

Е.Ю. Киселев, В.А. Румянцев, В.Н. Рыбакин

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ БОРЬБЫ С «ЦВЕТЕНИЕМ» ВОДЫ В ВОДОЕМАХ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДОРОСЛИ И ДРУГИЕ ОРГАНИЗМЫ

E. Yu. Kiselev, V. A. Romyantsev, V. N. Rybakin

APPLICATION OF LOW INTENSITY ULTRASOUND FOR PREVENTING ALGAL BLOOMS IN WATER BODIES. EFFECTIVENESS OF ACTION ON ALGAE AND OTHER ORGANISMS

Дан обзор воздействия ультразвукового излучения низкой интенсивности на водоросли и другие организмы. Рассмотрена эффективность такого воздействия.

Ключевые слова: ультразвук низкой интенсивности, водоросли, цианобактерии, «цветение» воды, эффективность воздействия.

An overview of the effect of low intensity ultrasound on algae is provided. The effectiveness of this treatment is considered.

Key words: low intensity ultrasound, algae, cyanobacteria, algal bloom, effectiveness of action.

Введение

Проблема поиска действенного метода борьбы с «цветением» воды в водоемах является актуальной уже достаточно давно и становится еще более острой в наши дни.

Предлагаемые химические и биологические методы часто не дают стабильного результата [7]. Ультразвуковое воздействие высокой интенсивности рассматривается как потенциальный метод борьбы с «цветением» воды. Проведены некоторые эксперименты, показавшие эффективность данной методики, однако требуемые энергетические затраты ограничивают ее применение [23].

В последнее время воздействие ультразвуком низкой интенсивности стало рассматриваться как достаточно перспективный метод борьбы с «цветением» воды в водоемах. Уже в течение более 10 лет выпускаются и продаются устройства для борьбы с водорослями в водоемах, использующие ультразвук низкой интенсивности [4]. Они производятся такими фирмами, как Thomas-Electronics [6], LG Sound [3], Sonic Solutions [4] и другими. Потребляемая этими устройствами мощность составляет от единиц до десятков ватт, при этом они подавляют развитие водорослей на расстояниях от десятков до сотен метров. Для появления заметных результатов требуется достаточно много времени — до нескольких недель. Тем не менее, энергетическая эффективность данной методики делает ее весьма перспективной. Ультразвуковые устройства для борьбы с водорослями активно продаются [6, 3]. Однако, научные публикации, описывающие

работу таких устройств, не распространены [23]. Значительное количество информации размещено на сайтах производителей устройств и в различных изданиях, преимущественно без ссылок на какие-либо работы, без описания условий экспериментов и методов анализа. Тем не менее, в большей или меньшей степени, такие сведения вошли в обзор. Механизмы действия ультразвука на водоросли приводятся в различных источниках, однако надежного научного подтверждения им пока не найдено [1]. Воздействие ультразвуковых устройств не всегда оказывается эффективным, и выявление связи эффективности с параметрами ультразвукового воздействия и другими факторами является важной задачей.

Эффективность воздействия на водоросли

На сайтах производителей ультразвуковых устройств размещено значительное количество описаний успешного их применения на различных объектах. На фотографиях водоемов после установки устройств видны заметные изменения — вода становится более прозрачной, водоросли, находившиеся на поверхности воды, отсутствуют.

Стоит отметить, что согласно данным, о которых пойдет речь в этом разделе, в разных случаях эффективность ультразвукового воздействия на представителей одного и того же вида водорослей может быть различной. Это может быть следствием того, что различные устройства создают ультразвуковое поле с различными параметрами. Возможность подстройки программы обработки под определенные виды водорослей, имеющаяся у таких производителей как LG Sound и Toscano Linea Electronica SL говорит о том, что правильный подбор параметров ультразвукового излучения для конкретных видов водорослей может быть очень важен.

