

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ШЛАКОВЫХ ОТВАЛОВ

Становление и развитие городов на Урале предопределено наличием крупных месторождений руд черных и цветных металлов. Добыча и переработка рудного сырья сопровождается складированием на поверхности больших масс диспергированных пород в отвалах и шламохранилищах, которые на территории горноскладчатого Урала занимают огромные площади. В этих техногенных образованиях концентрация ряда элементов (в основном металлов) превышает кларковые в десятки и сотни раз. При взаимодействии с внешней средой происходит их вынос из субстрата и геохимическое рассеяние. Интенсивность такого рассеяния зависит от многих факторов, а его последствия могут оказать вредное воздействие на природную среду и здоровье человека.

Классическим примером горнопромышленного центра является Н. Тагил. Его местоположение и развитие предопределено крупными месторождениями железных руд: Высокогорским, Лебяженским, Естюнинским. Переработка руды осуществляется на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате (НТМК). На территории города складировано более 100 млн тонн отходов горного (отвалы векрышных пород и забалансовых руд); обогатительного (хвостохранилища) и металлургического производств (шлаковые отвалы).

Целью работы, выполняемой сотрудниками Уральской государственной горно-геологической академии, являлась оценка воздействия шлаковых отвалов на все элементы природной среды: воздух, почвы, поверхностные и подземные воды.

Основные задачи, решаемые в ходе исследований:

1. Выявление приоритетных элементов, загрязняющих природную среду от источника загрязнения.
2. Оценка уровня загрязнения природных сред: воздуха, почвы, поверхностных и подземных вод.
3. Прогноз загрязнения природных сред.
4. Разработка мероприятий по снижению негативного влияния отвалов на окружающую среду.

Шлаковые отвалы НТМК находятся на северо-восточной окраине г. Н. Тагила и состоят из отвала доменных шлаков и отвала сталеплавильных шлаков. Оба отвала являются действующими, функционируют с 1949 года. Длина отвалов 1200 метров, ширина около 1000 метров. В настоящее время в отвалах содержится около 55 млн тонн отходов. По гранулометрическому составу отвалы очень неоднородны. Здесь имеются валуны диаметром до 2 метров и тонкодисперсная фракция.

Отходы НТМК имеют следующий химический состав: оксиды кремния ( $\text{SiO}_2$  - 10-30%), кальция ( $\text{CaO}$  - 30-40%), алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 5-15%), магния ( $\text{MgO}$  - 10-15%). Кроме того, в шлаках присутствуют соединения натрия и калия, железа, титана, марганца, ванадия, хрома, цинка, меди и кобальта. Содержание кремния, кальция, магния, алюминия, натрия и калия в отвалах не превышает кларковые значения этих элементов в земной коре. Кроме того, они являются не токсичными. Содержание "тяжелых металлов" в отвалах резко превышает содержание их в литосфере, и, следовательно, они могут быть потенциальными загрязнителями окружающей среды.

Загрязнение окружающей природной среды под влиянием шлаковых отвалов НТМК происходит аэрогенным и гидрогенным путем [2]. Аэрогенное загрязнение связано с выпадением компонентов из воздушных потоков. Специфика такого загрязнения определяется метеорологической обстановкой территории, включающей ветровой, термический режимы и режим атмосферных осадков.

Загрязнение воздушного бассейна под воздействием отвалов оценено косвенно - по результатам снеговой съемки, которая была проведена в начале марта 1995 г. Пробы снега отбирались по всему периметру отвала на расстоянии от него 25, 50, 100, 250 и, если возможно, 500 м. В лабораторных условиях по всем отобраным пробам анализировалось количество грубодисперсных частиц (взвесей, пыли) и содержание исследуемых "тяжелых металлов" в талой воде.

