

ЭКОЛОГИЯ

УДК 579

ВОЗМОЖНОСТИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ**А.Е. Соловченко, А.А. Лукьянов, С.Г. Васильева, Я.В. Саванина,
О.В. Соловченко, Е.С. Лобакова***(кафедра биоинженерии; e-mail: solovchenko@mail.bio.msu.ru)*

Обзор посвящен новой методологии биологической очистки и глубокой переработки отходов животноводческих ферм (навоза, помета, сточных вод) с использованием интенсивной культуры фототрофных микроорганизмов (микроводорослей, МВ). Рассматриваются критерии выбора МВ и особенности их культивирования для эффективного изъятия биогенных элементов и деструкции органических компонентов животноводческих отходов, варианты утилизации полученной биомассы МВ (например, для производства кормовых добавок и удобрений) с целью повышения рентабельности переработки отходов. Приводится анализ преимуществ и недостатков нового метода по сравнению с традиционными анаэробными технологиями. Особое внимание уделяется интегрированным технологиям, сочетающим традиционные методы анаэробной переработки и доочистку с применением МВ.

Ключевые слова: *анаэробная переработка, биоизъятие, микроводоросли (МВ), фотобиореактор (ФБР), фотосинтетическая аэрация.*

Безопасная утилизация жидкого навоза, помета и сточных вод, поступающих от производственных зон содержания и выращивания скота и птицы, а также из перерабатывающих цехов (далее — отходы животноводства), — актуальная проблема, сдерживающая развитие сельскохозяйственного производства. В последнее время эта проблема особенно обострилась вследствие массового строительства крупных животноводческих и птицеводческих комплексов, вызванного интенсификацией сельскохозяйственного производства и перевода его на промышленную основу. Стоки животноводства отличаются высокой концентрацией органических веществ и биогенных минеральных элементов, прежде всего аммонийного и нитратного азота (N), фосфора (P), и высокой санитарно-эпидемиологической опасностью; сброс этих стоков без надлежащей очистки и обеззараживания запрещен, поскольку приводит к эвтрофикации и заражению водоемов и почв болезнетворными микроорганизмами [1—4].

Менее половины связанного азота из состава кормов в итоге усваивается животными, остальное попадает в отходы — навоз и помет. Согласно действующим нормам сельскохозяйственные стоки после химического или термического обеззараживания вносятся на поля, использование биологической очистки допускается в исключительных случаях [3]. Традиционно для биологической очистки отходов животноводства используют многоступенчатые биологические пруды, включающие аэробные водорослевые

пруды (2-я ступень), песчано-гравийные фильтры, биофильтры и аэротенки [3]. В качестве альтернативных решений предлагаются гидропонные и комбинированные методы с использованием биоплато, засаженных высшими водными растениями, и террас с многолетними травами, а также земледельческие поля орошения. Однако эти методы сложны в реализации, неэффективны в холодное время года и требуют больших площадей. Во многих случаях оставляет желать лучшего и эффективность (скорость и полнота) очистки. Как следствие далеко не все хозяйства обладают очистными сооружениями надлежащего устройства, а существующие сооружения нередко эксплуатируются с нарушениями технологического режима. Вышеперечисленные проблемы обусловили потребность в разработке альтернативных, более эффективных технологий, к которым относится биологическая очистка с помощью МВ.

Методология использования фотосинтезирующих микроорганизмов для очистки сточных вод разрабатывается уже более полувека [5], но исследования в области глубокой переработки отходов и очистки стоков животноводства с применением интенсивных культур фотоавтотрофных микроорганизмов МВ в закрытых системах (фотобиореакторах, ФБР) стали проводиться относительно недавно. Данные технологии обладают рядом преимуществ. Так, МВ присуща высокая скорость роста и поглощения биогенных элементов [6]. При этом МВ обеспечивают так называемую фотосинтетическую аэрацию, выделяя в результате фотосинтеза кислород, эффективно окисляя

ющий органические молекулы и поддерживающий рост гетеротрофных бактерий, также интенсивно утилизирующих органические компоненты отходов [7]. Кроме того, снижаются затраты энергии на очистку, поскольку частично либо полностью устраняется потребность в аэрации и механическом перемешивании [8]. Очистка с применением МВ в целом более экологична, так как не генерирует вторичных отходов, таких как отработанный активный ил, нуждающихся в утилизации.

