

СТАТЬЯ

УДК 504.064.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Каманина И.З., Каплина С.П., Чигоева Д.Н.

Государственный университет «Дубна», Дубна, e-mail: kamanina@uni-dubna.ru

В работе проведена экотоксикологическая оценка отходов Мизурской горно-обогатительной фабрики, а также почв, базового компонента экосистемы, в зоне влияния горнопромышленного комплекса Республики Северная Осетия – Алания. Исследования проводили на трех ключевых участках: в районе Села Верхний Унал (штольня № 43 месторождения Холст); в непосредственной близости от Унальского хвостохранилища (по правому берегу р. Ардон согласно простиранию хвостохранилища); в районе Фиагдонского хвостохранилища. Оценка степени токсичности проводили с помощью двух тест-объектов: представителя высших растений – редиса *Raphanus sativus* и зеленой протококковой водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer. Большинство обследованных почв высоко и очень высоко гумусированные, близкие к нейтральным. Рекультивированный участок Фиагдонского хвостохранилища характеризуется высокой неоднородностью верхнего гумусированного слоя. В районе с. Верхний Унал выявлены небольшие участки с умеренным фитотоксичным действием почв в зоне влияния Унальского хвостохранилища и штольни № 43 месторождения Холст. Почвы в районе Фиагдонского хвостохранилища, в том числе на рекультивированном участке, не оказывают токсического действия на используемые тест-культуры высших растений *Raphanus sativus* и водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer. Отходы Мизурской обогатительной фабрики, размещенные на территории Унальского хвостохранилища, являются высокотоксичными.

Ключевые слова: хвостохранилище, токсичность, почва, тяжелые металлы, биотестирование, загрязнение, Северная Осетия – Алания

**DETERMINATION SOIL TOXICITY IN THE AREA OF THE MINING
INDUSTRY INFLUENCE**

Kamanina I.Z., Kaplina S.P., Chigoeva D.N.

Dubna State University, Dubna, e-mail: kamanina@uni-dubna.ru

In this work an ecotoxicological assessment of the waste of the Mizur mining and processing plant and soils, as a basic component of the ecosystem, in the territory of influence of the mining and industrial complex of the Republic of North Ossetia-Alania was carried out. The researches were carried out in three basic areas: in the area of the village of Upper Unal (adit No. 43 of the Kholst deposit); near the Unalsky tailing dump (along the right bank of the river Ardon according to the tailing dump strike); in the area of the Fiagdon tailing dump. The toxicity degree was assessed using two test objects: the higher plants – the radish *Raphanus sativus* and the green protococcal algae *Chlorella vulgaris* Beijer. The most of the studied soils are highly humus and near neutral. The recultivated area of the Fiagdon tailing dump is characterized as a high heterogeneity of the upper humus layer. Near the the village of Upper Unal the small areas with a moderate phytotoxic effect of soils in the zone of influence of the Unalsky tailing dump and adit No. 43 of the Kholst deposit were revealed. The soils in the area of the Fiagdon tailing dump do not have a toxic effect on the test cultures of higher plants *Raphanus sativus* and algae *Chlorella vulgaris* Beijer that were been used. The wastes from the Mizur concentration plant that located on the territory of the Unalsky tailing dump is highly toxic.

Keywords: tailing dump, toxicity, soil, heavy metals, biotesting, pollution, North Ossetia-Alania

В настоящее время большое внимание уделяется оценке состояния почв как базового компонента экосистемы. Загрязнение почвы токсикантами может привести к целому ряду негативных последствий: воздействию на живые организмы; нарушению экологического равновесия в почвенном биоценозе, деградации растительного сообщества, изменению физико-химических свойств почвы, снижению сельхозпродуктивности и др. Почва как депонирующая среда накапливает информацию о происходящих процессах и изменениях, в том числе загрязняющих веществ, процессы самоочищения происходят крайне медленно. Для оценки и контроля загрязнения почв наряду с химико-аналитическими ме-

тодами широко применяются методы биотестирования с использованием различных тест-объектов [1–3]. Это позволяет не только определить токсичность тех или иных веществ, но и их суммарное воздействие, получить более объективную информацию о неблагоприятном воздействии природных и антропогенных факторов.

