

Разработка и оптимизация способа биологической очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в условиях Арктики

© 2019. Л. А. Иванова², д. б. н., в. н. с., В. А. Мязин^{1,3}, к. б. н., с. н. с., М. В. Корнейкова¹, к. б. н., с. н. с., Н. В. Фокина¹, к. б. н., с. н. с., В. В. Редкина¹, к. б. н., ведущий инженер, Г. А. Евдокимова¹, д. б. н.,

¹Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», 184209, Россия, г. Апатиты, Академгородок, 14 а,

²Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН, 184209, Россия, г. Апатиты, Академгородок, 18 а,

³Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 197110, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18, e-mail: myazinv@mail.ru

Представлена новая концепция биоремедиации антропогенных водных объектов, а также очистки сточных карьерных вод методом фитоэкстракции и фитотрансформации в арктических условиях, основанная на технологии преобразования техногенных водоёмов в природоподобные болотные экосистемы. Технология базируется на создании фитоматов, позволяющих в ускоренном режиме формировать растительные блоки трёх разных типов: для задержания песчано-гравийных участков (откосы фильтрационных дамб и др.), для создания растительных сообществ на мелководных участках водоёмов и для создания сообществ на глубоководных участках. При формировании фитоматов используются два субстрата-почвозаменителя и регионально-оптимизированный ассортимент из 24 видов растений. Определение содержания нитрат-ионов в некоторых растениях биоценоза (*Comarum palustre* L., *Eryophorum angustifolium* Honck., *Salix phylicifolia* L.) показало их преимущественное накопление в корнях. Предлагаемый подход к формированию природоподобных болотных экосистем для очистки сточных карьерных вод впервые осуществлён в практике действующих горнорудных предприятий в экстремальных условиях Субарктики. Внедрение данной технологии позволило на 22% повысить эффективность очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота, не требуя при этом затрат энергии, химикатов и дефицитных в регионе почвенных ресурсов.

Ключевые слова: фиторемедиация, сточные карьерные воды, пруд-отстойник, минеральные соединения азота, фитоценоз, фитоматы.

Development and optimization of biological treatment of quarry waters from mineral nitrogen in the Arctic

© 2019. L. A. Ivanova² ORCID: 0000-0002-7994-5431, V. A. Myazin^{1,3} ORCID: 0000-0002-4155-3416, M. V. Korneykova¹ ORCID: 0000-0002-6167-1567, N. V. Fokina¹ ORCID: 0000-0002-2936-5252, V. V. Redkina¹ ORCID: 0000-0002-4908-5098, G. A. Evdokimova¹ ORCID: 0000-0003-0524-9748,

¹Institute of North Industrial Ecology Problems – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of Russian Academy of Science”, 14A, Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209,

²Polar Alpine Botanical Garden and Institute of Kola Science Centre of Russian Academy of Science, 18A, Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209,

³Institute of Russian Academy of Science “Saint-Petersburg Scientific-Research Centre of Ecological Safety”, 18, Korpusnaya St., Saint-Petersburg, Russia, 197110, e-mail: myazinv@mail.ru

The new concept of bioremediation of anthropogenic water bodies and quarry wastewaters treatment by phyto-extraction and phytotransformation in the Arctic conditions is presented. This technology is based on transforming the man-caused water reservoirs into nature-like marsh ecosystems. At the first stage, a new patented method for advanced waste treatment using floating bioplato was developed and implemented. After implementing the bioplato, the concentration of ammonium ions in water decreased by 53–90%, nitrate nitrogen reduced by 15–20%. At the second stage, the floating bioplato technology was modified into the highly efficient purifying marsh ecosystem, which allowed to cover the waterbody territory to the greatest possible extent. The technology is based on the creation of phytomats enabling in the accelerated mode to form plant blocks of three different types. They are aimed both at local grassing down, and at swamping deep and shallow areas of sediment ponds. In forming phytomats, two soil substitutional substrates (thermovermiculite, wood sawdust) and regionally-optimized assortment of 24 plant species are used. The proposed technology does not require energy, chemicals and soil components which are scarce in the region. The predominance of natural ecosystem processes in the formed phytocenoses allows to achieve maximum efficiency, and the use of available materials contributes to minimizing the costs of creating and maintaining the system. The introduction of this technology and formation of the artificial phytocenosis with the area of about 30% of the man-caused reservoirs territory made it possible to increase the efficiency of wastewater treating from mineral nitrogen compounds by 22%.

