

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СТЕПЕНЬ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ В РАЙОНЕ КОМБИНАТА ПО ОБОГАЩЕНИЮ
ЦИНКОВОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШААБЕТ-ЭЛЬ-ХАМРА (АЛЖИР)**

© 2020 г. Р. Омара^{1, *}, д. чл. М. В. Чарыкова¹, А. В. Русаков¹,
С. В. Мальшев¹, д. чл. Н. В. Платонова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, С.-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: omaralya913@gmail.com

Поступила в редакцию 05.11.2019 г.

После доработки 25.11.2019 г.

Принята к публикации 12.02.2020 г.

В работе исследованы пробы почв и техногенных отложений (отвалов) на территории, подвергающейся воздействию комбината по обогащению цинковой руды месторождения Шаабет-эль-Хамра: охарактеризована их окраска по цветовой шкале Манселла, определены содержания тяжелых металлов и ряда других элементов, минеральный состав, рН, доля скелетной части. Показано, что практически на всей изученной территории, за исключением небольшого участка в предгорье, имеет место превышение нормативных показателей по цинку, свинцу и кадмию. Загрязнение медью менее значительно и локализовано в основном на территории самого комбината.

Ключевые слова: тяжелые металлы, почвы, отвалы, цинк, свинец, кадмий, медь

DOI: 10.31857/S0869605520020057

Предприятия горнодобывающей промышленности являются основными антропогенными источниками поступления в окружающую среду таких тяжелых металлов, как Pb, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni (Callender, 2014). При этом происходит загрязнение воздуха и природных вод, но большая часть антропогенных поступлений этих элементов в окружающую среду приходится на почвы территорий, прилегающих к горнодобывающим и обогатительным комбинатам и металлургическим предприятиям. Так, согласно данным, приведенным в обзоре (Callender, 2014), соотношение суммарных количеств этих металлов (в тыс. т), поступивших за период 1980 гг. в воздух, почвы и природные воды, составляет для свинца 2 : 6 : 1, для цинка 1 : 10 : 2, для кадмия 1 : 3 : 1, для меди 1 : 27 : 3. Именно эти четыре элемента являются основными загрязнителями окружающей среды в районах, примыкающих к предприятиям по добыче и переработке цинковых и свинцовых руд (Adriano, 1986).

Авторы монографии, посвященной техногенным системам (Бортникова и др., 2006), отмечают, что “период бесконтрольного складирования отходов обогащения руд закончился в 70-х годах XX в., когда обнаружился значительный уровень загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами и другими токсичными компонентами вследствие их миграции из хранилищ”. Однако следует признать, что для большого числа горно-обогатительных предприятий эта проблема сохраняет свою актуальность и в настоящее время.

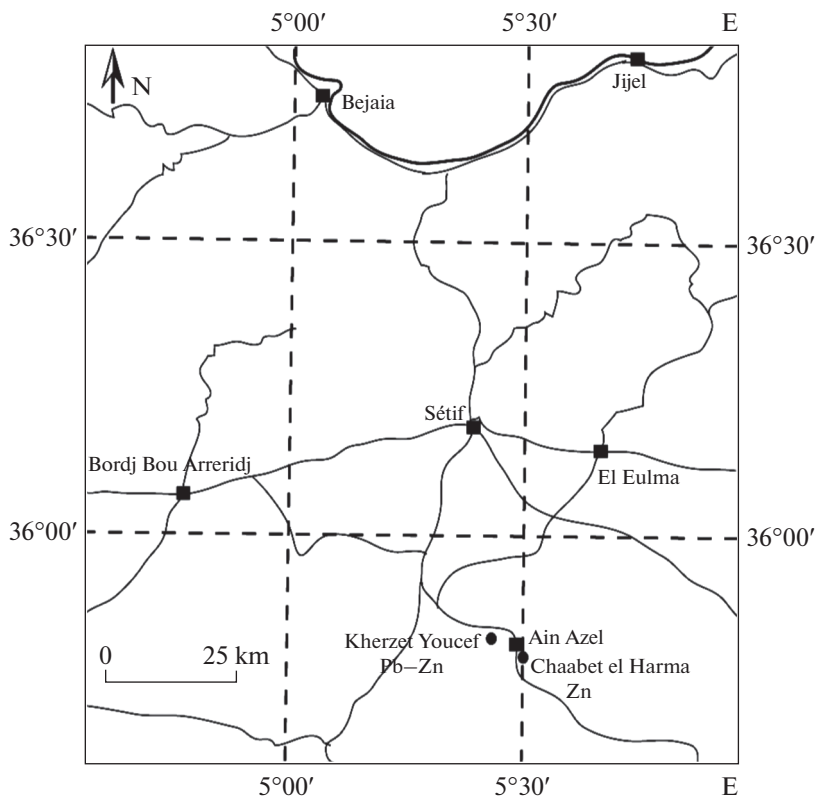


Рис. 1. Географическое положение месторождений Херцет Юсеф и Шаабет-эль-Хамра (Nekache, 2012 с дополнениями).

Fig. 1. Geographical location of Kherzet Youssef and Chaabet El Hamra mines.

Объектом нашего исследования является территория вблизи горно-обогатительного комбината, расположенного в северо-восточной части Алжира, вблизи города Айн Азель (рис. 1). С 1978 г. сырьем для обогащения на комбинате служила свинцово-цинковая руда месторождения Херзет Юсеф, эксплуатация которого была прекращена в 1991 г. в связи с аварийным прорывом воды в шахту. С 1991 по 1994 г. и с 2005 г. по настоящее время на обогащение поступает цинковая руда месторождения Шаабет-эль-Хамра (Boutaleb, 2001).

Месторождение Шаабет-эль-Хамра расположено примерно в 250 км к юго-востоку от г. Алжир и в 50 км к югу от г. Сетиф в районе Шуф-Буарке. Оно, как и месторождение Херзет Юсеф, входит в состав свинцово-цинковой металлогенической провинции горного массива Ходна (Khalfi, Taleb, 2014). Основными минералами на месторождении являются сфалерит, пирит и марказит. Галенит встречается реже и не имеет промышленного значения. Жильные минералы – кальцит, барит, доломит, реже кварц и гипс. Вторичные минералы, образующиеся в результате окисления – смитсонит, церуссит и лимонит (Khalfi, Taleb, 2014).

