

УДК 582.26/27

## **ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ – ОБИТАТЕЛЕЙ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

*Макарова Е. И., Отурина И. П., Сидякин А. И.*

*Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь,  
irina.oturina@mail.ru, acid2302@mail.ru*

В статье приведены современные данные научных исследований по практическому применению микроводорослей различных систематических групп в биотехнологических исследованиях, медицине, сельскохозяйственном производстве и других отраслях народного хозяйства. Дана оценка доступности микроводорослей как объекта эколого-биотехнологических разработок.

*Ключевые слова:* микроводоросли, водные экосистемы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Гидросфера как специфический и неотъемлемый компонент биосферы весьма сложна по химическому составу и заселена огромным количеством самых разнообразных организмов. Значительные изменения, происходящие в настоящее время в водных экосистемах под усиливающимся влиянием антропогенных факторов, в той или иной степени затрагивают все компоненты сложившихся и активно функционирующих гидроценологических комплексов, в которых главную роль играет фитобиота. Среди представителей альгофлоры особое место занимают микроводоросли, являющиеся в связи с фототрофным типом питания начальным звеном трофических цепей. Фотосинтезирующие микроорганизмы иллюстрируют все многообразие типов трофики. Качественные и количественные характеристики сообществ микроскопических водорослей во многом определяют развитие организмов других трофических уровней, вследствие чего исследования адаптивных изменений физиолого-биохимических характеристик микроводорослей является одним из приоритетных направлений в экологической физиологии растений.

Целью настоящих исследований является обобщения и анализ результатов биотехнологических исследований по практическому применению микроводорослей различных систематических групп в медицине, сельскохозяйственном производстве и других отраслях народного хозяйства, а также оценка доступности микроводорослей как объекта эколого-биотехнологических разработок.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Специфика метаболизма ряда представителей микроальгофлоры, связанная с продуцированием метаболитов с ценными для человека свойствами, сделала микроводоросли одним из важных объектов биотехнологии [1], целенаправленное использование которых имеет сравнительно краткую историю. Идея

культивирования микроводорослей в промышленных масштабах впервые возникла в период Второй мировой войны в Германии и состояла в получении пищевых масел из диатомовых водорослей, выращиваемых в условиях азотного голодания, однако выбранные культуры характеризовались низкой продуктивностью. Вскоре внимание исследователей переключилось на зеленые микроводоросли из родов *Chlorella* и *Scenedesmus*, представители которых на протяжении практически 50 последних лет стали наиболее популярными объектами прикладных исследований [2]. К сожалению, вследствие слабой разработки научно обоснованной методологии и недостаточного опыта ее практической реализации многие технологические неудачи и низкая рентабельность производства обусловили снижение интереса к этой проблеме. Возобновление исследований в области промышленного культивирования микроводорослей началось с конца 60-х – начала 70-х гг. В настоящее время получены убедительные доказательства того, что по комплексу свойственных водорослям физиолого-биохимических особенностей эта систематическая группа растений должна занять перспективное место в программе работ по созданию антропобиоценозов, характеризующихся высоким коэффициентом полезного действия фотосинтеза, а также промышленных биотехнологий, обеспечивающих их функционирование [3]. Однако и сегодня, несмотря на успехи развития фототрофных биотехнологий, более чем 30000 известных видов микроводорослей составляют слабоизученный биотехнологический ресурс [4, 2].

Дальнейшее развитие экономических аспектов биотехнологии микроводорослей затрагивает ряд отраслей: производство фармакологически активных препаратов, продуктов для косметических аппликаций (антиоксиданты, противовоспалительные средства) и диетических продуктов, клеточную инженерию, технологию по оздоровлению окружающей среды и прочее [4].

В настоящее время определены основные направления рационального использования биомассы микроводорослей, которую можно получить, как выращивая их в промышленных фотобиореакторах различного типа (хлорелла, сценедесмус, дуналиелла, спирулина, носток, порфиридиум, платимонас, хламидомонас и др.), так и выделяя их из эвтрофированных пресных (микроцистис, анабена, спирулина) и морских (нодулярия, дуналиелла) водоемов [3].

Микроводоросли используются для получения разнообразных продуктов из нативной и переработанной альгомассы [5]. В некоторых регионах мира исторически сложилась традиция использования в пищевых целях определенных видов водорослей. Сегодня во всех странах мира разрешено употребление в пищу следующих видов: *Arthrospira platensis*, *Arthrospira maxima*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella sorokiniana*, *Dunaliella salina*; регионально разрешены: *Nostoc pruniforme* (в странах юго-восточной Азии), в США – *Aphanizomenon flos-aquae* [2]. Микроводоросли содержат уникальный комплекс необходимых организму человека компонентов. Их клетки богаты витаминами, белками, углеводами, микро- и макроэлементами не только количественно, но и качественно. Например, микроскопические водоросли способны к биосинтезу 13 витаминов, а такой ценный продукт как рыбий жир, содержит их всего 6. В биомассе *Ch. vulgaris*, *Senechococcus elongates*, *S. platensis* концентрация таких

витаминов как тиамин, рибофлавин, фолиевая кислота, провитамин А, более высокая, чем у высших растений [6]. Водоросли родов *Nostoc* и *Microcystis* накапливают в больших количествах витамин В<sub>12</sub> [7, 8, 9].