Отдельного упоминания заслуживает способность МВ к синтезу широкого спектра ценных соединений. К ним относятся липиды, содержащие незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты, включая арахидоновую [9], γ -линоленовую [10], эйкозапентаеновую и др. [11, 12], а также каротиноиды с витаминной и антиоксидантной активностью, такие как астаксантин [13] и β -каротин [14]. Обогащенная липидами и (или) углеводами биомасса МВ, в том числе полученная при культивировании на стоках [15], также может быть переработана в различные виды биотоплива, такие как биодизель, метан, биоводород и др. [16]. Таким образом, использование МВ обеспечивает более глубокую переработку отходов животноводства с попутным получением продуктов с более высокой добавленной стоимостью.

Благодаря многочисленным преимуществам биологическая очистка с применением МВ представляется одной из наиболее перспективных биотехнологий для очистки сточных вод [6, 15, 17], в том числе стоков и отходов животноводства. Она характеризуется потенциально высокой эффективностью очистки от загрязнений, простотой эксплуатации и экономичностью, позволяет утилизировать сточные воды с минимальным ущербом для окружающей среды и дает дополнительную выгоду — попутное получение ценной биомассы МВ и в потенциале полную утилизацию отходов. Однако данный подход пока еще не получил распространения в России из-за недостаточной разработки методов интенсивного культивирования МВ, в том числе в ФБР, и отсутствия практического опыта проектирования сооружений для очистки животноводческих стоков с использованием интенсивных культур МВ. За рубежом исследования и разработки в этой области идут возрастающими темпами. В связи с вышесказанным настоящий обзор посвящен анализу возможностей применения современных разработок в области биотехнологии микроводорослей для глубокой переработки отходов и очистки стоков животноводческих предприятий с попутным получением биомассы МВ и биопродуктов из нее.

Изъятие биогенных элементов микроводорослями

Эффективность преобразования азота (N) кормов в пищевую продукцию скота и птицы не превышает 40% от общего N из состава кормов, соответственно

более 60% N попадает в отходы [18]. Вместе с тем связанный N и фосфор (P) необходимы для роста растений и МВ. Следует также учитывать, что в чрезмерных концентрациях связанный N является серьезным загрязнителем, вызывающим эвтрофикацию: нарушение кислородного режима водоемов, “цветение” токсичных МВ и потерю биоразнообразия [19]. Однако высокая степень обогащения питательными элементами позволяет добавлять отходы животноводства в среды для культивирования МВ и даже использовать их после разбавления в качестве сред. Виды и штаммы МВ, демонстрирующие быстрый рост на стоках, обогащенных N и P [17], используются для эффективного изъятия биогенных элементов из стоков (деэвтрофикация).

На химический синтез азотных и фосфорных удобрений тратится огромное количество энергии, это производство наносит значительный вред окружающей среде [20]. В этой связи важно, что, в отличие от традиционных систем биологической очистки, в которых бактерии-денитрификаторы превращают связанный азот в N_2 , который улетучивается в атмосферу, клетки МВ усваивают аммонийный и нитратный N, включая его в состав своих клеток. Так удается возвращать связанный N в агроэкосистемы, например в виде удобрений, полученных из биомассы МВ [2].

Фосфор необходим для роста растений, доступность P в почвах, как правило, лимитирует рост растений. Фосфатные удобрения являются одной из основ интенсивного сельского хозяйства. Однако растения усваивают не более 20% растворимого P, вносимого в почву с удобрениями, остальное обычно выносится с грунтовыми водами и стоками с полей в реки. В итоге суспендированные и растворенные фосфаты оказываются в море, где частично усваиваются фитопланктоном, но большая часть P безвозвратно теряется [21]. Следует также заметить, что запасы минералов для производства фосфорных удобрений стремительно сокращаются, к 2033 г. ожидается возникновение дефицита фосфатов [22]. Избыток P, подобно избытку N, приводит к эвтрофикации и нарушению водных экосистем, в которые попадают богатые биогенными элементами стоки [21]. Традиционно используется химическое осаждение P с последующей конверсией осадка в активированный ил с использованием микроорганизмов [23]. Однако осажженный данным методом P не удается в полной мере повторно использовать, поэтому активный ил с P-содержащим осадком захоранивают либо перерабатывают в удобрение. В этой связи весьма актуальна проблема изъятия P из сточных вод и возврата его в агроэкосистемы. Существенно, что МВ эффективно утилизируют P (хотя менее эффективно по сравнению с N), в то время как в традиционных системах очистки сельскохозяйственных стоков устранение избытка фосфатов доставляет особые трудности. В зависимости

от используемой технологии культивирования и нагрузки степень изъятия Р с помощью МВ достигает 50—70% [1].