Keywords: phytoremediation, sewage quarry, sediment pond, mineral nitrogen compounds, phytocenosis, phytomats.

В настоящее время районы Крайнего Севера привлекают внимание большим ресурсным потенциалом. Это приводит к росту экологических проблем, связанных с уязвимостью северной природы, и необходимости решения одной из важнейших задач – очистке промышленных стоков горнодобывающих предприятий.

На сегодняшний день, наряду с физико-химическими и микробиологическими способами очистки карьерных вод от соединений азота [1–4], перспективными признаются методы, основанные на использовании естественных процессов, происходящих в ландшафтных и водных экосистемах [5–8]. Для реализации данных методов очистки создаются искусственные болотные экосистемы (constructed wetlands). Они способны к самоподдержанию протекающих в них процессов, надёжны и эффективны, не требуют затрат энергии и химикатов, не оказывают дополнительного негативного воздействия на окружающую среду [9–13].

Опыт применения этого метода в Швеции, Финляндии, Норвегии, Канаде и России показывает, что искусственно создаваемые заболоченные территории в качестве сооружений доочистки стоков являются эффективными даже при низких температурах [14–16]. Несмотря на это, создание и функционирование искусственных фитоочистных систем в условиях севера сопряжено с трудностями и требует индивидуального подхода.

Целью данной работы стала разработка и оптимизация биотехнологии доочистки сточных карьерных вод от соединений азота с использованием процессов фиторекультивации в природно-климатических условиях Мурманской области.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили на пруду-отстойнике, собирающем сточные воды с обширной территории действующего железорудного карьера, расположенного в Мурманской области. Отстойник представляет собой копаный пруд, состоящий из двух секций, разделённых насыпной дамбой из песчано-гравийно-каменистого грунта.

Грунтовые и талые воды, а также осадки поступают в узел сбора стоков на дне карьера, откуда с помощью насосов по системе труб направляются в пруд-отстойник. В связи с использованием взрывчатых веществ в пруд-отстойник с карьерными водами ежемесячно поступает 5000–6000 кг нитратов, 30–50 кг нитритов и 60–80 кг аммонийного азота. В первой секции пруда происходит механическая очистка стоков. Доочистка карьерных вод от минеральных соединений азота методом фиторемедиации происходит во второй секции пруда-отстойника. Он имеет глубину не более 2 м и характеризуется часто меняющимся уровнем воды. Из него очищенная вода через коллектор поступает в природный водоток – ручей.

Растительность на прибрежной полосе вокруг водоёма занимает крайне незначительную часть поверхности. В пруду-отстойнике растительность представлена, в основном, прибрежно-водными сообществами гелофитов, с незначительным развитием прикреплённых и свободноплавающих моновидовых гигрофитных сообществ, погружённо-водные макрофиты отсутствуют.

Аналитическая работа выполнена в специализированных аккредитованных лабораториях Института проблем промышленной

экологии Севера (ФГБУН ИППЭС КНЦ РАН, г. Апатиты) и АО «Олкон» (г. Оленегорск). Показатели качества воды анализировались в соответствии с действующей нормативно-технической документацией.

Результаты и обсуждение

За период с 2012 по 2017 гг. выполнена серия лабораторных и полевых опытно-промышленных экспериментов по разработке фитосистемы для доочистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота. Исследования проводились в два этапа.

I этап. На этом этапе был разработан и внедрён новый запатентованный способ доочистки сточных карьерных вод с помощью плавающего биоплато [17]. Оно представляет собой плавающие кластеры из соединённых между собой каркасов с биологической загрузкой. В результате использования плавающего биоплато была показана их жизнеспособность и возможность поглощения соединений азота – в большей степени аммонийных и нитритных, в меньшей – нитратных форм (табл. 1).

