

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140619>  
 УДК 502.51(282)(477.73)  
 Т 76

## ANALYSIS OF POSSIBILITY OF PHYTOTECNOLOGIES USAGE FOR CLEANING OF INGULETS WATER SYSTEM FROM HEAVY METALS

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФИТОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ Р. ИНГУЛЕЦ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

**Hanna H. Trokhymenko**  
[ganna.trokhymenko@nuos.edu.ua](mailto:ganna.trokhymenko@nuos.edu.ua)  
 ORCID: 0000-0002-0835-3551  
**Nina V. Tsyhaniuk**  
[nina.tsyhaniuk@nuos.edu.ua](mailto:nina.tsyhaniuk@nuos.edu.ua)  
 ORCID: 0000-0003-4013-8875

**А. Г. Трохименко,**  
 канд. биол. наук, доц.;  
**Н. В. Цыганюк,**  
 асп.

**Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** The possibility of the phytotechnologies implementation and usage for the water bodies cleaning from chemical pollutants has been considered in the article. The aim of the work is to study the phytocenosis of the Ingulets River for its implementation in the phytotechnology during the water body cleaning. The main idea of the suggested technology is to use the natural elements of the river protection which use solar energy for their functioning and do not need any maintenance. The samples of water, algae, benthal deposits and fish are experimentally tested for the heavy metals. The types of algae for planting into the bioplato are defined. With the method of the native macrophytes species comparison, it was determined that the microelement concentration in the water forms the descensive series: Pb > Mn > Ni > Cu. Plumbum is a dominant toxicant; compared to the stabilization period, its concentration increased by 8–9 times with the industrial water disposal. The model laboratory system of the bioplato with the estimated number of the selected plants is to be created to study their systemic capability. The accumulation and distribution of heavy metals depending on the river flow, its depth and the characteristics of its channel needs to be studied too.

**Keywords:** heavy metals; algae; phytotechnologies; Ingulets River.

**Аннотация.** Представлены данные о возможности внедрения фитотехнологии для очистки водоема от химических загрязнителей. Приведена сравнительная характеристика местных видов макрофитов для использования их при очистке водоема.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы; водоросли; фитотехнологии; река Ингулец.

**Анотація.** Наведено дані про можливість упровадження фітотехнології для очистки водойми від хімічних забруднювачів. Подано порівняльну характеристику місцевих видів макрофітів для використання їх при очищенні водойми.

**Ключові слова:** важкі метали; водорості; фітотехнології; річка Ингулець.

#### REFERENCES

- [1] Dmitrieva A.G., Kozhanov O.N., Dronina, N.L. *Fiziologiya rastitelnykh organizmov i metallov* [Physiology of plant bodies and metals]. Moscow, MGU Publ., 2002. 159 p.
- [2] Dubyna D.V., Shelyag-Sosonko Yu.R. *Makrofity – indicatori izmeneniy prirodnoy sredy* [Macrophytes as indicators of environmental changes]. Kiev, 1993. 315 p.
- [3] Inzhenerno-virobnyche pidpriemstvo «Energoochystka» (Collection of works of the Engineering and production enterprise «Enerhoochystka»), 2011. Available at: <http://www.slideshare.net/pasik15/ss-12684547> (accessed 15 April 2012).
- [4] Kopnina A. Yu. *Fitoremediatsiya vody* [Water phytoremediation]. Samara, Informatsionno-izdatelskaya sluzhba Uchebnogo Tsentra ekologii i bezopasnosti zhyznedeyatelnosti Publ., 2012. 56 p.
- [5] Korelyakov I.L. *Rastitelnost Kremenchugskogo vodokhranilishcha* [Vegetation of the Kremenchug reservoir]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1977. 200 p.
- [6] Korsak N.B. Vliyanie zarosley vysshikh vodnykh rasteniy na gidrokhimicheskiy rezhim Tudzinskogo vodokhranilishcha [Influence of the higher aquatic plants thickets on the Tudzinskiy reservoir with hydrochemical regime]. *Gidrobiologicheskii zhurnal – Hydrobiological journal*, 1981, Vol. 17, no. 4, pp. 20.