1. Подавление роста

Количество времени, требующееся для того, чтобы увидеть улучшения, зависит от конкретных физико-химических факторов, таких как тип присутствующих водорослей, температура воды, количество света, количество питания (особенно фосфатов и нитратов), размеры и глубина водоема, уровни общего твердого взвешенного вещества, общего растворенного вещества, мутность, время водообмена и т.д. [19].

Например, для Sonic Solutions, в зависимости от условий места, первые результаты могут проявиться в течение двух недель после установки устройства. За время от 6 до 12 недель, устройство будет подавлять водоросли, которые прорастают из спор, присутствующих в воде. После 12 недель, устройство будет продолжать поддерживать водоем чистым [4].

Эффективность подавления различных типов водорослей и биопленок устройствами Sonic Solutions неодинакова и зависит от расстояния до устройства [4]. Так, например, оценка максимальной дальности подавления биопленок с помощью самого мощного из устройств компании Sonic Solutions, SS600 составляет 104 м (340 футов), зеленых водорослей — 260 м (854 фута), сине-зеленых водорослей — 693 м (2274 фута). Это может говорить как о различии механизмов воздействия на эти организмы, так и о различной устойчивости организмов к воздействию, имеющему один механизм.

Известен ряд работ, в которых описываются результаты экспериментов, проведенных в рамках проекта CHEM-FREE. Данный проект ставил своей целью разработку нехимического метода обработки, включающего в себя фильтрацию через волоконные фильтры, обработку ультразвуком и УФ-С [16]. В качестве ультразвукового излучателя использовалось устройство LG Sonic Tank. Эффективность ультразвукового воздействия, полученная в рамках проекта CHEM-FREE, должна быть оценена с осторожностью, поскольку ультразвуковое облучение применялось в комплексе с другими методами. Однако, по результатам канонического корреляционного анализа, авторы [16] заключили, что воздействие ультразвука превалировало над всеми остальными факторами, учитывавшимися в анализе. Ультразвук эффективно удалял планктонные формы, но не был столь эффективным в удалении бентосных форм.

В работах [17] и [22] упоминаются работы авторов Инман и Варнок. В одной работе использовались смешанные виды зеленых водорослей, диатомовых и цианобактерий, находившиеся в 700-литровых контрольном и экспериментальном прудах. В экспериментальном пруду было установлено устройство, излучавшее ультразвук на частоте 28 кГц, мощностью 20 Вт. Было отмечено снижение роста диатомовых водорослей на 60 % и зеленых на 41 %, но увеличение на 67 % цианобактерий *Microcystis sp.* В аналогичном эксперименте, отличавшимся от предыдущего лишь тем, что в нем использовались емкости объемом 250 литров, было отмечено снижение роста *Aphanizomenon sp.* на 49 % и *Scenedesmus sp.* на 60 % [22].

В диссертации [22] описываются эксперименты, в которых исследовалась эффективность воздействия устройства Дупатсо (частота 28 кГц, мощность 40 Вт, дальность действия 1000 м) на водоросли, находившиеся в емкостях объемом 1500 л. Наблюдалось различие в эффективности подавления водорослей в зависимости от фазы роста, в которой они находились. Однако, судя по приведенным графикам, к заявлениям о нахождении водорослей в экспоненциальной и стационарной фазах роста стоит относиться с осторожностью. Были проведены два эксперимента, в первом доминирующими видами были *Sphaerocystis sp.* и *Scenedesmus sp.*, во втором популяции состояли главным образом из нитчатых зеленых водорослей, одноклеточных зеленых и диатомовых. В первом эксперименте в контрольной емкости *Sphaerocystis sp.* и *Scenedesmus sp.* были здоровыми и доминирующими, концентрации их клеток росли, а затем стабилизировались. К 21-му дню в экспериментальной емкости практически исчезли доминировавшие виды *Sphaerocystis sp.* и *Scenedesmus sp.* Во втором эксперименте, в экспериментальной емкости концентрация клеток нитчатых зеленых водорослей не увеличивалась, в отличие от контрольной, и значительно снизилась после 15-го дня. После 16-го дня отмечалось снижение концентраций клеток одноклеточных зеленых и диатомовых водорослей.