Снижение содержания ионов аммония в воде II-ой секции отстойника до начала исследований составляло 15%. После внедрения биоплато их содержание уменьшилось на 53–90%. Концентрация нитратного азота в воде снижалась на 1,4%, а после формирования биоплато – на 15–20%.

II этап. Целью данного этапа стала модификация технологии плавающего биоплато в более эффективную фитоочистную болотную экосистему. В основу разработки легла технология создания фитоматов, что позволяет формировать растительные сообщества разного типа.

Фитомат представляет собой пластиковый сетчатый мешок размером 0,4 x 0,7 м,

заполненный 12,5 дм³ органо-минерально-растительной смеси, состоящей из древесных опилок и термовермикулита, взятых в соотношении 4:1 (по объёму), и 50 г травосмеси. В состав травосмеси входили семена трав, интенсивно растущих в условиях Мурманской области: пырей сизый, пырей ползучий, овсяница красная, тимофеевка луговая, волоснец песчаный, горец Вейриха, змеевик живородящий. Данная многокомпонентная смесь позволяет формировать фитоматы высотой до 10 см и площадью около 0,3 м² каждый, хранить готовые изделия в сухом состоянии в течение длительного времени и транспортировать на любые расстояния.

Для создания фитоматов применяли два вида субстратов-почвозаменителей – мелкофракционированный термовермикулит ковдорского месторождения, получаемый методом электрообжига, марки Випон-2 [18] и древесные опилки (свежие и подстилочные). Главное назначение фитоматов – формирование высококачественных искусственных фитоценозов, или растительных блоков трёх типов:

– *растительные блоки I типа* – для задернения песчано-гравийных участков и трансформации их в фитозаградительные барьеры. После того, как фитоматы постелены, их увлажняют из расчёта 5 л воды/1 ед. для запуска процесса прорастания семян. Начальное прорастание семян в открытом грунте происходит на 5–7-й день, а массовое – на 10–13-й день;

– *растительные блоки II типа* – для создания растительных сообществ на участках водоёмов с глубиной менее 0,5 м. Готовые фитоматы раскладывают группами, погружая их в воду частично или полностью. При благоприятной температуре появление массовых

Таблица 1 / Table 1
Содержание минеральных соединений азота в воде пруда-отстойника в 2013–2016 гг., мг/л
The content of mineral nitrogen compounds in the settling pond water in 2013–2016, mg/L

Дата Date	NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		NO ₂ ⁻	
	I секция I section	коллектор collector	I секция I section	коллектор collector	I секция I section	коллектор collector
27.06.2013	1,29	1,10	155,3	153,1	0,73	0,17
09.10.2013	3,30	2,04	107,9	95,0	0,91	0,80
09.07.2014	1,51	0,38	138,5	127,3	0,63	0,57
02.10.2014	1,50	0,35	128,6	109,7	0,36	0,14
01.07.2015	4,20	0,45	168,2	157,4	0,67	0,55
09.10.2015	2,81	0,63	241,1	230,1	0,71	0,40
29.06.2016	10,47	6,87	145,1	161,2	0,81	0,69
19.09.2016	9,30	6,90	214,6	165,4	1,00	1,10

Таблица 2 / Table 2

Содержание нитратов в сточной карьерной воде (2017 г.), мг/л
Nitrate content in waste water in 2017, mg/L

Место отбора проб Place of sampling	01.06	20.06	06.07	14.07	04.08	30.08	26.09
I секция / I section	90,51	112,5	100,3	100,7	124,1	112,1	125,5
II секция / II section	11,57	95,8	93,07	90,2	120	103,18	111,5
Коллектор / Collector	12,18	84,025	85,33	80,55	116	106,95	108,5
Природный водоток Natural stream	16,5	31,5	42,56	45,46	68,16	59,25	70,6

Таблица 3 / Table 3

Содержание нитратов в корнях растений, мг/кг / Nitrate content in plant roots, mg/kg

