

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЕМ-ФИТОРЕМЕДИАНТОМ – ТОПИНАМБУРОМ (*HELIANTHUS TUBEROSUS* L.)

С. Ф. Абдуллаев¹, Н. М. Сафаралиев¹, К. Партоев^{2}*

¹Физико-технический институт им. С.У. Умарова Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Центр инновационного развития науки и новых технологий Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе, Республика Таджикистан,
*e-mail: pkurbonali@mail.ru

Поступила в редакцию 17.11.2018 г.

Аннотация – Одним из простых и эффективных решений проблемы реабилитации почвы, загрязненной тяжелыми металлами (ТМ), является фиторемедиация. В работе предложено применять для этой цели в условиях Таджикистана растение-фиторемедиант топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.). Рентгенофлуоресцентным методом проведен анализ содержания тяжелых металлов и мышьяка в фиторемедианте и в почве места его произрастания. Рассчитаны коэффициенты биологического поглощения тяжелых металлов различными частями растения. Установлены значительное накопление в различных частях растения элементов Fe, Co, Cr, Mn, V и Sr и слабый захват элементов Pb, As, Zn, Ni и Ti, в то время как коэффициент поглощения Cu находится вблизи единицы. В целом, установлена принципиальная возможность использования топинамбура в качестве фиторемедианта для реабилитации почв, загрязненных ТМ. Даны рекомендации по применению данного типа фиторемедианта при загрязнении почвы различными видами ТМ.

Ключевые слова: фиторемедиация, загрязнение почвы, тяжелые металлы, топинамбур, коэффициент биологического поглощения.

STUDY OF BIOLOGICAL ABSORPTION OF HEAVY METALS BY PHYTOREMEDIATION PLANT JERUSALEM ARTICHOKE (*HELIANTHUS TUBEROSUS* L.)

S. F. Abdullaev¹, N. M. Safaraliev¹, and K. Partoev^{2}*

¹Umarov Physical-Technical Institute, Academy of Science of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Center for Innovative Development of Science and New Technologies, Academy of Science of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan, *e-mail: pkurbonali@mail.ru

Received November 17, 2018

Abstract – Phytoremediation is generally accepted to be one of the simple and most effective solutions of the problem of rehabilitation of soil contaminated with heavy metals. In this work, it is proposed to apply Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a phytoremediant plant for soil remediation in Tajikistan. The X-ray fluorescence method has been used to analyze the content of heavy metals and As in the phytoremediant and in the soil of the plant habitat. The values of biological absorption coefficient of heavy metals absorbed by different parts of the plant have been calculated. A significant uptake of Fe, Co, Cr, Mn, V, and Sr elements in different parts of the plant has been observed along with a weak capture of Pb, As, Zn, Ni, and Ti elements, while the absorption coefficient values for Cu are approaching 1. In general, a principal possibility of applying Jerusalem artichoke as a phytoremediant for rehabilitation of soils contaminated with heavy metals has been established. Recommendations for using this plant for remediation of soil polluted with various types of heavy metals are given.

Keywords: phytoremediation, soil pollution, heavy metals, topinambur, coefficient of biological absorption.

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей обеспечения химической безопасности является реабилитация почвы, загрязненной различными поллютантами, в частности, тяжелыми металлами. Тяжелые металлы, как правило, характеризуются высокой токсичностью и имеют длительный период полураспада с сохранением своих токсических свойств, а также обладают способностью накапливаться в живых организмах, что может представлять серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья человека.

Одним из перспективных, экономичных и экологически безопасных способов реабилитации загрязненной почвы является фиторемедиация, которая подразумевает использование для очистки загрязненного грунта специальных растений-фиторемедиантов [1, 2]. В зависимости от механизма взаимодействия растения и загрязняющего вещества выделяют несколько направлений фиторемедиационных методов: фитоэкстракция (фитоаккумуляция), фитостабилизация, фитодеградация, фитоиспарение, фитостимуляция и ризодеградация [3].