Также были проведены аналогичные эксперименты с водорослями, находившимися в стационарной фазе роста. Описание результатов этих экспериментов приведено в следующем разделе.

В вегетационный сезон 2013 г. сотрудниками Института озераведения РАН были проведены исследования влияния ультразвука на фитопланктон. Исследования проходили на Михайловском пруду, в парке у Русского музея в Санкт-Петербурге, в котором были выделены контрольный и экспериментальный участки размерами 110 м на

40 м каждый. Основной целью работы было сравнить состояние фитопланктонного сообщества на этих участках и выявить, есть ли влияние ультразвука в экспериментальном участке. Было использовано ультразвуковое устройство SS400 производства фирмы Sonic Solutions. В первый месяц (июнь—июль) исследований содержание хлорофилла было относительно низким и практически совпадало в обоих прудах. Далее, начиная с середины июля, происходило небольшое нарастание величин содержания хлорофилла, но они также шли параллельно друг другу. В начале августа величины содержания хлорофилла стали различаться, и в дальнейшем, во все сроки наблюдений, вплоть до конца сентября, концентрации хлорофилла в контрольном пруду были примерно в два раза выше, чем в экспериментальном пруду. Проведившиеся наблюдения не выявили явного отрицательного влияния ультразвука на зообентос. В экспериментальном участке было отмечено изменение структуры и состава зообентоса литорали, что может быть косвенно связано с влиянием ультразвука на водорослевый планктон в этой зоне.

2. Отсутствие влияния на рост и стимуляция роста

В диссертации [22] описываются эксперименты, для которых водоросли были взяты из контрольных емкостей, использовавшихся в двух вышеупомянутых опытах. В первом эксперименте концентрация клеток *Scenedesmus sp.* увеличивалась в экспериментальной емкости с большей скоростью, чем в контрольной, достигнув в 5 раз большей величины относительно начала, и стабилизировалась на 15-й день. Концентрация клеток *Sphaerocystis sp.* значительно не изменялась на протяжении эксперимента. Во втором эксперименте различия между концентрациями клеток отдельных видов водорослей в контрольной и экспериментальной емкостях были несущественными.

Проведенные впоследствии эксперименты по воздействию ультразвука высокой интенсивности на пробы из контрольных емкостей также подтвердили его неэффективность. Авторами проводятся аналогии с устойчивостью клеток, находящихся в стационарной фазе роста к действию химическим веществ.

В исследованиях [8] описывается лабораторный эксперимент, проведенный в 6 (3 экспериментальных, 3 контрольных) 20-литровых емкостях и эксперимент на открытом воздухе в 6 (3 экспериментальных, 3 контрольных) емкостях объемом 7000 л. В качестве ультразвукового излучателя использовались коммерческие устройства, производитель и модель которых не указаны. В лабораторных экспериментах использовалась культура *Microcystis Aeruginosa*. Концентрации клеток, фотосинтетический выход, процент живых и метаболически активных клеток мало отличались между контрольными и экспериментальными емкостями. В эксперименте на открытом воздухе, в начале во всех емкостях преобладающими были виды *Scenedesmus* и *Euglena*, в небольших количествах встречались другие виды, включая *Microcystis*. Через 28 дней, количество и видовой состав водорослей значительно различались между емкостями, при этом какой-либо связи с работой ультразвуковых устройств не наблюдалось.

В исследовании [12] показано, что работа устройства Aquasonic Algae Controller от VoR Environmental не привела к снижению плотности клеток золотистой водоросли *Prymnesium parvum* в водоеме площадью 0,1 Га за 21 день.

