

**Фиторемедиация как способ очищения почв,
загрязнённых тяжёлыми металлами**

© 2011. Н. А. Киреева¹, д.б.н., профессор, А. С. Григориади¹, к.б.н., ассистент,
Ф. Я. Багаутдинов², д.б.н., профессор,

¹Башкирский государственный университет,

²Башкирский государственный аграрный университет,

e-mail: vodop@yandex.ru, nysha111@yandex.ru

В работе представлен обзор литературных данных по изучению возможности применения метода фиторемедиации для восстановления и очищения почв, загрязнённых тяжёлыми металлами, а также процессов транслокации тяжёлых металлов из загрязнённой почвы в растения.

This paper presents a review of published data on the possibility of applying the method of phytoremediation for recovery and purification of soil contaminated with heavy metals, and the translocation processes of heavy metals from contaminated soil to plants.

Ключевые слова: почва, тяжёлые металлы, биологические методы очистки, растения-фиторемедианты

Key words: soil, heavy metals, biological methods of purification, plants-phytoremediants

В настоящее время в результате активной антропогенной деятельности происходит загрязнение окружающей среды значительным количеством разнообразных поллютантов. Наиболее опасными по токсичности и степени распространения загрязнения являются тяжёлые металлы. Металлы поступают в атмосферу в составе газов, дымов, а также техногенной пыли в результате деятельности предприятий цветной металлургии, машиностроения, химических, нефтедобывающих и нефтехимических предприятий и транспорта. В результате миграции тяжёлых металлов загрязняется почва, которая обладает способностью к их аккумуляции. Соли тяжёлых металлов (ТМ) – устойчивые к деградации соединения, поэтому проблема очистки почвы является острой задачей, особенно на территориях сельскохозяйственного назначения.

Для восстановления плодородия почвы, загрязнённой ТМ, на практике используют только две химические реакции (выщелачивание и перевод металла в трудноподвижную форму) [1]. Однако попытки рекультивации нарушенных почв только физико-химическими методами зачастую не дают желаемых результатов.

Особую роль в освобождении пахотного слоя почвы от токсикантов играет фиторемедиация, использующая объединённый ме-

таболический потенциал микроорганизмов и растений [2 – 6]. Применение биологических методов восстановления и очищения почвы обеспечивает как экологическую безопасность, так и экономическую выгоду [7]. В связи с этим весьма актуальным является изучение процессов восстановления загрязнённых почв с использованием различных растений-фиторемедиантов.

Технологии фиторемедиации более эффективны по сравнению с традиционными инженерными технологиями на стадии доочистки загрязнённых почв. При совершенствовании этого метода основное внимание уделяется отбору растений, способных трансформировать совместно с симбиотическими микроорганизмами токсичную часть поллютантов, переводя их в менее подвижную и активную форму.

На сегодняшний день выделяют несколько направлений фиторемедиационных мероприятий в зависимости от механизма воздействия на поллютант [4, 7 – 14]: фитоэкстракция (фитоаккумуляция), фитостабилизация, фитодеградация, фитоиспарение, фитостимуляция и ризодеградация.

Фитоэкстракция – поглощение, транслокация и аккумуляция загрязнителя в растении [15 – 17]. Для рекультивации окружающей среды этим методом применяют растения-гипераккумуляторы.

Фитостабилизация – перевод веществ из растворимой формы в нерастворимую в корневой зоне растений [12, 18 – 20].

Фитодеградация – «внутреннее» разрушение поллютантов растениями при участии растительных ферментов [15, 21 – 23].

Фитоиспарение – экстракция поллютанта из грунта и выделение его в газообразной форме [24 – 26].

Ризодеградация – разложение поллютантов микроорганизмами в прикорневой зоне растений [21, 27 – 28]. В процессе фиторемедиации направление ризодеградации является преимущественным при элиминации органических поллютантов из загрязнённой почвы [4, 30, 31]. Принцип этого механизма состоит в том, что разложение загрязняющих веществ производится не самим растением, а микроорганизмами, обитающими в непосредственной близости к его корням, т. е. в ризосфере [22]. Растения влияют на численность, разнообразие и активность микроорганизмов за счёт биологически активных корневых выделений [32, 33]. Микроорганизмы ризосферы более многочисленны, чем микроорганизмы почвы, лишённой растительности. Из-за более благоприятных условий обитания в ризосфере часто активнее развиваются и микроорганизмы, обладающие ферментами, необходимыми для деструкции поллютантов.

