

ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ ОКРЕСТНОСТЕЙ КАРЬЕРА КРЕМНИСТО-МАРГАНЦЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН)

Семенова И. Н., Кузина Г. Ш., Ягафарова Г. А., Ильбулова Г. Р., Бускунова Г. Г.

Сибайский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», Сибай, e-mail: alexa-94@mail.ru

Содержание меди, цинка, железа и марганца в почвах в радиусе 2000 м от отработанного карьера Южно-Файзуллинского кремнисто-марганцевого месторождения превышало значение нормы. В почве условного контроля концентрация металлов была ниже, но также превышала значения ПДК. По содержанию тяжелых металлов в почве сформирован следующий убывающий ряд: Fe>Mn>Zn>Cu. По степени загрязнения тяжелыми металлами большинство почв, находящихся в зоне влияния карьера данного месторождения, относятся к умеренно опасной категории. Исключение составляют почвы пробных площадок, расположенных на удалении 2000 м северного, 1000 м южного, 500 м и 2000 м восточного направлений, характеризующиеся высоко опасной степенью загрязнения. Все измеренные показатели биотестирования растительной системы *Allium porrum* L. (всхожесть и энергия прорастания семян, длина корня, высота и масса проростков) проявили чувствительность к действию металлов. Изученные признаки фитотеста проявляли регрессионную зависимость отрицательной направленности от содержания некоторых металлов в почве: всхожесть семян – от содержания Cu; энергия прорастания – от Cu и Zn. В то же время содержание изученных металлов в исследуемых почвах существенным образом не влияло на длину корня, высоту и биомассу проростков *Allium porrum* L. Умеренной степенью токсичности обладали почвы северного (0 и 500 м), южного (от 0 до 1000 м) и восточного (500 м) направлений. Остальные образцы были малотоксичными либо практически не токсичными по отношению к *Allium porrum* L.

Ключевые слова: Южно-Файзуллинское месторождение, марганцевая руда, тяжелые металлы, суммарный показатель загрязнения, биотестирование, лук порей.

PHYTOTOXICITY HEAVY METALS IN OF POLLUTED SOILS AROUND CAREER SILICEOUS - MANGANESE DEPOSIT (REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

Semenova I. N., Kuzhina G. S., Yagafarova G. A., Ilbulova G. R., Buskunova G. G.

Sibaiski Institute (branch) «The Bashkir state University», Sibay, e-mail: alexa-94@mail.ru

The content of copper, zinc, iron and manganese in soils within a radius of 2000 meters from the waste career is South Fayzullinskogo siliceous-manganese deposit exceeds the value of the norm. In soil conditional control the concentration of metals was lower, but also exceeded the limit values. On the content of heavy metals in the soil formed following decreasing series: Fe>Mn> Zn> Cu. According to the degree of heavy metal contamination of soils most of which are in the zone of influence of this career is field are moderately dangerous category. The exception is the soil of trial platforms located at a distance of 2000 meters north, 1000 meters south, 500 meters and 2000 meters east directions characterized by a high degree of danger of contamination. All measured values of biotesting of plant *Allium porrum* L. (germination and germination energy, length of the root, height and weight of seedlings) showed sensitivity to metals. The studied characteristics of the phytotest showed regressional relationship of negative directionality from the content of several metals in the soil: germinating ability of seeds from the content of Cu; germination readiness from the content of Cu and Zn. At the same time the content of the studied metals in these soils are not significantly influenced by the length of the root, height and dry weight of seedlings *Allium porrum* L. Moderate degree of toxicity of the soil had northern (0 and 500 m), the south (from 0 to 1000 m) and east (500 m) directions. The remaining samples were either of low toxicity not substantially toxic to *Allium porrum* L.

Keywords: South Fayzullinskoe mine, manganese ore, heavy metals, the total contamination index, biotesting, leek.

На территории Баймакского района Республики Башкортостан (РБ) выявлены многочисленные кремнисто-марганцевые месторождения, приуроченные к горизонту бугулыгырских яшм и другим слоям кремнистых пород [3, 12]. К объектам такого типа

относится Южно-Файзуллинское месторождение, расположенное в 20 км к юго-западу от г. Сибай и в 1,5 км восточнее д. Файзуллино. Месторождение было открыто в 1890 г. и эксплуатировалось до 1917 г. Дальнейшая разработка продолжалась в годы Великой Отечественной войны для получения легирующих добавок в сталь. В настоящее время на территории месторождения выявлены 14 заброшенных карьеров [6].