Окисление органических компонентов и обеззараживание отходов

Одним из важных процессов в традиционной технологии переработки является компостирование и сбраживание, в ходе которого происходит разогрев и обеззараживание навоза и помета. При переработке с использованием МВ те же цели достигаются иными средствами: интенсивный рост МВ сопровождается повышением рН среды вследствие совместного поглощения ионов H^+ и NO_3^- . В сочетании с фотосинтетической аэрацией (повышающей содержание кислорода в среде) этот фактор приводит к значительному снижению содержания в среде патогенных бактерий [5, 7].

Интенсивная аэрация очистных сооружений при использовании аэробных технологий — неременное условие эффективной очистки, поскольку она обеспечивает поступление кислорода, необходимого для окисления органических компонентов загрязнения (снижение величин БПК и ХПК). В традиционных системах используется механическая (за счет перемешивания) либо пневматическая (за счет барботирования атмосферным воздухом) аэрация [18]. При использовании МВ потребность в кислороде, как правило, полностью покрывается за счет выделения кислорода фотосинтезирующими клетками МВ, дополнительная аэрация при этом не требуется. Более того, фотосинтетическая аэрация более эффективна, поскольку насыщение стоков кислородом в ходе жизнедеятельности МВ идет намного эффективнее, чем при обычном барботировании. Таким образом, принудительная аэрация в данном случае необходима лишь для более полного перемешивания культуры (см. ниже).

Получение и отбор микроводорослей для очистки сельскохозяйственных стоков

Эффективность изъятия биогенных элементов МВ во многом определяется скоростью их роста [24], поэтому особого внимания в контексте очистки животноводческих стоков заслуживают быстрорастущие штаммы МВ. Не менее важны такие характеристики, как способность к миксотрофному росту, толерантность к неблагоприятным факторам, высокая скорость оседания клеток, содержание ценных веществ в биомассе. Многими исследователями показано, что одноклеточные зеленые водоросли (Chlorophyta) обладают наивысшей среди изученных МВ толерантностью к условиям культивирования на эвтрофных сточных водах [25, 26]. Так, типичными доминантами планктонной альгофлоры окислительных прудов являются представители родов *Chlorella* и *Scene-*

desmus [27, 28]. В отдельных системах эффективного изъятия биогенных элементов удавалось добиться и с помощью цианобактерий [29].

Следует отметить, что даже в пределах одного рода наблюдается существенная гетерогенность по толерантности к высоким концентрациям N, P и органических компонентов стоков. Так, в одном из исследований *Chlorella vulgaris* оказалась более эффективной, чем *Chlorella kessleri* [30], в другом случае *Scenedesmus obliquus* показал лучшие результаты по сравнению с *C. vulgaris* [26]. Ожидаемой высокой эффективностью в плане очистки стоков обладают изоляты МВ, выделенные в местах сброса. Эффективные продуценты липидов и углеводов, такие как *Botriococcus braunii*, также продемонстрировали хороший рост на животноводческих стоках с высоким содержанием нитратного азота [31].

При отборе штаммов-кандидатов для использования в системах очистки животноводческих стоков с помощью интенсивных культур МВ имеет смысл провести предварительное тестирование толерантности к конкретным стокам и выработку адаптации путем перевода отобранных штаммов на среды, содержащие реальные постепенно возрастающие пропорции реальных стоков, которые предполагается очищать. Для предварительной селекции и (или) адаптации МВ также используют модельные среды, имитирующие по составу стоки. Однако подобные испытания должны проводиться с учетом заведомо более низкой токсичности искусственных стоков.

Перспективным подходом является выделение МВ из автохтонной альгофлоры лагун и площадок для компостирования, поскольку в этих местах преобладают виды, толерантные к эвтрофным условиям и адаптированные к росту на отходах животноводства. Таким способом удается получить штаммы, более эффективные по сравнению с МВ из других местообитаний, адаптированными к росту на сточных водах [32].