Максимальная годовая мощность обогатительного комбината составляет 70000 т цинковой руды (среднее содержание Zn 8.29%) и 5585 т продукта – цинкового концентрата с содержанием Zn 53% (Rezigt, Imchal, 2008). Отходы предприятия, содержащие тяжелые металлы (Zn, Pb, Cd, Cu и др.), складированы на открытом воздухе.



Рис. 2. Схема отбора проб.

Fig. 2. Sampling scheme.

Всего к 2016 г. было накоплено около 2 160 000 т твердых отходов, которые образуют отвалы площадью 7.2 га. Поскольку климат региона характеризуется сильными ветрами, имеет место пылевое загрязнение атмосферы и поверхностного слоя почв (Attouchek, 2005; Rezigat, Imchal, 2008; Khalfi, Taleb, 2014). Дополнительную опасность для окружающей среды представляет сброс жидких отходов в ближайшее к комбинату периодически пересыхающее русло реки (Nekache, 2012).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки загрязнения окружающей среды на территории, примыкающей к обогательному комбинату, в октябре 2018 г. были отобраны пробы почв и рыхлых отложений в 38 точках. Схема отбора проб представлена на рис. 2.

В соответствии с районированием почвенного покрова в пределах Алжира (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-map-soil-atlas-africa>) доминирующими здесь являются три группы почв, определяющих почвенный покров ненарушенных территорий в 50 км к югу от г. Сетиф. Почвы классифицированы по международной классификации IUSS Working Group WRB (2015). Преобладают почвы группы *Haplic Calcisols* (*Yermic*), характеризующиеся существенным накоплением вторичного карбоната кальция и широко распространенные в аридных и семиаридных областях, где они в основном приурочены к карбонатным материнским породам. Группа *Lithic Leptosols* занимает подчиненное положение и объединяет почвы на плотных породах и сильно каменистые почвы. Пахотные почвы в пределах района исследования представлены *Petric Calcisols* (*Loamic, Aric*) и *Haplic Calcisols* (*Yermic, Aric*).

Рыхлые поверхностные отложения на территории, прилегающей к обогательному комбинату, могут быть отнесены к группе *Technosols*, которая объединяет почвы,

сформированные на промышленных отходах (производственном шламе, шлаках, отвалах).

Пробы отбирались по сети с шагом 100 м на территории промышленной зоны, из твердых отвалов, около места сброса жидких отходов, а также на прилегающих территориях – в предгорьях и в районе сельскохозяйственной деятельности. Кроме того, была отобрана проба почвы в близлежащем городе Айн Азель и вблизи самой шахты Шаабет-эль-Хамра. Отбор почв и рыхлых отложений осуществлялся из верхнего слоя мощностью 20 см, для двух точек были взяты несколько проб с разной глубины (до 80 см). Масса каждой пробы составила примерно 200 г. Отобранные пробы высушивались на открытом воздухе в течение десяти дней, затем помещались в полиэтиленовые пакеты и транспортировались в лабораторию для дальнейших исследований.

Все пробы классифицировались по цвету с помощью атласа Манселла (Munsell, 2014), в них определялась доля скелетной части (фракция >1 мм), измерялся рН водной вытяжки (троекратно, соотношение почва : вода = 1 : 2.5), выполнялся СНН-анализ. Элементный анализ осуществлялся рентгено-спектральным флуоресцентным методом (точность определения 10 отн. %); измерения проводились для фракции <1 мм. Для определения минерального состава проб рыхлых отложений использовалась порошковая рентгенография (полнопрофильный анализ методом Ритвельда). Для наглядного представления результатов были построены графики в среде программирования R-studio с использованием библиотеки визуализации ggplot2. Образцы цинковой руды были охарактеризованы методами электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отобранные пробы весьма разнообразны по окраске (табл. 1), но все они характеризуются щелочной или слабощелочной реакцией среды ($\text{pH}_{\text{водн.}}$ 7.1–8.5), что типично для почв, входящих в группу Calcisols. Во всех пробах в большом количестве присутствуют карбонаты – в основном доломит и кальцит, в отдельных пробах встречаются примеси карбонатов цинка и свинца (смитсонита и церуссита).

Схемы пространственного распределения содержаний суммы карбонатов, а также кальцита и доломита в отдельности, представлены на рис. 3, *a–в*. Видно, что наибольшее содержание карбонатов наблюдается в пробах, отобранных из отвалов – оно превышает 80%, причем преобладающим минералом является доломит. Для этих же проб характерно практически полное отсутствие в гранулометрическом составе частиц размером более 1 мм (рис. 3, *г*). Кальцит является преобладающим минералом для точек, расположенных в северо-западной и южной частях исследуемой территории. Отметим, что для этих же проб характерны наибольшие значения $\text{pH}_{\text{водн.}}$ (>8), что, вероятно, объясняется большей растворимостью кальцита по сравнению с доломитом (Справочник по растворимости..., 1975).

Разнообразный минеральный состав исследованных образцов отражается в их бурой, розовой, оливково-бурой и серой окраске (табл. 1). Естественные почвы территорий предгорий, используемые под пастбища, отличаются в основном палево-бурой и желтовато-палевой окраской. Пахотные почвы характеризуются желтовато-бурой и светло-бурой окраской гумусового горизонта.

Помимо карбонатов минеральный состав почв включает кварц, мусковит, каолинит, иногда хлорит и полевоый шпат; во многих пробах определяются гипс и сульфиды (пирит, марказит). Минеральный состав отвалов представлен в основном доломитом с примесью гипса и сульфидов (пирита, марказита, сфалерита) (табл. 1).

Методом рентгено-спектрального флуоресцентного анализа во всех пробах были определены концентрации более 30 химических элементов. Приоритетными токсикантами для данной территории являются цинк, свинец, кадмий и медь (Attouchek et al., 2008).

