

УДК 631.42+581.5: 550.4

**А.Ю.ОПЕКУНОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор, a\_opekunov@mail.ru**  
**М.Г.ОПЕКУНОВА, канд. геогр. наук, доцент, m.opekunova@mail.ru**  
*Санкт-Петербургский государственный университет*

**A.Yu.OPEKUNOV, Dr in geol. & min. sc., professor, a\_opekunov@mail.ru**  
**M.G.OPEKUNOVA, PhD in geogr. sc., associate professor, m.opekunova@mail.ru**  
*Saint-Petersburg State University*

## **ГЕОХИМИЯ ТЕХНОГЕНЕЗА В РАЙОНЕ РАЗРАБОТКИ СИБАЙСКОГО МЕДНО-КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

На основе комплексных исследований территории разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения установлены особенности изменения химического состава природных вод, показана специфика техногенной миграции рудных элементов в донных осадках реки и в почвах, а также вовлечения тяжелых металлов в биогеохимический круговорот. Выявлена степень трансформации природных геохимических процессов в условиях техногенеза. Определены ориентировочные размеры техногенных ореолов и потоков рассеяния рудных металлов. Даны рекомендации, направленные на снижение техногенной миграции элементов.

**Ключевые слова:** месторождение, донные осадки, почвы, индикаторные виды растений, тяжелые металлы, техногенный ореол рассеяния.

## **TECHNOGENIC GEOCHEMISTRY IN THE DEVELOPMENT OF SIBAI CHALCOPYRITE FIELD**

Complex of geochemical studies in developing of Sibai chalcopyrite deposits are conducted. The peculiarities of the chemical composition of natural waters, the specificity of technogenic migration of ore elements in river sediments and soils, as well as the involvement of heavy metals into the biogeochemical cycle are established. The extent of transformation of natural geochemical processes in technogenesis is revealed. Approximate dimensions of man-made streams and scattering halos of ore metals are determined. The recommendations at reducing anthropogenic migration of elements are aimed.

**Key words:** ore deposits, sediments, soils, indicating plant species, heavy metals, technogenic scattering halo.

Южный Урал представляет собой уникальный полигон для изучения техногенной трансформации природных геохимических процессов. Наряду с развитием естественных геохимических аномалий, обусловленных рудной минерализацией, горно-промышленное производство приводит к загрязнению недр, водных объектов, почв и атмосферного воздуха. В водоемы поступают промышленные сточные воды с цехов обогащения и первичной переработки сы-

ря, подотвальные и рудничные воды, стоки с хвостохранилищ. Особое место в этом ряду занимают колчеданные месторождения, имеющие широкое распространение, а при разработке являющиеся источником загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ).

На территории Башкирского Зауралья открыты крупные медно-колчеданные месторождения: Гайское, Сибайское, Учалинское и др. Этот регион – один из основных

поставщиков концентратов медно-колчеданных руд в России. На его долю приходится 24,4 % товарной продукции цветной металлургии, причем добыча Cu в концентратах составляет 12-15 %, а Zn 49 % от общероссийской.

В геологическом плане территория расположена на пересечении субмеридионального Западно-Магнитогорского вулканического пояса и субширотной Баймакско-Сибайской зоны. Пояс сложен горными породами допалеозойского и палеозойского возраста, с которыми связаны колчеданные руды [5]. Для большинства месторождений региона установлены аномальные концентрации свыше 40 химических элементов [4]. В изучаемом районе присутствуют две рудоносные зоны: Баймак-Бурибаевская смешанно-медно-рудная (месторождения Юбилейное и Семеновское) и Красноуральско-Сибай-Гайская медно-рудная (месторождения Сибайское, Камаганское, Учалинское). Основные рудообразующие минералы Сибайского колчеданного месторождения – пирит, пирротин, халькопирит и сфалерит. Пирит составляет 65-90 % рудного вещества. В подчиненном количестве присутствуют галенит, арсенопирит, теннантит, борнит, мельниковит, магнетит, гематит, гринокит, энаргит, фрейбергит и киноварь. Основными элементами-индикаторами вторичных ореолов рассеяния выступают Cu, Zn, Cd, As и Hg.