- [7] Oksiyuk O.P., Stolberg F.V. *Upravlenie kachestvom vody v kanalah* [Canals water quality management]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1988. 230 p.
- [8] Trokhymenko H.H. Vyznachennia priorytetnykh metaliv-zabrudnykiv u poverkhnevnykh vodakh r. Inhulets [Determination of the dominant metals in the waters surface of the Ingulets river]. *Materialy VIII mizh nar. nauk.-tekh. konf. «Problemy ekologii ta energozberezhennya v sudnobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats VIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistiv (15.09-16.09.2013)»* [Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference of young scientists and specialists «Energy efficiency and environmental issues in shipbuilding»]. Mykolaiv, 2013, pp. 32–33.
- [9] *UNEP Standard. Phytotechnology and Ecotechnology. Manual for designing, Constructing and operation.* Brussels, 2000. 370 p.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема очистки стоков промышленных и сельскохозяйственных предприятий, бытовых стоков малых населенных пунктов и культурно-оздоровительных зон является весьма актуальной. Традиционно применяемые технологии очистки коммунальных, промышленных и животноводческих стоков предусматривают механическое разделение загрязненных вод и искусственную биологическую очистку их жидкой фракции.

Недоочищенные после аэротенков и совсем неочищенные стоки вносят в водоемы и подземные воды органические вещества, соединения фосфора, азота, серы, тяжелых металлов и другие компоненты, в концентрациях, опасных для водных экосистем и здоровья человека.

Существующие схемы очистки сточных вод, как правило, не вполне соответствуют необходимым требованиям. Основным недостатком распространенных технологий очистки промышленных, хозяйственных, животноводческих и птицеводческих стоков является низкая экономическая эффективность, обусловленная, в первую очередь, энергоемкостью оборудования. Наиболее распространенным способом доочистки поверхностных стоков является выдерживание их в биологических прудах-отстойниках, в которых концентрация загрязнителей в течение того или иного периода времени снижается до требуемых норм за счет естественного процесса самоочищения, который осуществляется микроорганизмами, водорослями, беспозвоночными организмами и высшими водными растениями (ВВР) [10].

Размещение ВВР в бассейнах стабилизации и инфильтрации плавающими растениями позволяет интенсифицировать технологию очистки сточной воды в течение всего года независимо от температуры окружающего воздуха. Вегетативные процессы в зимнее время незначительно снижаются, а корневища ВВР не погибают, так как температура воды в бассейнах стабилизации не опускается ниже +4 °С [2]. Таким образом, наиболее рациональными способами очистки сточных вод являются биологи-

ческие, с применением фитотехнологий, т. е. методов очистки сточных вод, основанных на использовании процессов природной самоочистки водных объектов, с использованием высшей водной растительности, водной микрофлоры и микроорганизмов.

Роль природных биофильтров могут выполнять заросли макрофитов прибрежных участков рек, вблизи устьев, больших мелководных зон озер и водохранилищ. Высшая водная растительность является важнейшим компонентом, который определяет формирование всего биотопа в целом [2].

Макрофиты накапливают в своих тканях тяжелые металлы, тем самым снижают их концентрацию в воде, что является решением проблемы очистки русла реки Ингулец от данных загрязнителей.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ мирового опыта применения биоплата в целях очистки сточных и проточных вод проводился в контексте перспектив использования таких систем в Придунайском регионе Украины и Среднего Поволжья в районе города Тольятти (Россия).