Таблица 1. Минеральный состав (мас. %) и характеристика проб почв и техногенных отложений по цветовой шкале Манселла (в сухом состоянии)
Table 1. Mineral composition (wt %) and characteristics of soils and technogenic deposits samples according to the Munsell color scale (in dry conditions)

№ точки	Окраска	Минеральный состав*	№ точки	Окраска	Минеральный состав*
<i>Пастбище, предгорье</i>			<i>Территория комбината</i>		
1	2.5 Y 7/3 pale brown	кальцит – 43 доломит – 23 кварц – 11 мусковит и/или иллит – 9 хлорит – 7 каолинит – 7	4	2.5 Y 4/3 olive brown	кальцит – 20 доломит – 15 кварц – 27 мусковит и/или иллит – 7 смектит – 29
2	10 YR 7/3 very pale brown	кальцит – 29 доломит – 25 кварц – 32% мусковит и/или иллит – 5 хлорит – 3 каолинит – 5	8	7.5 YR 6/4 light brown	кальцит – 29 доломит – 18 кварц – 37 мусковит и/или иллит – 14 хлорит – 2
3	2.5 Y 7/4 pale brown	кальцит – 22 доломит – 15 кварц – 55 мусковит и/или иллит – 3 хлорит – 2 каолинит – 2	9	10 YR 5/3 brown	кальцит – 23 доломит – 20 кварц – 27 мусковит и/или иллит – 18 каолинит – 6 гипс – 3 сфалерит -2 пирит – 1
6	5 Y 8/4 pale yellow	доломит – 65 кварц – 3 мусковит и/или иллит – 23 каолинит – 9	10	7.5 YR 5/2 brown	кальцит – 41 доломит – 14 кварц – 28 мусковит и/или иллит – 12 каолинит – 4
7	2.5 Y 7/3 pale brown	кальцит – 41 доломит – 26 кварц – 11 мусковит и/или иллит – 17 каолинит – 5	13	2.5 Y 4/3 olive brown	доломит – 86 кварц – 3 гипс – 2 пирит – 3 марказит – 4
11	7.5 YR 8/3 pink	кальцит – 57 доломит – 18 кварц – 12 мусковит и/или иллит – 8 каолинит – 4	14	2.5 Y 5/2 gray- ish brown	кальцит – 21 доломит – 42 кварц – 17 мусковит и/или иллит – 8 каолинит – 4 гипс – 2 сфалерит -1 смитсонит – 1

Таблица 1. Продолжение

№ точки	Окраска	Минеральный состав*	№ точки	Окраска	Минеральный состав*
12	10 YR 5/3 brown	кальцит – 33 доломит – 19 кварц – 26 мусковит и/или иллит – 12 каолинит – 5 пирит – 2 смитсонит – 1	15	7.5 YR 5/4 brown	кальцит – 30 доломит – 9 кварц – 42 мусковит и/или иллит – 9 каолинит – 4 полевоы шпат – 6
16	2.5 YR 6/3 light yellowish brown	кальцит – 29 доломит – 39 кварц – 13 мусковит и/или иллит – 3 каолинит – 5 полевоы шпат – 5 гипс – 1 сфалерит – 2 пирит – 1 марказит – 1	17	7.5 YR 5/4 brown	кальцит – 26 доломит – 17 кварц – 35 мусковит и/или иллит – 10 каолинит – 4 полевоы шпат – 5 гипс – 2
19	2.5 Y 5/3 light olive brown	кальцит – 23 доломит – 38 кварц – 13 мусковит и/или иллит – 6 каолинит – 5 полевоы шпат – 8 гипс – 3 сфалерит – 1 пирит – 1 марказит – 2	18	10 YR 6/3 pale brown	кальцит – 46 доломит – 15 кварц – 18 мусковит и/или иллит – 9 хлорит – 1 каолинит – 2 полевоы шпат – 5
			<i>Площадка сброса жидких отходов</i>		
22	10 YR 4/6 dark yellowish brown	кальцит – 16 доломит – 26 кварц – 27 мусковит и/или иллит – 14 каолинит – 4 полевоы шпат – 8 гипс – 2 марказит – 2	20	2.5 Y 6/4 light yellowish brown	кальцит – 4 доломит – 47 кварц – 7 мусковит и/или иллит – 11 каолинит – 3 гипс – 2 сфалерит – 12 пирит – 2 марказит – 6 смитсонит – 4 церуссит – 2
<i>Пашня</i>			<i>Отвалы</i>		
21	7.5 YR 6/4 light brown	кальцит – 23 доломит – 9 кварц – 28 мусковит и/или иллит – 18 полевоы шпат – 13 гипс – 2 пирит – 1 марказит – 3 смитсонит – 1	1'	2.5 Y 5/2 grayish brown	доломит – 88 гипс – 4 сфалерит – 4 марказит – 4

