

УДК 504.064.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ОТХОДОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ УНАЛЬСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА

<sup>1</sup>Каманина И.З., <sup>2</sup>Пухаева Н.Е., <sup>2</sup>Густова М.В., <sup>2</sup>Фронтасьева М.В.,  
<sup>1</sup>Чигоева Д.Н., <sup>1</sup>Каплина С.П.

<sup>1</sup>Государственный университет «Дубна», Дубна, e-mail: kamanina@uni-dubna.ru,  
dzerkachigoeva@yandex.ru, sv\_kap@mail.ru;

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, e-mail: nelli.pukhaeva@gmail.com,  
gust@jinr.ru, marina@nf.jinr.ru

Проведен анализ состава сухой части (пляжной зоны) Унальского хвостохранилища Мизурской обогатительной фабрики, расположенного в центральной части Алагирского района, Республика Северная Осетия – Алания, в долине р. Ардон. Пляжная зона занимает около 40% от площади хвостохранилища. Аналитические определения были выполнены в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна Московской области. Для многоэлементного определения состава образцов использовали рентгенофлуоресцентный (РФА) и инструментального нейтронноактивационный анализ (ИНАА), что позволило получить данные по содержанию 39 элементов в составе хвостов. Содержание Ca, Ti, Cr, Mn, Cu, Sb в хвостах определяли двумя методами. Полученные с использованием РФА и ИНАА результаты в пределах ошибок определения совпадают. Унальское хвостохранилище представляет собой геохимическую аномалию с содержанием Zn, As, S, Cu, Sb, Se, Ag, In, Pb, Cd, превышающим кларковые более чем в сотни и тысячи раз. Состав хвостов в разных частях хвостохранилища значительно различается, в том числе и по содержанию полезных компонентов. Значительное варьирование содержания ряда элементов в разных точках опробования, вероятно, связано с разным удалением от зеркала воды. В результате воздействия флотационных процессов происходит обогащение верхних 10 см сухой части пляжной зоны хвостохранилища, в том числе высокотоксичными элементами (Zn, As, Cu, Sb, Ni, Pb), что представляет опасность для окружающей среды и здоровья населения. Присутствие в составе хвостов полезных компонентов указывает на необходимость использования отходов Мизурской обогатительной фабрики, складываемых на территории Унальского хвостохранилища как источник полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** Северная Осетия, хвостохранилище, рентгенофлуоресцентный анализ, инструментальный нейтронноактивационный анализ, элементный состав

## THE USE OF NUCLEAR PHYSIC METHODS FOR THE ANALYSIS OF WASTES FROM THE MINING AND PROCESSING INDUSTRY BY THE EXAMPLE OF THE UNAL TAILING POND

<sup>1</sup>Kamanina I.Z., <sup>2</sup>Pukhaeva N.E., <sup>2</sup>Gustova M.V., <sup>2</sup>Frontaseva M.V.,  
<sup>1</sup>Chigoeva D.N., <sup>1</sup>Kaplina S.P.

<sup>1</sup>Dubna State University, Dubna, e-mail: kamanina@uni-dubna.ru,  
dzerkachigoeva@yandex.ru, sv\_kap@mail.ru;

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, e-mail: nelli.pukhaeva@gmail.com,  
gust@jinr.ru, marina@nf.jinr.ru

The composition of the dry part (beach zone) of the Unal tailing pond of the Mizur concentrating pond located in the central part of the Alagir district, the Republic of North Ossetia-Alania, in the valley of the river Ardon was analyzed. The beach area occupies about 40% of the area of the tailing pond. Analytical studies were carried out at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Moscow Region. X-ray fluorescence (XRF) and instrumental neutron-activation analysis (INAA) were used for multi-element determination of the samples composition, which allowed obtaining the data on the content of 39 elements in the tailings composition. The content of Ca, Ti, Cr, Mn, Cu, Sb in the tails was determined by both methods. The results obtained using XRF and INAA within the determination accuracy are the same. The Unal tailing pond is a technogenic geochemical anomaly with the content of Zn, As, S, Cu, Sb, Se, Ag, In, Pb, Cd exceeding Clarke more than hundreds and thousands times. The composition of tailings in different parts of the tailing pond varies considerably, also in the content of useful components. A significant variation in the content of a number of elements at different points of sampling is probably associated with a different distance from the water mirror. As a result of the flotation processes influence, the upper 10 cm of the dry part of the beach zone of the tailing pond are enriched also by highly toxic elements (Zn, As, Cu, Sb, Ni, Pb), which poses a danger to the environment and public health. The presence of useful components in the tailings indicates the need to use waste from the Mizur concentration plant, stored in the Unal tailings, as a source of minerals.

**Keywords:** North Ossetia, tailing pond, X-ray fluorescence analysis, instrumental neutron activation analysis, elemental composition

На территории Садонского рудного района Республики Северная Осетия – Алания (РСО – Алания) поиски, разведка, добыча и переработка полиметаллических руд ве-

дутся с середины XIX века. В районе известно около 300 жильных свинцово-цинковых месторождений и рудопроявлений. Вся инфраструктура горнодобывающих