Данные ВОЗ свидетельствуют о том, что более 60% человечества питается неудовлетворительно, не получая достаточного количества белковой пищи [4]. Так, согласно заключению специалистов РАМН, проводящих выборочные клинические исследования по всей стране, дефицит белка в России составляет примерно 850 тыс. т/год. Разрешить эту проблему могут микроскопические водоросли, так как в них содержится большое количество полноценных белков, необходимых для человека [8]. В научной литературе имеются сведения о том, что белок хлореллы, сценедесмуса, хламидомоноса, спироулины, ностока и других микроводорослей содержит все незаменимые аминокислоты – треонин, валин, фенилаланин, лейцин, изолейцин, лизин, метионин и др. [3]. В связи с вышеперечисленными фактами необходимость создания интенсивной культуры микроводорослей, как дополнительного источника полноценного белка, очевидна. Показано, что, изменяя условия культивирования, можно получать биомассу хлореллы с содержанием белковых веществ от 8 до 58%, углеводов – от 6 до 37%, и жиров – от 4 до 85% [10]. Варьируя условия выращивания, в значительной мере можно увеличивать выход этих и прочих веществ (аминокислот, макро- и микроэлементов) и у других видов водорослей.

Известен опыт применения микроводоросли *S. platensis*, в пищевой промышленности, в качестве высокобелковых и витаминизированных пищевых добавок, биокрасителей, а также как биостимулятора и регулятора роста.

В клетках водорослей в значительном количестве представлены минеральные компоненты. Например, в биомассе спироулины содержится до 528 мг/кг железа, фосфора – 8000, калия – 14300, магния – 1660, марганца – 22, цинка – 33, селена – 0,4 мг/кг, а кальция в ней даже больше, чем в молоке (до 10000 мг/кг). Морская одноклеточная красная водоросль порфиридиум является источником каррагинина [11], который находит применение в пищевой промышленности не только как эмульгатор в фармацевтике и молочнокислой промышленности, но и как клеящее вещество в кожевенном и текстильном производстве [12].

Одной из наиболее актуальных задач биотехнологии является управляемый биосинтез пигментов микроводорослей, таких как хлорофиллы, каротины, ксантофиллы, фикобилипротеины [13]. Важно, что пигменты, получаемые из растительных компонентов, не токсичны. Так, наиболее перспективным источником каротина для биотехнологической промышленности признана зеленая водоросль *D. salina* [14, 15, 16, 17]. Известно, что в определенных условиях она способна к гиперсинтезу каротина, содержание которого в ее клетках может достигать 10%. Исследование биологии *D. salina* и экологических факторов, вызывающих ее переход к активному накоплению β-каротина в естественных условиях, показало, что биосинтез этого соединения является приспособительной реакцией организмов в ответ на экстремальные условия роста, к которым относятся изменения солености и минерального состава среды, температуры и освещенности, а также сочетания комплекса указанных параметров [18]. В промышленных условиях, используя принцип разобщения клеточных функций деления и фотосинтеза, при управляемом

биосинтезе  $\beta$ -каротина в клетках дуналиеллы, можно получить большие объемы предшественника витамина А за небольшие интервалы времени. Однако технологический процесс выращивания *D. salina* еще очень далек от идеального вследствие физиолого-биохимической сложности метаболизма водоросли и его слабой изученности с точки зрения регуляции синтеза каротина в условиях промышленного процесса [19].

Источником пигментов могут быть и сине-зеленые водоросли, из которых единственной в настоящее время микроводорослью, культивируемой для промышленного получения этих соединений, является спирулина. Ее хлорофиллы используют для окраски мыла, масел, жиров, алкогольных и безалкогольных напитков, одеколона, духов, в качестве дезодоранта. В Японии хлорофиллами окрашивают рыбные пасты и другие кулинарные изделия, В Европе – масла, жиры, ароматические эссенции [20]. Пищевые красители можно получать и из других видов микроводорослей, например, дополнительный пигмент фикоцианин, выделяют из сине-зеленой микроводоросли *Phormidium* [21].

Перспективным для практического использования является получение из биомассы микроскопических водорослей хлорофилл-каротиновой пасты, которая как основное действующее вещество входит в состав высокоэффективной мази «Альгофин». Данная мазь, оказывая антимикробное действие на грамположительную и грамотрицательную, аэробную и анаэробную, спорообразующую и аспорогенную микрофлору, обладает противовоспалительным эффектом, вследствие чего усиливает регенерационный и репарационный процессы, тем самым, снижая показатели токсикоза у больных с обширными ожогами, трофическими нарушениями, язвами радиационного поражения [3].

Известны многочисленные положительные результаты медико-биологических, фармакологических и других исследований, демонстрирующих высокую эффективность применения микроводорослей при лечении и профилактике целого ряда заболеваний, связанных с нарушениями деятельности иммунной, эндокринной, пищеварительной, сердечно-сосудистой и нервной систем животных и человека [22]. Заметный терапевтический эффект оказывает *Spirulina*, что определяется ее уникальным составом: биомасса спирулины содержит легко усваиваемый белок, свободные незаменимые аминокислоты, широкий спектр микроэлементов и минеральных солей, полиненасыщенные жирные кислоты, пигменты и пр. Препараты спирулины в виде мазей, спиртовых и масляных экстрактов, свечей и таблеток способствуют снижению холестерина в крови и риска ожирения, уменьшают нефротоксичность при воздействии тяжелых металлов и лекарств, значительно увеличивают популяции лактобацилл и бифидобактерий в кишечнике, нормализующих деятельность желудочно-кишечного тракта, снижают содержание сахара в крови при диабете [24]. Установлено, что фикоцианин, выделенный из спирулины, стимулирует рост клеток, а также повышает иммунитет и сопротивляемость организма раковым заболеваниям. Это соединение является одним из лучших радиопротекторов, поскольку поглощает до 40% радиоактивного цезия и стронция из организма человека, а ее супероксиддисмутаза инактивирует свободные радикалы, замедляя процессы старения клеток. Производные хлорофилла спирулины применяют для фотодинамической терапии рака [21]. В

связи с проблемой йододефицита у населения Украины разработаны биотехнологические способы производства биомассы спирулины с высокой концентрацией йода – до 100 мкг в 1 г биомассы, причем большая часть йода входит в состав органических соединений, являющихся более устойчивыми, чем минеральные [24]. Все вышеперечисленные факты дают основание рассматривать спирулину как важнейший объект биотехнологии. Возрастающие потребности в биомассе и ее составляющих привели к разработке высокопродуктивных технологий производства *S. platensis* в управляемых условиях, позволяющих с высокой степенью точности формализовать весь процесс производства ее биомассы с заданным биохимическим составом [25].