В результате пыления отвалов в приотвальной части формируется поток рассеяния шириной около 1 км со средней пылевой нагрузкой около  $1500 \text{ кг/км}^2$  в сутки, что примерно в 75-150 раз превышает фоновую. Особенности потока рассеяния от отвала являются его динамичность,

неустойчивость состава и концентрации. Наибольшая пылевая нагрузка приурочена к месту выгрузки шлаков и мартеновской пыли, т.е. в северной и восточной части отвала, которая превышает здесь 1000 кг/(км<sup>2</sup> · сут). Поток рассеяния имеет наибольшую протяженность в северо-восточном направлении, так как преобладают юго-западные ветры. Среднее значение пылевой нагрузки и дисперсия уменьшаются в удалении от отвала. При периметре отвала около 6 км и ширине потока рассеяния около 1 км площадь аномальной пылевой нагрузки составит 6 км<sup>2</sup>. В эту зону ежедневно транспортируется воздушным потоком около 9 тонн пыли, или ежегодно 3285 тонн, что составляет 1 % отгружаемых в отвал отходов.

Содержание тяжелых металлов в пыли, рассеиваемой отвалами, превышает их содержание в среднем по европейской части России в 10-50 раз, а нагрузка этих элементов увеличивается больше чем в тысячу раз (табл.1).

Загрязнение почв, как и загрязнение воздуха, осуществляется от отвалов аэрогенным путем, но в отличие от воздушного бассейна, который является транспортирующей средой, почва выполняет депонирующую функцию с образованием устойчивых ореолов загрязнения.

Таблица 1

**Концентрации тяжелых металлов в пылевых выпадениях из атмосферы**

Элемент	У отвалов на р.Ольховке		В среднем по европейской части России (по Ю.В.Сагду)	
	содержание в пылях, мг/кг	среднесуточная нагрузка, кг/км <sup>2</sup>	содержание в пылях, мг/кг	среднесуточная нагрузка, кг/км <sup>2</sup>
Железо	86200	113.13	-	-
Ванадий	1300	2.6	64	0.000640-0.00128
Титан	10800	13.45	-	-
Марганец	3700	5.57	570	0.0057-0.0114
Хром	2700	3.67	50	0.0005-0.001
Медь	270	0.44	80	0.0008-0.0016
Цинк	600	0.73	70	0.0007-0.0014
Кобальт	200	0.38	7	0.00007-0.00014

Пробы почв отобраны по всему периметру отвалов на расстоянии от него 25, 50, 100, 250 и 500 м. Опробование произведено из горизонтов А и В соответственно с глубины 5 и 25 см.

Лабораторные работы включали исследование содержания тяжелых металлов в почвах: Fe, Mn, Ti, V, Cr<sup>3+</sup>, Si, Zn и Co. По первым четырем элементам согласно ГОСТ 17.4.2.01-83 изучено валовое содержание, а по остальным - подвижные формы. Кроме этого, определялось рН и Eh среды с помощью потенциометра.

Обработка результатов полевых и лабораторных исследований показала, что концентрация тяжелых металлов в горизонте А выше, чем в горизонте В, и выше среднего содержания по району г.Н.Тагила, причем это различие особенно резко выражено по содержанию подвижных форм тяжелых металлов (Cr, Zn, Cu и Co). Это можно объяснить окислительной обстановкой и нейтрально-щелочной средой. В этих условиях цветные тяжелые металлы находятся в умеренно подвижной форме [4]. Слабощелочная среда у отвалов обусловлена их влиянием, а именно: содержанием в пыли окислов кальция, которые, гидролизуясь, раскисляют почву. Валовое содержание тяжелых металлов в почвах обусловлено интенсивностью пылевой нагрузки.

Содержание железа, марганца, титана и цинка в почвах горизонтов А и В близко к предельно допустимому. По ванадию, хрому и кобальту почва загрязнена умеренно, что превышает ПДК в 5-10 раз. Концентрация меди в почвах очень высокая. Интенсивность ореола загрязнения совпадает с повторяемостью ветров.