Поглощение тяжелых металлов растениями-фиторемедиантами (фитоаккумуляция) ведет к обезвреживанию и санации почвы. Что касается влияния поглощенных фиторемедиантами металлов на сами растения – оно носит двоякий характер и подчиняется зависимости «доза – эффект». Однако известно, что в процессе эволюции растения выработали сложную систему защитных механизмов, приводящих к снижению токсического воздействия ТМ на клеточном уровне и их детоксикации, что обеспечивает выживание растений в неблагоприятных для роста условиях [4].

Для изучения возможности применения метода фиторемедиации для реабилитации почвы, загрязненной тяжелыми металлами, необходимо провести исследования миграции и содержания ТМ в почве, изменения качественного состава почвы и изучить процесс миграции токсичных элементов в растения. Такие исследования представляют собой комплексную и актуальную задачу [5].

Для учета многофакторности процессов в системе «почва-растение» и необходимости отслеживания временных характеристик, прогнозирования динамических характеристик, в настоящей работе применен метод, в основу которого положен расчет коэффициента биологического поглощения элементов растением [5]. Коэффициент биологического поглощения рассчитывается по формуле:

$$K_i^{\text{бн}} = C_i^{\text{р}} / C_i^{\text{поч.}}$$

где $C_i^{\text{р}}$ – содержание i -го тяжелого металла в растении, мг/кг; $C_i^{\text{поч.}}$ – содержание i -го тяжелого металла в почве, мг/кг.

При $K_i^{\text{бн}} > 1$ можно судить о высоком накоплении элементов, а при $K_i^{\text{бн}} < 1$ наблюдается их очень слабый захват.

В ряде работ [5–10] для определения коэффициента биологического поглощения предложено проводить эксперимент, позволяющий исследовать

систему «почва-растение» для установления зависимости накопления ТМ в период вегетации различными органами растения от их содержания в почве места произрастания растения.

Целью настоящего исследования являлось выявление закономерностей накопления ТМ в различных органах предполагаемого растения-фиторемедианта топинамбура в зависимости от их начальной концентрации в почве и установление возможности использования топинамбура для реабилитации загрязненных почв.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве предполагаемого растения-фиторемедианта была выбрана многолетняя овощная культура – топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.) сорта «Интерес», который характеризуется высокой урожайностью зеленой массы и клубней [11]. Растение было посеяно в Гиссарской долине Таджикистана на высоте 800 м над уровнем моря в апреле 2015 г. на экспериментальном участке Института ботаники, физиологии и генетики растений Академии Наук Республики Таджикистан, расположенном в восточной части г. Душанбе. Схема посадки растений 70 x 35 см. Во время вегетации были внесены минеральные удобрения (аммиачная селитра и суперфосфат) в количестве 50 : 50 кг/га (д.в.) и проведено пять вегетационных поливов [12].

Для проведения анализов на содержание в растении металлов брали пробы органов растений (листья, корни, стебли и клубни) в конце сентября. Для каждого варианта опыта было взято 10 растений и 10 проб почвы для анализа и для них были подсчитаны средние арифметические показатели.

Содержание тяжелых металлов в органах растений анализировали с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра марки Спектроскан Макс-G (Спектрон, Россия), оснащенного персональным компьютером и предназначенного для анализа различных образцов [13–17].

Пробы почвы были собраны одновременно с отбором проб органов растений в местах произрастания топинамбура в Рудакинском районе Таджикистана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отобранные пробы из различных частей топинамбура (листья, корни, стебли и клубни) исследовались на содержание в них тяжелых металлов и мышьяка рентгенофлуоресцентным методом. Средние значения полученных данных с погрешностью приведены в таблице 1, сюда же включено содержание ТМ в почве места произрастания топинамбура.

Следует отметить, что приведенные в последней графе таблицы данные по количеству ТМ в почве – превышают предельно допустимый уровень ТМ в почве: по мышьяку в 34 раза, по свинцу и цинку в 14 раз. Высокое содержание в почве мышьяка, свинца и цинка, по-видимому, связано с выбросами транспорта и предприятий тяжелой промышленности, так как экспериментальная площадка, где проводились исследования, находится вблизи транспортной трассы и недалеко от промышленных предприятий.