Поиск оптимальных условий культивирования

Световой режим

Для МВ, выращиваемых в ФБР в условиях интенсивного культивирования, освещенность обычно является лимитирующим фактором, поскольку из-за высокой численности клеток и сильного поглощения светового излучения пигментами лишь клетки, находящиеся в тонком поверхностном слое культуры (> 10 мм), получают достаточное для фотосинтеза количество света [33]. Тем не менее для эффективной очистки животноводческих стоков протекание фотосинтеза с достаточной скоростью имеет первостепенное значение, поскольку от него зависит накопление биомассы, потребление биогенных элементов и фотосинтетическая аэрация. Обеспечить световой энергией клетки МВ в культуре высокой плотности (> 1 г/л сухой биомассы МВ) простым на-

рашиванием освещенности невозможно. Причина в том, что на свету высокой интенсивности клетки, расположенные близко к поверхности культивационного сосуда ФБР, получают избыточное количество света, вызывающее фотоокислительное повреждение и даже гибель МВ, тогда как клетки в более глубоких слоях культуры по-прежнему испытывают недостаток света [33, 34].

Для достижения равномерного облучения клеток культуры используют различные стратегии. Первая ориентирована на использование плоских либо трубчатых ФБР с толщиной (или диаметром) светопрозрачных культивационных сосудов, близкой к толщине фотического слоя (т.е. слоя, в котором клетки МВ получают достаточное для фотосинтеза количество световой энергии). Однако при малой толщине плоские сосуды большого объема неудобны в эксплуатации из-за большой площади и низкой прочности.

Другая стратегия основана на интенсивном перемешивании культуры. При этом оптимальной будет такая скорость перемешивания, при которой клетки МВ проводят в фотическом слое столько времени, сколько необходимо для улавливания достаточного количества световой энергии. В остальное время в клетках (пребывающих вне фотического слоя, фактически в темноте) протекают темновые реакции фотосинтеза, в которых утилизируются синтезированные за время пребывания на свету молекулы АТФ и восстановительных эквивалентов [35]. В такой ситуации удается достичь более высокой плотности культуры при большей интенсивности света без риска фотоповреждения клеток МВ [36]. Соответственно ФБР, поддерживающие культивирование МВ при большей плотности культуры, обеспечивают большую продуктивность при очистке при равной нагрузке на биомассу МВ.

Третья стратегия основана на использовании периодического освещения [37, 38]. При этом длина и интенсивность вспышек света, а также длительность интервалов между ними подбирается с учетом тех же факторов — времени, необходимого клеткам МВ на поглощение достаточного для фотосинтеза количества световой энергии, и времени, необходимого для ее утилизации. Следует заметить, что данная задача в силу своей сложности не получила до настоящего времени аналитического решения [35].

Источники света для культивирования МВ

Осветители для культивирования МВ должны испускать максимум энергии в видимой области спектра (в области фотосинтетически активной радиации, ФАР; 400—700 нм). Традиционные лампы накаливания, в том числе галогенные, пригодны для целей освещения культур, но наряду с видимым светом испускают довольно много теплового (инфракрасного, ИК) излучения, которое не используется для фотосинтеза, но может приводить к излишнему

нагреву ФБР. Более удобны люминесцентные лампы дневного света, поскольку они дают равномерное освещение, имеют гладкий спектр излучения, содержащий минимум ИК-излучения, и характеризуются большей по сравнению с лампами накаливания энергоэффективностью.

Благодаря значительному прогрессу в конструировании твердотельных источников света в последнее время появились доступные светоизлучающие диоды (СИД), обладающие высокими характеристиками в плане светоотдачи, энергоэффективности, спектрального качества излучения и долговечности [39, 40]. По-видимому, именно источники света на основе СИД являются в настоящее время наиболее перспективными для использования в ФБР [18, 41], проектируемых для решения задачи очистки сточных вод.