предприятий (рудники, обогатительные фабрики, хвостохранилища, дороги) приурочена к густо населенным долинам основных водных систем республики [1]. В состав Садонского свинцово-цинкового комбината, крупнейшего предприятия по добыче и обогащению полиметаллических руд, созданного в 1922 г., входят Мизурская и Фиагдонская обогатительные фабрики. В РСО-Алания на площади 250 га накоплено 10 млн т металлосодержащих хвостов Мизурской и Фиагдонской обогатительных фабрик и металлургических заводов [2, 3]. С 1984 г. отходы от переработки рудных материалов (хвосты) Мизурской обогатительной фабрики размещаются на территории Унальского хвостохранилища. Хвостохранилище расположено в центральной части Алагирского района, Республика Северная Осетия – Алания, в долине р. Ардон, на ее левом берегу между селениями Унал и Зинцар, в 12–15 км к северо-востоку от Мизурской обогатительной фабрики. Расстояние до города Владикавказ 60 км, до города Алагир – 40 км. Вблизи хвостохранилища проходит федеральная автомобильная магистраль «Транскам». На некоторых участках расстояние между телом хвостохранилища и дорогой составляет не более 20–30 м. Площадь Унальского хвостохранилища составляет около 0,2 км<sup>2</sup>. Большую часть поверхности хвостохранилища занимает прудотстойник. Глубина хранилища колеблется от 12 до 15 м. Объем хвостов около 3,2 млн т. С 1989 г. технологической службой комбината организовано водное орошение сухой части хвостохранилища, что существенно уменьшило ветровую эрозию. В настоящее время хвостохранилище имеет пляжную зону (около 40% от его площади) и залитую водой (60% площади) за счет непрерывного орошения с помощью водяных оросителей. Выходы относительно сухих хвостов обнажаются главным образом вдоль плотины, ограничивающей сооружение с восточной стороны. Ширина пляжной зоны, в зависимости от количества подаваемой опресняющей воды и погодных условий изменяется от 3 до 100 м. Хвосты представляют собой измельченную горную массу, по гранулометрическому составу близкую к мелкозернистым пылеватым пескам. В сухую жаркую погоду с пляжной зоны пыль попадает в воздушный бассейн местности. Запыленность в районе хвостохранилища в летнее время превышает ПДК в десятки раз [2].

Последние комплексные исследования на территории Садонского рудного района

проводились с 1989 по 2003 гг. [4]. Показано, что важнейшим источником техногенного загрязнения окружающей среды в районе являются предприятия горнорудной промышленности. Вокруг них образовались ореолы химического загрязнения, где содержание металлов превышает фоновое в десятки и сотни раз. Выявлена решающая роль Унальского хвостохранилища в формировании техногенных аномалий свинца на нижних террасах р. Ардон. Вместе с тем хвостохранилища обогатительных фабрик и металлургических заводов Осетии являются техногенными месторождениями цинка, свинца, ванадия, титана, марганца, никеля, молибдена и др. металлов. По данным [5] в Унальском хвостохранилище находится 2600000 т хвостов с содержанием свинца 0,21%, цинка 0,9%, меди 0,10% и др.

Цель исследования: изучение элементного состава отходов Мизурской обогатительной фабрики, складированных на территории Унальского хвостохранилища.

#### Материалы и методы исследования

Опробование поверхности сухой части хвостохранилища проводили в 2015–2016 гг. Пробоотбор проводили в соответствии с общепринятыми методиками [6] в 10 точках: южной (т. 1–3), восточной (т. 4–6) и северо-восточной (т. 7–10) частях пляжной зоны. Каждая проба формировалась путем смешивания 5 точечных проб, отобранных на глубину 0–10 см. Кроме того, в точке 8 был дополнительно отобран образец с глубины 15–20 см. Схема точек пробоотбора представлена на рисунке.

Аналитические определения были выполнены в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна Московской области. Многоэлементное определение состава образцов рентгенофлуоресцентным методом (РФА) проводилось в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова (ЛЯР ОИЯИ), инструментальный нейтронноактивационный анализ (ИНАА) – в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка (ЛНФ ОИЯИ). Рентгеновские спектры образцов измерялись с помощью стандартного спектрометра фирмы Сanbeta. Для возбуждения рентгеновского излучения использовались кольцевые радиоизотопные источники <sup>109</sup>Cd (E = 22,16 кэВ, T<sub>1/2</sub> = 453 дня) и <sup>241</sup>Am (E = 59,6 кэВ, T<sub>1/2</sub> = 458 лет) с общей активностью 20 мКи. Характеристическое рентгеновское излучение регистрировалось полупроводниковым Si(Li) детектором с площадью 30 мм<sup>2</sup> и толщи-

ной 3 мм, толщиной бериллиевого окна 25 мкм и с разрешением 145 эВ на линии 5,9 кэВ. Для обработки спектров и расчета концентраций элементов было использовано программное обеспечение для рентгенофлуоресцентного анализа WinAxil Canberra. Концентрации элементов определялись методом сравнения со стандартными образцами (ГСО) со схожими с определяемыми образцами матричными эффектами (СГ-1А, GnA, soil-5, GM, Sch-ST, Fe<sup>2</sup>O<sup>3</sup> и др.). Для определения элементов, отсутствующих в эталонных образцах, была применена методика одновременного определения в насыщенных слоях вещества всех элементов, возбуждаемых радиоизотопными источниками, по единым калибровочным кривым, построенным на основании измерений стандартных образцов [7]. Инструментальный нейтронный активационный анализ (ИНАА) проводили на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ с использованием пневмотранспортной установки РЕГАТА [8]. Для определения короткоживущих изотопов элементов Al, Cl, Ca, Ti, V, Mn, Cu, In образцы облучали 1 минуту в канале реактора с плотностью потока нейтронов  $1,3 \times 10^{12}$  нейтрон/(см<sup>2</sup>•с). Для определе-