Таблица 1. Продолжение

№ точки	Окраска	Минеральный состав*	№ точки	Окраска	Минеральный состав*
24	10 YR 5/6 yellowish brown	кальцит – 23 доломит – 11 кварц – 27 мусковит и/или иллит – 17 каолинит – 10 полевого шпат – 9 марказит – 3	35	2.5 Y 6/1 gray light brown	кальцит – 2 доломит – 87 кварц – 2 пирит – 4 марказит – 3
29	7.5 YR 6/4 light brown	кальцит – 29 доломит – 12 кварц – 30 мусковит и/или иллит – 12 каолинит – 7 полевого шпат – 10	39	2.5 Y 4/4 olive brown	кальцит – 1 доломит – 87 гипс – 3 пирит – 2 марказит – 3 гетит – 2 гексагидрит – 2
<i>Периодически пересыхающее русло реки</i>			79	5 Y 7/1 light gray	кальцит – 2 доломит – 91 кварц – 1 гипс – 2 пирит – 2 марказит – 2
23	10 YR 5/4 yellowish brown	кальцит – 28 доломит – 14 кварц – 32 мусковит и/или иллит – 11 каолинит – 5 полевого шпат – 7 гипс – 2	83	2.5 Y 5/3 light olive brown	доломит – 81 гипс – 6 пирит – 6 марказит – 5 пироаурит – 1
28	10 YR 5/4 yellowish brown	кальцит – 18 доломит – 33 кварц – 24 мусковит и/или иллит – 11 каолинит – 2 полевого шпат – 7 гипс – 3 марказит – 2	87	2.5 Y 5/3 light olive brown	доломит – 90 гипс – 4 пирит – 3 марказит – 2
<i>Территория вблизи шахты Шаабет-эль-Хамра</i>			125	10 YR 5/3 brown	кальцит – 21 доломит – 36 кварц – 22 мусковит и/или иллит – 13 каолинит – 3 гипс – 4 марказит – 1
	5 YR 5/4 red-dish brown	кальцит – 29 доломит – 6 кварц – 56 мусковит и/или иллит – 4 каолинит – 3	128	5 Y 6/2 light olive gray	доломит – 81 кварц – 1 мусковит и/или иллит – 3 каолинит – 4 гипс – 4 пирит – 3 марказит – 4

Таблица 1. Окончание

№ точки	Окраска	Минеральный состав*	№ точки	Окраска	Минеральный состав*
<i>Населенный пункт (город Айн Азель)</i>			132	7.5 YR 5/4 brown	кальцит – 24 доломит – 13 кварц – 30 мусковит и/или иллит – 12 каолинит – 7 полевоы шпат – 5 гипс – 6
	7.5 YR 7/3 pink	кальцит – 9 доломит – 15 кварц – 59 мусковит и/или иллит – 8 каолинит – 4 полевоы шпат – 3 гипс – 1	5'	10 YR 5/6 yellowish brown	доломит – 84 кварц – 2 гипс – 6 пирит – 3 марказит – 4

* В таблице приведены минералы, содержание которых не ниже 1%.

Как уже было сказано, именно эти элементы являются основными загрязнителями окружающей среды в районах, примыкающих к предприятиям по добыче и переработке цинковых и свинцовых руд (Adriano, 1986). Их содержания приведены в табл. 2.

В табл. 3 представлен диапазон содержаний Zn, Pb, Cd и Cu в исследованных пробах в сравнении с применяемыми в Алжире нормативными показателями концентраций этих элементов в почвах, а также фоновые значения для изученной территории и литературные данные о средних содержаниях в почвах мира (Adriano, 1986; Li, 2000; Kabata-Pendias, 2000). Максимальное превышение нормативных показателей (по цинку более чем в 1000 раз, по свинцу почти в 600 раз и по кадмию более чем в 900 раз) установлено для одной и той же пробы, отобранной в непосредственной близости от места сброса жидких отходов после обогащения цинковой руды (точка № 20 на рис. 2). Что касается проб почв, то нормативный показатель по цинку превышен в них максимум в 181 раз, по кадмию – в 143 раза, по свинцу – в 81 раз, причем наибольшее содержание Zn наблюдаются на территории комбината (точка № 9), наибольшее содержание Pb – на сельскохозяйственных землях (точка № 24), наибольшее содержание Cd – в пробах № 14 и № 24 (территория комбината и пашня).

Наиболее чистыми являются пробы, отобранные в предгорьях, к северо-западу от зоны складирования твердых отвалов и территории комбината (точки № 1, 2, 3, 6, 7, 11) – в них содержания Zn и Pb не превышают нормативные показатели для почв (A.F.N.O.R.), а содержание Cd ниже предела обнаружения. Содержания свинца в этих точках примерно соответствуют локальному фону и средним концентрациям в почвах мира (табл. 3), для цинка содержания несколько выше фоновых. Эта закономерность расположения наименее загрязненных почв согласуется с преимущественным направлением ветров, которые могут способствовать пылевому разносу частиц с поверхности отвалов – на исследуемой территории это западные и юго-западные ветры (Atouchek et al., 2008).

Загрязнение медью менее значительное, чем цинком, свинцом и кадмием – нормативные показатели превышены в почвах максимум в 6.5 раз, а в отвалах – в 2 раза, причем наиболее загрязненной является проба № 14, отобранная на территории комбината.

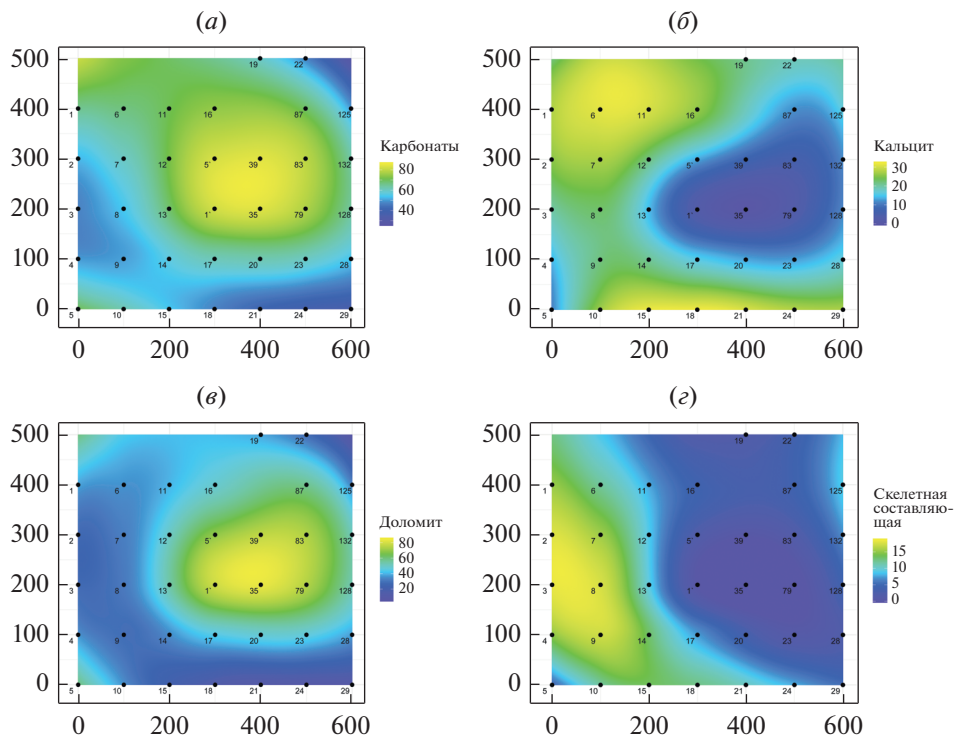


Рис. 3. Пространственное распределение содержаний (%) карбонатов (а), кальцита (б), доломита (е) и скелетной составляющей (з) в почвах и техногенных отложениях.