Цель настоящей работы провести экотоксикологическую оценку почв в зоне влияния горнопромышленного комплекса Республики Северная Осетия – Алания.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись почвы в Алагирском районе в зоне влияния объектов Садонского свинцово-цинкового комби-

ната – крупнейшего предприятия по добыче и обогащению полиметаллических руд, созданного в 1922 г. В состав комбината входят Мизурская и Фиагдонская обогатительные фабрики. Почвы были отобраны в 2017 г. на трех ключевых участках, всего было отобрано 46 почвенных проб и 2 пробы отходов с пляжной зоны Унальского хвостохранилища. При пробоотборе во всех точках регистрировались координаты с помощью системы GPS-навигации. Отбор проб почвы, их транспортировка и хранение осуществляют в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб» [4], ГОСТ 17.4.4.02-84 «Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа» [5]. Каждая проба представляла собой смешанный образец (из пяти точечных проб), отобранный с площадки 10x10 м методом «конверта», массой не менее 1 кг. Пробы отбирали из верхнего горизонта на глубину 0–10 см – для почв населенных пунктов и 0–20 см – для сельскохозяйственных земель. Первый ключевой участок располагался в районе с. Верхний Унал. Село Верхний Унал расположено на берегу р. Уналдон, притока р. Ардон. На расстоянии 300–500 м в северо-западном направлении от с. Верхний Унал находится штольня № 43 месторождения Холст. В настоящий момент работы по добыче полиметаллических руд в данном районе не ведутся. В районе штольни № 43 пробы отбирали на различном удалении от выхода штольни в северном, северо-восточном, восточном, юго-восточном, южном, юго-западном, западном и северо-западном направлениях. На данном участке было отобрано 22 пробы. Второй ключевой участок расположен в непосредственной близости от Унальского хвостохранилища Мизурской обогатительной фабрики, которое было введено в эксплуатацию в 1984 г. В настоящее время хвостохранилище рекультивировано, но на момент отбора проб эксплуатировалось. Пробы почв были отобраны по правому берегу р. Ардон согласно простиранию Унальского хвостохранилища. Всего было отобрано 7 проб. Третий ключевой участок располагался в районе Фиагдонского хвостохранилища Фиагдонской горно-обогатительной фабрики, расположенного в Куртатинском ущелье у северо-восточной окраины поселка Верхний Фиагдон, введенного в эксплуатацию в 1971 г. На момент исследования хвостохранилище рекультивировано. Всего было отобрано 17 почвенных проб, в том числе на территории рекультивированного участка. Кроме того, были исследованы

две пробы отходов Мизурской обогатительной фабрики, отобранные с пляжной зоны Унальского хвостохранилища.

После пробоотбора все пробы были доставлены в химическую лабораторию, где высушены до состояния воздушно-сухой смеси, измельчены, просеяны через сито с диаметром 1 мм, подготовлены для дальнейших аналитических измерений.

Оценку степени токсичности проводили с помощью двух тест-объектов: представителя высших растений *Raphanus sativus* и водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer. Именно эти тест-объекты часто применяют для определения токсичности загрязненных почв [6–8].

Метод фитотестирования широко применяется для определения токсичности агроценозов [3], а также почв, испытывающих антропогенное воздействие [7–10]. Суть метода заключается в подавлении роста и развития корневой системы высших растений под воздействием на них химических веществ, предпочтительно использовать мелкие семена высших растений с небольшим запасом питательных веществ. Для исследования были выбраны семена редиса (*Raphanus sativus*) сорта «Французский завтрак», так как такой тест-объект обладает высокой степенью прорастания и повышенной чувствительностью к токсическим веществам [6]. Токсичность определяли по снижению длины корней проростков семян в водных вытяжках из анализируемых почвенных образцов по сравнению с контролем, выраженному в процентах. В качестве контроля был использован почвенный образец, отобранный с участка, не подвергнутого техногенной нагрузке. Площадка отбора контрольной пробы находилась вне влияния господствующего направления ветра, штольневых вод и стоков атмосферных выпадений.

Исследования проводились согласно методике [11]. Сначала была определена всхожесть семян редиса (*Raphanus sativus*), которая составила 99%. Далее из каждого образца почвы была приготовлена водная вытяжка из расчета 1 часть почвы: 1 часть водопроводной воды без CO₂. Масса пробы, взятой для анализа, составляла 100 г, взбалтывание на ротаторе производилось в течение 2,5 ч. Семена редиса в количестве 216 шт. помещались в стаканчик, в который далее приливали 4 см³ фильтрата почвенной вытяжки. Через 24 ч неповрежденные семена из стаканчика по 50 шт. были разложены по чашкам Петри (4-кратная повторность для получения достоверных результатов), где равномерно распре-

делены на поверхности предварительно смоченных водой фильтров. Далее все чашки Петри были помещены в термостат при температуре 25 °С и выдерживались в течение 48 ч. Через двое суток на третьей (72 ч) была рассчитана средняя длина проросших корешков. В случае угнетения роста корней определялась суммарная токсичность. Степень токсичности и класс опасности почв определялся по эффекту торможения роста корней, по сравнению с контролем, выраженному в % (табл. 1).

