

Содержание

Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины О. И. БЕЛЫХ, А. С. ГЛАДКИХ, Е. Г. СОРОКОВИКОВА, И. В. ТИХОНОВА, С. А. ПОТАПОВ, Г. А. ФЕДОРОВА	363
Свойства волокнистых нефтесобирателей, полученных из отходов полистирола термообработкой водяным паром Е. В. ВЕПРИКОВА, Е. А. ТЕРЕЩЕНКО, Н. В. ЧЕСНОКОВ, Б. Н. КУЗНЕЦОВ	379
Биологически активные вещества <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim., произрастающего на Среднем Урале Г. И. ВЫСОЧИНА, Т. А. КУКУШКИНА, Е. С. ВАСФИЛОВА	387
Распределение и состав низкомолекулярных азотсодержащих оснований в высокосмолистых высокопарафинистых нефтях Н. Н. ГЕРАСИМОВА, Т. А. САГАЧЕНКО, Р. С. МИН	395
Влияние аминокислот на кинетику кристаллизации одноводного оксалата кальция О. А. ГОЛОВАНОВА, В. В. КОРОЛЬКОВ, Ю. О. ПУНИН, А. С. ВЫСОЦКИЙ	401
Процессы термического разложения биомассы и глицерина в виброожиженном слое в присутствии катализаторов глубокого окисления Ю. В. ДУБИНИН, Н. А. ЯЗЫКОВ, А. Д. СИМОНОВ, В. А. ЯКОВЛЕВ	411
Состав эфирных масел некоторых видов рода <i>Agastache</i> Clayton ex Gronov (Lamiaceae), культивируемых в условиях Среднего Урала М. А. МЯДЕЛЕЦ, Т. А. ВОРОБЬЕВА, Д. В. ДОМРАЧЕВ	419
Синтез высококонцентрированных гидрозолей наночастиц меди восстановлением аскорбиновой кислотой в присутствии желатозы С. В. САЙКОВА, К. С. МУРАШЕВА, С. А. ВОРОБЬЕВ, К. Ю. КОЧМАРЕВ, Е. Э. КАРИМОВ, Н. Д. ЕРЕМИНА, Ю. Л. МИХЛИН	425
Оценка токсичности наноструктурного оксигидроксида алюминия с помощью гидробионтов Н. В. СВАРОВСКАЯ, О. В. БАКИНА, Е. А. ГЛАЗКОВА, М. И. ЛЕРНЕР, А. С. ЛОЖКОМОВ, А. Н. СЕРОВА, Е. Г. ХОРОБРАЯ	433
Исследование состава и строения высококипящей фракции тяжелой смолы пиролиза широкой фракции легких углеводородов М. А. ЦЕУНОВА, В. И. МАШУКОВ, А. К. ГОЛОВКО	437
Получение и применение стиролсодержащего олигомера, обработанного гидропероксидом пинана О. Н. ЧЕРНЫХ, И. Н. ПУГАЧЕВА, С. С. НИКУЛИН	445
Комплексообразование Al(III) с бензилпенициллином и карбенициллином Е. Н. МЯСНИКОВА, В. Г. АЛЕКСЕЕВ, В. М. НИКОЛЬСКИЙ	453
Комплексообразование Al(III) с ампициллином и амоксициллином Е. Н. МЯСНИКОВА, В. Г. АЛЕКСЕЕВ, В. М. НИКОЛЬСКИЙ	459
Исследования Сибирского отделения РАН в области нанонауки и нанотехнологии: библиометрический анализ Т. В. БУСЫГИНА, Б. С. ЕЛЕПОВ, И. В. ЗИБАРЕВА, О. Л. ЛАВРИК, Н. Н. ШАБУРОВА	463

УДК 582.232:614.36-097.3:556.551(470+571)(476)(477)

Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины

О. И. БЕЛЫХ, А. С. ГЛАДКИХ, Е. Г. СОРОКОВИКОВА, И. В. ТИХОНОВА, С. А. ПОТАПОВ, Г. А. ФЕДОРОВА

Лимнологический институт Сибирского отделения РАН,
ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск 664033 (Россия)

E-mail: belykh@lin.irk.ru

(Поступила 18.12.12; после доработки 10.06.13)

Аннотация

Представлен обзор о гепатотоксинах микроцистинах, продуцируемых цианобактериями различных родов. Рассмотрены химическая структура и свойства микроцистинов, механизм их действия и токсикокинетика. Приведены методы анализа микроцистинов и генетическая основа их продукции. Представлены результаты по исследованию цианобактерий и их токсинов (микроцистинов) в различных водоемах России, Беларуси и Украины.