Гипергенные изменения рудных минералов колчеданных месторождений заключаются в окислении труднорастворимых сульфидов в хорошо растворимые сульфаты в присутствии кислорода и окислителей  $Fe_2(SO_4)_3$ ,  $H_2SO_4$ . Результатом этих реакций, а впоследствии и гидролиза сульфатов становится значительный рост концентрации  $H^+$  и резкое снижение pH вод, сопровождающее увеличением окислительно-восстановительного потенциала. Это вызвано переходом переменно-валентных элементов в высшие степени окисления. К основным миграционным формам Cu, Zn и Cd относятся их катионы, сульфатные и гидросульфатные соединения. При повышении pH могут образовываться комплексные соединения ме-

таллов с гидроксильными или смешанными гидроксильно-сульфатными группами; происходит осаждение кристаллогидратов металлов. С учетом развития в районе исследований черноземов, обогащенных органическим веществом (ОВ) гумусового ряда, возможно формирование комплексных органоминеральных соединений на основе гуминовых и фульвокислотных хелатов. Перечисленные процессы сопровождают и техногенные потоки металлов, формирующиеся через сброс сточных вод, аэротехногенный перенос, влияние хвостохранилищ и отвалов вскрышных пород.

Сибайский филиал ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» (бывший «Башкирский медно-серный комбинат») расположен на территории г. Сибай. В составе предприятия находятся два крупных карьера (Сибайское и Камаганское месторождения), подземный рудник (месторождение Новый Сибай), Сибайская обогатительная фабрика (СОФ), известняковый карьер. Большую площадь занимают отвалы накопленных вскрышных пород, обогащенных Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd, As и т.д. Их общий объем на 01.01.2009 г. достиг 600 млн т. Особое место занимают хвостохранилища обогатительной фабрики. Тяжелые металлы и As поступают на поверхность почв, в природные воды, донные осадки, вовлекаются в биологический круговорот, образуя хорошо выраженные вторичные техногенные ореолы рассеяния.

Комплексные геохимические исследования на обозначенной территории, нацеленные на оценку воздействия комбината, проводились с 1998 г. сотрудниками кафедры геоэкологии и природопользования СПбГУ [2, 3, 6]. Обследование природно-территориальных комплексов (ПТК) осуществлялось с учетом нарастания антропогенного стресса: на различном удалении от предприятия – вблизи пос. Калининское, Старый Сибай, Семеновское, озер Талкас и Култубан. В комплекс исследований входило изучение химического состава воды, донных осадков, почв и растений фоновых и антропогенно нарушенных участков. В донных осадках и почвах наравне с валовыми

содержаниями определялись подвижные формы металлов, извлекаемые ацетатно-аммонийным буфером ( $\text{pH} = 4,8$ ). В качестве условно фоновых приняты ПТК вблизи пос. Мукасово и Туркменево, а также оз. Култубан, расположенных в 25-35 км от г. Сибай вне прямого воздействия предприятия, но находящиеся в пределах естественной геохимической аномалии Красноуральско-Сибай-Гайской рудоносной зоны.

Лабораторные анализы валового содержания химических элементов в донных осадках и почвах проводились эмиссионным спектральным, рентгенофлуоресцентным и атомно-абсорбционным методами, определения микроэлементов в вытяжках и золе растворений выполнены атомно-абсорбционным методом, содержания металлов в воде – методами вольтамперометрии и атомной абсорбции.

Река Карагайлы пересекает город с юго-запада на северо-восток, дренируя в верхнем течении отвалы вскрышных пород Сибайского карьера. В среднем течении на правом берегу построено хвостохранилище общей площадью более  $1,1 \text{ км}^2$ . В хвостах сосредоточено значительное количество  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Ba}$ . На левом берегу находится обогатительная фабрика. Ниже по течению вблизи реки размещается городская свалка бытовых отходов. Водоток впадает в р. Худолаз. Длина изученной части реки составила более 11 км. Русло р. Карагайлы имеет ширину 2-6 м с разливами до 200-250 м. Скорость течения в летнюю межень составляет 0,0-0,3 м/с, а на некоторых участках до 0,8 м/с. Форма русла в основном канавообразная, высота берегов не превышает 1-1,5 м.

Измеренные величины  $\text{pH}$  воды указывают на контрастность кислотно-щелочных условий (табл.1). На верхнем (фоновом) участке реки (проба 701) значения  $\text{pH}$  воды составляют 7,7-8,2. Подземные воды, которые выклиниваются под отвалами вскрышных пород (вероятно, вследствие нарушения гидрогеологических условий при строительстве карьера, а также деформации водоносных горизонтов под давлением пород), имеют  $\text{pH} = 4,95$  (проба 703-2). Впадение

этого ручья в реку (проба 703-1) приводит к снижению кислотно-щелочного показателя речной воды до нейтрального (6,25). Следующее изменение  $\text{pH}$  вызвано сбросом карьерных и рудничных вод с  $\text{pH} = 3,32-4,95$  (пробы 704-1 и 704-2). Ниже этого сброса кислотно-щелочной показатель речной воды понижается до 4,75-4,85. В промзоне города в среднем течении реки  $\text{pH}$  постепенно растет до 5,45-5,75 (пробы 404, 706, 713), а в нижнем течении в пос. Калининское (пробы 411) речная вода достигает нейтральных значений ( $\text{pH} = 6,45 \div 7,10$ ). До впадения в р. Худолаз (проба 716)  $\text{pH}$  стабилизируется, так и не достигнув природных показателей (более 7,5).