средней величины оптической плотности по сравнению с контролем, на 20 % и более, если фиксируется подавление роста тест-культуры, или оптической плотности, повышение на 30 % и более в случае стимулирования роста.

Токсикологические характеристики изучаемой пробы устанавливали через величину токсичной кратности разбавления водных вытяжек согласно табл. 2. Проба считалась нетоксичной, если критерий токсичности не превышен ни при одном разбавлении пробы,

Таблица 1

Классификация почв по суммарной токсичности [11]

Класс опасности	Характеристика	Эффект торможения роста корней, %
1	Чрезвычайно токсичные	> 75
2	Высоко токсичные	50–75
3	Умеренно токсичные	20–50
4	Малотоксичные	< 20

Таблица 2

Токсикологические характеристики качества пробы [12]

Величина разбавления тестируемой пробы, при которой превышен критерий токсичности	Качество пробы
1 (неразбавленная)	слаботоксичная
3	токсичная
9	среднетоксичная
27	сильнотоксичная
81	гипертоксичная

Вторым методом, который использовался для определения токсичности почв, был метод по изменению оптической плотности тест-культуры зеленой протококковой водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) [12]. В основе метода лежит регистрация различий в величине оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контроль) и в тестируемых пробах. Эффективность применения тест-культуры хлореллы (*Chlorella vulgaris* Beijer) была показана на примере антропогенно нарушенных почв [8].

В соответствии с методикой [12] для определения токсичности были приготовлены водные вытяжки из каждого образца почвы (соотношение почва:вода – 1:4). Для осветления и освобождения от взвешенных частиц водные вытяжки центрифугировались (10 мин при 4000–4500 об/мин). Степень острого токсического воздействия определяли после 22 ч выращивания в культиваторе по разнице величины оптической плотности тест-культуры. Критерием токсичности пробы является снижение

включая ее исходный неразбавленный вариант. В случае превышения критерия токсичности качество пробы устанавливалось по наибольшей величине разбавления.

Результаты исследования и их обсуждение

В районе исследования распространены горно-луговые, горно-луговые черноземовидные и горные лугово-степные почвы. На рекультивированном участке Фиагонского хвостохранилища диагностируются техногенные почвы с насыпным гумусированным слоем, мощность которого колеблется от 5 до 30 см. Почвы в районе Села Верхний Унал (участок № 1) близкие к нейтральным, среднее значение величины рН водной вытяжки составляет 6,6, изменяется в диапазоне от 5,72 до 7,60 (табл. 3). Более 85 % обследованных почв относятся к высоко и очень высокогумусным (содержание гумуса ≥ 6%). Почвы, отобранные в непосредственной близости от Унальского хвостохранилища (участок № 2), имеют более щелочную рН (7,5), среднее содержание гумуса составляет 7,8% (табл. 3), значения

варьируют от 5,2 до 10,9%. Почвы в районе Фиагдонского хвостохранилища (участок № 3) отличаются меньшей мощностью гумусового горизонта и содержанием гумуса, среднее содержание гумуса составляет 4,6%. Только в двух пробах содержание гумуса соответствует высокогумусированным почвам. Величина pH водной вытяжки колеблется от 5,72 до 8,42. Рекультивированный участок Фиагдонского хвостохранилища от-

личается высокой неоднородностью верхнего гумусированного слоя. Величина pH водной вытяжки колеблется от 5,50 до 7,71, что в целом соответствует природным почвам в районе хвостохранилища. Большую часть обследованной территории можно отнести к низкогумусовым и очень низкогумусовым почвам (содержание гумуса $\leq 4\%$). Только в одной пробе содержание гумуса составило 13% (табл. 3).