Fig. 3. Spatial distribution of contents (%) of carbonates (a), calcite (б), dolomite (е), and skeletal part (з) in soils and technogenic deposits.

Полученные результаты в целом согласуются с данными работы (Attouchek et al., 2008), в которой рассматривалась территория, прилегающая к месторождению Херзет Юсеф и было установлено превышение содержаний Zn, Pb и Cd над нормативными показателями при содержании Cu, близком к фоновому.

На рис. 4, а, з показано пространственное распределение содержаний Zn, Pb и Cd, а также As. Для всех этих элементов наблюдаются сходные закономерности – наиболее загрязненной является проба поверхностных отложений, отобранная в точке № 20, расположенной в непосредственной близости от места сброса жидких отходов. Вероятно, источник загрязнения этими элементами один и тот же, однако можно заметить, что повышенные содержания цинка и кадмия распространены на большем расстоянии от точки № 20 по сравнению с мышьяком и свинцом. Очевидно, Zn и Cd обладают на данной территории большей миграционной подвижностью.

На рис. 5 можно видеть, как изменяются содержания цинка, свинца, кадмия и меди в точке № 20 в зависимости от глубины отбора пробы (содержание мышьяка не представлено, т.к. в пробах, отобранных на глубине >20 см, оно ниже предела обнаружения). Концентрации всех перечисленных элементов, кроме меди, с глубиной убывают, аналогичная картина наблюдается и для серы. Этот факт находится в полном согласии с результатами изучения минерального состава почв и рыхлых отложений.

Таблица 2. Содержания тяжелых металлов и мышьяка (ppm) в пробах почв и техногенных отложений
Table 2. Content of heavy metals and arsenic (ppm) in soils and technogenic deposits

№ точки	Функциональная группа	Zn	Pb	Cd	Cu	As
1	Пастбище, предгорье	1.4×10^2	3.5×10^1	<5	1.2×10^1	4.2
2	Пастбище, предгорье	9.3×10^1	3.0×10^1	<5	1.3×10^1	<4
3	Пастбище, предгорье	2.5×10^2	5.5×10^1	<5	1.7×10^1	<4
4	Территория завода	1.4×10^4	3.0×10^3	6.6×10^1	5.6×10^1	<4
6	Пастбище, предгорье	1.2×10^2	1.5×10^1	<5	7.0	4.2
7	Пастбище, предгорье	1.4×10^2	2.4×10^1	<5	1.8×10^1	5.6
8	Территория завода	8.6×10^3	1.3×10^3	4.0×10^1	2.2×10^1	<4
9	Территория завода	2.7×10^4	2.3×10^3	7.7×10^1	1.4×10^2	<4
10	Территория завода	2.5×10^3	2.3×10^2	1.1×10^1	2.2×10^1	<4
11	Пастбище, предгорье	8.8×10^1	1.5×10^1	<5	1.6×10^1	6.5
12	Пастбище, предгорье	1.6×10^4	3.4×10^3	7.6×10^1	6.1×10^1	<4
13	Территория завода	1.3×10^4	7.8×10^2	2.6×10^1	2.5×10^1	<4
14	Территория завода	2.2×10^4	2.4×10^3	1.0×10^2	2.6×10^2	<4
15	Территория завода	9.3×10^1	2.0×10^1	<5	1.9×10^1	4.1
16	Пастбище, предгорье	2.6×10^4	2.1×10^3	9.2×10^1	2.0×10^1	<4
17	Территория завода	4.3×10^3	5.0×10^2	1.6×10^1	2.4×10^1	<4
18	Территория завода	7.0×10^3	2.7×10^3	3.9×10^1	4.4×10^1	<4
19	Пастбище, предгорье	2.0×10^4	2.4×10^3	8.1×10^1	3.8×10^1	<4
20	Площадка сброса жидких отходов	1.6×10^5	3.5×10^4	6.6×10^2	3.0	2.1×10^2
21	Пашня	3.6×10^3	5.0×10^2	1.7×10^1	2.1×10^1	<4
22	Пастбище, предгорье	2.3×10^3	4.3×10^2	1.0×10^1	2.7×10^1	<4
23	Периодически пересыхающее русло реки	1.2×10^3	2.8×10^2	8.2	1.8×10^1	<4
24	Пашня	1.7×10^4	4.8×10^3	9.9×10^1	2.4×10^2	<4
28	Периодически пересыхающее русло реки	3.4×10^3	5.0×10^2	1.7×10^1	2.8×10^1	<4
29	Пашня	9.9×10^2	2.2×10^2	5.8	1.7×10^1	<4
1'	Отвалы	4.8×10^3	3.2×10^2	1.1×10^1	3.1×10^1	<4
5'	Отвалы	4.0×10^3	5.1×10^2	1.3×10^1	2.0×10^1	<4
35	Отвалы	5.1×10^3	2.2×10^2	1.4×10^1	2.7×10^1	<4
39	Отвалы	6.1×10^3	3.1×10^2	1.5×10^1	3.0×10^1	<4
79	Отвалы	1.4×10^3	2.9×10^2	5.0	4.3×10^1	<4
83	Отвалы	3.3×10^4	2.6×10^3	7.6×10^1	5.8×10^1	<4
87	Отвалы	1.3×10^4	5.3×10^2	2.8×10^1	1.9×10^1	<4
125	Отвалы	6.0×10^3	5.5×10^2	3.3×10^1	2.1×10^1	<4
128	Отвалы	3.9×10^3	1.5×10^3	1.2×10^1	8.1×10^1	<4
132	Отвалы	5.3×10^3	1.5×10^3	3.2×10^1	2.7×10^1	3.9×10^1
Шаабет-эль-Хамра	Территория вблизи шахты	6.7×10^2	5.6×10^1	<5	1.2×10^1	<4
Город Айн Азель	Населенный пункт	6.5×10^2	1.3×10^2	5.6	2.3×10^1	<4