Лечебными свойствами обладают и гликопротеиды микроводорослей, способные к угнетению роста опухолевых клеток, а также каротиноиды, относящиеся к числу антиоксидантов за счет того, что благодаря наличию сопряженных двойных связей они связывают синглетный кислород и ингибируют образование свободных радикалов [26, 27, 28, 29]. Фикобилипротеины как дополнительные пигменты микроводорослей нашли применение в иммунофлуоресцентной диагностике, где их используют в качестве флуоресцентных меток. Существуют данные, указывающие на возможность применения фикобилипротеинов в качестве противовоспалительных средств [2].

Возрастает значение водорослей и в медицине как регенераторов лечебных грязей, источников получения уникальных медицинских препаратов (заменителей крови, растворимых хирургических нитей, противодиабетических соединений) [30].

Одним из приоритетных направлений развития биотехнологии является поиск и изучение новых нетрадиционных источников биологически активных веществ, в исследовании которых лидируют США и Япония, заметный вклад также вносят разработки ученых Франции, Индии, Швейцарии, Австралии и Аргентины [31]. Данные последних лет позволяют утверждать, что водоросли можно использовать для направленного биосинтеза целого ряда соединений [32, 5, 33, 11]. Так, например, *S. platensis* способна к синтезу йодсодержащих соединений гормональной природы – тироксина и трийодтиронина, легко усваиваемых человеческим организмом [34]. Большой интерес представляет перспектива использования одноклеточных зеленых водорослей для биосинтеза алкалоидов, стероидов, витаминов – соединений вторичной природы [35, 32].

Микроводоросли успешно применяются и в химической промышленности. Из некоторых, например, из морской микроводоросли *Porphyridium cruentum* получают резиноиды – душистые фиксаторы, используемые в качестве отдушек и красителей для пищевых, парфюмерных и других косметических продуктов, а также товаров бытовой химии. Некоторые штаммы хлореллы и сценедесмуса содержат в высушенной биомассе более 20% резиноидов [36]. Главной проблемой в производстве резиноидов из морских микроводорослей является их высокая себестоимость по сравнению с синтетическими аналогами. Для удешевления технологий возможно применение безотходного производства при комплексной переработке биомассы микроводорослей. Продукты переработки спирулины используют также в косметологии в виде красителей, кремов, эмульгаторов, гелеобразователей и моющих средств.

Микроводоросли могут быть промышленным сырьем для получения альгиновых кислот и альгинатов, агар-агара, агароида, каррагинина, сорбита, маннита, этилового и метилового спиртов, ацетона, органических кислот, эфиров, нитроцеллюлозы, меченых аминокислот, стеролов, инсектицидов, репеллентов, дейтированных соединений [30]. Следует помнить, что такие полезные ископаемые, как залежи графита, известняка, диатомитов и трепелов, горючих сланцев и газов, сапропелей, некоторых разновидностей каменного угля, возможно, нефти, образовались в минувшие геологические эпохи в результате фотосинтетической деятельности древних водорослей, в том числе и одноклеточных.

Широк спектр применения микроводорослей в сельском хозяйстве. В качестве кормовых добавок в животноводстве и птицеводстве используются водоросли родов *Chlorococcum*, *Spirogyra*, *Scenedesmus*, *Nostoc*, *Navicula*, *Nitzschia* и др. Такие добавки оказывают выраженное положительное влияние: у животных повышается иммунитет, возрастают их вес, плодовитость и выживаемость молоди, у птиц – увеличиваются размеры яиц, усиливается яйценоскость и интенсивность окраски яичного желтка. Вследствие этого в США фермерские хозяйства для выращивания крупного рогатого скота и птицы обеспечены водорослевыми водоемами, в которых отходы животноводства утилизируются водорослями, в результате чего 40% азота из сточных вод снова поступает в биомассу водорослей и поедается животными [37]. Кроме того, применение суспензии хлореллы и сценедесмуса в шелководстве способствует ускорению развития гусениц тутового шелкопряда, а также увеличивает его жизнеспособность и урожайность коконов [8, 2].

Использование водорослей для решения продовольственной проблемы, неразрывно связанной с поиском эффективных путей охраны окружающей среды, позволяет уменьшить антропогенную нагрузку на наземно-водные экосистемы, являющиеся сегодня основным источником пищи для человека и кормовой базой для животных. В настоящее время мировой объем продаж продуктов из микроводорослей неуклонно растет: в 2008 г. он оценивался примерно в 7 миллиардов долларов США (табл. 1) [2].

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства и резкого повышения антропогенного воздействия на окружающую среду, в том числе, и на почвенный покров, в значительной степени возрастает роль биологических факторов повышения плодородия почв и их рекультивация. Большую помощь в этом может оказать умелое использование и регулирование развития почвенной биоты, постоянной и существенной составляющей которой являются водоросли. Микроводоросли успешно используются для повышения плодородия почв, то есть для пополнения запасов органических веществ (типа гуминовых кислот), что способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур. В этих целях применяют зеленые (*Ch. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, *Scenedesmus acutus*, *Scenedesmus quadricauda*, *Scenedesmus spinosa*) и сине-зеленые микроводоросли (Семейство *Nostocaceae*). Вопросы альгологизации почв впервые были затронуты в работах Дэ, обратившего внимание на стабильность урожаев риса в Индии при монокультуре без внесения удобрений [7]. Оказалось, что на рисовых полях Индии обитает большое количество сине-зеленых водорослей, среди которых много азотфиксирующих форм. Очевидно, что применение микроводорослей в качестве

биоудобрения является экономически выгодным и более безопасным для окружающей среды по сравнению с химическими удобрениями.