Основным марганцевым минералом конкреций исследуемого месторождения является тонкозернистый псиломеланс с высокой отражательной способностью светло-стально-серого цвета, по составу соответствующий калиевой разновидности (мас. %): MnO – от 71,10 до 89,44, FeO – от 1,20 до 13,27, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, K₂O, CaO. В состав темных железистых слоев также входит якобит со специфическим серым цветом, элементный состав которого аналогичен псиломелансу, но с низким содержанием перечисленных соединений. Кроме этого, появляются многочисленные кристаллы магнетита, содержащие до 4 % марганца [1].

В 1999 г. велись работы по добыче марганцевых руд на Южно-Файзуллинском карьере ООО «Артылыш». Разработка осуществлялась по транспортной технологии с внешним отвалообразованием. С августа 1999 г. было добыто вскрыши 65 тыс. м³, руды – 990 т. Общая протяженность рудной залежи месторождения составляет 200 м. Мощность колеблется от 0,5 до 8 м [3]. В настоящее время добыча руды остановлена, карьер заполнен водой и засыпан щебнем. Однако открытый способ работы на карьерах привел к загрязнению почвы в зоне добычи руд, а также населенных пунктов, расположенных в их окрестностях. Показано, что в условиях Южного Урала почвы окрестностей карьеров по добыче полезных ископаемых загрязнены тяжелыми металлами (ТМ). Аккумуляция ТМ в почвах в больших количествах приводит к трансформации их физико-химических и биологических свойств, а также повышению токсичности по отношению к живым объектам [8, 9, 10, 11].

Определить степень токсичности почвы можно с помощью биотестирования с использованием растительных тест-систем [2].

Данное исследование преследовало цель доказать, что заброшенный карьер Южно-Файзуллинского месторождения негативно воздействует на объекты окружающей среды его окрестностей, в частности, обуславливая фитотоксичность почв. При этом в качестве основной причины такого воздействия рассматривается повышенный уровень ТМ в почвах.

Материалы и методы исследования

Материалом для работы послужили образцы почвы, отобранные в соответствии с методическими указаниями по определению ТМ, в осенний период 2014 г. [4]. Пробные площадки располагались непосредственно у карьера – источника загрязнения (ИЗ), а также на удалении 0,5, 1 и 2 км от отвалов в северном, восточном, южном и западном

направлениях. За условный контроль принималась площадка, расположенная в 5 км южнее карьера в зоне, не подверженной техногенному воздействию.

Определение содержания подвижных форм Cu, Zn, Fe, Mn в почвах проводили методом атомной абсорбции [4]. Для экотоксикологической оценки почв использовали кратность превышения предельно-допустимых концентраций (ПДК) подвижных форм металлов. Уровень техногенного загрязнения почв оценивали с помощью суммарного показателя загрязнения (Z_c) [8].

Для биотестирования семена растения *Allium porrum* L. закладывали в чашки Петри в предварительно увлажненную почву по 20 штук. Засеянные чашки выдерживали при комнатной температуре в течение 7 суток. При необходимости производился полив дистиллированной водой. Результаты опыта учитывали на 3 и 7 сутки. На 3 сутки проводился визуальный учет прорастания семян (энергия прорастания), на 7 – измерялась длина предварительно отмытых от почвы корней, надземной части проростков, а также биомасса [5]. Статистическая обработка проводилась с помощью пакета компьютерных программ STATISTICA 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование содержания ТМ в почвах показало, что в радиусе 2 км от ИЗ, а также на расстоянии 5 км почвы загрязнены ТМ, хотя в почве условного контроля их содержание было ниже. Сравнение средних значений содержания изученных металлов в почвах позволило расположить их в следующий убывающий ряд: $Fe > Mn > Zn > Cu$.

Fe в черноземах Башкирского Зауралья является малоподвижным, достаточно инертным и устойчивым элементом, что определяется геохимическими, гидрологическими и климатическими особенностями района исследования и свойствами самих почв [9]. В данном исследовании содержание подвижных форм Fe в почвах изменялось от 5300 до 30950 мг/кг. Как известно, ПДК для подвижной формы Fe в почвах не установлена, поэтому содержание железа в исследованных почвенных образцах сравнивали с региональным геохимическим фоном (РГФ), равным 3800 мг/кг [9]. Превышение РГФ было зафиксировано во всех исследованных почвах (в среднем 3,8 ПДК), в том числе в условном контроле (1,5 ПДК). Максимальное превышение нормы (в 14 раз) зарегистрировано на удалении 2 км от ИЗ в северном направлении, а минимальное (в 1,2 раза) – в восточном направлении. По мере удаления от ИЗ содержание подвижной формы Fe в восточном и западном направлениях уменьшалось, а в северном – повышалось.