Изучение состава вод дало следующие результаты (табл.1). На входе в зону техногенного воздействия речная вода (проба 701) отвечает сульфатно-кальциевому типу вод с относительно низкой минерализацией (324 мг/л) и фоновым содержанием рудных элементов ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$ ). Состав подземных и карьерных сточных вод соответствует сульфатно-магниевому типу с минерализацией 9382 мг/л (солоноватые воды) и аномальными концентрациями металлов ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$ ). При этом степень метаморфизации анионно-карионного и микроэлементного состава более выражена в подземных (проба 703-1, 703-2) по сравнению со сточными (проба 704-1, 704-2) водами. Смешение тех и других с речной водой приводит к техногенной трансформации анионно-карионного и микроэлементного состава и изменению кислотно-щелочных условий. Вниз по течению от места сброса солевой состав воды меняется мало. Отмечено лишь небольшое снижение содержания металлов и незначительное изменение соотношения главных катионов и анионов. Одновременно установлено резкое увеличение концентраций металлов в воде после поступления подземных и сточных промышленных вод с максимумом в среднем течении. Вслед за этим наблюдается незначительное снижение их содержаний. Зафиксировано сохранение аномально высоких концентраций металлов в речной воде на всем протяжении водотока вплоть до впадения в р. Худолаз.

Таблица 1

Содержания химических ингредиентов в речных, карьерных и подземных водах, мг/л

Химич- еские вещества	Проба										
	701	703-1	703-2	704-1	704-2	705	404	706	713	411	716
K <sup>+</sup>	1,2	1,78	2,66	2,28	2,2	1,87	—	2,06	3,94	—	0,91
Na <sup>+</sup>	18,6	69,74	154,32	176,94	165,44	70,48	—	145,41	142,44	—	24,17
Mg <sup>2+</sup>	27,71	461,79	1463,1	358,91	450,36	435,27	—	377,66	278,9	—	14,72
Ca <sup>2+</sup>	78,21	363,19	369,22	256,19	248,66	383,52	—	264,7	18,95	—	60,16
Cl <sup>-</sup>	3,12	7,66	<0,5	<0,5	<0,5	10,78	—	58,15	106,38	—	35,46
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	186,8	2922,5	7392,2	2547,2	2916,2	2806,1	—	2504,4	1466,3	—	49,39
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	8,34	1,84	<1,0	<1,0	<1,0	18,91	—	<1,0	60,51	—	168,89
Σ ионов	324,0	3828,5	9381,5	3341,5	3783,4	3726,9	—	3352,4	2067,4	—	353,7
Zn	0,001	12,1	111,0	36,6	49,0	21,0	32,2	37,0	15,8	4,1	<0,001
Cu	0,001	0,20	21,0	5,4	8,1	1,6	11,3	4,7	1,4	0,059	0,001
Ni	0,001	0,025	0,24	0,09	0,12	0,045	—	0,077	0,051	—	<0,001
Cd	<0,001	0,03	0,59	0,13	0,15	0,10	0,1255	0,12	0,08	0,016	<0,001

Примечание. Прочерк – нет данных

В целом выявленный химический состав воды р. Карагайлы, ее гидрохимический тип (сульфатно-магниевый) характерны для вод, находящихся под влиянием окисляющихся медно-колчеданных руд или формирующихся под воздействием промышленных сточных вод горно-добычного предприятия.

В верхнем течении реки на участке разгрузки подземных вод в самом ручье вода имеет мутновато-голубоватый оттенок, и на дне реки наблюдается отложение голубовато-белого порошка как в тонкодисперсных фракциях, так и в виде налета на поверхности гравийно-галечной отмостки. Это же наблюдается и в среднем течении водотока, что позволяет предположить осаждение купоросов меди, цинка, а также сульфата кадмия при повышении pH.