Таблица 1

Объемы продаж продуктов из микроводорослей в мировых масштабах

Продукт	Объем продаж, млн. долларов США
БАД и продукты питания	1250–2500
Функциональные продукты	800
Аквакультура	700
Кормовые добавки	300
Астаксантин	>200
В-каротин	300
Лютеин	30
Фикоцианин, фикоэритрин	>12–13
Догозагексаеновая кислота	1500
Экстракты антиоксидантов	100–150
Арахидоновая кислота и смеси ПНЖК	30
Токсины	1–3
Аминокислоты и жирные кислоты, меченные стабильными атомами	>5

Практические подходы к использованию почвенных водорослей для повышения плодородия почв в настоящее время развиваются в двух направлениях. Во-первых, возможно активирование автохтонного комплекса почвенных микроводорослей, поскольку данные организмы как накопители органического вещества в водных и наземных экосистемах активнее увеличивают свою биомассу при внесении в почвы минеральных удобрений, более эффективных в присутствии органического вещества, в свою очередь, стимулирующего развитие самих водорослей. Например, при весенней подкормке сельскохозяйственных культур, когда удобрения вносятся на влажную поверхность почвы, происходит бурное развитие водорослей, в результате чего почва покрывается зеленым налетом – «цветет». Органическое вещество водорослей разлагается быстрее растительных остатков, что делает его более доступным для других обитателей биоценоза. Второе направление в интенсификации процесса повышения плодородия почв при помощи микроводорослей – внесение живых культур этих микроорганизмов в почву (альгализация), особенно в условиях поливного земледелия. Ее проводят до посева растений или при посеве вместе с семенами (например, хлопчатника), либо водоросли вносят после посева, что особенно эффективно на рисовых полях [38].

Почвенные водоросли могут также служить индикаторами состояния почв [37]. Многочисленные данные свидетельствуют о том, что водоросли используются в качестве тест-объектов как при определении потребности почвы в удобрениях, так и при испытании различных пестицидов, например, для оценки остаточной токсичности гербицидов в почве. Микроводоросли могут быть использованы для изучения механизма действия различных гербицидов, а также в качестве модельных

объектов при изучении фитотоксических химических соединений и идентификации их структуры [39]. Однако более надежными индикаторами состояния почвы являются все же не отдельные виды водорослей, а их сообщества. Таким образом, почвенные водоросли, чувствительные к любым изменениям условий существования, должны рассматриваться как неотъемлемая составляющая почвенного мониторинга.

В последнее время большое внимание привлек еще один аспект применения микроводорослей в хозяйственной жизни человека – экологический. Деятельность микроскопических водорослей как утилизаторов углекислоты можно рассматривать как вызов XXI века. В связи с этим масштабы их применения будут неуклонно расширяться в качестве альтернативы решения не только технических, пищевых и медицинских проблем, но и сложных энергетических и глобальных экологических задач [3].

Микроводоросли играют особо важную роль в биологической очистке вод. С учетом экономической эффективности наиболее перспективным считают использование водорослей для очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности, рыбоводных хозяйств, животноводческих ферм, птицефабрик, боен [40]. Они как фототрофные организмы обогащают водную среду кислородом, способствуя тем самым ускорению окислительных процессов и минерализации органических примесей в сточных водах. Водоросли для очистки сточных вод успешно применяют в США, Японии, Германии. Доказана способность ряда сине-зеленых водорослей гидролизовать ациланилидный гербицид пропанил, превращая его в 3,4-дихлоранилин, быстрее разрушаемый бактериями. Некоторые цианопрокариоты разлагают фенилкарбаматные гербициды – профам и хлорпрофам – на анилин и хлорпроизводные вещества [41]. Положительную роль сине-зеленых микроводорослей обуславливает суммарное действие нескольких существенных факторов: улучшение кислородного режима за счет фотосинтетической аэрации, улучшение условий существования водной микрофлоры, аккумуляция загрязнителей и выделение биологически активных метаболитов. Культивирование микроводорослей на сточных водах, с одной стороны, позволяет осуществлять биологическую очистку воды, с другой стороны – получать дешевую биомассу, богатую белками, витаминами и пр. [42]. Существуют данные о том, что альго-бактериальные ценозы способствуют разрушению мазута, продуктов органического синтеза и прочих ксенобиотиков, попадающих в природные водоемы в результате деятельности человека [43]. Применение активных штаммов микроорганизмов-деструкторов, выделение и использование устойчивых к загрязненным водам микроводорослей позволило создать новую комплексную биотехнологию очистки и восстановления экосистем водоемов и почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Эти технологии позволяют проводить биоремедиацию водоемов и почв, подвергнутых систематическому аварийному загрязнению в течение многих лет нефтепродуктами и другими токсикантами. Затраты на эксплуатацию биологических прудов (при наличии соответствующих земельных и водных ресурсов) на единицу эффективности очистки составляют 1% стоимости всей биологической очистки. Капитальные затраты на очистку в биологических прудах достигают 10–50% от стоимости типовой станции очистки.



Рассчитано, что очистка сточных вод биологическими методами, в первую очередь, с помощью водорослей, стоит в 100 раз дешевле, чем физико-химическими, при этом за счет механической очистки из воды удаляется до 30%, физико-химической – до 40%, а биологической – до 80% органических загрязнителей, в связи с чем микроводоросли для очистки сточных вод успешно и эффективно используются во многих странах мира [3]. Себестоимость получения 1 кг сухой биомассы водорослей из биологических прудов составляет всего 0,8 \$ (на 1996 г.). Изготовление продуктов из сырой водорослевой массы требует затрат 0,0222 \$ на 1 кг, а реализация этих продуктов возмещает стоимость очистки сточных вод.