Содержание Mn во всех изученных почвах изменялось от 1237 до 8307 мг/кг при ПДК, равной 140 мг/кг. Превышение ПДК, в среднем, составило 22 раза, в условном

контроле – 26 раз. Максимальная концентрация Mn наблюдалась в восточном направлении на пробной площадке, расположенной на расстоянии 2 км от ИЗ.

Концентрация Zn в почве варьировала в пределах от 29 до 142 мг/кг, что свидетельствовало о ее высокой обеспеченности данным элементом (> 5 мг/кг) [7]. Среднее содержание этого элемента в исследуемых почвенных образцах составило 11 ПДК, в условном контроле – 2,3 ПДК. По мере удаления от ИЗ в северном направлении содержание Zn снижалось, в то время как в южном и западном направлениях, наоборот, повышалось. Максимальное содержание Zn зарегистрировано непосредственно у ИЗ в северном направлении.

Концентрация Cu изменялась в пределах от 17,3 до 57,8 мг/кг, превышая ПДК, в среднем, в 11 раз. В почве условного контроля содержание данного элемента составило 6,6 ПДК. Максимальное содержание Cu зафиксировано на расстоянии 0,5 км от ИЗ в северном направлении.

Оценка степени загрязнения исследуемых почв позволила отнести их к умеренно опасной категории ($16 < Z_c < 32$). Исключением явились образцы почв пробных площадок, расположенных на удалении 2 км северного ($Z_c = 54$), 1 км южного ($Z_c = 63$), 0,5 км и 2 км восточного направлений, имеющих высоко опасную степень загрязнения за счет повышенного содержания Fe и Mn.

Показателями фитотоксического действия является снижение по сравнению с контролем всхожести и энергии прорастания семян, длины подземной и надземной частей растений.

В исследованиях величина энергии прорастания семян *Allium porrum* L. варьировала в широком диапазоне от 0 до 90 %. В контроле этот показатель составил 77 %. Максимальная энергия прорастания семян зафиксирована в почве западного направления на удалении 0,5 км от ИЗ, минимальная – в 2 км южного направления. В то же время всхожесть семян изменялась от 50 до 90 %, а в условном контроле равнялась 83 %. Максимальное значение этого показателя отмечено в почве западного направления на удалении 0,5 км от ИЗ, минимальное – 0 и 0,5 км северного и 0,5 км восточного направлений (рис. А).

Следует отметить, что для образцов семян *Allium porrum* L., пророщенных на пробах почв южного направления на удалении 1 км от ИЗ, наблюдалось значительное снижение величины их всхожести по сравнению с энергией прорастания. В образцах восточного и западного направлений выявлены лишь единичные случаи такого рода.

Исходя из того, что всхожесть семян тест-растения была достоверно ниже таковой в контроле, можно заключить, что почва окрестностей карьера обладает повышенной фитотоксичностью, обусловленной повышенным содержанием ТМ, что подтверждается