Вместе с поверхностным стоком в водоемы попадает огромное количество взвешенных и слаборастворимых органических и неорганических веществ, которые могут существенно изменить направленность происходящих внутри водоемов процессов (дыхание, фотосинтез и др.). Поэтому заросли макрофитов, в первую очередь погруженных [5], выполняют роль механических фильтров, изменяющих гидродинамический режим мелководий, и обеспечивают осаждение взвешенных в воде веществ минерального и органического происхождения, вследствие чего прозрачность воды резко улучшается [3].

В табл. 1 приведены данные об использовании различных технологических комбинаций растений и водорослей для обезвреживания загрязнений в водной и грунтовой средах.

Таблиця 1. Методи очистки загрязненных вод и почв с использованием высших растений и водорослей

Метод	Среда	Загрязнение
Биопруды	Загрязненная вода	Различные органические загрязнения, биогенные элементы
Гидрботанические площадки, искусственные болота	Загрязненная вода	Различные органические загрязнения, металлы, биогенные элементы, минеральные взвешенные вещества, илистые наносы, которые поступают с поверхностным смывом и дождевыми стоками
Фитоэкстракция	Почва, донные отложения	Металлы, радионуклиды
Фитодезактивация	Почва, донные отложения, загрязненная вода	Радионуклиды
Фитотрансформация	Почва, донные отложения	Органические ксенобиотики, иногда металлы
Фитодеградация	Почва, донные отложения	Органические ксенобиотики
Фитоиспарение	Почва, донные отложения	Металлы, органические загрязнения

Наиболее токсичными загрязнителями водоемов являются тяжелые металлы, которые могут быть перенесены вместе с воздушными и водными массами на большие расстояния. Тяжелые металлы представляют чрезвычайную опасность как загрязнители природных вод. Даже в сравнительно малых концентрациях они могут негативно влиять на водные организмы.

Биологические последствия загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами проявляются прежде всего в прямом токсическом действии на гидробионты, что приводит к поражению их физиологических систем и к массовой гибели организмов. Кроме того, отмечается нарушение первичной продукции и трофических связей, а также равновесия между авто- и гетеротрофными организмами, что приводит к нарушению биологического круговорота и дестабилизации водных экосистем [1].

В бассейне реки Ингулец расположены предприятия горнорудной промышленности. Учитывая высокую территориальную концентрацию и особенности производства, именно их работу можно считать оказывающей общее загрязнение среды. Так, в хвостохранилище, расположенном в бассейне реки Ингулец и на расстоянии до 2 км от ее притока – реки Желтой, ежегодно сбрасывалось более 1 млн т отходов. Значительную часть загрязняющих веществ составляют тяжелые металлы.

В реки и водоемы Кривого Рога за год в среднем поступает более 200 млрд м<sup>3</sup> неочищенных или недостаточно очищенных технологических сточных, фильтрационных и шахтных вод. В составе сточных вод содержатся соли тяжелых металлов, концентрация которых может превышать предельно допустимый уровень в 2–10 раз.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – изучение фитоценоза реки Ингулец для внедрения в фитотехнологию при очистке водоема.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1) подбор методики анализа состава воды по основным загрязняющим металлам;

2) определение видов высших водных растений для очистки водного объекта;

3) изучение русла реки Ингулец.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В отличие от органических поллютантов, металлы не подвергаются деструкции, постепенно накапливаются в водных экосистемах и перераспределяются между отдельными видами организмов и неорганическими составляющими водоемов. Динамика миграционной подвижности металлов определяется главным образом их физико-химическими свойствами и активностью процессов круговорота веществ.

Важным и необходимым является исследование влияния тяжелых металлов на уровне биоценозов и экосистем, а также применение соответствующих мер для очистки от загрязнений, поскольку избыточные дозы тяжелых металлов типа Cd (II), Cr (VI), Cu (II), Ni (II) и Zn (II) разрушают естественные водные и наземные экосистемы [1].

Одним из видов самоочищения водоемов, как указывалось выше, является поглощение и накопление водной растительностью химических веществ (фитотехнологии), в том числе и тяжелых металлов.