Таблица 3

Результаты исследования образцов почвы в Алагирском районе в зоне влияния объектов Садонского свинцово-цинкового комбината, РСО-Алания

№ пробы	pH _{вод}	Гумус, %	Характеристика токсичности	
			Эффект торможения роста корней, на тест-культуре <i>Raphanus sativus</i>	Наличие токсического действия на тест-культуру <i>Chlorella vulgaris</i> Beijer
Участок № 1, район села Верхний Унал				
1	6,67	7,1	45%, умеренно токсичная	нетоксичная
2	6,73	10,4	2%, малотоксичная	слаботоксичная
3	6,21	8,5	2%, малотоксичная	слаботоксичная
4	7,12	4,9	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
5	6,43	9,1	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
6	6,95	6,4	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
7	6,60	7,7	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
8	6,91	7,1	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
9	7,12	3,2	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
10	7,44	7,7	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
11	6,17	10,1	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
12	7,12	5,3	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
13	5,72	13,6	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
14	6,92	7,3	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
15	6,35	8,5	2%, малотоксичные	нетоксичная
16	6,56	4,5	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
17	6,00	11,4	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
18	6,14	15,5	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
19	6,31	17,3	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
20	6,64	11,6	отсутствует, нетоксичная	слаботоксичная
21	6,19	7,1	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
22	7,6	17,5	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
Участок № 2, вдоль Унальского хвостохранилища				
1	7,5	10,0	29,1%, умеренно токсичная	малотоксичная
2	7,5	5,9	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
3	7,4	10,9	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
4	7,6	7,4	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
5	7,5	7,8	13%, малотоксичная	нетоксичная
6	7,5	7,4	15%, малотоксичная	нетоксичная
7	7,4	5,2	8%, малотоксичная	слаботоксичная
Участок № 3, в районе Фиагдонского хвостохранилища				
1	7,65	4,85	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
2	7,42	6,73	1%, малотоксичная	нетоксичная
3	7,71	н/о	7%, малотоксичная	нетоксичная

Окончание табл. 3

№ пробы	рН _{вод}	Гумус, %	Характеристика токсичности	
			Эффект торможения роста корней, на тест-культуре <i>Raphanus sativus</i>	Наличие токсического действия на тест-культуру <i>Chlorella vulgaris</i> Beijer
4	7,02	2,44	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
5	5,50	2,85	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
6	6,75	2,36	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
7	7,14	1,35	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
8	6,06	1,45	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
9	5,75	5,45	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
10	6,23	5,09	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
11	7,48	13,79	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
12	7,28	2,07	н/о	нетоксичная
13	7,61	3,79	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
14	7,75	4,85	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
15	5,72	3,88	отсутствует, нетоксичная	нетоксичная
16	7,79	6,56	н/о	нетоксичная
17	7,98	9,48	отсутствует, нетоксичная	н/о
Отходы из пляжной зоны Унальского хвостохранилища				
1	н/о	н/о	н/о	высокотоксичные
2	н/о	н/о	н/о	высокотоксичные

Примечание. Н/о – не определялось.

Исследования по определению фитотоксичности почв, отобранных на участке № 1 в районе с. Верхний Унал, на основе определения суммарного показателя токсичности показали угнетение роста корней редиса только в одной пробе. Данная проба почвы отобрана на расстоянии 100 м на запад от штольни № 43 месторождения Холст. Степень угнетения роста корней составила 45 %, что классифицируется как «умеренно токсичная» почва 3 класса опасности. Токсичность почвы в данном районе, вероятно, обусловлена ее расположением относительно движения штольневых вод и градиента рельефа. Для остальных проб участка № 1 в районе села Верхний Унал эффект торможения отсутствует (длина проростков больше, чем в контрольной пробе), или составляет менее 3%. Для почв, отобранных на участках № 2, в непосредственной близости от Унальского хвостохранилища, в половине проб эффект торможения роста корней отсутствует, в 3 пробах из 7 эффект торможения роста корней составил от 8 до 15%. В районе Фиагдонского хвостохранилища эффект торможения роста корней *Raphanus sativus* отсутствует во всех анализируемых пробах почв, в том числе и с рекультивированной части хвостохранилища. Это позволяет классифицировать данные почвы как «малотоксичные».

При исследовании образцов почв на тест-культуре зеленой протококковой водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) было установлено, что в почвенных вытяжках без разбавления отмечалось снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом на 20 и более процентов только в двух пробах почв: на участке № 1 в пробе, расположенной в 100 м на северо-запад от штольни № 43 (на 39,6%), на участке № 2 в 800 м на юго-запад от хвостохранилища в устье реки Уналдон (на 38,1%). В неразбавленных вытяжках из образцов с пляжной зоны Унальского хвостохранилища отмечалось снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом на 77,95%. Повышение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом, связанное со стимуляцией ростовых процессов более чем на 30%, отмечалось на участке № 1 в пробе, отобранной в 250 м на восток от хвостохранилища (на 52%), на участке № 2 в половине исследованных проб повышение составило от 31 до 270%. После разбавления токсическое действие на тест-культуру *Chlorella vulgaris* Beijer, вызывающее снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контролем, отмечалось в двух пробах почв: в 100 м на запад от штольни № 43 и в 800 м на юго-