Воздействие на другие организмы

1. Бактерии и биопленки

Воздействие ультразвука низкой интенсивности на бактерии может представлять интерес, так как бактерии являются важной частью водных экосистем, но также и с точки зрения их схожести с цианобактериями.

Согласно [19], ультразвук, излучаемый устройствами LG Sonic, поражает большинство одноклеточных и сине-зеленых водорослей, также как и некоторые бактерии, отвечающие за формирование биопленок. Также, в ирригации ультразвук, кажется, подавляет и контролирует рост грибов, таких как *Pithium*, *Fusarium* и *Phytophthora*. В других сферах применения (включая ирригацию) ультразвуковая обработка может также подавлять и контролировать количество *E. Coli*, *Enterococcus* и всех колиформ [19]. В [20] такие же результаты по подавлению бактерий приводятся со ссылкой на работы, выполненные в рамках проекта CHEM-FREE, где ультразвук использовался в комплексе с ультрафиолетом и волоконными фильтрами. Согласно статье [14], в которой описываются работы, выполнявшиеся в рамках этого проекта, большая часть загрязнений, таких как бактерии, удалялась в первичном фильтре.

Согласно [5], бактерии и одноклеточные диатомовые водоросли, образующие биопленку могут быть подавлены, если используется определенная программа обработки. Аналогичные заявления о возможности удаления биопленок делаются и другими производителями. Так, биопленки удаляются устройствами Thomas-Electronics NT4, NT5, NT6. Стоит отметить, что не вся линейка устройств борется с биопленками [6].

Согласно [15], анаэробные бактерии, составляющие основной слой биопленок, в турбулентной воде убирают свои ворсинки, использующиеся ими для прикрепления к поверхностям, и не выделяют полисахаридные клеи, также служащие для прикрепления к поверхностям. Поэтому такие бактерии не образуют колонии в турбулентной воде. Существуют данные, которые, возможно, противоречат этим утверждениям. В работе [13] упоминается, что оптимальной для образования биопленок бактериями является турбулентная водная среда.

В рамках данного обзора может представлять интерес устройство SonoXide, выпускаемое фирмой Ashland. Оно сочетает воздействие ультразвуком высокой частоты (1,5–2 МГц, мощность одного излучателя из нескольких в установке менее 10 Вт/см²) с созданием микропузырьков в обрабатываемой воде и применяется в замкнутых системах охлаждения и других аналогичных циклах. Воздействие объясняется синергизмом, возникающим при воздействии ультразвука в присутствии микропузырьков, ультразвук в отсутствие микропузырьков не дает желаемого эффекта [9]. Известно, что неоднородности, присутствующие в жидкости, например такие как маленькие пузырьки являются зародышами кавитационных пузырьков. Таким образом, присутствие неоднородностей снижает порог образования кавитации в жидкости. Синергизм в данном случае может объясняться за счет облегчения образования кавитации, однако авторы [10] считают, что мощность, используемая в SonoXide, вероятно, недостаточна для создания «настоящей» кавитации. В качестве объяснения воздействия на бактерии в [9] предлагается следующий механизм. Условия, создаваемые в жидкости ультразвуком и микропузырьками, приводят к образованию пор в клеточных оболочках, что в

свою очередь активизирует процессы восстановления клеток, увеличивая потребление питания. Возникающий при этом голод запускает механизм запрограммированной клеточной смерти для сохранения части популяции. После обработки, посредством инфракрасной фурье-спектроскопии, в воде, содержащей бактерии, были обнаружены две линии поглощения, соответствующие ацил-гомосеринлактонам. Авторы считают это возможным подтверждением механизма апоптоза. Ацил-гомосеринлактоны являются сигнальными веществами, обуславливающими «чувство кворума» у бактерий, а также участвуют в процессе образования биопленки. Например, в работе [11] показано, что бактерии-мутанты *Pseudomonas aeruginosa*, не производившие сигнальных молекул, образовывали более тонкую биопленку с более плотно упакованными клетками, в то время как «дикие» бактерии формировали характерные микроколонии.