Аэрогенным загрязнителем воздуха и почв от отвалов является пыль. Это происходит как при выгрузке шлаков, так и в результате ветровой эрозии самих отвалов, что и предопределяет основные природоохранные мероприятия. С пуском комплекса по переработке шлаковых отвалов НТМК в 1996 г. производительностью 3 млн. тонн в год возможно изменение технологии складирования отходов, которая сводится к разработке внутреннего карьера в отвале и складированию в нем

шлаков автомобильным транспортом. При этом карьер будет постоянно развиваться, так как производительность комплекса в 5-7 раз выше объема складываемых отходов.

Процесс транспортировки загрязняющих веществ от отвалов шлаков идет также водным путем. Главными объектами загрязнения при этом потенциально являются поверхностные и подземные воды. Вынос загрязняющих веществ из шлаков происходит при взаимодействии их с атмосферными осадками или поверхностными водами р.Ольховки. В первую очередь процесс выноса определяется условиями "омывания" шлаков водой, количеством и режимом атмосферных осадков, скоростью и расходом поверхностных вод, температурой, рН и Eh среды.

Во-вторых процесс выноса определяется характером самих шлаков - их дисперсностью, пористостью, что обуславливает размер площади взаимодействия шлаков с водой.

В-третьих, спецификой самих элементов, взаимодействующих с водой.

Процесс выноса загрязняющих веществ из шлаков происходит без нарушения их структуры, поэтому его следует относить к выщелачиванию. Способность шлаков выщелачивать те или иные загрязняющие ингредиенты исследована в химической лаборатории УГГА по методике, описанной в работе [4], и по разработкам автора. Для характеристики процесса выщелачивания из шлаков при фильтрации необходимо знать начальное удельное объемное и начальное удельное весовое (г/г) количество растворимого вещества, максимальную растворимость в воде содержащегося в шлаке твердого вещества  $C_{max}$ , а также константу скорости растворения (коэффициент выщелачивания вещества) (1/сут). Лабораторные опыты по определению этих параметров проводились на трех шлаках: доменном, мартеновском, конверторном, а их результаты приведены в табл. 2.

Анализ табл.2 показывает, что наибольшим загрязняющим эффектом обладает доменный шлак, а наибольшей скоростью выщелачивания - черные металлы: железо, ванадий и марганец. Цветные металлы из шлаков выносятся достаточно долго (десятки лет).

Загрязнение поверхностных вод исследовано по р.Сухой Ольховке, являющейся временным водотоком VI порядка. Русло реки на протяжении 200-300 м завалено отвалом мартеновских шлаков.

Таблица 2

Результаты расчетов параметров выщелачивания шлаков

Шлак	Элемент	Удельное весовое количество, г/г	Удельное объемное количество раствор. вещества	Максим. растворимости, мг/кг	Константа скорости растворения 1/сут
Доменный	Fe	0.065	0.0065		
	Co	0.00016	0.000014	0.111	2476.55
	Zn	0.001	0.00011	0.28	10103.8
	Cu	0.0002	0.000018	0.226	18256.9
	V	0.01	0.0013	1.85	1449.8
Мартеновский	Mn	0.0023	0.00024	1.0	5644.02
	Fe	0.038	0.0072	4.0	158.8
	Co	0.0001	0.0000216	0.11	5886.2
	Zn	0.00114	0.000297	0.59	769.9
	Cu	0.00015	0.000032	0.08	2670.6
Конверторный	V	0.022	0.0068	1.28	39.6
	Mn	0.0131	0.00329	0.83	213.6
	Fe	0.1817	0.053	3.68	639.6
	Co	0.00023	0.000059	0.125	13668.9
	Zn	0.0009	0.00029	0.12	
	Cu	0.0003	0.000076	0.085	10036.2
	V	0.0022	0.00084	0.76	2364.7
	Mn	0.01155	0.0035	0.57	2218.37

Загрязнение р.Сухой Ольховки осуществляется за счет выноса загрязняющих веществ из пыли дождевыми и тальными водами с территории, прилегающей к отвалу, а также выщелачивания их

непосредственно из шлаков при прохождении воды через отвал. Исследование заключалось в проведении режимных наблюдений за химическим составом реки до отвала и после отвала в течение года. Анализ гидрохимической обстановки реки до и после отвала показал, что воздействие отвала на содержание тяжелых металлов в р. Сухой Ольховке проявляется в увеличении содержания их после отвала. Причем увеличение концентрации железа и ванадия происходит за счет выноса их из самого отвала при движении по нему воды реки. Формирование загрязнения по марганцу, меди, цинку и кобальту происходит, главным образом, из пыли, рассеянной по территории, прилегающей к отвалу.