В донных осадках р. Карагайлы и впадающих в нее ручьев содержание пелитовой фракции колеблется в пределах 3,4-43,7 %, алевритовой 12,5-76,5 %, песчаной 8,6-61,6 %. В местах наиболее интенсивной аккумуляции донные отложения представлены современными флокулированными илами с высокой влажностью и пористостью, серого, желтовато-серого (в верхнем течении) и темно-серого (в нижнем течении) цветов с относительно небольшим количеством ОВ. Среднее содержание C<sub>орг</sub> в донных осадках р. Карагайлы равно 2,3 %. Его наибольшие концентрации приурочены к местам сброса коммунально-бытовых вод, а также аккуму-

ляции почвенного органического вещества вследствие эрозии и плоскостного смыва с распаханных водосборов (пос. Калининское).

Изучение содержания ТМ и мышьяка показало обогащение ими донных отложений реки по сравнению с условно фоновыми осадками оз. Култубан. Выявлено накопление Zn, Cu, Cd и Hg, в меньшей степени Pb и As (табл.2). Так, содержание Cu и Zn в донных осадках реки над озерными отложениями выше в 13 и 23 раза, соответственно.

Распределение ТМ в донных осадках водотока обусловлено, в первую очередь, техногенными литолого-геохимическими барьерами. На всем протяжении реки выявлено несколько техногенных барьеров. Представлены механические, биогеохимические и физико-химические классы барьеров. Формирование механических вызвано падением скорости течения при резком расширении русла реки после канализированных участков, возникновением разливов воды при строительстве дамб, а также снижением гидродинамической активности в местах интенсивного произрастания тростника. Биогеохимические барьеры обусловлены биоаккумуляцией высшей водной растительностью тяжелых металлов и других химических загрязняющих веществ, в том числе и в виде эпифитовзвеси. Среди физико-химических основное значение имеют щелочные барьеры, возникающие при резком повышении величины pH. Они обнаружены на участках впадения подземных и

Таблица 2

**Средние содержания валовых и подвижных форм ТМ и As в донных осадках водных объектов района исследований**

Элементы	р. Карагайлы			оз. Култубан		
	Валовые, мг/кг	Подвижные, мг/кг	Доля подвижных, %	Валовые, мг/кг	Подвижные, мг/кг	Доля подвижных, %
Co	38±6	3,6±1,8	8,2	24±3	0,1±0,1	0,2
Ni	46±11	2,1±1,2	4,1	71±13	0,6±0,2	0,7
Zn	4311±1184	2490±1669	60,9	423±284	12±3,2	7,1
Cu	4666±1456	1468±1182	23,4	412±99	1,8±0,6	0,6
Cd	10,1±5,41	4,9±3,0	44,5	5,3±1,1	0,19±0,06	3,6
Mn	1040±245	50,1±21,8	3,6	2569±1045	446±41	18,9
Cr	72±12	Н.д.	—	59±6	Н.д.	—
Pb	75±43	4,8±1,6	8,4	31±6	2,9±0,4	11,3
As	140±46	Н.д.	—	56±10	Н.д.	—
Hg	1,90±0,59	Н.д.	—	0,159±0,065	Н.д.	—
Fe	Н.д.	797±718	—	Н.д.	19±4	—

Таблица 3

**Валовое содержание ТМ в почвах Башкирского Зауралья, мг/кг**

ПТК	Cu	Zn	Ni	Fe	Mn
Фон, пос. Мукасово-Туркменево, Красноуральско-Сибай-Гайская рудоносная зона ( <i>n</i> = 35)	49 30-82	235 137-517	34 16-74	40563 17336-106310	1457 324-10957
Пос. Калининское, приусадебные участки вблизи хвостохранилища ( <i>n</i> = 12)	153 97-205	460 328-622	53 43-68	31694 30138-33083	704 681-736
Берег оз. Култубан, в 10 км к югу от Сибайской обогатительной фабрики и карьера ( <i>n</i> = 26)	292 125-520	223 50-630	92,5 54-160	h/o	3259 900-15000
г. Сибай, микрорайоны города ( <i>n</i> = 150)	248 83-632	487,3 224-762	49 38-99	34667,4 22173-44795	1338 669-6644
Региональный фон	49	223	34	37100	1060
Фон для черноземов	25	68	45	—	—
Кларк по Р. Бруксу, 1986	70	80	100	25000	1000
ПДК, 2009	132	220	80	—	—

Примечание. В числителе – среднее значение; в знаменателе – диапазон.