Фитомелиорация, как любой подход к восстановлению нарушенных земель, имеет свои ограничения. Растения способны выживать и давать необходимую биомассу и степень проективного покрытия лишь при относительно невысокой концентрации загрязнителя в почве. Полностью устойчивых к загрязнению видов растений нет. Можно говорить лишь о некотором пороге чувствительности растений к определённым концентрациям поллютанта.

При рекультивации загрязнённых почв большое значение имеет подбор видов растений, способных произрастать на таких землях. К растениям, используемым для фиторемедиации и ризодеградации нарушенных почв, предъявляют следующие требования [6, 34 – 36]:

- толерантность к высоким концентрациям поллютантов;
- способность поглощать и аккумулировать их в высоких концентрациях;
- способность к транспорту их из корневой системы в надземную утилизируемую биомассу;
- высокая скорость роста, достаточно крупные размеры;

- иметь большую биомассу и глубоко разрастающуюся корневую систему;

- иметь высокую сопротивляемость к болезням и вредителям;

- быть удобными для уборки и непривлекательными для животных.

Для повышения степени накопления ТМ в надземной биомассе растения следует применять эффекторы фитоэкстракции (ЭДТА, ДДДА, ДТПА и др.), которые за счёт образования прочных водорастворимых внутрикомплексных соединений с металлами будут повышать их подвижность в почве [10, 37 – 40].

Степень иммобилизации ТМ также зависит от типа удобрения, используемого для повышения плодородия загрязнённых почв. Так, на примере базилика (*Ocimum basilicum*) таиландские исследователи [41] показали, что в растениях, произрастающих на почвах, обработанных органическим удобрением в виде коровьего навоза, содержание кадмия удваивалось, в то время как внесение силикатных удобрений приводило к значительному снижению транспорта ионов металла из корней в надземную часть растения.

В настоящее время активно изучаются и выявляются виды растений, устойчивых к высокому содержанию ТМ в почве и способных к их аккумуляции (табл.). Минимальная аккумуляция металлов характерна для травянистых и древесных ксерофитов, средняя и максимальная – для мезофитов. Травянистые гигрофиты характеризуются максимальной аккумуляцией природных элементов, древесные – техногенных соединений [43 – 45]. В литературе имеются сведения, что наиболее устойчивыми растениями к повышенному содержанию ТМ в почве являются представители семейств крестоцветных, злаковых и бобовых [46, 47]. В свою очередь А. В. Линдиман с соавторами [48] выявил, что по устойчивости к загрязнению почвы свинцом исследуемые ими растения расположились следующим образом: овёс > горчица > горох > кресс-салат > рожь, а по устойчивости к загрязнению кадмием: горчица > кресс-салат > овёс > горох > рожь. Ими отмечалось, что аккумуляция кадмия была интенсивнее, чем свинца.

Польскими исследователями [49] проводилась оценка фиторемедиационного потенциала различных зерновых и овощных в условиях кадмиевого и свинцового загрязнения почвы: красная свёкла (*Beta vulgaris var. cicla* L.), тыква (*Cucurbita pepo* L.), цикорий (*Cichorium intybus var. foliosum* Hegi), фасоль обыкновенная (*Phaseolus vulgaris* L.), ячмень

(*Hordeum vulgare* L.), капуста белокочанная (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.), кукуруза (*Zea mays* L. convar. *saccharata* Koern.), люцерна (*Medicago sativa* L.) и пастернак посевной (*Pastinaca sativa* L.).

Максимальное содержание ТМ было найдено в листьях красной свёклы, тыквы, цикория, фасоли, капусты и пастернака. В то время как свёкла и пастернак оказались теми видами растений, которые способны к максимальному накоплению свинца в растительной массе [49], Н. Гад и Х. Кандил [50] изучили влияние загрязнения почвы кобальтом на содержание этого элемента в корнях и листьях. Ими показано, что в незначительных концентрациях кобальт стимулировал рост и увеличивал продуктивность растений, а также в надземных органах металл аккумулировался лучше, чем в корнях.