Таблица 1. Среднее значение содержания тяжелых металлов и их оксидов, а также мышьяка в различных частях топинамбура и в почве места произрастания

Металл или его оксид	Единица измерения	Корень	Клубень	Листья	Стебель	Почва
Sr	мг/кг	118.12 ± 0.78	159.31 ± 1.35	133.51 ± 1.14	112.18 ± 0.70	109.84 ± 0.66
Pb	мг/кг	22.92 ± 7.15	26.02 ± 8.79	33.01 ± 10.76	27.42 ± 6.81	427.43 ± 10.82
As	мг/кг	13.73 ± 3.09	7.40 ± 3.73	8.89 ± 4.72	15.34 ± 2.95	68.19 ± 4.57
Zn	мг/кг	108.82 ± 1.93	191.34 ± 2.96	322.71 ± 5.32	90.08 ± 1.73	984.22 ± 11.96
Cu	мг/кг	43.89 ± 0.17	43.22 ± 0.18	39.41 ± 0.27	44.12 ± 0.17	44.12 ± 0.16
Ni	мг/кг	42.10 ± 2.13	15.64 ± 2.30	55.34 ± 3.60	49.74 ± 2.13	62.34 ± 2.12
Co	мг/кг	14.81 ± 0.59	15.74 ± 0.53	24.52 ± 1.20	13.99 ± 0.59	12.01 ± 0.52
Fe ₂ O ₃	%	3.91 ± 0.04	2.11 ± 0.00	10.97 ± 0.18	4.30 ± 0.04	3.44 ± 0.03
MnO	мг/кг	851.65 ± 14.39	645.65 ± 10.42	904.74 ± 16.09	982.58 ± 17.27	641.12 ± 11.00
Cr	мг/кг	111.30 ± 0.94	101.70 ± 0.85	228.91 ± 3.33	108.48 ± 0.89	105.43 ± 0.81
V	мг/кг	87.01 ± 16.34	65.71 ± 14.94	88.87 ± 28.12	125.42 ± 17.18	94.26 ± 15.71
TiO ₂	%	0.47 ± 0.02	0.10 ± 0.01	0.15 ± 0.02	0.64 ± 0.02	0.61 ± 0.02

На рисунках 1 и 2 представлены данные по содержанию тяжелых металлов и их оксидов, а также мышьяка в различных частях топинамбура и в почве места произрастания.