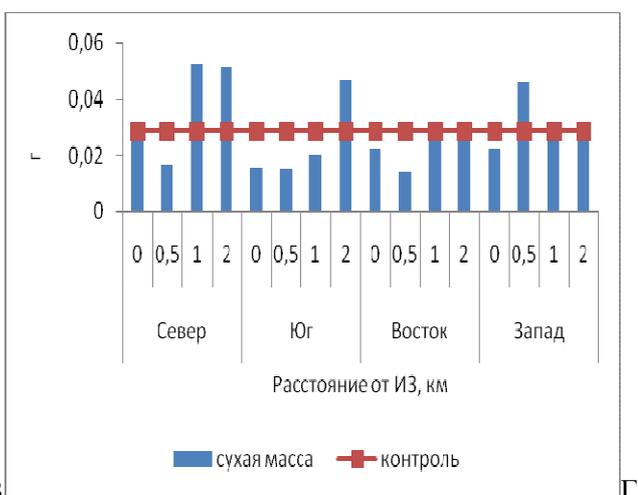
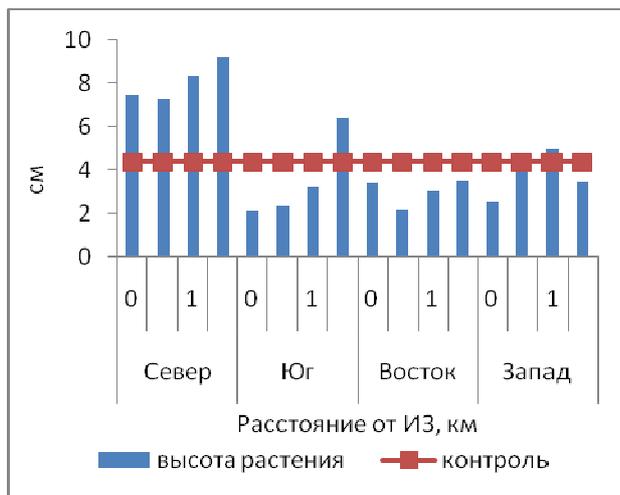
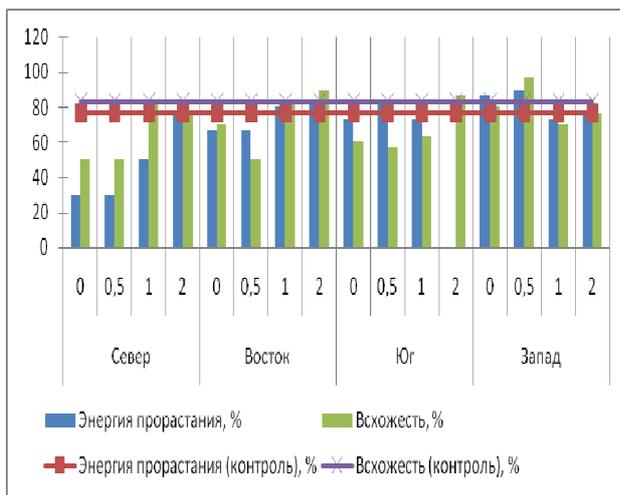
наличием корреляционной зависимости отрицательной направленности между содержанием некоторых металлов в почве и изученными показателями фитотеста, а именно: между всхожестью семян и содержанием Cu ($r = -0,74; p = 0,001$); энергией прорастания и содержанием Cu ($r = -0,49; p = 0,043$) и Zn ($r = -0,75; p = 0,001$).

Вместе с тем выявлены случаи стимулирования всхожести семян лука, отмеченные для почв восточного (1 км) и западного (0,5 км) направлений от ИЗ.

Чувствительными к повышенному содержанию ТМ в тестируемых почвах оказались как подземная, так и надземная части проростков лука порея. Длина корня и высота растений лука в почвах северного и южного направлений по мере удаления от ИЗ увеличивались. В остальных же направлениях от ИЗ изменение данных показателей не подчинялось определенной закономерности.

Длина корня лука порея не превышала значения этого показателя в контроле (11 мм) в образцах растений, выращенных в почвах южного (за исключением почв на расстоянии 2 км от ИЗ), восточного и западного направлений, что свидетельствует об их фитотоксичности. В то же время образцы почв северного направления не проявляли отрицательного воздействия на развитие подземной части растений, более того, они оказывали выраженное стимулирующее действие, в результате чего длина корня превысила контрольную величину в 4 раза (рис. Б). По аналогии с вышесказанным, к нетоксичным в отношении надземной части растения следует отнести почвы северного, южного (2 км) и западного (1 км) направлений. Остальные же образцы почв проявляли ингибирующий эффект и, соответственно, были отнесены к фитотоксичным (рис. В). Однако достоверной корреляционной зависимости между содержанием ТМ в исследованных почвах и изменением изучаемых параметров *Allium porrum* L. выявлено не было.

Сравнительное изучение биомассы проростков лука порея, выращенных в ходе биотестирования, показало, что почвы, отобранные в радиусе до 0,5 км во всех направлениях, можно отнести к фитотоксичным. Исключением является почва западного направления (0,5 км), обладающая стимулирующим действием по отношению к биомассе растений *Allium porrum* L. Аналогичным эффектом обладают почвы, взятые на расстоянии 1 и 2 км северного и 2 км южного направлений. Как и в случае длины растения, достоверной корреляционной зависимости между содержанием ТМ в исследованных почвах и изменением биомассы *Allium porrum* L. выявить не удалось. Возможно, что наблюдаемый фитотоксический эффект связан с наличием в почве иных факторов, в том числе каких-либо других химических элементов (рис. Г).



Всхожесть и энергия прорастания семян (А), длина подземной (Б), надземной части (В), сухой биомассы (Г) проростков *Allium porrum* L.

Сравнение чувствительности исследуемых показателей растительной тест-системы *Allium porrum* L. к токсическому действию изученных почвенных образцов показало, что все они являются достаточно чувствительными тест-откликами, поскольку по каждому показателю фитотеста выявлено от 9–11 случаев проявления токсичности.

На основании полученных результатов и в соответствии с Методикой ... (2009) [5] была рассчитана степень токсичности изученных почвенных образцов (таблица).