Таблица 3. Оценка загрязнения тяжелыми металлами почв и техногенных отложений
Table 3. Assessment of heavy metal contamination of soils and technogenic deposits

Элемент	Содержание, ppm		Нормативный показатель A.F.N.O.R. ¹ , ppm (Attouchek et al., 2008)	Превышение нормативного показателя		Локальный фон (ppm) (Attouchek et al., 2008)	Среднее содержание в почвах		
	почвы	отвалы		почвы	отвалы		(Li, 2000)	(Adriano, 1986)	(Kabata-Pendias, 2000)
Zn	$8.8 \times 10^1 - 2.7 \times 10^4$	$1.4 \times 10^3 - 1.6 \times 10^5$	150	0.59–180	9.3–1066	50	74	60	66
Pb	$1.5 \times 10^1 - 4.8 \times 10^3$	$2.2 \times 10^2 - 3.5 \times 10^4$	60	0.25–80	3.7–583	20	26	19	30
Cd	<5– 1.0×10^2	5.0– 6.6×10^2	0.7	<7–143	7.1–943		0.1	0.35	0.06
Cu	7.0– 2.6×10^2	$1.7 \times 10^1 - 8.1 \times 10^1$	40	0.18–6.5	0.43–2.0	35	23	25	22

¹Association Française de normalisation.

В минеральном составе пробы №20, отобранной с глубины до 20 см, установлено наиболее высокое среди всех проб содержание минералов цинка и свинца – 12% сфалерита и 4% смитсонита, а также 2% церуссита. Остальные минералы – доломит (более 40%), марказит (6%), пирит (2%), а также мусковит, небольшие количества кварца, кальцита, гипса. Следующая по глубине отбора проба в той же точке содержит уже меньше минералов цинка и свинца: 8% сфалерита, 3% смитсонита, 1% церуссита. Остальные минералы присутствуют примерно в тех же количествах, за исключением гипса – здесь наблюдается его наибольшая концентрация среди всех проанализированных проб (12%). Наконец, проба, отобранная на глубине 80 см, отличается отсутствием сульфидных минералов и резким преобладанием в ее минеральном составе кальцита над доломитом (38 и 16% соответственно).

Интересно сравнить пространственные распределения содержаний Zn, Pb, Cd, As (рис. 4) с аналогичными распределениями серы и сульфидов (рис. 6, а, в). Максимальные содержания в поверхностном слое рыхлых отложений в этом случае приходится на зону складирования твердых отвалов, которая несколько смещена от точки сброса жидких отходов. Именно здесь (точки №№ 35, 39, 79, 83) наблюдаются высокие содержания пирита и марказита при отсутствии в составе отложений минералов цинка и свинца. Распределение содержаний железа (рис. 6, б) аналогично распределению серы, т.е. его повышенные концентрации определяются попаданием в поверхностный слой рыхлых отложений частиц сульфидных минералов с места складирования твердых отвалов.

Поведение меди отличается от поведения других тяжелых металлов. Для изученной территории она традиционно рассматривается в качестве одного из основных загрязнителей (Attouchek et al., 2008), однако, как было отмечено выше, ее содержания в исследованных пробах превышают нормативные показатели не столь значительно – максимум в 6.5 раз. Как следует из рис. 6, г, повышенные содержания Cu на данной

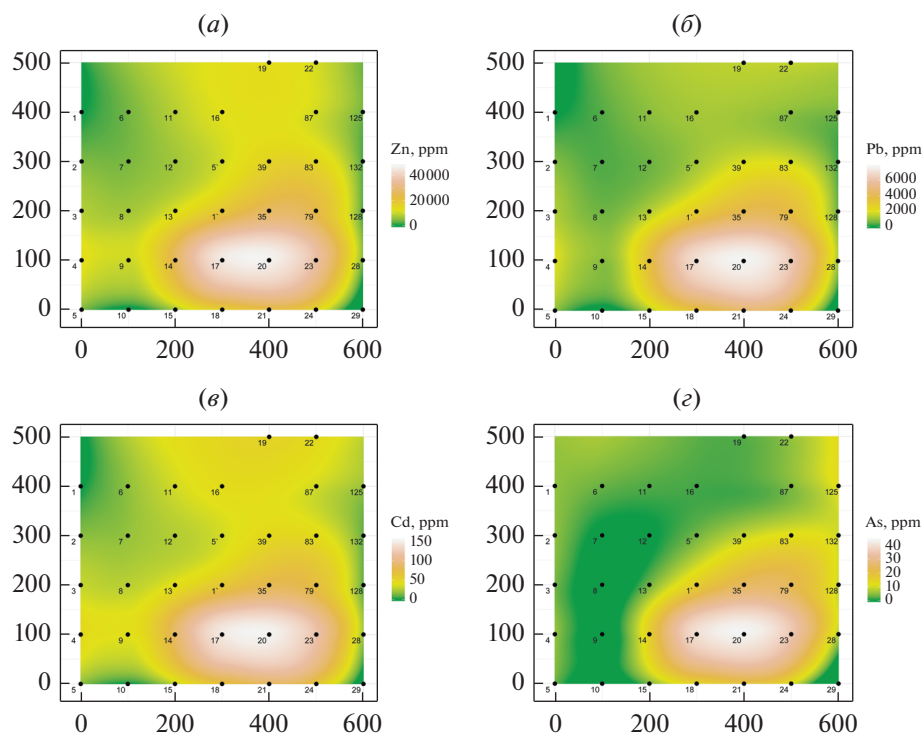


Рис. 4. Пространственное распределение содержаний цинка (а), свинца (б), кадмия (е) и мышьяка (з) в почвах и техногенных отложениях.