В настоящее время разработаны принципы прогнозирования качества воды водоемов /5/ на основе теории смещения, когда в водоем или в водоток сбрасывают сточные воды с определенным расходом. Специфика данного случая заключается в том, что сброса, как такового, сточных вод нет, а качество воды реки заметно ухудшается.

Прогноз заключается в определении максимально возможных концентраций в реке загрязняющих веществ после ее взаимодействия с отвалом. Для прогнозирования необходимо найти максимально возможную концентрацию реки до отвала (фоновую), используя метод достоверных пределов.

Если взаимосвязь содержания компонента до и после отвала тесная (коэффициент корреляции высокий), то максимальную (прогнозируемую) концентрацию вещества в реке после отвала можно определить, используя уравнение регрессии

$$C_{\max} = a + b \cdot C_{\phi},$$

где  $a$  и  $b$  - коэффициенты уравнения регрессии.

Если эта взаимосвязь невысокая, то максимальную концентрацию в реке после отвала можно определить по формуле

$$C_{\max} = k_n \cdot C_{\phi},$$

где  $k_n$  - коэффициент повышения концентрации за счет выщелачивания.

Анализ табл.3 показывает, что шлаковые отвалы оказывают существенное влияние на концентрации элементов в реке Сухой Ольховке. Фактические и прогнозные (максимально возможные) концентрации тяжелых металлов в реке могут превышать предельно допустимые концентрации в десятки и сотни раз.

Таблица 3

Исходные данные и результаты расчета прогнозных значений концентрации загрязняющих веществ в р.Сухой Ольховке после отвала

Ингредиенты	Река до отвала		Река после отвала		Коэффициент повышения, $k_p = C_{п.о.}/C_{д.о.}$	Коэффициент корреляции между содержанием до и после отвала	Уравнение регрессии	Фоновая концентрация, мг/л	Прогноз. значен., Спр., мг/л
	среднее, мг/л	стандарт, мг/л	среднее, мг/л	стандарт, мг/л					
Железо	1.94	4.83	3.03	4.28	1.56			4.88	7.62
Марганец	0.24	0.275	0.23	0.25	0.96	0.74	$C_p = 0.07 + 0.67 C_{\phi}$	0.408	0.34
Ванадий	0.31	0.25	0.8	0.85	2.58			0.46	1.19
Медь	0.032	0.0043	0.04	0.048	1.25	0.935	$C_p = -0.29 + 10.43 C_{\phi}$	0.034	0.065
Цинк	0.05	0.07	0.057	0.061	1.14	0.932	$C_p = 0.016 + 0.81 C_{\phi}$	0.093	0.092
Кобальт	0.024	0.016	0.058	0.069	2.42	0.642	$C_p = -0.008 + 2.77 C_{\phi}$	0.034	0.086

Основным водоносным горизонтом под шлаковым отвалом является зона региональной трещиноватости эффузивных пирокластических пород: базальтовых, андезито-базальтовых, трахиандезито-базальтовых, диабазовых порфиритов и их туфов. Мощность водоносного горизонта зоны региональной трещиноватости составляет 30-50 м. Коэффициенты фильтрации равны 0.1-0.5 м/сут.