Метод и скорость перемешивания

Как отмечено выше, перемешивание культуры является важным фактором ее роста и как следствие — эффективности очистки. Перемешивание ускоряет перенос масс в ФБР, способствуя равномерному распределению питательных веществ в объеме культуры, аэрации и освещению клеток МВ (см. выше), а также препятствует оседанию клеток в суспензионных культурах [42]. В настоящее время используют главным образом механическое или пневматическое (эрлифт, airlift) перемешивание [43]. Механическое перемешивание обычно осуществляется с помощью подвижных лопаток, крыльчаток и колес с лопастями. Для пневматического перемешивания в культивационных сосудах монтируются форсунки, подающие атмосферный воздух или газо-воздушную смесь из атмосферного воздуха и CO_2 . Чем выше скорость перемешивания, тем интенсивнее происходит перенос масс в культуре, что благоприятно с точки зрения скорости роста культуры, утилизации биогенных элементов и деструкции органических загрязнителей. Однако при определенных скоростях потока возникают так называемые сдвиговые деформации (shear stress), которые негативно влияют на физиологическое состояние МВ и могут приводить к разрушению клеток. В силу этого обстоятельства скорость перемешивания приходится ограничивать, и нередко данный фактор становится лимитирующим для эффективности работы ФБР и скорости очистки [44].

Температура

Подобно освещенности, температура имеет ключевое значение для роста и продуктивности; характер этой зависимости во многом определяется видовыми особенностями и иными условиями культивирования [33]. При оптимальных и близких к оптимальным для роста температурам наблюдается наиболее интенсивное изъятие N и P из среды культивирования. В большинстве случаев для роста МВ оптима-

лен диапазон 20—30°C. Температура также оказывает сильное влияние на жирнокислотный состав биомассы МВ: снижение температуры приводит к снижению ненасыщенности жирных кислот структурных липидов мембран клеток МВ [33, 45].

Нагрузка на биомассу и начальная плотность культуры

Подбор адекватной начальной плотности культуры (по числу клеток или количеству хлорофилла на единицу объема инокулюма) — один из ключевых факторов успеха культивирования МВ на сточных водах, включая стоки животноводства [46]. Слишком низкая начальная плотность (чрезмерная нагрузка) приводит к сильному замедлению роста культуры и даже к ее гибели. При чрезмерной концентрации биогенных элементов и (или) органических компонентов стоки приходится разбавлять; оптимальным представляется использование для разбавления менее концентрированных стоков с той же фермы.

От удельной скорости поступления загрязнителей в очистное сооружение с культурой МВ (от величины нагрузки по N, P, ХПК и пр.) зависят скорость и полнота изъятия биогенных элементов. В общем случае чем больше плотность культуры (меньше нагрузка), тем быстрее происходит извлечение биогенных элементов и деструкция органических компонентов сточных вод [47]. Так, по данным Mulbry с соавт. [1], эффективность очистки животноводческих стоков от биогенных элементов с использованием МВ достигает 70—90% при поступлении в N и P со скоростью не более 1 и 0,15 г/м²/сут соответственно; повышение скорости поступления биогенных элементов приводит к падению полноты их изъятия до 50—80%.

Таким образом, при разработке технологий биологической очистки животноводческих стоков с помощью МВ критически важно установить значения оптимальной и предельной нагрузки на биомассу. При этом следует учитывать, что эти значения будут различными для разных компонентов сточных вод в зависимости от обилия и токсичности последних. Так, высокое содержание аммонийного N может ингибировать рост МВ [48—50]. Соответственно скорость биологической очистки стоков при прочих равных будет лимитироваться компонентом, для которого значение оптимальной нагрузки является минимальным.

Барботирование культур

Основной положительный эффект барботирования в случае культивирования МВ для очистки животноводческих стоков заключается в перемешивании культуры (см. раздел “Метод и скорость перемешивания”). В традиционной интенсивной культуре МВ барботирование служит, среди прочего, для снижения концентрации растворенного в среде кис-

лорода. При очистке выделяемый клетками в процессе фотосинтеза кислород интенсивно расходуется на окисление органических компонентов стоков, поэтому при достаточной нагрузке его концентрация в ФБР не повышается до значений, вызывающих ингибирование роста МВ.

Атмосферная концентрация CO₂ является лимитирующей для роста МВ, поэтому барботирование культур смесью воздуха с CO₂ позволяет в общем случае повысить скорость роста культуры МВ [6, 15, 51], в системах для очистки животноводческих стоков данный эффект наблюдается не всегда [22]. Вероятная причина заключается в дополнительном поступлении CO₂ вследствие дыхания сопутствующих гетеротрофных бактерий. Тем не менее можно думать, что при использовании МВ, толерантных к высоким концентрациям CO₂, насыщение культуры углекислым газом, вероятно, позволит увеличить скорость накопления биомассы и эффективность изъятия биогенных элементов. Для этой цели было бы оптимальным барботирование дымовыми газами котельных (после отделения твердых частиц и кислотных ангидридов), обогревающих фермы (концентрация CO₂ в дымовых газах — около 20%). Однако влияние высоких (> 10%) концентраций CO₂ на рост МВ в эвтрофных условиях, по нашим сведениям, не исследовалось.