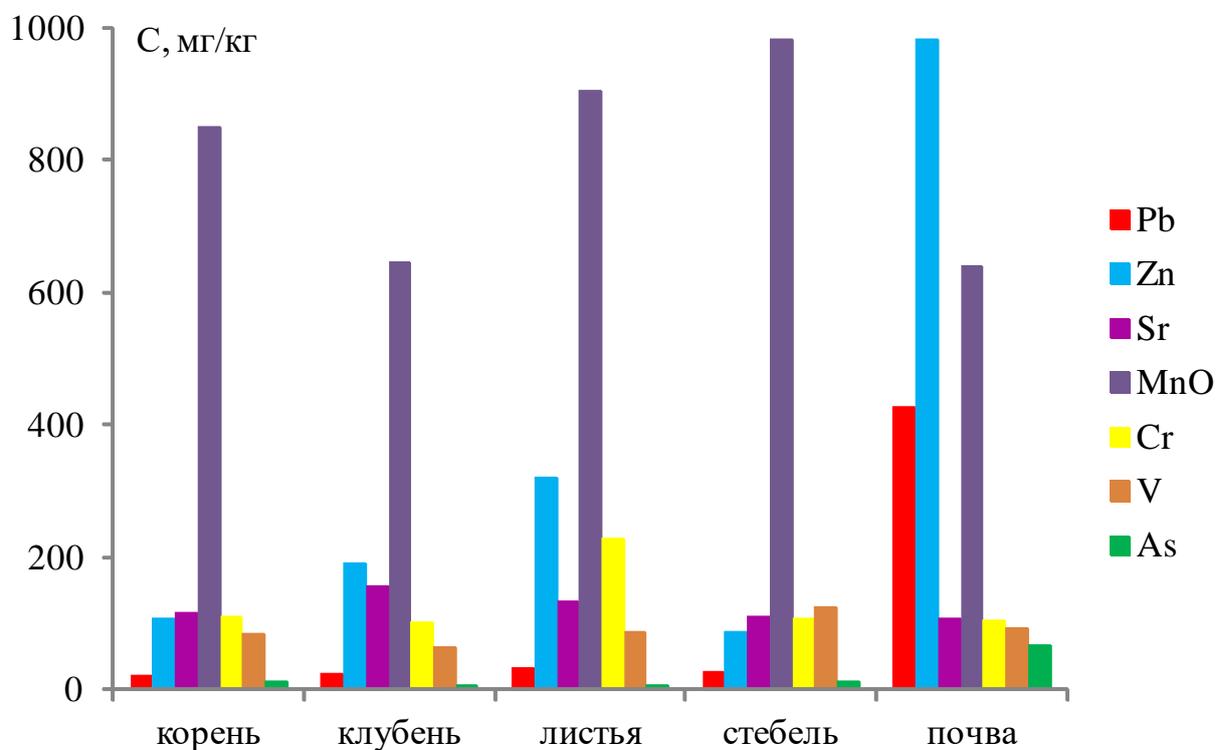


Рис. 1. Среднее значение содержания Pb, Zn, Sr, MnO, Cr, V и As в различных частях топинамбура и в почве.

Как видно из рисунка 1, наибольшее содержание стронция наблюдается в клубнях, ванадия – в стеблях, хрома – в листьях топинамбура. Содержание

оксида марганца в стеблях немного больше, чем в остальных частях растения. Установлено, что поведение при поглощении растением цинка и свинца имеет одинаковый характер, содержание этих металлов примерно одинаково во всех частях растения и значительно ниже, чем в почве.

Как видно из рисунка 2, железа в листьях растения оказалось больше, чем в клубнях приблизительно в пять раз. Содержание кобальта и никеля больше в листьях, меди меньше в листьях, никеля меньше в клубнях. Обнаружено почти одинаковое количество оксида железа в почве и в других частях топинамбура (кроме листьев). Содержание оксида титана в стеблях и почве одинаково и превышает его содержание в клубнях и листьях примерно в 6 раз. Содержание оксида титана в корнях в пять раз больше, чем в клубнях и листьях.