Fig. 4. Spatial distribution of contents of zinc (а), lead (б), cadmium (е), and arsenic (з) in soils and technogenic deposits.

территории не связаны с твердыми отвалами или сбросом жидких отходов; они наблюдаются на территории завода. Низкие (по сравнению с другими элементами) содержания меди в почвах, вероятно, связаны с ее низкими содержаниями в исходной руде месторождений Херзет Юсеф и Шаабет-эль-Хамра (Henni, 1998). Одна из возможных причин загрязнения медью почв на территории комбината – использование флотационных агентов, в число которых входит сульфат меди.

Особый интерес представляет анализ почв, используемых для сельскохозяйственной деятельности (выращивания овощей). Пример – точка № 29, в которой содержание цинка в 6.6 раз превышает нормативный показатель, содержание свинца – в 3.7 раз, содержание кадмия – в 8.3 раза, содержание меди ниже нормы. Несколько в меньшей степени загрязнена тяжелыми металлами проба, отобранная на территории города Айн Азель (расположен в 6 км от исследуемой территории) – содержание цинка здесь превышает нормативный показатель в 4.3 раза, свинца – в 2.1 раза, кадмия – в 8 раз, меди – ниже нормы. Наконец, в пробе почвы, отобранной в непосредственной близости от шахты Шаабет-эль-Хамра, содержание цинка превышает нормативный показатель в 4.4 раза, содержание свинца близко к нормативному показателю, меди – ниже нормы, кадмия – ниже предела обнаружения.

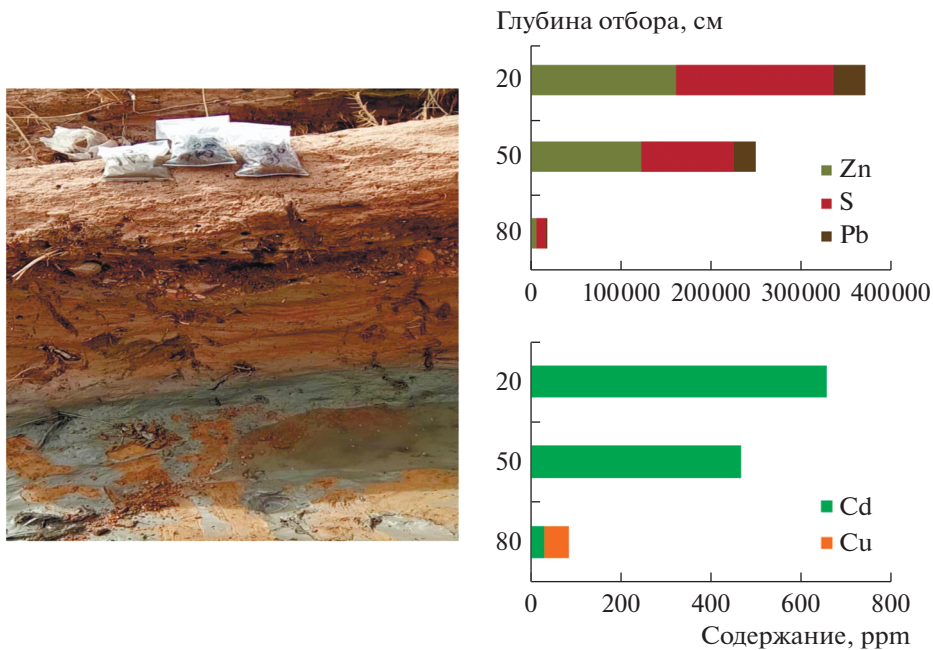


Рис. 5. Содержания цинка, свинца, кадмия, меди и серы в зависимости от глубины отбора проб в наиболее загрязненной точке № 20.

Fig. 5. Contents of zinc, lead, cadmium, copper, and sulfur depending on the sampling depth at the most contaminated point No. 20.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования охарактеризованы поверхностные отложения отвалов и почвы территории, подвергающейся воздействию комбината по обогащению цинковой руды месторождения Шаабет-эль-Хамра, изучен их минеральный состав и определена степень загрязнения тяжелыми металлами. Показано, что практически на всей изученной территории, за исключением небольшого участка в предгорье, имеет место превышение нормативных показателей по цинку, свинцу и кадмию; пространственное распределение содержаний этих элементов носит сходный характер, а источником загрязнения являются отвалы и жидкие отходы горно-обогатительного комбината. Загрязнение медью менее значительно и локализовано в основном на территории самого комбината.

Следующим этапом нашей работы станет изучение миграционной способности тяжелых металлов в исследуемых пробах, т.е. определение форм их нахождения и степени подвижности в зависимости от изменения физико-химических условий, моделирование взаимодействия загрязненных почв и отвалов с природными водами и, следовательно, оценка способности перехода рассматриваемых элементов в растворенные формы, представляющие наибольшую опасность для окружающей среды.

Работа выполнена с использованием оборудования Научного парка СПбГУ (ресурсные центры “Геомодель”, “Рентгенодифракционные методы исследования”, “Методы анализа состава вещества”).