Фотобиореакторы для суспензионных культур

В настоящее время больше всего МВ используются для очистки сточных вод в традиционных стабилизационных (окислительных) прудах, а также в более высокотехнологичных интенсивных водорослевых прудах (HRAP), в которых применяется принудительное механическое перемешивание [7, 17, 31, 52]. Существенным недостатком подобных систем является зависимость степени и скорости очистки от погодных условий (низкая эффективность в холодное время года, высокая потеря воды вследствие испарения), нестабильный выход и качество биомассы и контаминация [53]. Кроме того, подобные очистные сооружения занимают много земли, цена на которую постоянно растет.

Закрытым системам для выращивания суспензионных культур МВ, к которым относятся и ФБР, эти проблемы присущи в меньшей степени [54]. Наиболее распространенными являются вертикальные и горизонтальные трубчатые, кольцевые и плоскочастичные ФБР. Поскольку детальный анализ преимуществ и недостатков различных вариантов ФБР можно найти в обзорах [55—57], в настоящей статье этот предмет в деталях не рассматривается.

Иммобилизованные микроводоросли

Альтернативным способом биологической очистки сточных вод микроводорослями является использование иммобилизованных культур. Данный спо-

соб характеризуется рядом преимуществ, включая высокую скорость роста МВ, высокую эффективность очистки и незначительный вынос клеток из ФБР с током культуральной среды [58]. Имобилизация МВ может достигаться путем их включения в альгинатные гели [8], а также путем формирования биопленок [59]. Показано, что клетки *C. vulgaris*, иммобилизованные в альгинатных гранулах, способны изымать из сточных вод до 80% аммония и 70% фосфора [30]. Клетки *Scenedesmus*, иммобилизованные в альгинатных листах, так же эффективно изымают биогенные элементы из сточных вод после вторичной (аэробной) очистки [60].

Основная сложность при использовании иммобилизованных МВ заключается в выборе способа иммобилизации и сбора биомассы. Для очистки животноводческих стоков применяются торфяно-водорослевые скрубберы (algal-turf scrubbers, ATS). Эти системы способны функционировать с нагрузкой порядка 2700 кг N и 400 кг P на 1 га в год, позволяя получать за тот же период до 27 000 кг/га сухой биомассы МВ, пригодной для производства кормовых добавок [22]. Существенно, что стоимость очистки животноводческих стоков данным способом ниже по сравнению с традиционными способами (11 долл. США/кг N, изъятых из сточных вод).

Сбор биомассы и подготовка ее к переработке

Одна из наиболее сложных проблем при разработке биотехнологий для очистки сточных вод при помощи МВ связана со сбором биомассы и подготовкой ее к дальнейшей переработке. Оседание клеток МВ под действием гравитации, как правило, происходит недостаточно быстро и полно. По оценкам экспертов, именно отсутствие простых и недорогих методов сбора биомассы во многом сдерживает распространение технологий очистки сточных вод с использованием МВ [58]. Следует заметить, что задача сбора биомассы упрощается при использовании иммобилизованных на пластиковых подложках культур МВ (см. выше).

Наиболее распространенными методами сбора биомассы являются фильтрация, центрифугирование и флокуляция (биофлокуляция), а также различные комбинации этих методов [15, 41, 51]. Центрифугирование удобно тем, что позволяет быстро отделить от среды более 95% клеток практически любого вида МВ, недостаток этого метода — высокая стоимость вследствие большого энергопотребления.