Фитоценоз (от греч. *phyton* – растение и *koinos* – общий) – растительное сообщество, совокупность популяций растений, приуроченных к относительно однородному участку земной поверхности. Следует отметить, что буферная емкость поверхностных вод по отношению к металлам-токсикантам определяется не только наличием растворенного органического вещества и суспензий, но и аккумулирующей способностью гидробионтов, а также кинетикой поглощения ионов металлов всеми компонентами экосистемы, включая комплексообразование с растворенными органическими веществами. Все это говорит о сложности процессов, протекающих в поверхностных водах при попадании в них металлов-загрязнителей [2].

Ученые Украинского центра фитотехнологий для выявления и ликвидации тяжелых металлов из водной среды рек предлагают вертикальную систему (рис. 1).

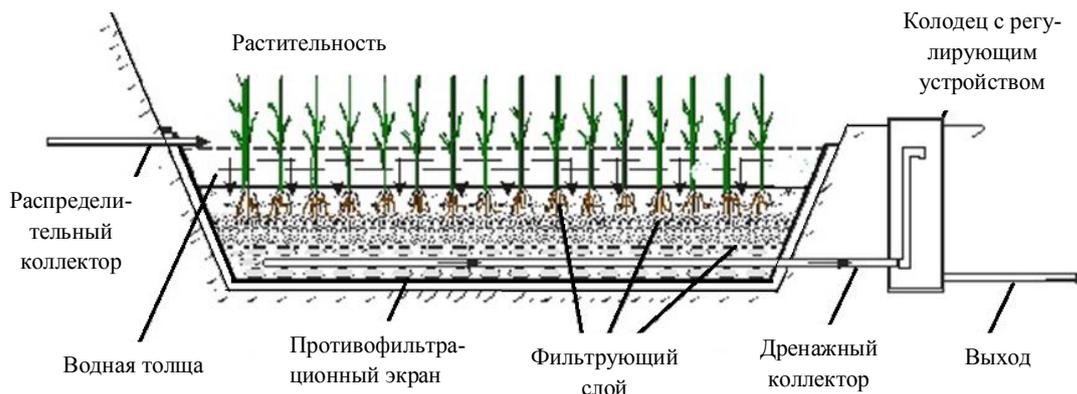


Рис. 1. Схема биоплато [3]

Основная идея предлагаемой технологии заключается в использовании природных элементов защиты рек от загрязнения и для очистки воды, которые функционируют благодаря солнечной энергии и не требуют обслуживания. К таким элементам относится, в первую очередь, высшая водная растительность – камыш, рогоз, аир и др.

Процесс очистки вод проходит следующим образом. Из основного пруда (который нужно очистить) в биоплато с помощью насоса поступает вода с придонными отложениями. Принося с собой большое количество органики, она очищается механическим гравием, медленно протекает через корневую систему растений, насыщается кислородом, при этом полностью удаляются азот, кальций, магний и другие элементы, а также пестициды, фенолы и патогенная микрофлора. Затем самотеком вода поступает во вспомогательный пруд (собственно биоплато

со специальными растениями и организмами). Это доказывает, что многофункциональная роль высших водных растений препятствует попаданию загрязняющих веществ в воду и способствует их выведению.

Строительство сооружений для фитоочистки чрезвычайно простое, осуществляется из местных материалов и не требует ни квалифицированной рабочей силы, ни специальных механизмов, ни дорогих материалов и приспособлений [4, 9], а высшая водная растительность (табл. 2) и есть тот самый природный элемент защиты от загрязнения.

Для посадки на поверхности биоплато используются местные виды макрофитов. К таким видам принадлежат, в первую очередь, тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), рогоз широколистный (*Typha latifolia*), камыш лесной (*Scirpus sylvaticus*), некоторые виды осоки (*Carex* spp.).