Таблица 4

**Содержание подвижных форм ТМ в почвах Башкирского Зауралья, мг/кг\***

ПТК	Cu	Zn	Fe	Mn	Pb	Ni
Фон, пос. Мукасово-Туркменево, Красноуральско-Сибай-Гайская рудоносная зона ( <i>n</i> = 145)	0,8 0,1-1,8	7,2 0,6-21,4	9,4 0,29-18	42,1 19,6-74	1,4 0,01-4,7	0,5 0,01-1,6
Пос. Калининское, приусадебные участки вблизи хвостохранилища ( <i>n</i> = 12)	2,2 0,4-5,4	65 42-108	0,8 0,2-1,8	52 34,4-84	2,1 1,7-3,1	0,4 0,05-0,8
Берег оз. Култубан, в 10 км к югу от Сибайской обогатительной фабрики и карьера ( <i>n</i> = 26)	2,1 0,2-4,7	31 1,7-77	24 0,6-34	72,2 34,7-113	2,6 1,8-3,4	1,5 <0,01-1,7
г. Сибай ( <i>n</i> = 150)	7,3 0,1-77	47,2 0,2-409	5,6 0,1-26,8	55 0,2-168	2,7 0,1-11,6	1,1 0,01-2,9
Региональный фон	0,2	9,7	3,2	29	0,3	0,1
ПДК	3,0	23,0	-	140	6,0	4,0

\* См. примечание к табл.3.

сточных в верховьях реки, при подщелачивании вод притоками в среднем течении водотока. На этих участках переход сульфатов металлов из раствора во взвесь фиксируется даже визуально.

В процессе исследований были изучены подвижные формы ТМ и As, которые определялись в аммонийно-ацетатной вытяжке (pH = 4,8) из осадков. Полученные данные указывают на высокую подвижность основ-

ных элементов (Cu, Zn, Cd) в донных отложениях реки по сравнению с фоновыми условиями осадконакопления (см. табл.2). С целью более детальной интерпретации форм металлов в донных осадках реки был выполнен фазовый анализ. Были установлены поверхностно-сорбированные формы (0,25 моль/л  $MgCl_2$ ); фазы, связанные с карбонатными минералами и легко разлагающимися ОВ (ацетатный буферный раствор с  $pH = 4,8$ ), а также с органическим веществом (1 моль/л раствора уксусной кислоты и перекиси водорода); сорбированных на гидроксидах железа и марганца (раствор солянокислого гидроксиамина); кристаллических (0,3 моль/л раствора соляной кислоты) и остаточных силикатных форм (по разнице валового содержания и полученных подвижных фаз).

Фазовое состояние металлов в осадках реки характеризуется следующими особенностями. В фоновой пробе верхнего течения реки (702) подавляющая часть Cu и Zn (более 93 %) и основная часть Cd (60,6 %) находятся в силикатной остаточной форме. В осадках зоны техногенеза (верхнее и среднее течение) преобладает Cu (до 86 %) в составе органического вещества, вероятно, в виде органоминеральных комплексов с гуминовыми хелатами. Частично металл связан с карбонатными минералами (в пробе 711 до 50 %). Наиболее разнообразен фазовый состав Zn, у которого ведущими являются силикатная (32-46 %), карбонатная или связанная с ОВ (от 22 до 37 %) формы. Самый подвижный из рассматриваемых металлов Cd. Для него ведущее значение имеют поверхностно-сорбированная и органоминеральная формы. Для сравнения в пробе донных осадков из оз. Култубан подавляющая часть индикаторных металлов (90-98 %) находится в силикатной форме. Кроме того, отмечается общая тенденция незначительного снижения подвижности металлов по мере удаления от основных источников загрязнения.

Выявленные особенности дифференциации химических элементов в р. Карагайлы указывают на существование двух типов техногенных осадочных образований. Ис-

пользуя геохимическую классификацию техногенных илов [1], можно констатировать, что в верхнем течении формируется комплекс минеральных техногенных илов (среднее содержание  $C_{opr} = 1,85 \%$ ) с Hg-Cd-Cu-Zn специализацией. В среднем и нижнем течении накапливаются органоминеральные техногенные илы ( $C_{opr} = 3,85 \%$ ) с Ni-Cr-Pb-Cu-Zn-Cd полиметаллической специализацией. Необходимо заметить, что химический состав органоминеральных илов не избежал существенного влияния сбросов горно-добывающего предприятия.