В [10] воздействие устройства Sonoxide на бактерии *Pseudomonas putida* выявило подавление роста и дыхания без потери жизнеспособности. Повреждение клеточных мембран было обнаружено с помощью флуоресцентной микроскопии и штамма-репортера, содержащего гены, связанные с промотором реакции на повреждение мембраны. Другие штаммы-репортеры также показали возможное вовлечение систем восстановления ДНК и белков. Как следствие воздействия, наблюдалось ухудшение способности образовывать биопленки, что может быть следствием подавления роста. Результаты работы [10] говорят в пользу предположения, что повреждение мембран, вызванное турбулентностью и сдвиговыми напряжениями, представляют собой первичный и значительный эффект. Вторичные эффекты могут включать повреждение ДНК и белков.

Стоит отметить, что в отличие от устройств для борьбы с водорослями на водоемах, Sonoxide воздействуют периодически и кратковременно. Но можно выделить общие черты: у обеих методик эффект проявляется через достаточно продолжительное время, и одним из механизмов является нарушение целостности мембраны.

Воздействие ультразвука различной частоты на бактерии *Escherichia coli* в специальных условиях, исключающих воздействие кавитации, описывается в работе [13]. Эффективность воздействия оценивалась с помощью микротитрового спектрометрического анализа продукции биопленки. Эксперименты показали, что воздействие ультразвука малой частоты в течение непродолжительного времени не приводит к снижению жизнеспособности бактерий. Лишь частота 38 кГц показала небольшой бактерицидный или бактериостатический эффект, вероятно, из-за более высокого акустического давления. Возможно, определенная частота может давать бактерицидный эффект, но для этого потребуется более длительное время (от 15 до 60 минут). Образование биопленки показало строгую корреляцию с акустическим давлением, способность подавления повышалась с увеличением давления. Частоты 20, 25 и 30 кГц показали тенденцию падения величин поглощения практически до нуля после 40 секунд воздействия и рост после 60 секунд. Такое поведение может объясняться стимуляцией этими частотами метаболизма *E. Coli*. Воздействие 24 и 35 кГц не привели к увеличению или уменьшению. Воздействие на частотах 28 и 38 кГц привело к непрерывному снижению величин поглощения, которые доходили практически до нуля после 60 секунд. Такое поведение может объясняться синергетическим эффектом между акустическим давлением, временем воздействия и частотой, что в итоге приводит к подавлению развития биопленки.

Ультразвук относительно низкой интенсивности может стимулировать рост бактерий. В работе [21] замечено, что бактерии *Staphylococcus epidermidis*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli* прикреплялись и росли на поверхности полиэтилена в присутствии ультразвука. Ультразвук частоты 70 кГц интенсивности менее 2 Вт/см² способствовал увеличению скорости роста клеток по сравнению с ростом в отсутствие ультразвука. Также ультразвук стимулировал планктонный рост *S. Epidermidis* и других планктонных бактерий.

2. Другие организмы

Согласно заявкам производителей, ультразвуковые устройства не влияют на рыб. Устройство DUMO Algacleaner имеет сертификат, подтверждающий это на основе экспериментов, выполненных в научном учреждении. Sonic Solutions также подтверждает безопасность для рыб своих ультразвуковых устройств. В исследовании [12] утверждается, что устройство Algae Controller от VoR Environmental не оказывало заметного эффекта на выживание радужной форели. Также не отмечено негативного воздействия на рыб в работе [16].

Envirosonic утверждают, что по результатам работы, выполненной САРМ на уличных прудах, ультразвук не оказывал влияния на Дафний, использовавшихся как тестовый организм [2].

Согласно [19], в ирригации ультразвук, кажется, подавляет и контролирует рост грибов, таких как *Pithium*, *Fusarium* и *Phytophthora*.