ния долгоживущих изотопов элементов Na, Sc, Cr, Co, Ni, As, Se, Sb, Cs, La, Ce, Tb, Ta, Ag, Th, U образцы облучали около трех суток в канале реактора с кадмиевым экраном и плотностью потока резонансных нейтронов  $1,6 \times 10^{12}$  нейтрон/(см<sup>2</sup>•с). После облучения образцы для измерения переупаковывали в чистые контейнеры. Наведенную гамма-активность образцов измеряли дважды: спустя 4–5 дней после выгрузки из канала облучения в течение 45 минут и спустя 20 дней в течение 1,5 часов. Для обработки гамма-спектров и расчета концентраций элементов использовали пакет программ, разработанных в ЛНФ ОИЯИ [9]. Качество анализа обеспечивалось с помощью сертифицированных эталонных материалов Coal fly ash (NIST, 1633c), Montana Soil (NIST, 2710), Estuarine sediment (BCR, 667), навески которых облучали в одинаковых условиях с исследуемыми образцами.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Использование РФА и ИИНАА позволило получить данные по содержанию 39 элементов в составе отходов горной промышлен-

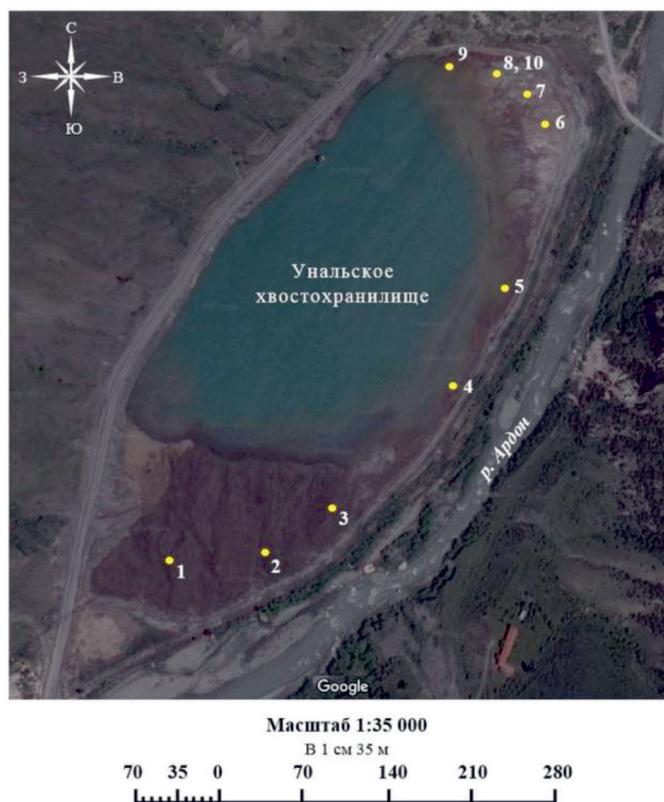


Схема опробования Уральского хвостохранилища

ности (хвостов Мизурской обогатительной фабрики). Результаты аналитических определений представлены в табл. 1. Содержание Ca, Ti, Cr, Mn, Cu, Sb в хвостах определяли двумя методами. Полученные результаты в пределах ошибок определения совпадают.

Унальское хвостохранилище представляет собой техногенную геохимическую аномалию с содержанием ряда элементов, превышающим их кларки в земной коре (табл. 1). Содержание таких элементов, как Zn, As, S, Cu, превышает кларковые концентрации более чем в сотни раз, содержание Sb, Se, Ag, In, Pb превышает кларковые значения в тысячи раз. Обращает на себя внимание обогащение техногенных образований Унальского хвостохранилища Cd, содержание которого более чем в двадцать тысяч раз превышает его кларк в земной коре, при этом Cd не входит в ассоциацию химических элементов (Pb, Zn, Fe, Cu, Ag, Bi, Al, Si), находящихся в повышенных концентрациях на свинцово-цинковых месторождениях [10].

Состав хвостов в разных частях хвостохранилища значительно различается, в том числе и по содержанию полезных компонентов (табл. 1). Хвосты в северо-восточной части хвостохранилища отличаются высоким содержанием таких элементов, как Pb, As, V, U, Mo, Tb. Максимальное количество таких элементов, как S, Na, Ca, Cu, Zn, Sn, Ba, Cl, Mn, Se, Te, Sr, In, Nd, Ag, отмечается в хвостах восточной части, при этом они бедны такими элементами как: Al, K, Ti, Ce, Rb, V, Sc, Th, Nb, Ta. Состав хвостов южной части, обогащен такими элементами как: K, Al, Rb, Zr, Ce, Th, Nb, Ta, при этом бедны Ag, Cu, Zn, Sn, Ba, Cl, Mn, Cd, As, Se, In, Te. Значительное варьирование содержания ряда элементов в разных точках опробования вероятно связано с разным удалением от зеркала воды, и воздействием флотационных процессов.

Полученные данные были обработаны методами математической статистики с использованием программного пакета Microsoft Excel. Анализ полученных статистических параметров показал, что распределение данных по всем показателям отклоняется от нормального распределения, наиболее показательной описательной статистикой является медиана, и именно она самым достоверным образом отражает положение центра вариационного ряда по всем показателям [11]. В качестве среднего по всем показателям принималось значение медианы.