Таблица 2. Способность высшей водной растительности к накоплению химических элементов

Растительность	Соотношение химических элементов, %							
	N	P	K	Mg	Na	Cl	Fe	Mn
Тростник обыкновенный ( <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin)	2,17	0,85	1,70	0,10	0,14	1,36	0,005	0,020
Камыш узколистный ( <i>Typha angustifolia</i> L)	2,52	0,41	1,79	0,15	0,51	1,20	0,100	0,060
Камыш озерный ( <i>Scirpus palustris</i> L)	2,34	0,39	2,35	0,12	0,40	1,56	0,006	0,030
Сусак зонтичный ( <i>Butomus umbellatus</i> )	2,66	0,40	4,36	0,12	0,43	1,17	0,030	0,090

Как показал опыт, при доминирующей роли тростника узколистного, тростника обыкновенного и рогоза в составе искусственного фитоценоза на блоках биоплато может использоваться все разнообразие макрофитов, которые попали в блок с растительным слоем. Это позволяет создавать структуру растительных сообществ. На фильтрационных блоках наиболее целесообразно создание сообществ макрофитов одного или двух видов, причем в начале блока целесообразно высаживать тростник.

Некоторые из видов макрофитов, указанных в табл. 2, являются доминирующими в экосистеме р. Ингулец, а именно тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), рогоз широколистный (*Typha latifolia*), камыш лесной (*Scirpus sylvaticus*), некоторые виды осоки (*Carex* spp.).

Это лишь один фактор, который подчеркивает целесообразность применения фитотехнологий для очистки данного водоема. Макрофиты накапливают тяжелые металлы в своих тканях и органах, обеспечи-

вая этим выведение химических элементов из круговорота в водоеме в течение почти всего вегетационного периода [2].

Таким образом, наличие в воде водорослей (нитчатых, хордовых и др.) повышает эффективность очистки воды. Достижение проектных параметров очистки сточных вод следует ожидать после формирования на блоках комплекса зрелых зарослей высшей водной растительности.

В предыдущих исследованиях авторов было установлено, что в реке Ингулец доминирующими отделами являются следующие виды водорослей:

1) Cyanophyta: *Microcystis eruginosa* Kutz; *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs;

2) Pyrophyta: *Ceratium hirundinella* O.F.M.;

3) Chrysophyta: *Chrysococcus rufescens*; *Stenokalix monilifera*;

4) Bacillariophyta: *Melosiragranulata* Ralfs; *N. Gracilis* Hantzsch; *Synedraacus* Kutz.; *S. Ulna* Ehr.; *Asterionella gracillima* Grun. Heib.; *N. gracilis* Ehr.; *Gomphonema acuminatum* Ehr.; *Rhoicosphenia curvata* Kutz.; *Surirellalinear* Greg.;

5) Chlorophyta: *Chlamydomona srenihardii* Dang; *Scenedesmus quadricauda* Breb; *A. Pseudomirabilis* Korschik; *Coelastrum microporum* Naeg.; *Pediastrum duplex* Meyen.

За летний период 2012 года лабораторным методом и методом атомной абсорбции были определены концентрации тяжелых металлов в пробах воды, водорослей и гидробионтов по точкам пробоотбора (от с. Снигиревка и до с. Александровка). Установлено, что концентрации микроэлементов в воде образуют нисходящий ряд:  $Pb > Mn > Ni > Cu$  [8]. Как видно, приоритетным токсикантом является свинец. Его концентрация в воде во время сбросов промышленных вод возросла по сравнению со стабилизационным периодом в 8–9 раз. Однако, как показали исследования, значительная часть свинца находилась в форме комплексных соединений с органическими веществами, что снижает токсическое действие на ихтиофауну водоемов.

По результатам исследований [5, 9], различные микроэлементы имеют неодинаковую способность к аккумуляции водными растениями, т. е. разный коэффициент биологического накопления (для свободноплавающих растений, например: для марганца – 9000, железа – 1700, цинка – 1160, меди – 414, хрома – 210).