Одним из наиболее эффективных способов очистки воды является биофлокуляция [44]. Сущность этой разработки заключается в применении специально выращенной биокультуры для оздоровления водных экосистем. В отличие от известных методик, применяется микроводоросль, находящаяся в неактивном состоянии, поскольку в качестве флокулянта используются физико-химические свойства биомассы. В отличие от синтетических флокулянтов, биофлокулянт дешевле и может быть произведен в неограниченном количестве на месте его потребления. Способ очистки сточных вод биофлокуляцией в 5 раз дешевле всех известных способов очистки, что обуславливает возможность снижения затрат, повышения эффективности и стабильности работы, улучшения качества очистки вод от взвешенных примесей, распределенных в больших объемах воды. Биофлокуляция позволяет в процессе очистки больших объемов загрязненных вод одновременно выращивать культуру водоросли. Предлагаемый способ очистки пригоден для применения в горнодобывающей промышленности, в отдаленных от коммуникаций районах, что может обеспечить стабильность процесса очистки вне зависимости от климатических факторов и колебаний в расходах сточных вод. Кроме осаждения взвешенных веществ микроводоросли могут адсорбировать тяжелые металлы, радионуклиды, стойкие органические загрязнения, выводя их из воды. В отличие от известных технологий биофлокуляция может применяться и для открытых водоемов, выполняя функцию недостающего звена экосистемы. Многие виды микроскопических водорослей применяют в качестве индикаторов органического загрязнения водоемов и их санитарно-биологической оценки.  $\alpha$ -мезосапробными организмами являются *S. acutus*, *Ch. vulgaris*,  $\beta$ -мезосапробными – *Ankistrodesmus falcatus*, многие виды *Scenedesmus* и др. [8, 45].

Таким образом, биотехнология защиты окружающей среды от загрязнителей различной природы и индикация ее состояния с помощью надежных тестовых объектов, в качестве которых могут использоваться определенные виды микроводорослей – это тот инструментарий, который призван обеспечить восстановление затронутых деятельностью человека экосистем [43].

Водоросли – один из самых богатых источников для производства биотоплива. Выход масла из водорослей составляет около 50%, что существенно больше чем у рапса. Количество производимых растительных масел из водорослей составляет 11400–95000 л · га<sup>-1</sup>, то есть на порядок больше, чем из пищевых культур [46]. Микроводоросли по потенциальному энергетическому выходу в 8–25 раз превосходят пальмовое масло и в 40–120 раз – рапсовое, что позволяет относить их к типичным представителям растительных масличных культур. Некоторые

штаммы водорослей идеально подходят для производства биотоплива благодаря высокому содержанию в них масла – избыток его составляет до 70%. Преимущества получения биодизельного топлива из водорослей – высокая скорость роста и, следовательно, высокий выход на 1 га площади; кроме того, биотопливо, получаемое из водорослей, не содержит серы, нетоксично и хорошо поддается биоразложению.

Лабораторные культуры водорослей могут использоваться для решения многих фундаментальных проблем естествознания. Микроводоросли применяют в качестве удобного модельного объекта для выяснения механизмов дыхания и фотосинтеза, потенциальной продуктивности фотосинтетического аппарата, вопросов биологического саморегулирования биосинтеза различных соединений [47], для выяснения вопросов природной очаговости некоторых сапронозных инфекций. Полагают, что водоросли являются природным резервуаром возбудителей некоторых инфекционных заболеваний человека, чем обуславливают их существование в межэпидемические периоды, способствуя реализации водного пути передачи возбудителя [48]. С увеличением численности микроводорослей связывают накопление патогенов в среде и вспышку инфекции. Так, эвтрофикацией водоемов, обусловленной отмиранием фитопланктона и повышением концентрации органических веществ в среде, объясняют сезонность некоторых инфекционных заболеваний, например, холеры. Культивированию *Vibrio cholerae* совместно с различными видами микроводорослей (*Anabaena variabilis*, *S. quadricauda*, *Ch. vulgaris* и др.) показало, что в культуре сине-зеленых водорослей *Anabaena* sp. происходит активное размножение и длительная персистенция (до 25 месяцев) холерных вибрионов [49]. Эксперименты такого рода могут помочь в обнаружении и понимании многих механизмов сапронозных инфекций и поиске путей их предотвращения.

Микроскопические водоросли, прежде всего, хлореллу, в связи с проблемой освоения космоса рассматривают как звено в замкнутых экологических системах, способное обеспечить биологическую регенерацию воздуха и воспроизводство пищи [50, 51, 52, 53]. Эта идея была высказана еще К. Э. Циолковским, предположившим, что возможно использовать микроводоросли в качестве метаболического противовеса человеку в условиях длительного космического полета или внеземных поселений. Проведенные эксперименты показали, что в замкнутой по газу и воде экосистеме хлорелла может обеспечивать человека кислородом, поглощая углекислоту, и утилизировать продукты его жизнедеятельности практически неограниченно долго (опыты длились до года), но при этом человек не может полностью поглотить всю синтезируемую биомассу хлореллы [54]. К достоинствам использования микроводорослей следует отнести отсутствие в эксперименте заметных изменений в физиолого-популяционном состоянии и побочных эффектов при совместном существовании человека и водорослей в замкнутых системах, а также высокую продуктивность (для хлореллы 25–30 литра кислорода с 1 литра суспензии в сутки) и высокую степень надежности и устойчивости водорослевого звена в обеспечении полноценного питания экипажа.