Имеются данные по изучению в качестве фиторемедиантов растений люцерны (*Brassica juncea* L.), подсолнечника (*Helianthus annuus* L.), сорго (*Sorghum bicolor* L.) [40, 51, 52], зелёных овощных культур – петрушки, укропа, салата листового [53, 54], среди злаков – ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), овса (*Avena sativa* L.), овсяницы (*Festuca pratensis* L.) [55, 56]. Перспективным видом для рекультивации грунтов среди многолетних злаковых растений может считаться вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* L.), который способен накапливать различные ТМ, особенно никель [57]. Также среди злаковых культур тайваньскими исследователями [58] была отмечена способность коричневого риса (*Oryza sativa* L.) аккумулировать кадмий и мышьяк из загрязнённых почв. Ещё одним гипераккумулятором кадмия является хрустальная травка (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) [59]. Около 50 представителей рода *Alyssum* наиболее часто рассматриваются в качестве потенциальных кандидатов для фитоэкстракции никеля из загрязнённых почв [60].

По данным ряда авторов [61 – 63], показана способность кукурузы (*Zea mays* L.) и подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) к гипераккумуляции ионов меди и никеля в условиях средней засоленности почвы (до 20 ПДК). При увеличении концентрации ТМ отмечался активный переход ионов металлов из корней в надземную растительную массу. А. С. Фёдоров [64] отмечал, что кукуруза и люцерна, произрастающие на территориях горно-обогатительных комбинатов, способны накапливать в своей биомассе медь и цинк, причём содержание металлов более чем в 1,5 раза превышало ПДК.

Большинство дикорастущих гипераккумуляторов относится к семейству крестоцветных [65]. По данным авторов [46, 66] горчица (*Brassica juncea* L.) оказалась весьма эффективным накопителем свинца, меди и никеля. К. Ахмедом с соавторами [37] было показано, что устойчивость разных видов горчицы может значительно варьировать. Ими доказано, что горчица сарептская (*Brassica juncea* L.) проявила большую устойчивость к кадмиевому загрязнению, чем горчица абиссинская (*Brassica carinata* L.), и соответственно может являться более эффективным фиторемедиантом загрязнённых почв с концентрацией кадмия до 40 мг/кг. Американские учёные из 11 исследуемых растений выделили вид декоративного растения семейства крестоцветных – иберис (*Iberis intermedia*) в качестве активного аккумулятора талия [67].

Хорошими фитоэкстрагентами ТМ из дикорастущих и сорных видов растений также являются одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris* L.) [68]. Свинец способен накапливать также известный сорняк амброзия (*Ambrosia* sp.) [46].

Швецом А. А. [69] установлена толерантность лисохвоста вздутого (*Alopecurus ventricosus* Pers.) и овсяницы тростниковидной (*Festuca arundinacea*) к аномально высоким концентрациям цинка, свинца и меди в почве. Надземная фитомасса козлятника восточного (*Galega orientalis* Lam.) возрастала при высоких концентрациях всех изучавшихся ТМ, в том числе и кадмия.

О механизме накопления растениями и переноса ТМ из корней в надземные части известно достаточно мало. Растения слабо усваивают многие ТМ даже при их высоком содержании в почве из-за того, что они находятся в виде малорастворимых соединений. Проблему удалось решить, когда обнаружили, что поступление ТМ в растения стимулируют вещества (например, этилендиаминтетрауксусная кислота), образующие с металлами в почвенном растворе устойчивые, но растворимые комплексы соединения [46].

Таким образом, в настоящее время вопрос об эффективном применении растений для очистки загрязнённой почвы остаётся открытым и требует значительных дополнительных исследований в области изучения механизмов превращения ТМ в растительном организме, а также поиска и исследования активных гипераккумуляторов различных металлов.

Список видов растений, эффективных для применения
в качестве фиторемедиантов загрязнённой ТМ почвы [9, 42]