Среднее содержание (медиана) элементов в техногенных образованиях хвостохранилища (на глубине до 10 см) составляет (в порядке убывания), %: S – 13; Fe – 6,19; Zn – 4,32; Al – 3,9; Pb – 2,71; Ca – 2,5; K – 1,2; Cu – 1,1; Na – 0,92; As – 0,47; Sb – 0,39; Ba – 0,38; Ti – 0,28; Sn – 0,234; Mn – 0,21; Cr – 0,08; In – 0,07; Te – 0,056; Cd – 0,028; Cl – 0,028; Ni – 0,019; Se – 0,01; Sr – 0,0095; далее в ppm: Nd – 94; Zr – 44; V – 33,7; Ce – 33; Ag – 30; La – 25; Co – 22; Th – 8; Sc – 6,4; U – 6,2; Rb – 3; Nb – 3; Ta – 1,2; Tb – 1,04; Mo – 1.

Необходимо отметить, что большинство из элементов, присутствующих в сухой части хвостохранилища, относятся к высокотоксичным и токсичным элементам. В отсутствие увлажнения дисперсные частицы разносятся на большие расстояния, загрязняя почву, поверхностные воды, растительность. Наибольшую опасность для здоровья человека представляют мелкодисперсные частицы (диаметром меньше 1 мкм) так как они достигают нижних дыхательных путей и оседают в альвеолах легких.

Отдельно был проведен анализ состава хвостов, отобранных на разной глубине хвостохранилища. В восточной части хвостохранилища было отобрано 2 пробы, с поверхности (0–10 см) и с глубины (15–20 см.) Результаты анализов представлены в табл. 2.

На поверхности сухой части хвостохранилища, возможно, в результате флотационных процессов в период максимального обводнения происходит обогащение хвостов. При этом отмечается резкое увеличение содержания таких компонентов, как: Te (в 221 раза) с 0,0002 до 0,0443 %, In (в 140 раз), с 0,0005 до 0,07 %, As (в 37 раз) с 0,022 до 0,82 %, Sn (в 27 раз) с 0,0085 до 0,2294 %. В меньшей степени, но значительно увеличивается содержание Cu (в 13,7) с 0,08 до 1,1 %, Ni (в 10,8 раз) с 23 до 250 ppm, Cd (в 8,7 раз) с 32 до 280 ppm. От 5 до 5,5 раз увеличивается содержание Zn (в 5,7 раз) с 0,758 до 4,32 %, Sb (в 5,5 раз) с 0,1336 до 0,7387 %, Ag (в 5,2 раза) с 5,7 до 30 ppm, Tb (в 5 раз) с 0,5 до 2,5 ppm. От 2,1 до 2,8 раз увеличивается содержание Fe (в 2,5 раз) с 2,34 до 5,83 %, Ba (в 2,7 раз) с 0,1416 до 0,3857 %, Pb (в 2,5 раз) с 1,18 до 2,93 %, Na (в 2,6 раза) с 0,36 до 0,92 %, Cl (в 2,8 раза) с 0,017 до 0,048 %, Mn (в 2,1 раза) с 0,096 до 0,2 %, Se (в 2,6 раза) с 0,004 до 0,0103 %, Sr (в 2,7 раза) с 29 до 78 ppm, Nd (в 2,5 раза) с 28 до 71 ppm, V (в 2,3 раза) с 38 до 89 ppm, Co (в 2,4 раза) с 12 до 29 ppm. Незначительно увеличивается содержание Ca (в 1,5 раз) с 1,22 до 1,9 % и U (в 1,1 раз) с 5,9 до 6,7 ppm.