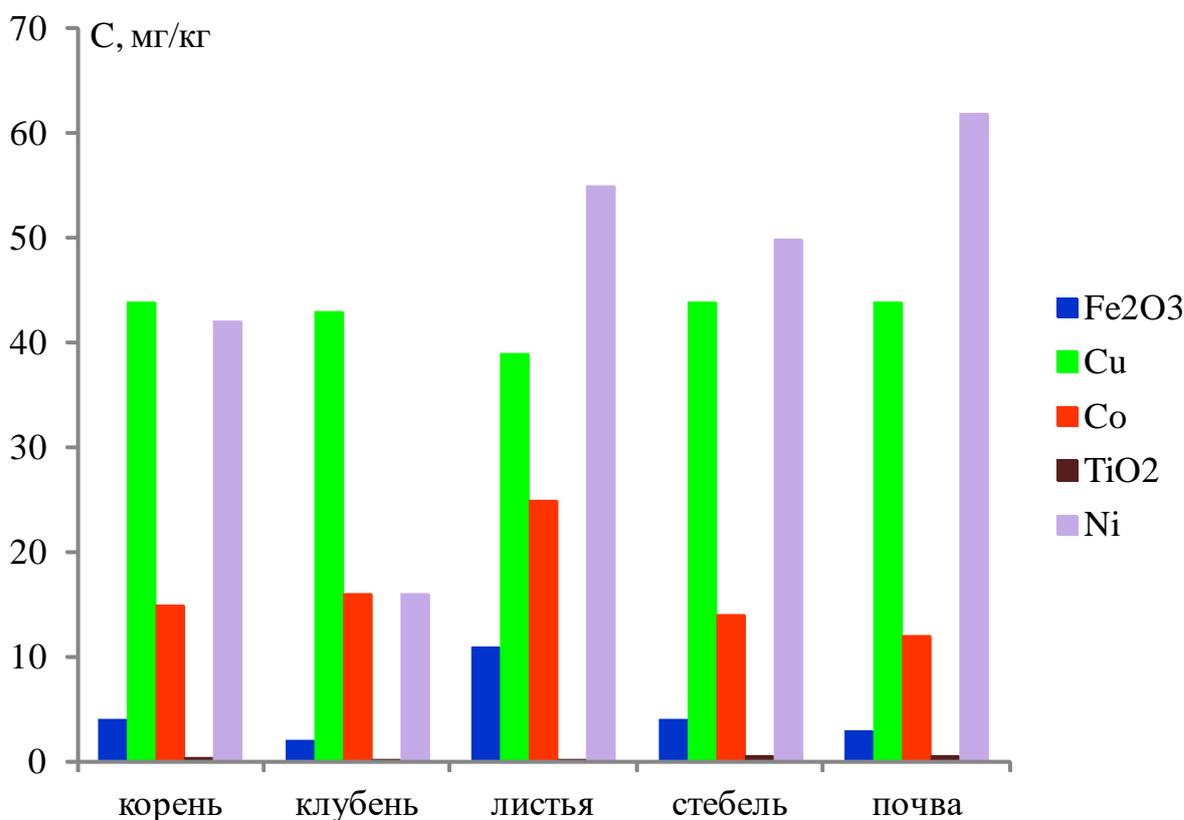


Рис. 2. Среднее значение содержания Fe₂O₃, Cu, Co, Ni и TiO₂ в различных частях топинамбура и в почве.

Обращает на себя внимание высокое накопление в различных частях топинамбура таких химических веществ, как оксид марганца (645–983 ppm), ванадий (65–125 ppm), стронций (112–159 ppm), хром (101–228 ppm), их содержание в растении находится практически на том же уровне, как содержание этих веществ в почве.

На рис. 3 обобщены данные по коэффициенту биологического поглощения всех исследованных в данной работе металлов и оксидов металлов, различными частями топинамбура.