Необходимо учитывать, что наряду с множеством положительных аспектов практического использования микроводорослей, существует и негативное их

воздействие на окружающую среду. Так, на первом Европейском симпозиуме «Микроводоросли и здоровье» в связи со вспышками массового развития микроводорослей в водоемах и участвовавшими случаями отравления обсуждалась их способность к синтезу широкого спектра токсинов и антибиотиков, а также рассматривались вопросы поиска продуцентов новых селективно действующих соединений с высокой физиологической активностью [55]. Значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и для решения проблем, связанных со здоровьем человека и сохранением водных ресурсов, представляют токсины таких микроводорослей, как *S. obliquus*, *S. quadricauda*, представителей рода *Nostoc* [56]. При повышении температуры воды, усилении биогенного загрязнения прибрежных вод, вселении новых видов в акватории вместе с балластными водами быстрое увеличение биомассы микроводорослей приводит к гибели рыб, загрязнению морепродуктов токсинами и оказывает другие негативные воздействия, получившие в настоящее время название «Вредоносное цветение водорослей» [57]. Во второй половине XX века из-за активизации техногенной деятельности человека в глобальных масштабах частота «цветений» вод, вызванных токсичными морскими водорослями, резко возросла. Катастрофические вспышки биомассы ядовитых водорослей представляют реальную угрозу для здоровья человека, ресурсов рыбной промышленности и аквакультуры. Убытки мировой экономики от последствий вредоносного влияния токсичных микроводорослей могут достигать сотен миллионов долларов в год [57]. Кроме того, обладая многими полезными для человека свойствами, водоросли вместе с тем могут наносить значительный ущерб народному хозяйству, вызывая биокоррозию промышленных и строительных материалов, порчу произведений искусства, памятников архитектуры, обрастание гидротехнических сооружений, суден, засорение трубопроводов и фильтров [30].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, микроводорослям отводят важную роль в решении ряда глобальных проблем, волнующих все человечество: продовольственной, медицинской, энергетической, охраны окружающей среды, освоения космического пространства и пр. Возможности широкомасштабного промышленного производства биомассы микроводорослей и расширение спектра их использования выдвигают ряд задач перед экологами, микробиологами и биотехнологами в области поиска высокопродуктивных штаммов и оптимизации условий их культивирования. Охрана и рациональное использование полезных видов и предотвращение нежелательных биологических явлений, вызываемых водорослями, возможны лишь при условии глубокого познания альгофлоры, изучения закономерностей распределения и развития водорослей в наземных и водных экосистемах с учетом их физиолого-биохимических и эколого-биологических особенностей.

### Список литературы

1. Макро- и микроэлементы в оптимизации минерального питания микроводорослей / В. В. Упитис. – Рига: Зинатне, 1983. – 240 с.

2. Минюк Г. С. Одноклеточные водоросли как возобновляемый биологический ресурс / Г. С. Минюк, И. В. Дробещкая, И. Н. Чубчикова и др. // Морской экологический журнал. – 2008. – Т. 7, № 2. – С. 5–23.
3. Романенко В. Д. Биотехнология культивирования гидробιονтов / [В. Д. Романенко, Ю. Г. Крот, Л. А. Сиренко, В. Д. Соломатина]. – Киев, 1999. – 264 с.
4. Хоанг Т. М. Н. Исследование процессов получения продуктов белковой и углеводной природы из белого лепестка сои: автореферат дисс. на соиск. уч. звания канд. биол. наук / Т. М. Н. Хоанг; российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева. – М., 2009. – 20 с.
5. Пульц О. Ценные вещества из водорослей / О. Пульц // Альгология. – 2000. – Т. 10, № 3. – С. 344–348.
6. Винберг Г. Г. Массовые культуры одноклеточных водорослей как новый источник пищевого и промышленного сырья / Г. Г. Винберг // Успехи современной биологии. – 1957. – Т. 18, вып. 3.
7. Баянова Ю. И. Оценка витаминного состава некоторых одноклеточных водорослей и высших растений, выращенных в искусственных условиях / Ю. И. Баянова, Н. И. Трубачев // Прикладная биохимия и микробиология. – 1981. – Т. 17, № 3. – С. 400–407.
8. Горюнова С. В. Синезеленые водоросли (биохимия, физиология, роль в практике) / С. В. Горюнова, Г. Н. Ржанова, В. К. Орлеанский. – М.: Наука, 1969. – 300 с.
9. Царенко П. М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР / П. М. Царенко [отв. ред. Г. М. Паламарь-Мордвинцева]. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
10. Гаевская Н. С. Проблемы использования одноклеточных водорослей / Н. С. Гаевская // Природа. – 1956. – № 4. – С. 43–51.
11. Вопросы управления биосинтезом низших растений. / [В. Н. Белянин, Р. П. Тренкеншу, Ф. Я. Сидько и др.]. – Новосибирск: Наука, 1982. – 154 с.
12. Саут Р., Уиттик А. Основы альгологии / Р. Саут, А. Уиттик. – М.: Мир, 1990. – 597с.
13. Береговая Н. М. Сравнение различных способов хранения водного экстракта с-фикоцианина микроводоросли *Spirulina platensis* / Н. М. Береговая, И. Н. Гудвилевич // Экология моря. – 2006. – Вып. 70. – С. 5–8.
14. Тренкеншу Р. П. Технология промышленного культивирования спирулины / Р. П. Тренкеншу, Р. Г. Геворгиз. – Севастополь, 2004. – 16 с.
15. Гудвилевич И. Н. Динамика суммарных каротиноидов и хлорофилла-а в клетках *Dunaliella salina* в квазинепрерывной культуре / И. Н. Гудвилевич, Н. М. Береговая, А. Б. Боровков // Экология моря. – 2005. – Вып. 6. – С. 52–55.
16. Тренкеншу Р. П.. Технология промышленного культивирования дуналиеллы / Р. П. Тренкеншу, Р. Г. Геворгиз, А. Б. Боровков. – Севастополь, 2005. – 14 с.
17. Анализ направлений пищевой биотехнологии / [А. Д. Лодыгин, А. Б. Рябцева] // Сборник научных трудов СевКавГТУ. Серия «Продовольствие»: [ред. колл. Б. М. Синельников и др.]. – Изд-во СевКавГТУ, 2005. – № 1. – С. 12–18.
18. Боровков А. Б. Зеленая микроводоросль *Dunaliella salina* Теод. (обзор) / А. Б. Боровков // Экология моря. – 2005. – Вып. 67. – С. 5–17.
19. Сиренко Л. А. Особенности интенсивного культивирования *Dunaliella salina* (обзор) / Л. А. Сиренко, З. Т. Сафиуллин, Н. В. Панченко // Экология моря. – 2005. – Вып. 67. – С. 68–88.
20. Ефимов А. А. Обоснование использования синезеленых водорослей для выделения хлорофилла и фикобилипротеинов как пищевых красителей и биологически активных веществ / А. А. Ефимов, Т. П. Белова, М. В. Ефимова // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 11. – С. 77–80.
21. Ефимов А. А. Обоснование технологии получения фикоцианина из синезеленых водорослей как пищевой добавки / А. А. Ефимов // Научный журнал «Фундаментальные исследования». – 2007. – № 11. – С. 80.
22. Боровков А. Б. Продуктивность *Spirulina platensis* и *Tetraselmis viridis* при использовании различных методов культивирования / А. Б. Боровков, Р. Г. Геворгиз // Экология моря. – 2006. – Вып. 70. – С. 9–13.
23. Чернова Н. И. Микроводоросль спирулина как объект биотехнологии / Н. И. Чернова, Т. П. Коробкова, С. В. Киселева // Московский педагогический марафон учебных предметов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bio.1september.ru/articlef.php?ID=200601304>
24. Минюк Г. С. Спирулина Крымская – источник йода / Г. С. Минюк, Р. П. Тренкеншу // Прикладная альгология. – 1999. – № 1–3. – С. 25–28.