Вид растения	Аккумулируемый химический элемент
<i>Alyssum sp.</i> Бурачок	Ni
<i>Amaranthus retroflexus</i> L. Щирица колосистая	¹³⁷ Cs
<i>Anthyllis vulneraria</i> L. Язвенник ранозаживляющий	Pb, Cd, Zn
<i>Armeria maritima</i> Willd. Армерия приморская	Pb, Cd, Zn
<i>Azolla pinnata</i> R.Br. Азолла перистая	Pb, Cu, Cd, Fe
<i>Brassica canola</i> L. Рапс	¹³⁷ Cs
<i>B. juncea</i> L. Горчица сарептская	Pb, Cd, Zn, Cu, Mn, Fe, Cr, Ni, Se
<i>Datura innoxia</i> Mill. Дурман индейский	Ba
<i>Eucalyptus sp.</i> Эвкалипт	Na, As
<i>Eichornia crassipes</i> (Mart.) Solms. Эйхорния отличная или красивейшая, водяной гиацинт	Pb, Cu, Cd, As, Cr, Ni, Se
<i>Festuca arundinaceae</i> Schreb. Овсяница тростниковая	Pb, Cd, Zn
<i>Helianthus annuus</i> L. Подсолнечник маслянистый	¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, U, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni
<i>Hordeum vulgare</i> L. Ячмень обыкновенный	As, Pb, Cd
<i>Hydrocotyle umbellata</i> L. Щитолистник зонтичный	Pb, Cu, Cd, Fe
<i>Kochia scoparia</i> L. Кохия, или летний кипарис	¹³⁷ Cs и др. радионуклиды
<i>Koeleria vallesiana</i> (Honck.) Bertol. Тонконог	Pb, Cd, Zn
<i>Lemna minor</i> L. Ряска маленькая	Pb, Cu, Cd, Fe, Hg
<i>Lolium multiflorum</i> L. Райграс многоцветковый	Pb
<i>Lupinus angustifolius</i> L. Люпин узколистный	As
<i>Phaseolus acutifolius</i> Gray. Фасоль остролистная	¹³⁷ Cs
<i>Pteris vittata</i> L. Птерис ленточный	As
<i>Secale cereale</i> L. Рожь посевная	As, Pb
<i>Zygophyllum fabago</i> L. Парнолистник обыкновенный	Pb, Zn, Cu