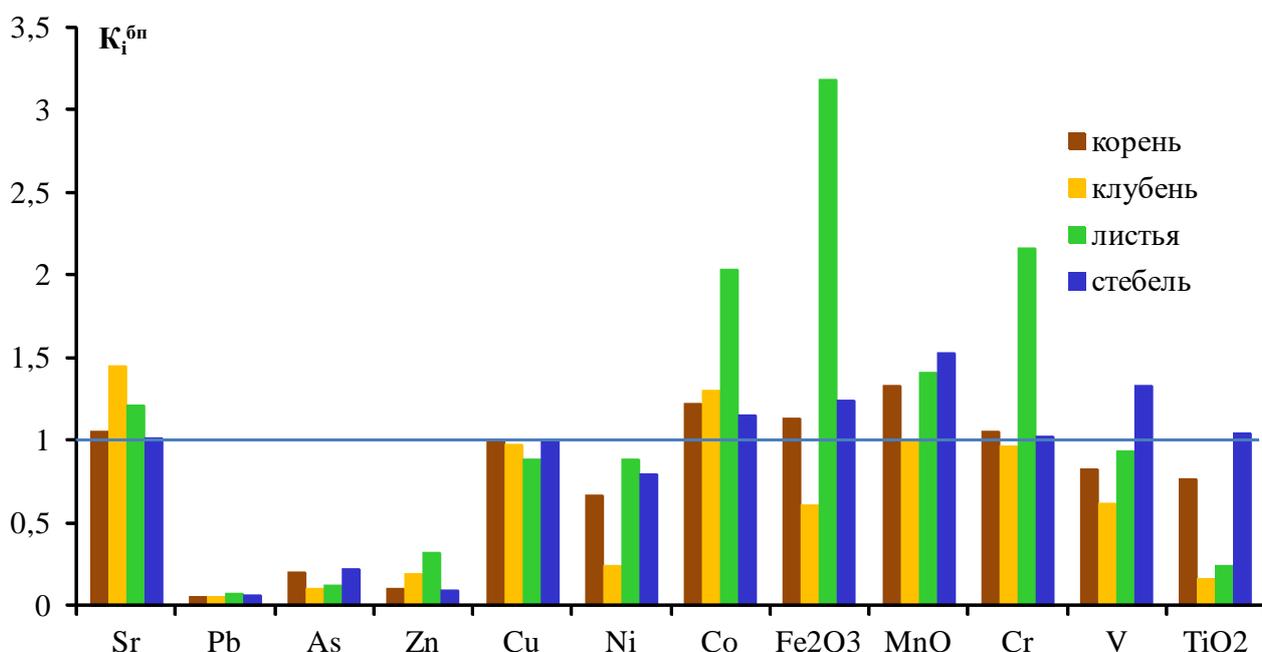


Рис. 4. Коэффициент биологического поглощения металлов, оксидов металлов, а также мышьяка различными частями растения топинамбура.

Анализ полученных данных показывает, что в листьях топинамбура содержание оксида железа, цинка хрома, никеля и кобальта больше чем в остальных частях. В стеблях больше оксида титана, оксида марганца, ванадия. В клубнях больше стронция. Меди меньше всего в листьях, чем в остальных частях растения, и она распределена равномерно, также как и в случае свинца.

В целом, значения коэффициента биологического поглощения ТМ различными частями топинамбура (рис. 4), свидетельствуют о высокой степени накопления в растении таких элементов, как Fe, Co, Cr, Mn, V и Sr, и о слабом захвате элементов Pb, As, Zn, Ni и Ti, при этом для меди значения коэффициента поглощения находятся вблизи единицы для всех частей растения топинамбура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты определения коэффициента биологического поглощения тяжелых металлов и мышьяка растением топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) в условиях Таджикистана, показывают, что установлена принципиальная возможность использования топинамбура в качестве растения-фиторемедианта для реабилитации почв, загрязненных ТМ. Следует отметить, что для реабилитации грунтов с высоким содержанием Fe, Co, Cr, Mn, V и Sr выращивание на них топинамбура, скорее всего, окажется целесообразным. В то же время в почвах с высоким содержанием Pb, As, Zn, Ni и Ti выращивание топинамбура с целью реабилитации почвы, загрязненной этими металлами, по-видимому, нецелесообразно.

В конечном итоге, предполагается утилизация топинамбура, поглотившего из почвы тяжелые металлы, с последующим использованием биомассы растения в качестве сырья для получения биотоплива – возобновляемого источника энергии.

Список литературы:

1. *Ghosh M., Singh S.P.* // Asian Journal of Energy and Environment. 2005. V. 6. No. 4. P. 214.
2. *Tangahu B.V., Abdullah S.R.S., Basri H. et al.* // International Journal of Chemical Engineering. 2011. V. 2011. Article ID 939161. DOI:10.1155/2011/939161.
3. *Киреева Н.А., Григориади А.С., Багаутдинов Ф.Я.* // Теоретические проблемы экологии. 2011. № 3. С. 4.
4. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Институт биологии КарНЦ РАН, 2014. 194 с.
5. *Григорьев А.А., Бородихин А.С., Руденко О.В., Сова Ю.А.* // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6.
6. *Кундас С.П., Гишкелюк И.А.* Перспективы применения методов компьютерного моделирования для анализа и прогнозирования миграции радионуклидов в окружающей среде - Чернобыль 20 лет спустя: Стратегия восстановления и устойчивого развития пострадавших регионов: материалы Междунар. конф., Минск, 19–21 апр. 2006. С. 82.
7. *Кундас С.П., Гишкелюк И.А.* // Экологический вестник. 2007. № 1. С. 62.
8. *Новик О.Б., Оста М.К., Хубларян М.Г.* Физ. и мат. моделирование в мелиорации. М.: Колос, 1978. С. 167.
9. *Де Фриз Ф.В.Т.П., ван Таар Х.Х.* Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 320с.
10. *Полужтков Р.А., Кумаков В.А., Василенко Г.В.* // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 1. С. 68.
11. http://www.topinambur.net/pitatelnaya_cennost/mineralniy_sostav.html (дата обращения 17.11.2018).
12. *Партноев К., Сайдалиев Н.Х.* // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12. С. 1676.
13. *Абдуллаев С.Ф., Абдурасулова Н.А., Назаров Б.И. и др.* // ДАН РТ. 2011. Т. 54. № 9. С. 746.
14. *Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Маслов В.А. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 03. С. 187.
15. *Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 03. С. 207.
16. *Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т.* // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 02. С. 143.
17. *Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т.* // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 03. С. 246.