Уровень токсичности техногенно загрязненных почв окрестностей
Южно-Файзуллинского месторождения

Направление	Расстояние от карьера, км	Степень токсичности по всхожести семян	Степень токсичности по длине корня	Степень токсичности
Север	0	III	V	III
	0,5	III	V	III
	1	V	V	V
	2	IV	V	IV
Юг	0	III	V	III
	0,5	III	V	III

	1	III	V	III
	2	V	V	V
Восток	0	IV	V	IV
	0,5	III	IV	III
	1	V	IV	IV
	2	V	V	V
Запад	0	IV	IV	IV
	0,5	V	V	V
	1	IV	V	IV
	2	IV	V	IV

Примечание: I – высоко опасно токсичные; II – опасно токсичные; III – умеренно токсичные; IV – малотоксичные; V – практически не токсичные.

По такому показателю, как всхожесть семян, шесть пробных площадок имели умеренную степень токсичности: 0 и 0,5 км от ИЗ северного, 0, 0,5, 1 км южного, 0,5 км восточного направлений. По показателю длины корня все исследуемые площадки имели малую токсичность или были практически не токсичными. Таким образом, в соответствии с принципом избыточной экологической безопасности оценка токсичности почв по показателю всхожести представляется более целесообразной.

Проведенное исследование позволило заключить, что почвы окрестностей Южно-Файзуллинского месторождения в радиусе 2 км имеют умеренно- и высоко опасную категорию загрязнения ТМ, главным образом, за счет повышенного содержания Fe и Mn. С увеличением расстояния от карьера в большинстве случаев происходит снижение фитотоксичности. Выявлено наличие корреляционной зависимости отрицательной направленности между содержанием ряда ТМ в почве и показателями фитотеста, а именно: между всхожестью семян и содержанием Cu, энергией прорастания и содержанием Cu и Zn. 50 % почвенных образцов окрестностей Южно-Файзуллинского месторождения из исследуемых 12 являются умеренно токсичными, остальные – не обладали выраженной фитотоксичностью по отношению к *Allium porrum* L.

Список литературы

1. Аюпова Н. Р. Минеральный состав девонских железо-марганцевых конкреций уральского палеоокеана [Электронный ресурс] / Н. Р. Аюпова. – Режим доступа: <http://www.minsoc.ru/2010-1-5-0> (дата обращения: 29.01.2016).
2. Багдасарян А. С. Биотестирование почв техногенных зон городских территорий с использованием растительных организмов: дис. ... канд. биол. наук. – Ставрополь, 2005. – 159 с.

3. География Баймакского района: учебное пособие. – Сибай: РИЦ Сибайского института БашГУ, 2002. – 141 с.
4. Методические указания «Определение массовой доли металлов в пробах почв и донных отложений. Методика выполнения измерений методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии». – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2006. – 30 с.
5. Методика измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно загрязненных почв (М-П- 2006 ФР.1.39.2006.02264). – Санкт-Петербург, 2009. – 19 с.
6. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (марганцевые руды) / Д. Н. Салихов [и др.]. – Уфа: Изд-во «Экология», 2002. – 242 с.
7. Савич В. В., Шишов Л. Л., Амергужин Х. А., Норовсурен Ж., Поветкина Н. Л. Агрономическая оценка и методы определения агрохимических и физико-химических свойств почв // «АкПол», Астана, 2004. – 620 с.
8. Семенова И. Н., Биктимерова Г. Я., Ильбулова Г. Р., Исанбаева Г. Т. Содержание тяжелых металлов в почве окрестностей карьеров Челябинской области // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–1; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18973>.
9. Семенова И. Н. Биологическая активность почв как индикатор их экологического состояния в условиях техногенного загрязнения тяжелыми металлами / И. Н. Семенова, Я. Т. Суюндуков, Г. Р. Ильбулова. – Уфа: Гилем, 2012. – 196 с.
10. Суюндуков Я. Т., Семенова И. Н., Зулкарнаев А. Б., Хабиров И. К. Антропогенная трансформация почв города Сибай в зоне влияния предприятий горнорудной промышленности. – Уфа: АН РБ, Гилем, 2014. – 124 с.
11. Суюндуков Я. Т., Янтурин С. И., Сингизова Г. Ш. Накопление и миграция тяжелых металлов в основных компонентах антропогенных экосистем Башкирского Зауралья в зоне влияния объектов горнорудного комплекса. – Уфа: АН РБ, Гилем, 2013. – 156 с.
12. Фаткуллин Р. А. Природные ресурсы Республики Башкортостан и рациональное их использование: учеб. пособие / Р. А. Фаткуллин. – Уфа: Китап, 1996. – 176 с.