Загрязнение подземных вод от отвала происходит в результате выщелачивания загрязняющих компонентов атмосферными водами и инфильтрации их через площадь отвала до уровня грунтовых вод. Интенсивность такого загрязнения зависит от способности элементов к выщелачиванию, фильтрационного расхода атмосферных вод и защитных свойств зоны аэрации. Обогащенные

загрязняющими веществами в результате выщелачивания атмосферные осадки поступают на подошву отвала, сложенную глинистыми образованиями. Движение загрязняющего вещества через них будет определяться двумя процессами: конвективным и диффузионным массопереносом, осложненными адсорбцией загрязняющего вещества на породах. После прохождения глинистого слоя загрязняющее вещество попадает в подземные воды и создается реальная угроза загрязнения водозаборов.

Защищенность подземных вод определяется тремя показателями зоны аэрации: глубиной залегания подземных вод, мощностью слабопроницаемых отложений в разрезе, фильтрационными свойствами пород. Кроме перечисленных факторов, существенную роль играют активная пористость и сорбционные свойства пород. Анализ фактического материала показал, что зона аэрации под отвалом характеризуется второй категорией защищенности подземных вод по В.М.Гольдбергу [3]. Это соответствует времени прохождения загрязненных атмосферных осадков с подошвы отвалов до уровня подземных вод в течение 10-50 суток. Однако это действительно для несорбирующихся компонентов ( $Cl$ ,  $NO_3^-$  - исследуемые тяжелые металлы активно поглощаются глинистыми образованиями).

Прогноз загрязнения подземных вод заключается в оценке времени прохождения загрязненных атмосферных осадков с подошвы отвала до уровня подземных вод и определения возможных концентраций загрязняющих веществ в подземных водах. Расчет времени прохождения атмосферных осадков до УГВ произведен для схемы конвективного массопереноса несорбируемого ( $Cl$ ,  $NO_3^-$ ) и сорбируемого компонентов (исследуемых тяжелых металлов). Анализ загрязнения подземных вод под отвалами показал, что концентрации, существенно превышающие фон в подотвальных подземных водах, имеются только по меди (в 3 раза). Содержание ванадия в подземных водах района (в том числе и подотвальных) выше санитарно-бытовых ПДК (0.1 мг/л). Основные параметры для расчета получены на основании статистической обработки результатов определения физических, фильтрационных и физико-химических параметров свойств зоны аэрации. К ним относятся: активная пористость (1% от общей), коэффициент фильтрации и коэффициент Генри. Время прохождения несорбируемых компонентов (хлориды, нитраты) до уровня подземных вод составляет десятки суток, а сорбируемых тяжелых металлов - десятки лет. В то же время оно меньше времени существования отвала (47 лет), что подтверждает возможность загрязнения подземных вод.

После прохождения зоны аэрации инфильтрующиеся загрязненные атмосферные осадки попадают в грунтовый поток, где происходит их смешение и выравнивание концентраций. Прогнозную концентрацию загрязняющего вещества в подземных водах на выходе потока из-под отвала можно определить по формуле смещения, а результаты представлены в табл.4

$$C_{\text{прог}} = C_{\text{фон}} + (C_{\text{загр}} - C_{\text{ф}}) / n,$$

где  $C_{\text{ф}}$  - фоновая концентрация вещества в подземных водах района, мг/л;  $C_{\text{загр}}$  - концентрация вещества в загрязненных атмосферных осадках;  $n$  - кратность разбавления.

Таблица 4

Исходные данные и результаты расчетов прогнозных концентраций в подземных водах

Элемент	Фоновые концентрации, мг/л	Средняя концентрация в подотвальных водах, мг/л	Прогнозные концентрации подземных вод на выходе из-под отвала, мг/л	ПДК, мг/л
Железо	0.36	1.36	0.6	0.3
Марганец	0.082	0.32	0.14	0.1
Ванадий	0.46	0.19	0.4	0.1
Медь	0.017	0.064	0.028	1.0
Цинк	0.061	0.149	0.082	5.0
Кобальт	0.048	0.065	0.052	0.1

Анализ табл.4 показывает, что отвалы шлаков НТМК могут оказать влияние на увеличение содержания железа и марганца в подземных водах, концентрации которых могут превышать ПДК.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ складироваемых отходов в отвале шлаков АО НТМК показал, что наиболее потенциально опасными, влияющими на окружающую среду, являются тяжелые металлы: железо, ванадий, титан,

марганец, хром, медь, цинк и кобальт.