Таблица 1

Результаты анализа хвостов Унальского хвостохранилища методами ИНАА и РФА

Элемент	Метод анализа	Точки опробования			
		1	2	3	4
		Содержание элемента, %			
Na	ИНАА	0,32 ± 0,03	0,44 ± 0,04	0,75 ± 0,08	2,7 ± 0,3
Al	ИНАА	4,1 ± 0,3	4,9 ± 0,3	5,2 ± 0,3	3,9 ± 0,2
S	ИНАА	1,1 ± 0,3	4,3 ± 1,3	13 ± 4	33 ± 10
Cl	ИНАА	0,017 ± 0,005	0,020 ± 0,006	0,018 ± 0,006	0,028 ± 0,008
K	РФА	1,3 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,6 ± 0,2	0,63 ± 0,13
Ca	РФА ИНАА	0,90 ± 0,07	1,27 ± 0,08	2,8 ± 0,1	3,2 ± 0,7
Ti	РФА ИНАА	0,20 ± 0,02	0,30 ± 0,02	0,40 ± 0,03	0,28 ± 0,03
Cr	РФА ИНАА	0,063 ± 0,008	0,066 ± 0,009	0,16 ± 0,01	0,126 ± 0,009
Mn	ИНАА	0,050 ± 0,002	0,100 ± 0,005	0,21 ± 0,01	0,42 ± 0,02
Fe	РФА	2,56 ± 0,01	3,61 ± 0,02	6,20 ± 0,02	6,25 ± 0,02
Cu	РФА ИНАА	0,08 ± 0,02	0,09 ± 0,03	0,21 ± 0,06	2,0 ± 0,6
Zn	РФА	1,182 ± 0,004	0,735 ± 0,004	2,342 ± 0,007	6,98 ± 0,01
As	ИНАА	0,028 ± 0,002	0,048 ± 0,003	0,065 ± 0,005	0,67 ± 0,05
Se	ИНАА	0,0009 ± 0,0001	0,0022 ± 0,0003	0,0048 ± 0,0007	0,089 ± 0,013
Sr	РФА	0,0023 ± 0,0002	0,035 ± 0,002	0,0073 ± 0,0003	0,0345 ± 0,0003
Cd	РФА	0,0040 ± 0,0002	0,0016 ± 0,0001	0,0087 ± 0,0003	0,088 ± 0,001
In	ИНАА	0,0003 ± 0,0001	0,0017 ± 0,0005	0,008 ± 0,002	0,12 ± 0,03
Sn	РФА	0,021 ± 0,001	0,0062 ± 0,0002	0,0704 ± 0,0005	3,455 ± 0,004
Sb	РФА ИНАА	0,2881 ± 0,0008	0,0427 ± 0,0003	0,2780 ± 0,0008	0,429 ± 0,002
Te	РФА	≤ 0,0002	0,0009 ± 0,0002	0,0059 ± 0,0003	0,0726 ± 0,0009
Ba	РФА	0,1459 ± 0,0002	0,0967 ± 0,0004	0,2258 ± 0,0007	0,484 ± 0,002
Pb	РФА	1,86 ± 0,02	0,45 ± 0,02	3,65 ± 0,03	2,52 ± 0,03
		Содержание элемента, ppm (10 <sup>-4</sup> , %)			
Sc	ИНАА	5,1 ± 1,3	9,6 ± 2,4	8,2 ± 2,1	6,0 ± 1,5
V	ИНАА	22,4 ± 2,2	45,2 ± 2,3	47,1 ± 2,4	22,9 ± 2,3
Co	ИНАА	12,6 ± 1,9	22 ± 3	20 ± 3	28 ± 4
Ni	ИНАА	98 ± 29	41 ± 12	193 ± 58	296 ± 89
Rb	РФА	67 ± 3	128 ± 3	43 ± 4	≤ 3
Zr	РФА	48 ± 1	131 ± 2	80 ± 2	39 ± 2
Nb	РФА	5 ± 1	10 ± 1	≤ 1	≤ 1
Mo	РФА	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Ag	ИНАА	6,2 ± 0,4	5,9 ± 0,4	6,7 ± 0,5	53 ± 3
Cs	ИНАА	5,3 ± 1,1	5,4 ± 1,1	3,5 ± 0,7	1,8 ± 0,4
La	ИНАА	26 ± 7	31 ± 8	24 ± 6	14 ± 4
Ce	РФА ИНАА	52 ± 3	66 ± 3	55 ± 3	24 ± 6
Nd	РФА	91 ± 5	70 ± 6	135 ± 8	260 ± 10
Tb	ИНАА	0,63 ± 0,09	0,66 ± 0,10	0,44 ± 0,07	1,08 ± 0,16
Ta	ИНАА	2,2 ± 0,3	1,7 ± 0,3	1,9 ± 0,3	0,50 ± 0,08
Th	ИНАА	13,7 ± 1,6	12,8 ± 1,5	10,5 ± 1,3	4,5 ± 0,5
U	ИНАА	6,4 ± 1,3	6,2 ± 1,2	5,1 ± 1,0	2,5 ± 0,5