25. Лелеков А. С. Оптимизация роста *Spirulina platensis* в проточной культуре / А. С. Лелеков, С. Ю. Склярченко, Р. Г. Геворгиз // Экология моря. – 2006. – Вып. 70. – С. 34–38.
26. Мушак П. А. Биомасса синезеленых водорослей (*Cyanophyta*) – сырье для получения биологически активных веществ / П. А. Мушак // Альгология. – 1999. – Т. 9, № 2. – С. 98–99.
27. Ефремова Н. Е. Разработка способов получения антиоксидантных препаратов на основе биоактивных веществ цианобактерий и микроводорослей: автореферат дис. на получение научн. степени доктора биол. наук / Н. Е. Ефремова; Ин-т микробиол. и биотехнол. Акад. наук Молдовы. – Кишинев, 2009. – 29 с.
28. Нехорошев М. В. Черноморские водоросли – потенциальный источник химиотерапевтических и противоопухолевых препаратов / М. В. Нехорошев, О. К. Воронова // Альгология. – 1996. – Т. 6, № 1. – С. 86–89.
29. Hanaa N. Abd El Baky. Production of antioxidant by the green alga *Dunaliella salina* / Hanaa N. Abd El Baky, Farouk K. El Baz, Gamal S. El-Baroty // International Journal of Agriculture & Biology. – 2004. – Vol. 6, № 1. – P. 49–57.
30. Топачевский А. В. Пресноводные водоросли Украинской ССР / А. В. Топачевский, Н. П. Масюк. – К.: Вища школа, 1984. – 336 с.
31. Васьковский В. Е. Морские водоросли – источник биологически активных веществ / В. Е. Васьковский // III Совещания по лесохимии и органическому синтезу: 28.09–02.10.1998.: мат. конф. – Сыктывкар, 1998 – С. 8.
32. Кузнецов Е. Д. Управляемый биосинтез / Е. Д. Кузнецов, В. Е. Семенов. – Наука, 1966. – С. 105–110.
33. Чесноков В. А. Массовое выращивание одноклеточных водорослей / В. А. Чесноков, В. В. Пиневиц, Н. Н. Верзилин // Сельское хозяйство Северо-западной зоны. – 1959. – № 12.
34. Котинский А. В. Влияние солей кобальта на содержание биологически активных веществ в биомассе спирулины / [А. В. Котинский, Л. А. Чернухина, Г. В. Донченко и др.] // Укр. біохім. журн. – 2004. – Т. 76, № 2. – С. 112–116.
35. Клячко-Гурвич Г. Л. Физиолого-биохимические аспекты направленного получения ценных метаболитов в условиях интенсивной культуры водорослей / Г. Л. Клячко-Гурвич, В. Е. Семенов // Труды Московского общества испытателей природы. – 1966. – Т. 24, вып. 24. – С. 154–159.
36. Тренкеншу Р. П. Морские микроводоросли – источник резиноидов / Р. П. Тренкеншу, И. А. Гейнрих // Экология моря. – 2000. – Вып. 50. – С. 75–77.
37. Водоросли / [отв. ред. С. П. Вассер]. – К.: Наукова думка, 1989. – 608 с.
38. Джуманиязов И. биологические основы альгализации орошаемых почв Узбекистана в условиях интенсивного земледелия: автореферат дисс. соиск. науч. степ. д-ра. биол. наук. / И. Джуманиязов. – К., 1988. – 47 с.
39. Круглов Ю. В. Изменения альгофлоры дерново-подзолистых почв под влиянием систематического применения гербицидов / Ю. В. Круглов, Е. И. Михайлова // развитие и значение водорослей в почвах Нечерноземной зоны: матер. межвуз. конф. – Пермь, 1977. – С. 74–75.
40. Ленова Л. И. Водоросли в доочистке сточных вод / Л. И. Ленова, В. В. Ступина. – К.: Наук. думка, 1990. – 183 с.
41. Винберг Г. Г. Участие фотосинтезирующих организмов фитопланктона в процессах самоочищения загрязненных вод / Г. Г. Винберг, Т. Н. Сивко // Гидробиология и ихтиология внутренних водоемов Прибалтики / Тр. Ин-та биол. АН Латв. ССР. – Рига, 1963. – Т. 23, № 7. – С. 61–65.
42. Таубаев Т. Т. Система биологической очистки сточных вод при помощи протококковых водорослей, ряски, и других гидробионтов / Т. Т. Таубаев С. Буриев // Культивирование и применение микроводорослей в народном хозяйстве: мат. респ. конф. – Ташкент: Фан, 1980. – С. 113–115.
43. Янкевич М. И. Формирование ремедиационных биоценозов для снижения антропогенной нагрузки на водные и почвенные экосистемы: автореферат дис. на соискание уч. степени канд. биол. наук / М. И. Янкевич; Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности РАСХН. – Щелково, 2002. – 50 с.