В фоновых условиях почвы района характеризуются высокими содержаниями большинства изученных ТМ (табл.3). Обращают на себя внимание аномальные валовые концентрации Cu, Zn и Fe, обусловленные геологическими факторами. Концентрации подвижных форм ТМ в почвах могут сильно варьировать (табл.4). Они определяются совокупностью факторов, из которых наибольшее значение имеют положение ПТК в элементарном геохимическом ландшафте (элювиальный, трансэлювиальный, субаквальный и аквальный), тип миграции, метеоусловия, кислотность почв и удаленность от источников загрязнения. Большую роль играет количество выпавших атмосферных осадков и влажность почв: по годам на одних и тех же пробных площадках отмечаются существенные различия в концентрации подвижных форм ТМ. Наблюдаются резкие изменения концентрации подвижных форм ТМ по профилю в рельефе. Так, высоким содержанием Mn характеризуются почвы подчиненных ПТК в нижней части склона увала. Максимальные концентрации Fe, Cu и Zn, в основном приходятся на средние части склонов и на вершины увалов. Содержание подвижных форм Pb и Ni в почвах различных ПТК практически не изменяется. В почвах фоновой территории доля подвижных форм ТМ составляет 0,1-3 % от их валового содержания. В засушливые годы она уменьшается до 0,01 %, а во влажный период может достигать 3-5 %, что объясняется деятельностью почвенных организмов, феноритмическими изменениями интенсивности поглощения химических элементов растениями и другими факторами.

Таблица 5

**Изменение содержания ТМ в индикаторных видах растений Башкирского Зауралья  
в период с 1999 по 2010 гг., мг/кг сухого вещества\***

ПТК	Cu	Zn	Fe	Mn	Pb	Ni
Фоновая территория, пос. Мукасово-Туркменево, Красноуральско-Сибай-Гайская рудоносная зона						
Полынь <i>Artemisia austriaca</i> L.	<u>15</u> 6-23	<u>59</u> 23-154	<u>71</u> 21-136	<u>64</u> 29-122	<u>1,6</u> 0,3-2,5	<u>1,7</u> 0,6-3,5
Чабрец <i>Thymus morschallianus</i> L.	<u>8</u> 5-12	<u>67</u> 26-160	<u>172</u> 43-271	<u>58</u> 19-120	<u>1,9</u> 1,1-3,5	<u>1,8</u> 0,8-3,0
Вероника <i>Veronica incana</i> L.	<u>9</u> 5-18	<u>42</u> 17-66	<u>53</u> 5-166	<u>40</u> 11-92	<u>1,6</u> 0,8-2,7	<u>1,1</u> 0,6-3,2
Пос. Калининское, вблизи хвостохранилища БМСК						
Полынь <i>Artemisia austriaca</i> L.	<u>25</u> 32-40	<u>96</u> 138-117	<u>251</u> 188-314	<u>71</u> 31-111	<u>2,2</u> 0,8-3,6	<u>2,8</u> 2,6-3,1
Чабрец <i>Thymus morschallianus</i> L.	<u>10</u> 8-13	<u>62</u> 42-83	<u>273</u> 167-380	<u>41</u> 21-62	<u>1,3</u> 0,9-3,0	<u>2,5</u> 2,0-3,0
Вероника <i>Veronica incana</i> L.	<u>10</u> 8-11	<u>60</u> 50-78	<u>122</u> 18-344	<u>15</u> 12-22	<u>0,8</u> 0,2-1,4	<u>0,9</u> 0,2-2,0
Пос. Старый Сибай, в 2 км от отвалов Сибайского карьера						
Полынь <i>Artemisia austriaca</i> L.	<u>15</u> 9-20	<u>60</u> 53-70	<u>107</u> 63-154	<u>120</u> 80-155	<u>3,7</u> 2,3-4,7	<u>2,0</u> 1,5-2,8
Чабрец <i>Thymus morschallianus</i> L.	<u>7</u> 5-10	<u>33</u> 21-42	<u>97</u> 76-144	<u>82</u> 32-144	<u>2,1</u> 1,1-4,3	<u>1,6</u> 1,3-1,9
Вероника <i>Veronica incana</i> L.	<u>7</u> 6-7	<u>32</u> 24-41	<u>116</u> 103-130	<u>43</u> 26-55	<u>3,7</u> 3,28-4,0	<u>2,1</u> 1,6-2,5
Берег оз. Култубан, в 10 км к югу от Сибайской обогатительной фабрики и карьера БМСК						
Полынь <i>Artemisia austriaca</i> L.	<u>13</u> 6-18	<u>68</u> 32-146	<u>56</u> 16-112	<u>41</u> 13-73	<u>1,3</u> 0,4-2,8	<u>1,4</u> 0,7-2,3
Чабрец <i>Thymus morschallianus</i> L.	<u>8</u> 6-11	<u>54</u> 29-71	<u>68</u> 36-123	<u>67</u> 21-91	<u>1,6</u> 0,3-3,2	<u>1,5</u> 0,2-2,9
Вероника <i>Veronica incana</i> L.	<u>12</u> 5-19	<u>47</u> 31-66	<u>92</u> 19-181	<u>42</u> 19-66	<u>1,8</u> 1,2-2,7	<u>1,8</u> 0,7-4,1
Региональный фон	13	42	52	40	3	2,5
Кларк по В.В. Добровольскому, 1998	8	30	-	205	1,25	2

\* См. примечание к табл.3.