Анализируя биотическую компоненту речной экосистемы, можно заметить, что заросли высшей водной растительности развиваются на берегах реки, главным образом в местах балочных выходов, из которых в реку стекает загрязненный поверхностный сток с водосборной площади. В прудах, озерах и водохранилищах ВВР интенсивно развиваются на наиболее загрязненных участках водной акватории [7]. Итак, высшая водная растительность и водоросли, характерные для исследуемого биогеоценоза, могут быть использованы для создания биоплато для очистки р. Ингулец от тяжелых металлов.

Посадка растений может осуществляться с помощью корнево-почвенной массы, которая выкапывается механизированным способом на береговых участках прилегающего водного объекта, транспортируется к месту укладки и распределяется на подготовленной поверхности создаваемого сооружения.

Таким образом, проанализировав состояние гидроэкосистемы и виды высшей водной растительности, можно перейти к моделированию процесса очистки в лабораторных условиях и расчету общих характеристик выбранной фитотехнологии с учетом географических, гидрологических и геохимических показателей р. Ингулец.

## ВЫВОДЫ

1. В результате изучения фитоценоза реки Ингулец было определено, что для разработки и внедрения фитотехнологии очистки гидроэкосистемы реки целесообразно использовать камыш обычный и тростник обыкновенный. Это объясняется особенностями русла и течения реки, климато-географическими показателями местности и биохимическими отличиями растений-поглотителей. Наличие представленных видов растений в данном регионе исследования вместе с адаптированной микрофлорой позволяет создать структуру растительных сообществ, что значительно улучшает очистку водных объектов от тяжелых металлов.

2. В дальнейшем планируется создание модельной лабораторной системы биоплато с расчетным количеством выбранных растений для изучения их системной способности к накоплению токсикантов, а также исследование степени накопления и распространения тяжелых металлов в зависимости от течения реки, ее глубины и гидрологических характеристик русла.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дмитриева, А. Г. Физиология растительных организмов и металлов [Текст] / А. Г. Дмитриева, О. Н. Кожанова, Н. Л. Дронина. – М. : МГУ, 2002. – 159 с.
- [2] Дубина, Д. В. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды [Текст] / Д. В. Дубина, Ю. Р. Шеляг-Сосонко. – К., 1993. – 315 с.
- [3] Інженерно-виробниче підприємство «Енергоочистка» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.slideshare.net/pasik15/ss-12684547>.

- [4] **Копнина, А. Ю.** Фиторемедиация воды [Текст] : метод. пособие для студентов профильных специальностей / А. Ю. Копнина. – Самара : Информ.-издат. служба учебного центра экологии и безопасности жизнедеятельности, 2012. – 56 с.
- [5] **Корелякова, И. Л.** Растительность Кременчугского водохранилища [Текст] / И. Л. Корелякова. – К. : Наук. думка, 1977. – 200 с.
- [6] **Корсак, Н. Б.** Влияние зарослей высших водных растений на гидрохимический режим Тудзинского водохранилища [Текст] / Н. Б. Корсак // Гидробиологический журнал. – 1981. – Т. 17, № 4. – 20 с.
- [7] **Оксинок, О. П.** Управление качеством воды в каналах [Текст] / О. П. Оксинок, Ф. В. Стольберг. – К. : Наук. думка, 1988. – 230 с.
- [8] **Трохименко, Г. Г.** Визначення пріоритетних металів-забрудників у поверхневих водах р. Інгулець [Текст] / Г. Г. Трохименко // VIII Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні». – 2013.
- [9] UNEP Standard. Phytotechnology and Ecotechnology. Manual for designing, Constructing and operation [Text]. – Brussels, 2000. – 370 p.

---

© Г. Г. Трохименко, Н. В. Циганюк

Надійшла до редколегії 15.09.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *М. І. Радченко*