Окончание табл. 1

Элемент	Метод анализа	Точки опробования				
		5	6	7	8	9
		Содержание элемента, %				
Na	ИНАА	3,1 ± 0,4	4,6 ± 0,5	1,11 ± 0,11	0,92 ± 0,09	0,57 ± 0,06
Al	ИНАА	1,6 ± 0,1	1,9 ± 0,1	2,4 ± 0,1	3,4 ± 0,2	3,9 ± 0,2
S	ИНАА	17 ± 5	21 ± 6	16 ± 4	6,2 ± 1,8	1,6 ± 0,5
Cl	ИНАА	0,09 ± 0,03	0,04 ± 0,01	0,017 ± 0,005	0,048 ± 0,014	0,053 ± 0,016
K	РФА	0,63 ± 0,13	0,60 ± 0,13	0,5 ± 0,2	1,2 ± 0,2	1,2 ± 0,2
Ca	РФА ИНАА	3,6 ± 0,1	3,6 ± 0,1	2,50 ± 0,14	1,9 ± 0,1	0,97 ± 0,10
Ti	РФА ИНАА	0,21 ± 0,02	0,21 ± 0,02	0,37 ± 0,04	0,23 ± 0,03	0,29 ± 0,03
Cr	РФА ИНАА	0,11 ± 0,01	0,069 ± 0,009	≤ 0,1	≤ 0,1	0,19 ± 0,07
Mn	ИНАА	0,45 ± 0,02	0,45 ± 0,02	0,30 ± 0,01	0,20 ± 0,01	0,089 ± 0,004
Fe	РФА	6,49 ± 0,02	6,19 ± 0,02	8,22 ± 0,04	5,83 ± 0,03	3,56 ± 0,03
Cu	РФА ИНАА	1,9 ± 0,5	1,5 ± 0,4	1,2 ± 0,3	1,1 ± 0,3	0,29 ± 0,09
Zn	РФА	6,80 ± 0,01	7,30 ± 0,01	7,29 ± 0,02	4,32 ± 0,01	1,978 ± 0,008
As	ИНАА	0,48 ± 0,03	0,47 ± 0,03	0,34 ± 0,02	0,82 ± 0,06	1,08 ± 0,08
Se	ИНАА	0,080 ± 0,012	0,073 ± 0,011	0,025 ± 0,004	0,0103 ± 0,0016	0,0061 ± 0,0009
Sr	РФА	0,0287 ± 0,0002	0,0369 ± 0,0004	0,0095 ± 0,0004	0,0078 ± 0,0003	0,0031 ± 0,0003
Cd	РФА	0,067 ± 0,001	0,093 ± 0,001	0,037 ± 0,003	0,028 ± 0,0003	0,009 ± 0,0002
In	ИНАА	0,11 ± 0,03	0,11 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,07 ± 0,02	0,015 ± 0,005
Sn	РФА	4,292 ± 0,004	3,766 ± 0,004	0,658 ± 0,0004	0,2294 ± 0,0003	0,0585 ± 0,0002
Sb	РФА ИНАА	0,824 ± 0,002	0,392 ± 0,002	0,8820 ± 0,0003	0,7387 ± 0,0002	0,3215 ± 0,0001
Te	РФА	0,0770 ± 0,0009	0,0605 ± 0,0009	0,0469 ± 0,0004	0,0443 ± 0,0004	0,0117 ± 0,0002
Ba	РФА	0,377 ± 0,002	0,483 ± 0,002	0,504 ± 0,001	0,3857 ± 0,0002	0,1748 ± 0,0001
Pb	РФА	2,71 ± 0,03	2,62 ± 0,03	4,64 ± 0,05	2,93 ± 0,04	3,30 ± 0,04
		Содержание элемента, ppm (10 <sup>-4</sup> , %)				
Sc	ИНАА	3,3 ± 0,8	3,4 ± 0,9	3,6 ± 0,09	6,8 ± 1,7	9,1 ± 2,3
V	ИНАА	28,0 ± 2,8	18,7 ± 1,9	103 ± 5	89 ± 6	33,7 ± 1,7
Co	ИНАА	24 ± 4	29 ± 4	21 ± 3	29 ± 4	11,8 ± 1,8
Ni	ИНАА	261 ± 78	93 ± 28	185 ± 56	256 ± 77	245 ± 74
Rb	РФА	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	27 ≤ 4
Zr	РФА	35 ± 2	44 ± 2	24 ± 4	15 ± 3	46 ± 3
Nb	РФА	≤ 1	4 ± 1	3 ± 1	2 ± 1	5 ± 1
Mo	РФА	≤ 1	8 ± 1	≤ 1	3 ± 1	3 ± 1
Ag	ИНАА	69 ± 4	53 ± 3	30 ± 2	30 ± 2	12,8 ± 0,9
Cs	ИНАА	7,3 ± 1,5	1,8 ± 0,4	2,4 ± 0,5	3,9 ± 0,8	4,9 ± 1,0
La	ИНАА	40 ± 10	5,9 ± 1,5	30 ± 8	21 ± 5	25 ± 6
Ce	РФА ИНАА	≤ 6	≤ 6	23 ± 4	33 ± 3	39 ± 2
Nd	РФА	210 ± 10	260 ± 20	94 ± 6	71 ± 5	37 ± 3
Tb	ИНАА	2,5 ± 0,4	0,46 ± 0,07	2,7 ± 0,1	2,5 ± 0,2	1,04 ± 0,13
Ta	ИНАА	0,70 ± 0,11	0,39 ± 0,06	1,2 ± 0,2	1,2 ± 0,2	1,9 ± 0,3
Th	ИНАА	8,0 ± 1,0	3,7 ± 0,4	4,2 ± 0,5	6,9 ± 0,8	11,2 ± 1,3
U	ИНАА	5,3 ± 1,1	6,3 ± 1,3	10 ± 2	6,7 ± 1,3	3,4 ± 0,7

Таблица 2

Результаты анализа хвостов Унальского хвостохранилища

Элемент	Метод анализа	Глубина до 10 см	Глубина 15–20 см	По данным [4]	По данным [6]
		Содержание, %			
Na	ИНАА	0,92 ± 0,09	0,36 ± 0,04	0,12	
Al	ИНАА	3,4 ± 0,2	4,6 ± 0,3	5,24	
S	ИНАА	6,2 ± 1,8	7 ± 2	7,39	
Cl	ИНАА	0,048 ± 0,014	0,017 ± 0,005		
K	РФА	1,2 ± 0,2	1,7 ± 0,2	2,07	
Ca	РФА ИНАА	1,9 ± 0,1	1,22 ± 0,09	1,97	
Ti	РФА ИНАА	0,23 ± 0,03	0,21 ± 0,03	0,31	0,17
Cr	РФА ИНАА	≤0,1	≤0,1		0,016
Mn	ИНАА	0,20 ± 0,01	0,096 ± 0,005		0,19
Fe	РФА	5,83 ± 0,03	2,34 ± 0,02	8,86	
Cu	РФА ИНАА	1,1 ± 0,3	0,08 ± 0,02		0,04
Zn	РФА	4,32 ± 0,01	0,758 ± 0,005		0,235
As	ИНАА	0,82 ± 0,06	0,022 ± 0,002		0,028
Se	ИНАА	0,0103 ± 0,0016	0,0040 ± 0,0006		
Sr	РФА	0,0078 ± 0,0003	0,0029 ± 0,0002		
Cd	РФА	0,028 ± 0,0003	0,0032 ± 0,0001		0,0006
In	ИНАА	0,07 ± 0,02	0,0005 ± 0,0001		
Sn	РФА	0,2294 ± 0,0003	0,0085 ± 0,0001		0,0023
Sb	РФА ИНАА	0,7387 ± 0,0002	0,1336 ± 0,0001		
Te	РФА	0,0443 ± 0,0004	≤0,0002		
Ba	РФА	0,3857 ± 0,0002	0,1416 ± 0,0001		
Pb	РФА	2,93 ± 0,04	1,18 ± 0,03		0,193
		Содержание, ppm (10 <sup>-4</sup> %)			
Sc	ИНАА	6,8 ± 1,7	7,8 ± 2,0		
V	ИНАА	89 ± 6	38 ± 4		40
Co	ИНАА	29 ± 4	12,0 ± 1,8		28
Ni	ИНАА	256 ± 77	23 ± 7		20
Rb	РФА	≤3	90 ± 3		
Zr	РФА	15 ± 3	69 ± 3		140
Nb	РФА	2 ± 1	6 ± 1		
Mo	РФА	3 ± 1	3 ± 1		5
Ag	ИНАА	30 ± 2	5,7 ± 0,4		4
Cs	ИНАА	3,9 ± 0,8	4,9 ± 1,0		
La	ИНАА	21 ± 5	22 ± 6		
Ce	РФА ИНАА	33 ± 3	43 ± 2		
Nd	РФА	71 ± 5	28 ± 2		
Tb	ИНАА	2,5 ± 0,2	0,5 ± 0,4		
Ta	ИНАА	1,2 ± 0,2	1,6 ± 0,2		
Th	ИНАА	6,9 ± 0,8	14,5 ± 1,2		
U	ИНАА	6,7 ± 1,3	5,9 ± 1,2		