Влияние комбината на химический состав почв сказывается в радиусе 2-5 км от предприятия. Максимальные содержания ТМ обнаружены в почвогрунтах на территории г. Сибай, в микрорайонах вблизи обогатительной фабрики, Сибайского и Камаганского карьеров и др. Высокие концентрации Cu и Zn наблюдаются в почвах пос. Калининское, расположенного вблизи хвостохранилища. Валовое содержание Zn и Cu в почвах приусадебных участков превышает уровень ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) в 3 раза, концентрация подвижных форм в 2-5 раз превосходит предельно допустимую концентрацию (ПДК). Почвы коллективных садов, расположенных в санитарно-защитной зоне обогатительной фабрики, загрязнены As до 1,8

ОДК, Cu – до 2,4 ОДК, Zn – до 2,6 ОДК. В зоне влияния отвалов Сибайского карьера вблизи пос. Старый Сибай выявлено загрязнение почв пастищных угодий и приусадебных участков Zn, Cu, Pb: концентрации подвижных форм достигают ПДК, валовые содержания – ОДК.

Отличительная черта почв, подвергшихся антропогенной трансформации – резкое увеличение содержания подвижных форм ТМ. Вблизи производственных объектов доля их возрастает до 16-24 %. Это обусловлено выбросами диоксида серы, а также окислением сульфидов в отвалах, что вызывает подкисление почв до pH = 4,3-5,9 (при фоне 7,0-7,5) и увеличивает подвижность катионогенных металлов. В загрязненных

почвах уровень содержания сульфатов в 26-185 раз превышает фоновые значения.

Суммарный показатель загрязнения почв ( $Z_c$ ) подвижными формами ТМ в зоне воздействия предприятия соответствует категориям крайне опасная, чрезвычайно опасная и опасная. Критическая ситуация сложилась в нескольких микрорайонах города, где  $Z_c$  для этих территорий в разные годы изменялся в пределах от 122 до 288. При таких значениях  $Z_{c\max} = 128$ , выходящих за рамки оценочной шкалы опасности загрязнения почв, резко возрастает риск воздействия на здоровье населения.

В районе действия обогатительной фабрики, карьеров, хвостохранилищ и других объектов комбината наблюдается интенсивное вовлечение ТМ в биогеохимический круговорот и образование зон с повышенными содержаниями рудных элементов (Zn, Cu, Fe и др.) в растениях (табл.5). Большая изменчивость химического состава растений определяется валовым содержанием ТМ в почвах, степенью их доступности растениям, физико-химическими свойствами почв (рН, гранулометрический состав, содержание ОВ и т.д.), а также видовыми особенностями растений, их возрастом, физиологической ролью ТМ, интенсивностью антропогенной нагрузки.

Исследования химического состава растений на различном расстоянии от производственных объектов позволили выявить виды-концентраторы ТМ, которые могут быть использованы при оценке интенсивности техногенеза. Характерное накопление ТМ (Zn, Cu, Fe, Pb и Cd) в полыни австрийской *Artemisia austriaca* L., веронике серой *Veronica incana* L., чабреце Маршалла *Thymus marschallianus* L. отвечает естественной геохимической аномалии, а также антропогенному загрязнению компонентов ландшафтов при эксплуатации месторождения. Вместе с тем, накопление ТМ в фоновых условиях во многом определяется их подвижностью в почвах. Во влажные годы в растениях отмечается резкое увеличение концентрации Zn, Cu и Fe.

Содержание типоморфных оруденению ТМ во всех индикаторных видах в импакт-

ной зоне в районе оз. Култубан, пос. Калининское и Старый Сибай превышает соответствующие концентрации в растениях фоновой территории (пос. Мукасово). Изменения содержания химических элементов в пределах Сибай-Гайской рудоносной зоны во многом определяются рельефом: на пониженных участках выявлены повышенные концентрации микроэлементов (Mn, Zn, Cu и Fe).

Расчет коэффициента биологического поглощения изученных растений указывает на хорошо выраженные индивидуальные биогеохимические особенности: полынь *Artemisia austriaca* L. накапливает в основном Zn, Cd и Pb, чабрец *Thymus marschallianus* L. – Fe и Zn, вероника *Veronica incana* L. – Cu и Zn. К абсолютным концентраторам относятся *Artemisia austriaca* L. и *Thymus marschallianus* L., *Veronica incana* L. обладает меньшей концентрирующей способностью.