Согласно заявкам производителей, ультразвуковые устройства не влияют на растения. В работе [18], лилии Калла не демонстрировали каких-либо отклонений под воздействием устройства LG Sonic SSS.

Заключение

Борьба с водорослями в водоемах с помощью ультразвука низкой интенсивности может быть достаточно успешной. Однако, приводимые в литературе экспериментальные данные не всегда подтверждают эффективность такого воздействия. Различие условий, в которых были выполнены эксперименты, не позволяет однозначно выделить параметры ультразвука, обеспечивающие его наибольшую эффективность. Таким образом, дальнейшие исследования с целью совершенствования данной методики представляются актуальными.

Литература

1. Киселев Е.Ю., Румянцев В.А., Рыбакин В.Н. Применение ультразвукового излучения низкой интенсивности для борьбы с «цветением» воды в водоемах. Механизмы воздействия на водоросли. // Ученые записки РГГМУ, 2014, № 34, с. 115–122.
Kiselev E.Yu., Rumyantsev V.A., Rybakin V.N. Primenenie ul'trazvukovogo izlucheniya nizkoy intensivnosti dlya bor'by s «tsveteniem» vody v vodoemakh. Mekhanizmy vozdeystviya na vodorosli. // Uchenye zapiski RGGMU, 2014, № 34, s. 115–122.
2. Производитель ультразвуковых устройств Envirosonic. — Электронный ресурс: [<http://www.envirosonic.eu/index.htm>].