При этом содержание ряда компонентов увеличивается с глубиной: К (1,4 раза), Al (в 1,3 раза), S (в 1,1 раза), Rb (в 30 раз), Zr (в 4,6 раза), Nb (в 3 раза), Th (в 2,1 раза).

Сравнение результатов опробования хвостов, проводимых ранее в пляжной зоне хвостохранилища (усредненные данные опробования до глубины 5–8 м) [3, 5] с полученными данными показало, что содержание Ti, As, V, Ni, Mo, Ag коррелирует с содержанием в образцах, взятых с глубины 15–20 см. В образцах с поверхности пляжной зоны хвостохранилища содержание таких высокотоксичных элементов, как Cd, Ni, As, Ag, Cu, Pb, в десятки и сотни раз выше имеющихся в литературе данных [3–5]. Дефляционные процессы, развивающиеся в сухой части пляжной зоны, несут серьезную угрозу прилегающим территориям.

Несмотря на то, что содержание полезных компонентов в составе хвостов обогащения крайне неравномерно, полученные результаты показали, что содержание Pb и Zn в верхней части пляжной зоны Унальского хвостохранилища соответствует рядовым рудам (Pb + Zn от 7 до 4%). Радикальным способом защиты окружающей среды от влияния хвостохранилища является выщелачивание хвостов с утилизацией полезных продуктов переработки и последующей рекультивацией. Имеются положительный опыт использования хвостов в качестве техногенных месторождений [12]. Как отмечают многие авторы [13], реализация таких подходов требует диверсификации горного и перерабатывающего производства на Садонских месторождениях. На базе Унальского хвостохранилища развивается механохимическая переработка хвостов. Вовлечение в производство некондиционных для традиционных технологий ресурсов может стать приоритетным направлением горнорудной отрасли не только РСООА, но и всего Северо-Кавказского региона.

### Выводы

1. Применение РФА и ИИНАА для анализа отходов горной промышленности позволило количественно определить содержание 39 элементов в составе хвостов Унальского хвостохранилища.

2. Унальское хвостохранилище представляет собой техногенную геохимическую аномалию с содержанием Zn, As, S, Cu, Sb, Se, Ag, In, Pb Cd, превышающим кларковые более чем в сотни и тысячи раз.

3. Содержание элементов в составе хвостов неравномерно, значительное варьи-

рование содержания ряда элементов в разных точках опробования, вероятно, связано с разным удалением от зеркала воды и воздействием флотационных процессов.

4. Отмечается обогащение верхних 10 см пляжной зоны хвостохранилища высокотоксичными элементами (Zn, As, Cu, Sb, Ni, Pb), что представляет опасность для окружающей среды и здоровья населения.

5. Присутствие в составе хвостов полезных компонентов указывает на необходимость использования отходов Мизурской обогатительной фабрики, складированных на территории Унальского хвостохранилища как источник полезных ископаемых.