Литература

1. Давыдова С.Л., Тагасова В.И. Тяжёлые металлы как супертоксиканты XXI века. М.: Изд-во РУДН, 2002. 140 с.
2. Bizilli S.P., Rugh C.L., Meagher R.B. Phytodetoxification of hazardous organomercurials by genetically engineered plants // *Nat. Biotechnol.* 2000. № 18. P. 213–217.
3. Kramer U., Chardonnens A.N. The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated by trace elements // *Appl Microbiol Biotechnol.* 2001. № 55. P. 661–672.
4. Турковская О.В., Муратова А.Ю. Биодegradация органических поллютантов в корневой зоне растений // Молекулярные основы взаимоотношений ассоциированных микроорганизмов с растениями. М.: Наука, 2005. С. 180–208.
5. Суюндуков Я.Т., Миркин Б.М., Абдуллин Ш.Р., Хасанова Г.Р., Сальманова Э.Ф. Роль фитомелиорации в воспроизводстве плодородия чернозёмов Зауралья (Башкирия) // *Почвоведение.* 2007. № 10. С. 1217–1225.
6. Шестибратов К.А., Лебедев В.Г., Мирошников А.И. Лесная биотехнология: методы, технологии, перспективы // *Биотехнология.* 2008. № 5. С. 3–22.
7. Молотков И.В., Касьяненко В.А. Фиторемедиация // *НефтьГазПромышленность.* 2005. № 1 (13). С. 15–19.
8. Burken J.G., Shanks J.V., Thompson P.L. Phytoremediation and plant metabolism of explosives and nitroaromatic compounds // *Biodegradation of nitroaromatic compounds and explosives* / Eds. J.C. Spain, J.B. Hughes, H.J. Knackmuss. Washington, D.C. 2000. P. 239–275.
9. Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязнённых металлами // *Физиология растений.* 2003. Т. 50. № 5. С. 764–780.
10. Буравцев В.Н., Крылова Н.П. Современные технологические схемы фиторемедиации загрязнённых почв // *Сельскохозяйственная биология.* 2005. № 5. С. 67–74.
11. Квеситадзе Г. И., Хатисашвили Г. А., Садуншвили Т. А., Евстигнеева З.Г. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. М.: Наука, 2005. 199 с.
12. Киреева Н.А., Бакаева М.Д. Рекультивация нарушенных земель: Учеб. пособие. Уфа: РИО БашГУ, 2005. 208 с.
13. Peer W.A., Baxter I.R., Richards E.L., Freeman J.L., Murphy A.S. Phytoremediation and hyperaccumulator plants // *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. P. 299–340.
14. Peuke A., Rennenberg H. Tree transgenesis – recent developments / Eds. M. Fladung, D. Ewald. Heidelberg: Springer Publ., 2006. P. 137–155.
15. Pilon-Smits E.A., Pilon M. Phytoremediation // *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol.* 2005. № 56. P. 15–39.
16. Salt D.E., Smith R.D., Raskin I. Phytoremediation. // *Annu Rev. Plant Physiol. Plant Mol Biol.* 1998. № 49. P. 643–668.
17. Lombi E., Zhao F., McGrath S., Young S., Sacchi G. Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *Thlaspi caerulescens* ecotype // *New Phytol.* 2001. № 149. P. 53–60.
18. Ernst W.H. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants // *Appl Geochem.* 1996. № 11. P. 163–167.
19. Marseille F., Tiffreau C., Laboudigue A., Lecomte P. Impact of vegetation on the mobility and bioavailability of trace elements in a dredged sediment deposit: a greenhouse study // *Agronomy.* 2000. № 20. P. 547–556.
20. Bouwman L.A., Bloem J., Romkens P.F., Boon G.T., Vangronsveld J. Beneficial effects of the growth of metal tolerant grass on biological and chemical parameters in copper- and zinc-contaminated sandy soils // *Minerva Biotechnologica.* 2001. № 13. P. 19–26.
21. Schnoor J.E., Licht L.A., McCutcheon S.C., Wolfe N.L., Carreira E.H. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants // *Environ. Sci. Technol.* 1995. V. 29. № 7. P. 318–323.
22. McCutcheon S.C., Schnoor J.L. Overview of phytotransformation and control of wastes // *Phytoremediation: transformation and control of contaminants.* New York: John Wiley, 2003. P. 3–58.
23. Suresh B., Ravishankar G. Phytoremediation – A novel and promising approach for environmental cleanup // *Crit Rev Biotech.* 2004. № 24. P. 97–124.
24. Terry N., Zayed A., Pilon-Smits E., Hansen D. Can plants solve the selenium problem? // *In Proc. 14-th Annu. Symp. Columbia. Univ. Missouri.* 1995. P. 63–64.
25. Newman L., Strand S., Choe N., Duffy J., Ekuan G., Ruszaj M., Shurtleff B., Wilmoth J., Heilman P., Gordon M. Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars // *Environ Sci Tech.* 1997. № 31. P. 1062–1067.
26. Davis L.C., Vanderhoof S., Dana J., Selk K., Smith K., Goplen B., Erickson L.E. Movement of chlorinated solvents and other volatile organics through plants monitored by Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry // *J. Hazardous Subst. Research.* 1998. № 4. P. 4–26.
27. Anderson T.A., Guthrie E.A., Walton B.T. Bioremediation in the rhizosphere // *Environ. Sci. Technol.* 1993. V. 27. № 13. P. 2630–2636.
28. Kumar P.B.A.N., Motto H., Raskin I. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams // *Environ. Sci. Technol.* 1995. V. 29. P. 1239–1245.
29. Merkl N., Schultze-Kraft R., Infante C. Phytoremediation in the tropics – influence of heavy crude oil on

root morphological characteristics of graminoids // Environ. Pollut. 2005. V. 138. № 1. P. 86–91.

30. Gunter T., Dornberger U., Fritsche W. Effect of ryegrass on biodegradation of hydrocarbons in soil // Chemosphere. 1996 V. 33. P. 203–215.

31. Joner E.J., Corgie S.C., Amellal N., Leyval C. Nutritional constraints to degradation of PAN in a simulated rhizosphere // Soil Biol. Biochem. 2002. V. 34. № 6. P. 859–864.

32. Jones R., Sun W., Tang C.S., Robert F.M. Phytoremediation of petroleum hydrocarbons in tropical coastal soils. II. Microbial response to plant roots and contaminant // Environ. Sci. Pollut. Research. 2004. № 11. P. 340–346.

33. Kirk J., Klironomos J., Lee H., Trevors J.T. The effects of perennial ryegrass and alfalfa on microbial abundance and diversity in petroleum contaminated soil // Environ Pollut. 2005. № 133. P. 455–465.

34. Яковишина Т.Ф., Столярова К.Н., Яковенко О.А. Перспективы использования фиторемедиации на загрязнённых тяжёлыми металлами почвах урбанизированных территорий // «Экологические и метеорологические проблемы больших городов и промышленных зон»: Материалы Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург. 1999. С. 156–158.

35. Medina V.F., Marmiroli M., Dietz A.C., McCutcheon S.C. Plant tolerances to contaminants // Phytoremediation: transformation and control of contaminants. New York: John Wiley, 2003. P. 189–232.