запад от хвостохранилища в устье реки Уналдон. Возможным источником токсичных соединений могут быть штольневые воды, попадающие как в р. Уналдон [13], так и на прилегающую территорию по градиенту рельефа. По результатам биотестирования с использованием тест-культуры *Clorella vulgaris* Beijer эти почвы характеризуются как «слаботоксичные». В остальных пробах после разбавления в 2–3 раза почвенные вытяжки не оказали токсического действия на тест-культуру *Clorella vulgaris* Beijer.

Вытяжки из образцов из пляжной зоны Унальского хвостохранилища не оказывали токсического действия только после разбавления в 27 раз, что свидетельствует о высокой токсичности отходов, складированных на территории Унальского хвостохранилища (табл. 3). В составе отходов присутствуют элементы (Pb, Zn, Cd, Cu, Ni и др.), обладающие высокой токсичностью [14].

Почвенные вытяжки с участка № 3 (район Фиагдонского хвостохранилища) не оказали токсического действия на тест-культуру зеленойособенности протококковой водоросли торговых хлорелла *Clorella vulgaris* Beijer.

Заключение

1. Отходы Мизурской обогатительной фабрики, размещенные на территории Унальского хвостохранилища, являются высокотоксичными.

2. В зоне влияния Унальского хвостохранилища и штольни № 43 месторождения Холст выявлены небольшие участки с умеренным фитотоксичным действием почв.

3. Рекультивированный участок Фиагдонского хвостохранилища характеризуется неоднородностью верхнего гумусированного слоя как по мощности, так и по составу. По результатам биотестирования почвы в районе Фиагдонского хвостохранилища не оказывают токсического действия на используемые тест-культуры высшего растения *Raphanus sativus* и водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer.

4. Комплексное использование тест-объектов является достаточно информативным и может применяться при изучении степени загрязнения территорий. Данные, полученные в результате биотестирования,

могут использоваться в качестве дополнительной информации при проведении экологической оценки почвенного покрова.

Список литературы

1. Дорохина З.П. Фитоиндикация процессов деградации почв: основные термины и определения // Вестник науки. 2018. Т. 3. № 8 (8). С. 229–237.
2. Васильев А.В., Заболотских В.В., Васильев В.А., Ганин А.И. Подходы к созданию обобщенной теории мониторинга токсикологических загрязнений биосферы и их практическое использование // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 5 (4). С. 513–521.
3. Филипчук О.Д. Системное биотестирование компонентов агробиоценоза на экологическую безопасность // Агрохимия. 2018. № 9. С. 84–92.
4. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с.
5. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Изд-во стандартов, 1985. 12 с.
6. Блинова З.П. Биотестирование почвенного покрова городских территорий с использованием проростков *Raphanus sativus* // Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки». 2014. № 1. С. 18–23.
7. Попова Е.И. Определение токсичности почв города Тобольска методом биотестирования // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 4. С. 216.
8. Казакова Н.А. Определение токсического загрязнения почв промышленной зоны методом биотестирования // Современные методы развития науки и технологий. 2015. № 6–3. С. 64–67.
9. Гончарова В.Г., Грудина В.В., Чудинова О.Н., Чередова Т.В. Определение фитотоксичности почв на несанкционированных свалках г. Улан-Удэ // Научные труды КубГТУ. 2019. № 3. С. 794–802.
10. Максимова Н.Б., Морковкин Г.Г., Лаврентьева А. Оценка токсичности и загрязненности почв методом фитоиндикации // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2003. № 2. С. 106–112.
11. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. 2-е изд. учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
12. ПНД Ф Т 14.1: 2:4.10-2004 (издание 2012 г.). Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов производства и потребления по изменению оптической плотности культуры водоросли Хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer). М., 2012. 42 с.
13. Чигоева Д.Н., Каманина И.З., Каплина С.П. Содержание тяжелых металлов в водотоках в районе Унальского хвостохранилища и реки Ардон // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 2. С. 113–122.
14. Каманина И.З., Пухаева Н.Е., Густова М.В., Фронтасьева М.В., Чигоева Д.Н., Каплина С.П. Использование ядерно-физических методов для анализа отходов горно-обогатительной промышленности на примере Унальского хвостохранилища // Успехи современного естествознания. 2018. № 7. С. 142–150.