References:

1. *Ghosh M., Singh S.P.* // Asian Journal of Energy and Environment. 2005. V. 6. No. 4. P. 214.
2. *Tangahu B.V., Abdullah S.R.S., Basri H. et al.* // International Journal of Chemical Engineering. 2011. V. 2011. Article ID 939161. DOI:10.1155/2011/939161.
3. *Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Bagautdinov F.Ya.* // Teoreticheskiye problem ekologii [Theoretical problems of ecology]. 2011. No. 3. P. 4 [in Russian].
4. *Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V.* Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Inst. Biologii KarNTs RAN, 2014. 194 p. [in Russian].
5. *Grigoriev A.A., Borodikhin A.S., Rudenko O.V., Sova Yu.A.* // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]. 2013. No. 6 [in Russian].
6. *Kundas S.P., Gishkelyuk I.A.* // Proceedings of International Conference Strategy of recovery and sustainable development of the affected regions, Minsk, April 19–21, 2006. P. 82 [in Russian].
7. *Kundas S.P., Gishkelyuk I.A.* // Ekologicheskii vestnik [Ecology bulletin]. 2007. No. 1. P. 62 [in Russian].

8. *Novik O.B., Osta M.K., Khublaryan M.G.* Physical and mathematical modeling in amelioration. Moscow; Kolos, 1978. P. 167 [in Russian].
9. *DeVries F.W.T.P., vanTaar H.H.* Simulation of plant growth and crop production. Wageningen: Centre for Agr. Publishing and Documentation, 1982.
10. *Poluektov R.A., Kumakov V.A., Vasilenko G.V.* // Fiziologiya rastenii [Plant physiology]. 1997. V. 44. No 1. P. 68 [in Russian].
11. http://www.topinambur.net/pitatelnaya_cennost/mineralniy_sostav.html (accessed 17.11.2018).
12. *Partoev K., Saidaliev N.Kh.* // Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundam. issledovaniy [International journal of applied and basic research]. 2016. No. 12. P. 1676 [in Russian].
13. *Abdullaev S.F., Abdurasulova N.A., Nazarov B.I. et al.* // Doklady akademii nauk respublik Tajikistan [Proceedings of Academy of Science of the Republic of Tajikistan]. 2011. V. 54. No. 9. P. 746 [in Russian].
14. *Abdullaev S.F., Nazarov B.I., Maslov V.A. et al.* // Optika atmosfery i okeana [Optics of atmosphere and ocean]. 2013. V. 26. No. 03. P. 187 [in Russian].
15. *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I. et al.* // Optika atmosfery i okeana [Optics of atmosphere and ocean]. 2014. V. 27. No. 03. P. 207 [in Russian].
16. *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I. et al.* // Optika atmosfery i okeana [Optics of atmosphere and ocean]. 2015. V. 28. No. 02. P. 143 [in Russian].
17. *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I. et al.* // Optika atmosfery i okeana [Optics of atmosphere and ocean]. 2015. V. 28. No. 03. P. 246 [in Russian].