44. Новиков О. Н. Биофлокуляция – биотехнологический элемент водных экосистем / О. Н. Новиков, Г. О. Хакимова // «Морская экология – 2005»: труды Междунар. науч.-практич. конф. – Владивосток, 2005. – С. 146–147.
45. Барина С. С. Атлас водорослей – индикаторов сапробности (российский дальний Восток) / [С. С. Барина, Л. А. Медведева]. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 364 с.
46. Ключ В. П. Перспективы производства жидкого биотоплива второго поколения / В. П. Ключ // IX міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика ХХІ століття»: 15–19 вересня 2008 р.: тез. доп. – смт. Миколаївка, АР Крим, Україна, 2008. – С. 294–296.
47. Владимирова М. Г. Физиологические особенности *Chlorella* в связи с длительным интенсивным культивированием водорослей / М. Г. Владимирова М. И. Таутс, О. И. Феоктисова, В. Е. Семененко // Труды Московского общества испытателей природы. – 1966. – Т. 24, вып. 24. – С. 142–152.
48. Титова С. В. Взаимоотношения холерных вибрионов с представителями планктона водоема средних широт в условиях эксперимента: дисс. На соискание науч. степени канд. биол. наук / С. В. Титова. – Ростов-на-Дону, 2000. – 30 с.
49. Islam M. S. Association of *Vibrio cholerae* O1 with cyanobacterium *Anabaena sp.*, elucidated by polymerase chain reaction and transmission electron microscopy / M. S. Islam, Z. Rahim, M. J. Alam et al. // Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg. – 1999. – Vol. 93. N 1. – P. 36–40.
50. Филипповский Ю. Н. Оптические свойства суспензии хлореллы при действии сложных спектров. Фотосистемы высокой продуктивности / Ю. Н. Филипповский, В. Е. Семененко, А. А. Ничипорович. – Наука, 1966. – С. 204–212.
51. Ничипорович А. А. Создание обитаемой среды в будущих космических полетах человека / А. А. Ничипорович // Космос. – 1963. – Вып. 1. – С. 32.
52. Ничипорович А. А. Автотрофные организмы как компоненты замкнутых систем / А. А. Ничипорович, В. Е. Семененко // Тезисы докл. научн. сессии, посвящ. 5-й годовщине запуска первого искусственного спутника Земли. – Москва, 1962. – С. 13.
53. Krauss R. W. Mass culture of algae for food and other organic compounds / R. W. Krauss // Amer. J. Bot. – 1962. – V. 49, N 4. – P. 425–435.
54. Тренкеншу Р. П. Одноклеточные водоросли: массовое культивирование и практическое использование / Р. П. Тренкеншу // Прикладная альгология. – 1999. – № 1. – С. 7–10.
55. Семененко В. Е. I Европейский симпозиум «Микроводоросли и здоровье» / В. Е. Семененко // Физиология растений. – 1994. – Т. 41, № 2. – С. 313–314.
56. Волошко Л. Н. Токсины цианобактерий (*Cyanobacteria*, *Cyanophyta*) / Л. Н. Волошко, А. В. Плющ, Н. Н. Титова // Альгология. – 2008. – Т. 18, № 1. – С. 4–21.
57. Атлас токсичных микроводорослей Черного и Азовского морей / [отв. ред В. И. Рябушко]. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – 140 с.

**Макарова О. І., Отуріна І. П., Сідякін А. І. Прикладні аспекти використання мікрроводоростей – мешканців водних екосистем** // Екосистеми, їх оптимізація та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2009. Вип. 20. С. 120–133.

Стаття містить сучасні данні наукових досліджень по практичному використанні мікрроводоростей різноманітних систематичних груп у біотехнологічних дослідженнях, медицині, сільськогосподарському виробництві та інших галузях народного господарства. Дана оцінка доступності мікрроводоростей як об'єкта еколого-біотехнологічних розробок.

*Ключові слова:* мікрроводорості, водні екосистеми.

**Makarova H. I., Oturina I. P., Sidiyakin A. I. Applied aspects of algae – the inhabitants of aquatic ecosystems** // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2009. Iss. 20. P. 120–133.

The article presents the current research data of the practical application of microalgae of different taxonomic groups in biotechnological research, medicine, agriculture and other sectors of the economy. The estimation of the availability of microalgae as an object of ecological and biotechnological developments was shown.

*Key words:* microalgae, aquatic ecosystems.

*Поступила в редакцію 16.11.2009 г.*