Вид растения Plant species	Содержание нитратов в корнях растений Nitrate content in plant roots	
	естественные биоценозы natural wetlands	биоплато constructed wetlands
<i>Comarum palustre</i> L.	67±12	196±25
<i>Eryophorum angustifolium</i> Honck	80±19	154±21
<i>Salix phylicifolia</i> L.	78±11	95±14

всходов отмечается на 7-й день с начала работ, после чего можно приступать к посадке различных видов гигрофитов и гидрофитов. В таких условиях подсаженные растения приживаются в течение 3–5 дней и быстро прорастают в грунтовую основу водоёма;

– *растительные блоки III типа* – для формирования сообществ на глубоководных (более 0,5 м) участках водоёмов. В данном случае фитоматы размещаются на плавающих конструкциях, обеспечивающих их удержание и полное или частичное погружение в воду. Примером такой конструкции может служить плавающее биоплато, использованное ранее в работе.

Эффективность доочистки карьерных вод в значительной степени зависит от правильного выбора видового состава растений, исключающего их межвидовую конкуренцию.

В качестве ценозообразователей использовали 24 вида сосудистых растений: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), осоки (*Carex* sp.), пушица узколистная (*Eryophorum angustifolium* Honck), пушица Шейхера (*Eriophorum scheuchzeri* L.), вахта трёхлистная (*Menyanthes trifoliata* L.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), белокрыльник болотный (*Calla palustris* L.), калужница болотная (*Caltha palustris* L.), хвощ топяной (*Equisetum fluviatile* L.), хвощ болотный (*Equisetum palustre* L.), ива филиколистная (*Salix phylicifolia* L.), ива козья (*Salix caprea* L.), сфагнум (*Sphagnum* sp.), ряска малая (*Lemna minor* L.), хвостник, или водяная сосенка (*Hippuris vulgaris* L.), лютик

ползучий (*Ranunculus repens* L.), пырей сизый (*Agropyron intermedium* (Host.) Beauv.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski), овсяница красная (*Festuca rubra* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), волоснец песчаный (*Leymus arenarius* L. Hochst.), горец Вейриха (*Polygonum weyrichii* Fr. Schmidt), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), горец живородящий (*Bistorta vivipara* (L.) Delarbre).

Оценка эффективности предлагаемой технологии

В ходе мониторинга содержания минеральных форм азота в воде пруда-отстойника после внедрения предлагаемой технологии были получены следующие результаты (табл. 2).

В период интенсивного снеготаяния наблюдалось снижение концентрации нитратов в воде в результате разбавления. В дальнейшем снижение концентрации нитрат-ионов было не столь значительным и составляло 10–25% от исходного уровня. В природном водотоке концентрация нитратов в июне-июле уменьшалась до значений, не превышающих или равных ПДК (45 мг/л), а в августе и сентябре превышала ПДК на 30–50%.

В среднем за период наблюдения концентрация нитратов в воде II секции составляла 85±15 мг/л, что превышает установленное значение ПДК в 2 раза. Концентрации ионов аммония и нитрит-ионов в воде II секции пруда-отстойника были ниже значений ПДК.

Изучение содержания нитрат-ионов в растениях выявило тенденцию к их накоплению

в корнях растений, произрастающих на био-
плато (табл. 3).

В целом за весь период проведения исследова-
ний эффективность очистки карьерных
вод увеличилась на 22%.

Заключение

В результате исследований разработана
научно-обоснованная малозатратная тех-
нология трансформирования техногенных
водоёмов в природоподобную болотную эко-
систему для доочистки сточных карьерных вод
от минеральных соединений азота.

В основе технологии заложено формиро-
вание фитоматов, позволяющих в ускоренном
режиме формировать разные комбинации
растительных блоков, аналогичных природ-
ному ландшафту для локального залужения
прибрежных территорий и заболачивания
водоёмов.

За весь период проведения исследований
эффективность очистки карьерных вод уве-
личилась на 22% при площади искусственно
сформированного фитоценоза около 30% от
площади техногенного водоёма.