36. Панченко Л.В., Муратова А.Ю., Турковская О.В., Малаховская Л.В. Естественная и экспериментальная фиторемедиация загрязнённой тяжёлыми металлами почвы с территории нефтеперерабатывающего завода // Вестник Оренбургского государственного университета. 2009. № 10. С. 585–589.

37. Ahmed K.S., Panwar B.S., Gupta S.P. Phytoremediation of cadmium-contaminated soil by Brassica species // Acta agronomica hungarica. 2001. V. 49. № 4. P. 351–360.

38. Puschenreiter M., Stroger G., Lombi E. et al. Phytoextraction of heavy metal contaminated soils with *Thlaspi goesingense* and *Amaranthus hybridus*: rhizosphere manipulation using EDTA and ammonium sulfate // J. Plant nutrition Soil Sci. 2001. V. 164. P. 615–621.

39. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Фитоэкстракция тяжёлых металлов из загрязнённых почв // Агрохимия. 2003. № 3. С. 77–85.

40. Яковишина Т.Ф. Детоксикация загрязнённых тяжёлыми металлами чернозёмов обыкновенных северной степи Украины: Дис. ... канд. с.-х. наук. Днепрпетровск. 2006. 226 с.

41. Putwattana N., Kruatrachueb M., Pokethitiyooka P., Chaiyarat R. Immobilization of cadmium in soil by cow manure and silicate fertilizer, and reduced accumulation of cadmium in sweet basil (*Ocimum basilicum*) // ScienceAsia. 2010. V. 36. № 4. P. 349–354.

42. Prabha K. Padmavathiamma, Loretta Y. Li Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants // Water Air Soil Pollut. 2007. V. 184. P. 105–126.

43. Cunningham S.D., Ow D.W. Promises and prospects of phytoremediation. // Plant Physiology. 1996. V. 110. № 3. P. 715–719.

44. Прохорова Н.В., Матвеев Н.М., Павловский В.А. Аккумуляция тяжёлых металлов дикорастущими и культурными растениями в степном Поволжье. Самара: Изд-во СамГУ, 1998. 131 с.

45. Salt D.E., Blaylock M., Kumar N.P. et al. Phytoremediation: a novel strategy for removal of toxic metals from environment using plant // Biotechnology. 1995. V. 13. P. 468–474.

46. Душенков В., Раскин И. Фиторемедиация: зелёная революция в экологии // Химия и жизнь – XXI век. 1999. №11–12. www.chem.msu.ru/rus/journals/chemlife/fito.html.

47. Prasad M.N.V., Freitas H. Biotechnological and bioremediation strategies for serpentine soils and mine spoils // Electron. J. Biotechnol. 1999. V. 2. № 1. P. 35–50.

48. Линдиман А.В., Шведова Л.В., Тукумова Н.В., Невский А.В. Фиторемедиация почв, содержащих тяжёлые металлы // Экология и промышленность. 2008. № 9. С. 45–47.

49. Sekara A., Poniedzialek M., Ciura J., Jedrzczyk E. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: implications for phytoremediation // Polish Journal of Environmental Studies. 2005. V. 14. № 4. P. 509–516.

50. Gad N., Kandil H. The influence of cobalt on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) production // International Journal of Academic Research. 2009. V. 1. № 2. P. 52–58.

51. Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J.L., Delarosa G., Gonzales J. H., Parsons J. G., Herrera I. Effects of the growth stage on the tolerance to heavy metals in alfalfa plants (*Medicago sativa*) // Adv. Environ. Res. 2004. V. 8. № 3–4. P. 679–685.

52. Ciura J., Poniedzialek M., Sekara A., Jedrzczyk E. The possibility of using crops as metal phytoremediants // Pol. J. Environ. Stud. 2005. V. 14. № 1. P. 17–22.

53. Плеханова И.О., Кутукова Ю.Д., Обухов А.И. Накопление тяжёлых металлов сельскохозяйственными растениями при внесении осадков сточных вод // Почвоведение. 1992. № 12. С. 1530–1536.

54. Чеснокова Т.А., Шведова Л.В., Терехова А.С., Невский А.В. Влияние природы солей меди на её миграционные свойства в системе почва – растение // Экология и промышленность России. 2010. № 12. С. 34–36.