## Выводы

1. Разработка месторождения привела к хорошо выраженной и устойчивой техногенной метаморфизации вод р. Карагайлы по анионно-карионному и микроэлементному составу, приведшей к образованию сульфатно-магниевого типа солоноватых вод.

2. В почвах сформировался техногенный вторичный ореол рассеяния индикаторных элементов (Zn, Cu, Cd и Fe) в радиусе 2-5 км от производственных объектов, а в донных осадках реки – техногенный поток рассеяния, протяженностью до 10 км. В техногенных ореолах и потоках отмечен значительный рост валовых концентраций ТМ относительно естественных вторичных ореолов и потоков рассеяния, а также резкое увеличение доли подвижных форм металлов. Последние представлены поверхностно-сорбированными (Cd), карбонатными (Zn) и органоминеральными (Cd, Co, Cu, Zn) формами.

3. В донных осадках и почвенном покрове характер миграции и концентрации рудных элементов обусловлен техногенными физико-химическими барьерами, в основном, кислотно-щелочного класса.

4. Выделены индикаторные виды растений техногенного загрязнения: полынь австрийская *Artemisia austriaca* L., вероника серая *Veronica incana* L., чабрец Маршалла *Thymus marschallianus* L., которые могут быть использованы при экологическом мониторинге и рекультивации нарушенных земель.

5. Среди природоохранных мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения окружающей среды, помимо традиционных методов (применение систем очистки выбросов и сбросов), целесообразно использование искусственных геохимических барьеров на основных путях техногенных потоков, приводящих к уменьшению подвижности рудных элементов в зоне гипергенеза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Опекунов А.Ю. Аквальный техноседиментогенез // Труды ВНИИОкеангеологии. 2005. Т.208.
2. Опекунов А.Ю. Геохимические особенности современного осадкообразования в районе разработки Сибайского медноколчеданного месторождения (Южный Урал) / А.Ю.Опекунов, Л.В.Леонтьева, М.С.Куприна // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер.7. 2010. Вып.2. № 15.
3. Опекунова М.Г. Оценка геоэкологического состояния и изменения природно-территориальных комплексов в зоне воздействия горно-добывающей промышленности на территории Башкирского Зауралья / М.Г.Опекунова, Е.Ю.Елсукова, Э.Э.Муратова // Проблемы геоэкологии Южного Урала: Мат. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. Оренбург, 2005.
4. Прокин В.А. Закономерности размещения колчеданных месторождений на Южном Урале. М., 1977.
5. Серавкин И.Б. Вулканизм и колчеданные месторождения Южного Урала. М., 1986.
6. Тяжелые металлы в почвах и растениях Южного Урала. Ч.2. Экологическое состояние антропогенно нарушенных территорий / М.Г.Опекунова, Н.В.Алексеева-Попова, И.Ю.Арестова, С.В.Грибальев, Д.А.Краснов, Д.Г.Бобров, О.А.Осипенко, Н.И.Соловьева // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер.7. 2002. Вып.1. № 7.

#### REFERENCES

1. *Opekunov A.Ju.* Aquatic tehnosedimentogenet // Proceedings VNIIIOkeangeologia. 2005. Vol.208.
2. *Opekunov A.Ju.* Geochemical features of recent sedimentation in the development of chalcopyrite Sibai deposit (South Urals). / A.Ju.Opekunov, L.V.Leontieva, M.S.Kuprina // Journal of Saint Petersburg Staite University. Serie 7. 2010, Vol.2. N 15.
3. *Opekunova M.G.* Assessment of environmental conditions and changes in environmental systems in the zone of influence of mining industry in the Bashkir Trans-Urals // M.G.Opekunova, E.Ju.Elsukov, E.E.Muratova // Problems of Geocology of Southern Urals: Proceedings of the Second Russian scientific-practical Conference. Orenburg, 2005.
4. *Prokin V.A.* Patterns of distribution of massive sulfide deposits in the southern Urals. Moscow, 1977.
5. *Seravkin I.B.* Volcanism and pyrite deposits of the Southern Urals. Moscow, 1986.
6. *Heavy metals in soils and plants of the Southern Urals. Part.2. The ecological status of anthropogenically disturbed areas / M.G.Opekunova, N.V.Alekseeva-Popova, I.Ju.Arestova, S.V.Gribalev, D.A.Krasnov, D.G.Bobrov, O.A.Osipenko, N.I.Solovjeva // Journal of Saint-Petersburg Staite University. Serie 7. 2002. Vol.1. N 7.*