Предлагаемый подход к формированию
природоподобных болотных экосистем для
очистки сточных карьерных вод впервые осу-
ществлён в практике действующих горноруд-
ных предприятий в экстремальных условиях
Арктической зоны Российской Федерации.

*Работа выполнена при финансовой и тех-
нической поддержке АО «Олкон» (Оленегорский
ГОК), г. Оленегорск в рамках договора № 27-3-
2012 от «01» октября 2012.*

Литература

1. Яковлев С.В., Карелин Я.А., Ласков Ю.М., Во-
ронов Ю.В. Очистка производственных сточных вод. М.:
Стройиздат, 1985. 335 с.
2. Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т. Электролиз при-
родных и сточных вод. М.: Изд-во АСВ, 2001. 139 с.
3. Бирман Ю.А., Вурдова Н.Г. Инженерная защита
окружающей среды. Очистка вод. Утилизация отходов.
М.: Изд-во АСВ, 2002. 296 с.
4. Ксенофонтов Б.С. Флотационная обработка воды,
отходов и почвы. М.: Новые технологии, 2010. 272 с.
5. Mattila K., Zaitsev G., Langwaldt J. Biological removal
of nutrients from mine waters (Biologinen ravinteiden poisto
kaivosvedesta). Final report – loppuraportti – Rovaniemi.
Finnish Forest Research Institute. 2007. 99 p.
6. Савичев О.Г. Биологическая очистка сточных вод
с использованием болотных биогеоценозов // Известия

Томского политехнического университета. 2008. № 1.
Т. 312. С. 69–74.

7. Нефедьева Е.Э., Сиволобова Н.О., Кравцов М.В.,
Шайхиев И.Г. Доочистка сточных вод с помощью фито-
ремедиации // Вестник технологического университета.
2017. № 10. Т. 20. С. 145–148.

8. Jin G., Kelley T., Freeman M., Callahan M. Removal
of N, P, BOD 5 and coliform in pilot-scale constructed wet-
land systems // International Journal of Phytoremediation.
2002. V. 4. No. 2. P. 127–141.

9. Ran N., Agami M., Oron G. A pilot study of con-
structed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for
treatment of domestic primary effluent in Israel // Water
Research. 2004. V. 38. No. 9. P. 2241–2248.

10. Stewart F.M., Mulholland T., Cunningham A.B.,
Kania B.G., Osterlund M.T. Floating islands as an alterna-
tive to constructed wetlands for treatment of excess nutrients
from agricultural and municipal wastes – results of laborato-
ry-scale tests // Land Contamination & Reclamation. 2008.
V. 16. No. 1. P. 25–33.

11. Vymazal J. Constructed wetlands for treatment of
industrial wastewaters: A review // Ecological Engineering.
2014. V. 73. P. 724–751.

12. Dong Qing Zhang, Jinadasa K.B.S.N., Gersberg R.M.,
Liu Y., Wun Jern Ng, Soon Keat Tan. Application of construct-
ed wetlands for wastewater treatment in developing countries.
A review of recent developments (2000–2013) // Journal En-
vironmental Management. 2014. V. 141. P. 116–131.

13. Miranda M.G., Galvan A., Romero L. Nitrate re-
moval efficiency with hydrophytes of Los Reyes Aztecas Lake
Water, México // Journal of Water Resource and Protection.
2014. V. 6. P. 945–950.

14. Janssen P.P., Maehlum T., Krogstad T. Potential
use of constructed wetlands for wastewater treatment in
northern environments // Water Science Techniques. 1993.
V. 28. P. 149–157.

15. Maehlum T., Janssen P.D., Warner W.S. Cold-
climate constructed wetlands // Water Science and Technol-
ogy. 1995. V. 32. No. 3. P. 95–101.

16. Nyquist J., Greger M. A field study of constructed
wetlands for preventing and treating acid mine drainage //
Ecological engineering. 2009. V. 35. P. 630–642.

17. Евдокимова Г.А., Иванова Л.А., Мязин В.А. Устрой-
ство для биологической очистки сточных карьерных вод //
Патент на изобретение № 2560631. Заявка № 2014122204,
30.05.2014. Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 22 июля 2015 г.

