010, no. 4 (23), pp. 287–289.
  14. Robertus Yu.V. Novye dannye o transgranichnom perenose zagryaznyayushchikh veshchestv na territoriyu Altaya [The new data about transboundary conduction of pollutants on terrain of Western Altai]. *Regional Environmental Issues*, 2010, no. 5, pp. 27–31.
  15. Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P., Lyubimov R.V. Dendrogeochemical indication of transboundary carrying over of toxicants to the Altai territory. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 173–177. In Rus.
  16. *Obzor zagryazneniya okruzhayushchey prirodnoy sredy v Rossijskoy Federatsii za 2014 g.* [Review of Environmental Pollution in the Russian Federation for 2014]. Moscow, Rosgidromet Publ., 2015. 214 p.
  17. Udachin V.N., Aminov P.G., Filippova K.A. *Geokhimiya gornopromyshlennogo tekhnogeneza Yuzhnogo Urala* [Geochemistry of the Southern Urals Mining technogenesis]. Ekaterinburg, RIO Publ., UrB RAS, 2014. 252 p.
  18. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov. Kn. 3. Redkie p-elementy* [Ecological Geochemistry of elements. B. 3. Rare p-elements]. Ed by. E.K. Burenkov. Moscow, Nedra Publ., 1996. 352 p.
  19. Yalaltdinova A.R., Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P. Ust-Kamenogorsk industrial emission effect on poplar leaves element composition formation. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 2 (85), pp. 108–113. In Rus.
  20. Rikhvanov L.P., Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Yalaltdinova A.R. [Elemental composition of poplar foliage as a biogeochemical indicator of industrial specialization of urban systems]. *Ecology and Industry of Russia*, 2015, vol. 19, no. 6, pp. 58–63. In Rus.
  21. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Yalaltdinova A.R. Geochemical features of poplar leaf elemental composition in urban areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 25–36. In Rus.
  22. Bargagli R. *Trace elements in terrestrial plants: an ecological approach to biomonitoring and biorecovery*. Moscow, GEOS Publ., 2005. 457 p.
  23. Frolova N.S., Zinchenko G.S., Papina T.S. Vliyanie regionalnykh atmosferynykh protsessov na formirovaniye sloev pylevogo zagryazneniya v lednikovyykh otlozheniyakh g. Belukha [Influence of regional atmospheric processes on formation of dust pollution layers in Belukha glacial deposits]. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2007, no. 3, pp. 93–99.
  24. Revyakin V.S., Galakhov V.P., Goleshchin V.P. *Gornolednikovye basseiny Altaya* [Mountain ice basins of Altai]. Tomsk, TSU Publ., 1979. 302 p.
  25. Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Talovskaya A.V., Lyubimov R.V., Shatilov A.Yu. Features of distribution of chemical elements in melted water ice Large Aktru (Gorny Altai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313, no. 1, pp. 97–103. In Rus.

Received: 5 August 2016.

#### Information about the authors

**Yuriy V. Robertus**, Cand. Sc., Director, Autonomous Institution of the Altai Republic «Altai Regional Institute of Ecology».

**Valeriy N. Udachin**, Dr. Sc., associate professor, Deputy Director, Institute of Mineralogy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences.

**Leonid P. Rikhvanov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Anna V. Kivatskaya**, Cand. Sc., senior researcher, Autonomous Institution of the Altai Republic «Altai Regional Institute of Ecology».

**Roman V. Lyubimov**, Cand. Sc., scientific researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

**Dmitry V. Yusupov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.