Ключевые слова: токсичные цианобактерии, *Microcystis*, *Anabaena*, оз. Байкал, оз. Котокельское, Балтийское море, Берешское водохранилище, р. Свислочь, р. Днепр, Каневское водохранилище, микроцистин, генетические маркеры

Оглавление

Введение	363
Химическая структура и свойства МС	364
Механизм действия МС	365
Токсичность МС	365
Токсикокинетика	366
Методы анализа МС	366
Генетическая основа продукции МС	367
Наши исследования	367
Сибирь	369
Водоохранилища ангарского каскада	369
Оз. Байкал	370
Оз. Котокельское	372
Берешское водохранилище	374
Балтийское море	375
Украина	375
Беларусь	375
Закключение	376

ВВЕДЕНИЕ

Цианобактерии (синезеленые водоросли, цианопрокариоты) – одна из самых древних на Земле группа организмов. Они возникли

около 3.5 млрд лет назад и сыграли важную роль в становлении атмосферы Земли, обогатив ее кислородом [1]. В настоящее время цианобактерии по-прежнему являются неотъемлемым компонентом водных и назем-

ных экосистем и распространены почти повсеместно, включая экстремальные экологические ниши: пустыни, термальные источники, озера Арктики и Антарктики [2].

Цианобактерии синтезируют большое количество вторичных метаболитов. Наиболее пристальное внимание исследователей привлекают токсины, поскольку они представляют опасность для жизни и здоровья человека и животных. Массовое развитие (“цветение”) цианобактерий в водоемах приводит к выделению токсинов и появлению технических и эстетических проблем при использовании воды для хозяйственных и рекреационных целей, а в некоторых случаях становится причиной нарушения и деградации всей экосистемы. Во время “цветения” водоемов концентрация токсинов в воде многократно возрастает на стадии гибели популяции цианобактерий, лизиса клеток и выхода из них токсинов; внутриклеточное содержание растворенных токсинов в молодых клетках обычно невысокое (0,1–10 мкг/л). В пресных и солоноватых водоемах выделяют две основные группы цианотоксинов в соответствии с их химической структурой: циклические пептиды (микроцистины и нодулярин) и алкалоиды (цилиндропермоллин, анатоксины, сакситоксины) [3, 4]. Помимо вторичных метаболитов, не участвующих в генеральном метаболизме, токсичность также проявляют структурные компоненты клеточных стенок цианобактерий – липополисахариды. Цианотоксины вызывают как острые, так и хронические отравления, а по действию на органы-мишени их разделяют на гепато-, нейро- и дерматотоксины.

Микроцистины (МС) – одни из самых известных и широко распространенных цианотоксинов в пресных водах, их основными продуцентами являются цианобактерии родов *Anabaena*, *Microcystis*, *Planktothrix*, которые зачастую вызывают токсичное “цветение” воды в продуктивных водоемах по всему миру [5].

ХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МС

Впервые МС были изолированы из штамма *Microcystis aeruginosa* и названы в соответствии с родовым названием этих цианобактерий. В состав МС входят семь аминокислот:

цикло-(D -Ala-**X**- D -MeAsp-**Z**-Adda- D -Glu-Mdha), где D -Ala – D -аланин, D -MeAsp – D -эритро- β -метиласпарагиновая кислота, Adda – 3-амино-9-метокси-2,6,8-триметил-10-фенилдека-4,6-диеновая кислота, D -Glu – D -глутамат, Mdha – N -метилдегидроаланин, **X** и **Z** – переменные L-аминокислоты [6, 5]. Молекулярная масса МС варьирует от 500 до 4000 Да, для большинства вариантов она составляет 900–1100 Да. Аминокислота Adda – самая необычная структура в этой группе циклопептидов. Она обеспечивает характерную для МС и нодулярина абсорбцию при 238 нм благодаря наличию конъюгированной диеновой группы, и это свойство используется для разделения при ВЭЖХ [7]. В настоящее время идентифицировано более 90 вариантов МС [8]. Структурные варианты отмечены во всех семи аминокислотах, но наиболее часто в позиции переменных L-аминокислот: **X** (**X** – чаще всего лейцин, аргинин или тирозин, но возможны гомотирозин, аланин, фенилаланин, гомофенилаланин, метионин-S-оксид или триптофан) и **Z** (**Z** – аргинин или аланин, возможны аминокислоты: изобутироновая кислота, гомоаргинин или метионин-S-оксид). Наиболее часто встречается МС-LR, где переменные L-аминокислоты представлены лейцином и аргинином. Изоформы RR (аргинин-аргинин) и YR (тирозин-аргинин) менее распространены. Много вариантов образуется при метилировании/деметилировании D -MeAsp и/или Mdha. Большинство МС содержит β -метиласпаргиновую кислоту, глутаминовую кислоту и аланин с метиламином, присоединенные к глутаминовой кислоте. В некоторых вариантах Mdha заменяется L-серином и D -Ala D -серином. Отдельные нетоксичные варианты идентифицированы как компоненты, содержащие 6Z-стереоизомер Adda. В целом некоторые структурные модификации Adda региона или ацилирование глутамата снижают токсичность МС и даже обеспечивают их нетоксичность. Этерификация (образование сложного эфира) свободной карбоксильной группы глутаминовой кислоты приводит к образованию неактивных структур (вариантов).

Микроцистины растворяются в воде, метаноле и этаноле и не растворяются в ацетоне, эфире, хлороформе и бензоле. Они ос-