- Производитель' ul'trazvukovykh ustroystv Envirosonic. — Elektronnyy resurs: [<http://www.envirosonic.eu/index.htm>].
3. Производитель ультразвуковых устройств LG Sound. — Электронный ресурс: [<http://www.lgsonic.com>].
Производитель' ul'trazvukovykh ustroystv LG Sound. — Elektronnyy resurs: [<http://www.lgsonic.com>].
 4. Производитель ультразвуковых устройств Sonic Solutions. — Электронный ресурс: [<http://www.sonicsolutionsllc.com/>].
Производитель' ul'trazvukovykh ustroystv Sonic Solutions. — Elektronnyy resurs: [<http://www.sonicsolutionsllc.com/>].
 5. Производитель ультразвуковых устройств Toscano Linea Electronica SL. — Электронный ресурс: [<http://www.toscano.es/en/microsites-applications/micro-water-environment/dumo-algacleaner/>].
Производитель' ul'trazvukovykh ustroystv Toscano Linea Electronica SL. — Elektronnyy resurs: [<http://www.toscano.es/en/microsites-applications/micro-water-environment/dumo-algacleaner/>].
 6. Производитель ультразвуковых устройств Thomas Electronics. — Электронный ресурс: [<http://www.thomas-electronics.be>].
Производитель' ul'trazvukovykh ustroystv Thomas Electronics. — Elektronnyy resurs: [<http://www.thomas-electronics.be>].
 7. Румянцев В.А., Крюков Л.Н., Поздняков Ш.Р., Жуковский А.В. Цианобактериальное «цветение» воды — источник проблем природопользования и источник инноваций в России. // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana), 2011, № 2, с. 222–228.
Rumyantsev V.A., Kryukov L.N., Pozdnyakov Sh.R., Zhukovskiy A.V. Tsianobakterial'noe «tsvetenie» vody — istochnik problem prirodopol'zovaniya i istochnik innovatsiy v Rossii. // Obshchestvo. Sreda. Razvitie (Terra Humana), 2011, № 2, s. 222–228.
 8. Alternative and innovative methods for source water management of algae and cyanobacteria. Water research foundation, 2012. — Электронный ресурс: [http://www.waterrf.org/ExecutiveSummaryLibrary/4094_ProjectSummary.pdf].
Alternative and innovative methods for source water management of algae and cyanobacteria. Water research foundation, 2012. — Elektronnyy resurs: [http://www.waterrf.org/ExecutiveSummaryLibrary/4094_ProjectSummary.pdf].
 9. Broekman S., Pohlmann O., Beardwood E.S., Cordemans de Meulenaer E. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems. // Ultrasonics Sonochemistry, 2010, 17, pp. 1041–1048.
 10. Chapman J.S., Ferguson R., Consalo C., Bliss T. Bacteriostatic effect of sequential hydrodynamic and ultrasound-induced stress. // Journal of Applied Microbiology, 2013, 114, pp. 947–955.
 11. Davies D., Parsek M., Pearson J., Iglewski B., Costerton J.W., Greenberg E.P. The use of signal molecules to manipulate the behavior of biofilm bacteria. // Science, 1998, vol. 280, pp. 295–298.
 12. Dorzab T. Evaluation of an Ultrasonic Device to Control Golden Alga *Prymnesium parvum* in Fish Hatchery Ponds. Management of *Prymnesium parvum* at Texas State Fish Hatcheries. — Электронный ресурс: [http://www.tpwd.state.tx.us/publications/pwdpubs/media/pwd_rp_t3200_1138_preface.pdf].
Dorzab T. Evaluation of an Ultrasonic Device to Control Golden Alga *Prymnesium parvum* in Fish Hatchery Ponds. Management of *Prymnesium parvum* at Texas State Fish Hatcheries. — Elektronnyy resurs: [http://www.tpwd.state.tx.us/publications/pwdpubs/media/pwd_rp_t3200_1138_preface.pdf].
 13. Erriu M. Direct measurement of ultrasonic activity on microbial metabolism and analysis of related uncertainty. Ph.D. Thesis. — Politecnico di Torino, 2011/12.
 14. Griessler Bulc T., Istenič D., Krivograd Klemenčič A. The efficiency of a closed-loop chemical-free water treatment system for cyprinid fish farms. // Ecological Engineering, 2011, 37, pp. 873–882.
 15. Hutchinson G. Sound water practices. Ultrasonic technology controls algae and biofilm. // AWWA Opflow, April 2008, pp. 18–19.
 16. Krivograd Klemenčič A., Griessler Bulc T., Balabanič D. The effectiveness of chemical-free water treatment System combining fibre filters, ultrasound, And UV for fish farming on algal control. // Periodicum Biologorum, 2010, vol. 112, № 2, pp. 211–217.
 17. Mason T.J. Sonochemistry and the environment — Providing a «green» link between chemistry, physics and engineering. // Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14, pp. 476–483.
 18. Novel methods of algal control in aquatic plant production tanks Annual report, March 2010. — Электронный ресурс: [http://www.hdc.org.uk/sites/default/files/research_papers/HNS%20176_%20final%20report%202010_0.pdf].
Novel methods of algal control in aquatic plant production tanks Annual report, March 2010. — Elektronnyy

resurs: [[http://www.hdc.org.uk/sites/default/files/research_papers/HNS%20176 %20final%20report%202010_0.pdf](http://www.hdc.org.uk/sites/default/files/research_papers/HNS%20176%20final%20report%202010_0.pdf)].

19. *Oyib D.H.* Water treatment by means of ultrasound. // Everything about water, February 09, pp. 58–62.
20. *Oyib D.H.* Ultrasound in water treatment. // Water 21, June 2009, pp. 52–53.
21. *Pitt W.G., Ross S.A.* Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth. // Biotechnol Prog., 2003, 19(3), pp. 1038–1044.
22. *Purcell D.* Control of Algal Growth in Reservoirs with Ultrasound. PhD Thesis. — Cranfield university, Centre for water science, Department of sustainable systems, School of applied sciences, December 2009. — 227 p.
23. *Wu X., Joyce E.M., Mason T.J.* The effects of ultrasound on cyanobacteria. // Harmful Algae, 2011, 10, pp. 738–743.