Метод флокуляции основан на использовании реагентов, компенсирующих отрицательные заряды на поверхности клеток МВ, в норме не позволяющие клеткам слипаться. Добавление к культуре таких веществ, как $FeCl_3$ или $Al_2(SO_4)_3$ (последний реагент особенно часто применяют при очистки сточных вод), устраняет поверхностный заряд [61]. Альтернативные

флокулирующие агенты включают щелочи и полимерные катионы, такие как хитозан [62]. Клетки отдельных видов МВ, например *C. minutissima*, приобретают способность к флокуляции в определенных условиях либо на поздних стадиях культивирования без добавления специальных реагентов (это явление было названо биофлокуляцией). В результате флокуляции формируются агрегаты клеток, которые легко отфильтровать или осадить центрифугированием при низкой скорости, однако при очистке сточных вод чаще используется осаждение под действием гравитации, поскольку приходится отделять большие количества биомассы для переработки в продукты с низкой добавленной стоимостью [61].

Для сбора биомассы также может использоваться фильтрация под давлением или вакуумом. В качестве фильтра может применяться инфузорная земля и целлюлозные волокна, однако такие фильтры не подходят для видов с мелкими клетками, такими как *Chlorella*. В последнем случае приходится использовать мембранные фильтры, требующие частой замены [51]. С учетом расхода энергии на создание давления или вакуума разница по стоимости между фильтрацией и центрифугированием получается минимальной, и центрифугирование остается предпочтительным методом [63].

Использование иммобилизованных культур (см. выше) существенно упрощает задачу сбора биомассы, к тому же этот метод более удобен для очистки сточных вод. В этой связи были разработаны различные способы иммобилизации, сравнительный анализ их эффективности при очистке воды приводится в обзорах [8, 58]. Дальнейшая переработка иммобилизованной таким образом биомассы МВ может осуществляться путем термохимической конверсии (пиролиза) или сбраживанием с получением биоэтанола. Пока неясно, возможна ли эффективная экстракция из иммобилизованной биомассы липидов для производства биодизеля.

Утилизация биомассы микроводорослей

Производство биотоплива

Одним из перспективных способов переработки биомассы МВ является производство биотоплива [17]. В зависимости от технологии переработки возможно производство твердого (пеллеты из сухой биомассы), жидкого (биодизель и углеводородные продукты пиролиза) или газообразного (биогаз, полученный путем анаэробного сбраживания биомассы) топлива. По оценкам экспертов, распространение должно получить именно биотопливо, полученное из биомассы МВ, выращенных на сточных водах, поскольку только оно способно конкурировать с ископаемым топливом при текущем уровне цен на нефть [15, 17]. Получение биомассы, пригодной для производства биодизеля, явилось целью большинства

**Продуктивность по биомассе и по липидам микроводорослей,
культивируемых на животноводческих стоках (по [17] с изменениями)**

Тип сточных вод	Вид водоросли	Продуктивность по биомассе (сухой вес)	Содержание липидов, % сухого веса	Продуктивность по липидам	Источник
Свиной навоз с высоким содержанием NO_3^-	<i>Botryococcus braunii</i>	700 мг/л/сут	—	69 мг/л/сут	[69]
Коровий навоз на пенопластовой подложке	<i>Chlorella</i> sp.	2,6 г/м ² /сут	9	230 мг/м ² /сут	[70]
Стоки свиноферм (после сбраживания)	<i>Scenedesmus</i> sp.	6 мг/л/сут	0,9	0,54 мг/л/сут	[71]
Стоки свиноферм, макс. нагрузка	<i>R. hieroglyphicum</i>	10,7 г/м ² /сут	0,7	72 мг/м ² /сут	[22]
Стоки молочных ферм, аэрация с CO_2	<i>R. hieroglyphicum</i>	17,9 г/м ² /сут	1,2	210 мг/м ² /сут	[72]
Коровий навоз, 25-процентное разведение	Консорциум <i>Chlorella</i> sp., <i>Micractinium</i> sp., <i>Actinastrum</i> sp.	59 мг/л/сут	29	17 мг/л/сут	[73]

работ по культивированию МВ на животноводческих стоках (таблица). Однако следует учитывать, что культивирование МВ в эвтрофных условиях не вызывает индукции синтеза запасных липидов, характерной для МВ, культивируемых при дефиците N в среде [64]. В силу этого обстоятельства при использовании сточных вод с высоким содержанием биогенных элементов сложно получить биомассу с содержанием липидов больше 20%. По-видимому, полученная в подобных условиях биомасса МВ больше подходит для анаэробной переработки с целью получения биогаза, а также для производства кормовых добавок и удобрений.