18. Иванова Л.А., Котельников В.А. Перспективы
гидропонного выращивания растений в Мурманской
области. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. 106 с.

References

1. Yakovlev S.V., Karelin Ya.A., Laskov Yu.M., Vo-
ronov Yu.V. Industrial wastewater treatment. Moskva:
Stroyizdat, 1985. 335 p. (in Russian).

2. Vurdova N.G., Fomichev V.T. Electrodialysis of natural and waste water. Moskva: Izd-vo ASV, 2001. 139 p. (in Russian).
3. Birman Yu.A., Vurdova N.G. Engineering protection of the environment. Purification of waters. Recycling. Moskva: Izd-vo ASV, 2002. 296 p. (in Russian).
4. Ksenofontov B.S. Flotation treatment of water, waste and soil. Moskva: Novyye tekhnologii, 2010. 272 p. (in Russian).
5. Mattila K., Zaitsev G., Langwaldt J. Biological removal of nutrients from mine waters (Biologinen ravinteiden poisto kaivosvedesta). Final report – loppuraportti – Rovaniemi. Finnish Forest Research Institute. 2007. 99 p.
6. Savichev O.G. Biological treatment of wastewater using wading biogeocoenoses // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2008. V. 312. No. 1. P. 69–74 (in Russian).
7. Nefedyeva E.E., Sivolobova N.O., Kravtsov M.V., Shaykhiyev I.G. The post-treatment of wastewater using phytoremediation // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2017. V. 20. No. 10. P. 145–148 (in Russian).
8. Jin G., Kelley T., Freeman M., Callahan M. Removal of N, P, BOD 5 and coliform in pilot-scale constructed wetland systems // International Journal of Phytoremediation. 2002. V. 4. No. 2. P. 127–141. doi: 10.1080/15226510208500078.
9. Ran N., Agami M., Oron G. A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel // Water Research. 2004. V. 38. No. 9. P. 2241–2248. doi: 10.1016/j.watres.2004.01.043.
10. Stewart F.M., Mulholland T., Cunningham A.B., Kania B.G., Osterlund M.T. Floating islands as an alternative to constructed wetlands for treatment of excess nutrients from agricultural and municipal wastes – results of laboratory-scale tests // Land Contamination & Reclamation. 2008. V. 16. No. 1. P. 25–33. doi: 10.2462/09670513.874.
11. Vymazal J. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review // Ecological Engineering. 2014. V. 73. P. 724–751. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.034.
12. Dong Qing Zhang, Jinadasa K.B.S.N., Gersberg R.M., Liu Y., Wun Jern Ng, Soon Keat Tan. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries. A review of recent developments (2000–2013) // Journal Environmental Management. 2014. V. 141. P. 116–131. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.03.015.
13. Miranda M.G., Galvan A., Romero L. Nitrate removal efficiency with hydrophytes of los reyes Aztecas Lake Water, México // Journal of Water Resource and Protection. 2014. V. 6. P. 945–950. doi: 10.4236/jwarp.2014.611089.
14. Jenssen P.P., Maehlum T., Krogstad T. Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in Northern environments // Water Science Techniques. 1993. V. 28. No. 10. P. 149–157. doi: 10.2166/wst.1993.0223.
15. Maehlum T., Jenssen P.D., Warner W.S. Cold-climate constructed wetlands // Water Science and Technology. 1995. V. 32. No. 3. P. 95–101. doi: 10.2166/wst.1995.0130.
16. Nyquist J., Greger M. A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage // Ecological engineering. 2009. V. 35. P. 630–642. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.10.018.
17. Evdokimova G.A., Ivanova L.A., Myazin V.A. Device for biological treatment of waste water // Patent RU 2560631 C1. Application: 2014122204, 30.05.2014. Date of publication: 20.08.2015. Bull. 23 (in Russian).
18. Ivanova L.A., Kotelnikov V.A. Perspectives of hydroponic plant growing in the Murmansk region. Apatity: Izd-vo KNTs RAN, 2006. 106 p. (in Russian).