### Список литературы

1. Голик В.И. К истории горнометаллургической отрасли Северной Осетии / В.И. Голик, Д.А. Мельков, А.В. Логаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 1. – С. 194–199.
2. Голик В.И. Экономическая эффективность предупреждения природно-техногенных катастроф в горнодобывающих регионах / В.И. Голик, Е.Н. Козырев, Е.Н. Ключко // Научный вестник ЮИМ. – 2015. – № 3. – С. 7–13.
3. Рухлин Г.В. Отходы горного производства как сырье для высокотехнологичной продукции / Г.В. Рухлин, А.М. Байматов // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (25). – С. 34–39.
4. Приличникова Е.В. Эколого-геохимическая оценка горнорудного района: на примере Садоно-Унальской котловины, Республика Северная Осетия – Алания: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. (25.00.09). – Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. Геол. фак. – Москва, 2005. – 27 с.
5. Голик В.И. Перспективы возрождения горного производства Северной Осетии / В.И. Голик, Т.М. Тезиев // Актуальные вопросы современной науки. – 2016. – № 45. – С. 110–121.
6. Карпов Ю.А. Методы пробоотбора и пробоподготовки / Ю.А. Карпов, А.П. Савостин. – 3-е изд. (эл.). – М.: Бинном. Лаборатория знаний, 2015. – URL: <http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2584-9-ch.pdf> (дата обращения: 20.05.2018).
7. Маслов О.Д. Многокомпонентный инструментальный рентгенофлуоресцентный анализ почв и других объектов окружающей среды на токсичные и сопутствующие элементы. Стандарт предприятия СТП 104-2002 / О.Д. Маслов, М.В. Густова, Л.Г. Молоканова. – Дубна: ОИЯИ, 2002. – 16 с.
8. Frontasyeva M.V., Pavlov S.S. REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies. In «Problems of Modern Physics». On the 90th anniversary of Saratov State University and the 40 years of the JINR- SSU collaboration. Editors: A.N. Sissakian, D.I. Trubetskov. Dubna, JINR, 1999, pp. 152–158.
9. Дмитриев А.Ю. Автоматизация количественного определения содержания элементов в образцах методом нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР 2 в ЛНФ ОИЯИ / А.Ю. Дмитриев, С.С. Павлов // Письма в ЭЧАЯ. – 2013. – Т. 10, № 1 (178). – С. 58–64.
10. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия / В.А. Алексеенко. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
11. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении, 3-е изд. / Е.А. Дмитриев. – М.: Либроком, 2009. – 328 с.
12. Технологические, экономические и экологические аспекты переработки техногенного сырья горно-металлургических предприятий Урала / И.В. Шадрунова [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013. – № 8. – С. 16–21.

13. Голик В.И. Экономический механизм конверсии горнодобывающей отрасли депрессивных регионов юга России / В.И. Голик, З.М. Хашева, Л.П. Шульгатый // Научный вестник Южного института менеджмента. – 2016. – № 3. – С. 27–32.

### References

1. Golik V.I. K istorii gornometallurgicheskoy otrasli Severnoj Osetii / V.I. Golik, D.A. Mel'kov, A.V. Logagev // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. – 2009. – № 1. – pp. 194–199.
2. Golik V.I. E'konomicheskaya e'ffektivnost' preduprezhdeniya prirodno-technogenny'x katastrof v gornodoby'vayushhix regionax / V.I. Golik, E.N. Kozy'rev, E.N. Klochko // Nauchny'j vestnik YulM. – 2015. – № 3. – pp. 7–13.
3. Ruxlin G.V. Otxody' gornogo proizvodstva kak sy'r'e dlya vy'sokotexnologichnoj produkcii / G.V. Ruxlin, A.M. Bajmatov // Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. – 2010. – № 4 (25). – pp. 34–39.
4. Pryanichnikova E.V. E'kologo-geoximicheskaya ocenka gornorudnogo rajona: na primere Sadono-Unal'skoj kotloviny', Respublika Severnaya Osetiya – Alaniya: avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk. (25.00.09) . – Mosk. gos. un-t im. M.V. Lomonosova. Geol. fak. – Moskva, 2005. – 27 p.
5. Golik V.I. Perspektivy' vozrozhdeniya gornogo proizvodstva Severnoj Osetii / V.I. Golik, T.M. Teziev // Aktual'ny'e voprosy' sovremennoj nauki. – 2016. – № 45. – pp. 110–121.
6. Karpov Yu.A. Metody' probnoobora i probopodgotovki / Yu.A. Karpov, A.P. Savostin. – 3-e izd. (e'l.). – M.: Binom. Laboratoriya znaniy, 2015. – URL: <http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2584-9-ch.pdf> (data obrashheniya: 20.05.2018).
7. Maslov O.D. Mnogokomponentny'j instrumental'ny'j rentgenofluorescentny'j analiz pochv i drugix ob'ektov okruzhayushhej sredy' na toksichny'e i soputstvuyushhie e'lementy'. Standart predpriyatija STP 104-2002 / O.D. Maslov, M.V. Gustova, L.G. Molokanova. – Dubna: OIYaI, 2002. – 16 p.
8. Frontasyeva M.V., Pavlov S.S. REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies. In «Problems of Modern Physics». On the 90th anniversary of Saratov State University and the 40 years of the JINR- SSU collaboration. Editors: A. N. Sissakian, D. I. Trubetskoy. Dubna, JINR, 1999, pp. 152–158.
9. Dmitriev A.Yu. Avtomatizaciya kolichestvennogo opredeleniya sodержaniya e'lementov v obrazcax metodom nejtronnogo aktivacionnogo analiza na reaktore IBR 2 v LNF OIYaI / A.Yu. Dmitriev, S.S. Pavlov // Pis'ma v E'ChAYa. – 2013. – T. 10, № 1 (178). – pp. 58–64.
10. Alekseenko V.A. E'kologicheskaya geoximiya / V.A. Alekseenko. – M.: Logos, 2000. – 627 p.
11. Dmitriev E.A. Matematicheskaya statistika v pochvovedenii, 3-e izd. / E.A. Dmitriev. – M.: Librokom, 2009. – 328 p.
12. Texnologicheskie, e'konomicheskie i e'kologicheskie aspekty' pererabotki texnogennogo sy'r'ya gorno-metallurgicheskix predpriyatij Urala / I.V. Shadrinova [i dr.] // E'kologiya i promy'shennost' Rossii. – 2013. – № 8. – pp. 16–21.
13. Golik V.I. E'konomicheskij mexanizm konversii gornodoby'vayushhej otrasli depressivny'x regionov yuga Rossii / V.I. Golik, Z.M. Xasheva, L.P. Shul'gaty'j // Nauchny'j vestnik Yuzhnogo instituta menedzhmenta. – 2016. – № 3. – pp. 27–32.