2. Основным загрязняющим элементом воздуха от отвалов является пыль, содержащая высокие концентрации тяжелых металлов. Дальность и интенсивность пыления зависят от метеорологического режима территории. Пылевая нагрузка в приотвальной зоне в 100-150 раз выше фоновой, а концентрации тяжелых металлов в атмосфере превышают фоновые более чем в 1000 раз.

3. В результате пыления произошло интенсивное загрязнение почв в зоне влияния отвалов. Особенно оно значимо по меди и ванадию. В целом территория вокруг отвалов по уровню загрязнения почв относится к умеренно опасной зоне.

4. Наибольшим загрязняющим эффектом при гидрогенном загрязнении обладает доменный шлак, а наиболее подвижными элементами являются железо и ванадий.

5. Гидрогенное загрязнение поверхностных вод происходит в результате сноса загрязняющих веществ с территории, окружающей отвал, и при прохождении потока воды р. Сухой Ольховки через него. При этом концентрации загрязняющих веществ в реке становятся значительно выше рыбохозяйственных ПДК.

6. Влияние шлаковых отвалов на подземные воды вследствие малых расходов инфильтрационных вод, слабой выщелачиваемости элементов и слабых фильтрационных свойств зоны аэрации невысоко. Подземные воды могут быть загрязнены железом и марганцем.

### Б И Б Л И О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С П И С О К

1. Бочевер Ф.М., Лапшин Н.М., Орозовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения.-М.: Недра, 1979. - 254 с.
2. Геохимия окружающей среды/Ю.Е.Сагет, Б.А.Ревич, Е.П.Янин и др. - М.: Недра, 1990. -335 с.
3. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения.-М.: Недра, 1984. - 262 с.
4. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник. В 6 кн./Под ред. Э.К. Буренкова.-М.: Недра, 1994. - 303 с.
5. Родзиллер И.Д. Прогноз качества приемников сточных вод. М.: Стройиздат, 1984. - 231 с.

УДК 556

Л.П. Парфенова

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТВЕРДЫХ ШЛАМОВ В ОТНОШЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ (НА ПРИМЕРЕ МАЛОСЕРНИСТОГО И СОРЬИНСКОГО ШЛАМОХРАНИЛИЩ)

В данной статье предложен один из путей оценки качества фильтратов, сформировавшихся под дном и дамбами обвалования двух крупнейших на Урале шламохранилищ, предназначенных для складирования отходов обогащения и металлургического производства меди. Объем накопленных отходов в Малосернистом шламохранилище составляет около 10 млн куб. метров, в Сорьинском - около 30 млн куб. метров.

Шламы представлены в виде суспензии переменной консистенции. Консистенция, или отношение весовых содержаний твердых и жидких фаз, меняется от 1 к 4 до 1 к 8. Жидкая фаза шламов содержится в форме минерализованных растворов (значение сухого остатка 3-6 г/(дм.куб.)) сульфатного состава с высокими содержаниями тяжелых металлов (в мг/(дм.куб.): меди до 5, железа до 30, цинка до 1,5, мышьяка до 9, а также фторидов до 85, фосфатов до 50 и пр. Она в силу своей высокой степени токсичности и считается основным источником загрязнения подземных вод.

По результатам гранулометрического состава в Малосернистом шламохранилище она представлена мелкими и пылеватыми песками и супесями, а в Сорьинском пылеватыми песками, в высокой степени неоднородными (см. рисунок). Средняя мощность накопленных твердых шламов составляет в шламохранилищах около метра и более двух метров соответственно. Этот слой и создает тот искусственный противофильтрационный экран, в котором происходят основные процессы физико-химического взаимодействия твердых и жидких шламов. Скорости этих процессов вероятно