55. Tlustos P., Balik J., Pavlikova D., Szakova J. The uptake of cadmium, zinc, arsenic and lead by chosen crops // Rostlinna Vyroba. 1997. V. 43. № 10. P. 365–370.

56. Наумова Р.П., Кудряшов В.Н., Григорьева Т.В., Гафуров Р.Р., Мухаметшин И.Р., Хузяянов Р.Х., Несмелов А.А. Предварительная оценка потенциала фитореме-

диации твёрдых химических отходов // Учёные записки Казанского государственного университета. Естественные науки. 2008. Т. 150. Кн. 2. С. 156–165.

57. Маджугина Ю.Г., Кузнецов Вл.В., Шевякова Н.И. Растения полигонов захоронения бытовых отходов мегаполисов как перспективные виды для фиторемедиации // Физиология растений. 2008. Т. 55. № 3. С. 453–463.

58. Hung-Yu Lai, Shaw-Wei Su, Horng-Yuh Guo, Zueng-Sang Chen Phytoremediation and the uptake characteristics of different rice varieties growing in Cd of As-contaminated soils in Taiwan // Soil Science and Plant Nutrition. 2010. V. 56. Issue 1. P. 31–52.

59. Шевякова Н.И., Нетронина И.А., Аронова Е.Е., Кузнецов Вл.В. Распределение Cd и Fe в растениях *Mesembryanthemum crystallinum* при адаптации к Cd-стрессу // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 5. С. 756–763.

60. Brooks R.R. Plant that hyperaccumulate heavy metals (their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining). Wallingford: CAB International, 1998. 380 p.

61. Vassilev A. Metal phytoextraction: state of art and perspectives // Bulgarian J. of Agr. Sci. 2002. V. 8. P. 125–140.

62. Писаренко Е.Н. Использование подсолнечника в качестве ремедианта загрязнённых почв // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. С. 38–40.

63. Писаренко Е.Н., Рогачева С.М., Губина Т.И. Фиторемедиация среднесолённых земель, загрязнённых никелем и медью // Экологические проблемы промышленных городов. Саратов: СГТУ, 2007. С. 236–239.

64. Фёдоров А.С. Устойчивость почв к антропогенным воздействиям. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2008. 204 с.

65. Baker A. J.M., Reeves R.D., Mcgrath S. P. In situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal accumulating plants // «In situ bioremediation», eds. by Hinchee R. E. and Olfenbittel R. E. – Stoneham, Butterworth-Heinemann, 1991. P. 539–544.

66. Петров Н.Ю., Трофимова Т.А. Фиторемедиация техногенно загрязнённых тяжёлыми металлами светлокаштановых почв южной пригородной агропромзоны г. Волгограда с помощью горчицы сарептской // Аграрный вестник Урала. 2009. № 9 (63). С. 64–65.

67. LaCoste C., Robinson B., Brooks R. Uptake of tallium by vegetables: its significance for human health, phytoremediation and phytomonitoring // J. Plant Nutrition. 2001. V. 24. № 8. P. 1205–1215.

68. Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. Аккумуляция тяжёлых металлов некоторыми высшими растениями в разных условиях местообитания // Агрохимия. 2002. № 9. С. 66–71.

69. Швец А. А. Фиторемедиация загрязнённых почв // <http://shmain.ru/nauchnye-stati/fitoremediaciya-pochv.html>

УДК 574:330.15+502.3

Проблемы становления современной теории экологического ущерба

© 2011. О. Я. Глибко, к.б.н., с.н.с.,

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,
e-mail: oягли@mail.ru

Проведено изучение научной категории экологического ущерба в связи с проблемой её определения и интеграции в современной науке. Рассмотрена история вопроса, современные подходы к определению понятия ущерба, вреда и убытков окружающей среде, принципы, способы и методы оценки экологического ущерба.

The scientific category of environmental damage was studied in connection with the problem of its definition and integration in modern science. The history of the issue, current approaches to the definition of damage, harm or loss to the environment, principles, techniques and methods for assessing environmental damage are considered.

Ключевые слова: экологический ущерб, экономический ущерб, природные ресурсы

Key words: environmental damage, economical damage, natural resources

Ущерб – экономическая категория, которая вошла в экологическую науку относительно недавно и оказалась крайне востребованной. Однако при несомненном практическом

значении работ, связанных с оценкой ущерба, причиняемых человеком объектам природы, нельзя не отметить их достаточно слабую теоретическую основу. Концепция экологиче-