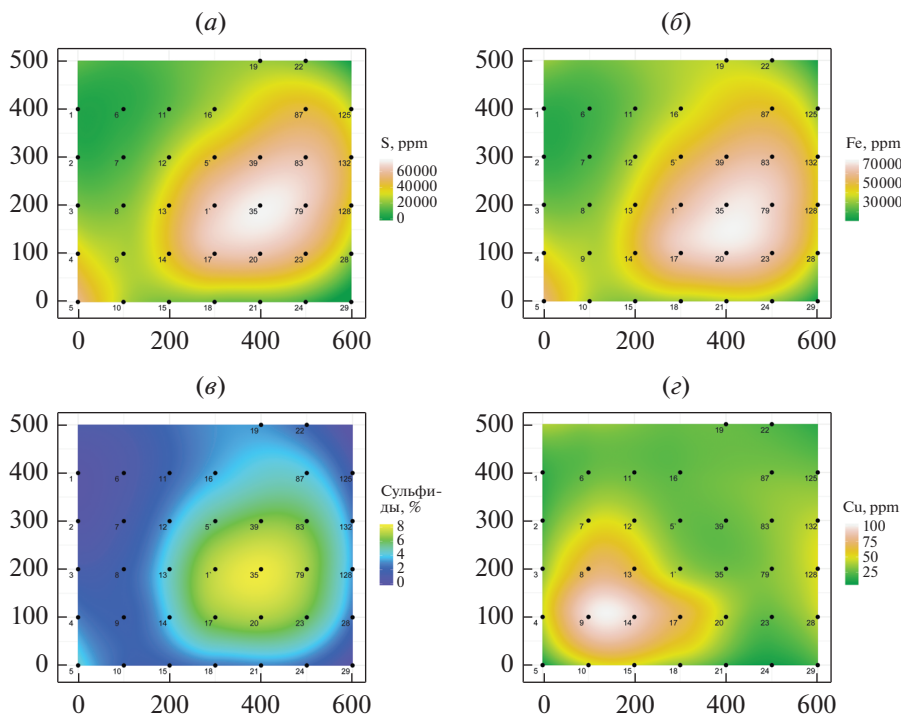


Рис. 6. Пространственное распределение содержаний серы (а), железа (б), сульфидов (г) и меди (з) в почвах и техногенных отложениях.

Fig. 6. Spatial distribution of contents of sulfur (a), iron (b), sulfides (g) and copper (z) in soils and technogenic deposits.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Гео, 2006. 169 с.

Справочник по растворимости солевых систем / Ред. Пельш А.Д. В 2-х томах. Л.: Химия, 1975. Т. 1. 1070 с.

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES AND CONTAMINATION DEGREE OF SOILS IN THE AREA OF ZINC ORE PROCESSING PLANT OF THE SHAABET-EL-HAMRA DEPOSIT (ALGERIA)

R. Omara^{a,*}, M. V. Charykova^a, A. V. Rusakov^a, S. V. Malyshev^a, and N. V. Platonova^a

^aSaint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: omaralya913@gmail.com

The mining complex of Kherzet Youcef is located near the agglomeration of Ain Azel (Setif), it includes the Zn ore mine (Chaabat El-Hamra) and an ore processing plant. This mining activity is characterized by excavation of large volumes of waste rocks and production of mining residues during the various technological processes. These waste rocks and tailings are stored near the mine and cover the 7.2 hectares area, which in the long run leads to accumulation and increase of the heavy metal content in soil. To assess the state of the environment around the mining complex, 47 samples of soil and technogenic deposits (dumps, agri-

cultural soils, and foothills) were collected in September 2018 with a mesh size about 100 m. All samples were characterized by the following methods: their color was determined by the Munsell color scale, contents of heavy metals and some other elements, mineral composition, pH, and the share of skeletal part were measured. It is shown that practically over all studied area, except a small site in foothills, there is an excess of standards on zinc, lead and cadmium. Copper pollution is lesser significant and located mainly on territory of the enterprise.

Keywords: heavy metals, soils, dumps, zinc, lead, cadmium, copper

REFERENCES

- Adriano D.C.* Trace element in the terrestrial environment. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, **1986**. 536 p.
- Attouchek L.* Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youcef (Setif) et son impact sur l'environnement. Magister thesis, Algeria: Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, **2005**. 83 p. (*in French*).
- Attouchek L., Bayou B., Boutaleb A., Aissa D.E.* Diagnostique et evaluation de la charge polluante par les elements traces metalliques (ETMs): cas du complex minier de Kherzet Youssef (Setif). *Bull. Serv. Geol. Nat.* **2008**. Vol. 9. P. 217–233. (*in French*).
- Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Bessonova E.P.* Geochemistry of technogenic systems. Novosibirsk: Geo, **2006**. 169 p. (*in Russian*).
- Boutaleb A.* Les minéralisations à Pb–Zn du domaine Sétifian–Hodna : Litologie, pétrographie des dolomies, micro thermométrie et implications métallogénique. Ph. D. Thesis, Algeria: Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene, **2001**. (*in French*).
- Callender E.* Heavy Metals in the environment – historical trends. In: *Treatise on Geochemistry*. Vol. 11. Environmental Geochemistry. Amsterdam: Elsevier Pergamon, **2014**. P. 59–89.
- Handbook of solubility of salt systems. Ed. by A.D. Pelsh. In 2 volumes. Leningrad: Khimiya, **1975**. Vol. 1. 1070 p. (*in Russian*).
- Henni A.* Minéralogie, géochimie et métallogénie du gisement Pb-Zn de Kherzet Youcef. Mémrs. Serv. Géol. Algérie, (O.R.G.M, Boumerdès). **1998**. № 9. P. 77–114. (*in French*).
- IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, Update 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, **2015**. 192 p.
- Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. 3rd Edn. Boca Raton: CRC Press, **2000**. 403 p.
- Khalfi A., Taleb C.* Contribution à l'étude d'impact environnemental de l'exploitation minière souterraine et de rejets de traitement, cas de la mine de Chaabet El-Hamra, Ain Azel, Wilaya de Setif. Magister thesis, Algeria, **2014**. 67 p. (*in French*).
- Li Y-H.* A Compendium of Geochemistry. Princeton: Princeton University Press, **2000**. 475 p.
- Munsell A.H.* Munsell Soil Color Charts: With Genuine Munsell* Color Chips; Munsell Color Company: Grand Rapids, MI, USA, **2014**.
- Nekache R.* Étude de la stabilité des mines souterraines par les méthodes numériques. Cas de la mine de Chaabet El Hamra – Algérie. Magister thesis, Annaba: Université Badji Mokhtar. **2012**. 124 p. (*in French*).
- Rezigat N., Imchal K.* Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaabet El-Hamra, Ain Azel, Wilaya de Sétif. Magister thesis, Algeria: Université Farhat Abas, **2008**. 100 p. (*in French*).