Производство кормовых добавок

В сущности при культивировании МВ на животноводческих стоках их рост не лимитирован по N. В составе жирных кислот липидов клеток МВ в этих условиях преобладают моно- и полиненасыщенные ЖК семейств C16 и C18 [22]. При использовании иммобилизованных МВ данный эффект прослеживался независимо от скорости подачи стоков в ФБР [22].

Для технологий, ориентированных на производство кормовых добавок, предпочтительнее культивирования видов МВ, накапливающих незаменимые длинноцепочечные жирные кислоты в липидах мембран хлоропластов. Примером могут служить представители рода *Nannochloropsis*, накапливающие эйкозапентаеновую кислоту [65, 66]. Отсутствие лимитирования по N будет способствовать повышению продуктивности культур по липидам, обогащенным ценными жирными кислотами. Кроме того, биомасса МВ, выращенных в таких условиях, характеризуется повышенным содержанием белка и каротиноидов [65], что делает ее оптимальным сырьем для производства кормовых добавок [7].

Производство удобрений

Один из наиболее перспективных способов утилизации биомассы МВ, полученной при очистке животноводческих стоков, — производство удобрений. Установлено, что сразу после внесения сухой биомассы МВ примерно 3% общего N из ее состава доступно для растений, спустя 3 недели этот показатель увеличивается до 33%; аналогичная динамика характерна и для P. В итоге рост растений огурца и кукурузы на почвах, удобренных выращенной на стоках молочных ферм биомассой МВ, был не хуже, чем при использовании равного количества (в пересчете на N и P) химических удобрений [2]. Несмотря на потенциально высокую концентрирующую активность МВ в отношении тяжелых металлов, внесения этих загрязнителей с биомассой МВ, полученной на животноводческих стоках, не выявлено [67].

Рентабельность очистки с помощью микроводорослей и способы ее повышения

Затраты на очистку и переработку отходов животноводческих ферм составляют существенную статью расхода в бюджете агропромышленных предприятий. При использовании традиционных технологий с компостированием эти расходы частично компенсировались производством органических удобрений, однако в настоящее время меньше трети навоза в итоге используется в качестве удобрений [18]. В последнее время начинают распространяться технологии, позволяющие извлекать дополнительную выгоду из биогаза (CH_4), получаемого из навоза, помета и животноводческих стоков в метантенках [18]. Использование технологий очистки (доочистки) с помощью МВ позволит дополнительно увеличить отдачу от био-переработки животноводческих стоков прежде всего за счет получения биомассы МВ, которая может

быть переработана с получением ценных продуктов (кормовые добавки, удобрения и т.п., см. выше). Однако при оценке рентабельности технологий очистки, основанных на культивировании МВ, следует учитывать, что рынок биомассы МВ, полученной с использованием животноводческих стоков, к настоящему времени не сложился, и биомасса преимущественно будет перерабатываться “на месте”.

Основные затраты при внедрении технологий очистки стоков с помощью МВ включают капитальные затраты (отчуждение земли под очистные сооружения, строительство, прокладка коммуникаций) и затраты на эксплуатацию (в основном это электроэнергия для перекачки суспензии, освещения ФБР, сушки биомассы и пр.). При использовании интегрированных технологий, включающих предварительную анаэробную переработку животноводческих стоков, потребности в тепловой энергии могут частично либо полностью покрываться биогазом, образующимся на данном этапе. В свою очередь дымовые газы котельной, работающей на биогазе, могут быть использованы как источник CO₂ для культивирования МВ. По оценкам Pizarro и соавт. [68], при использовании интегрированной технологии стоимость очистки составляет (в долл. США): 454 долл./г на одну голову крупного рогатого скота (КРС); 6,2 долл./кг N и 31,1 долл./кг P; стоимость сухой биомассы МВ при этом составит 0,7 долл./кг (в данной оценке последняя не учитывалась). В отсутствие этапа анаэробной переработки с генерацией биогаза затраты будут на 36% выше. Рассчитанная по этим оценкам долгосрочная прибыль должна составить 500 долл./г на одну голову КРС [29, 69].

По-видимому, важным компонентом оценки рентабельности технологий очистки станет экономия на штрафах за загрязнение окружающей среды. В настоящее время предприятиям АПК в России зачастую выгоднее оплачивать штрафы, чем внедрять более совершенные технологии переработки отходов. Однако намечается тенденция к ужесточению природоохранных законов. В итоге она должна привести к тому, что предприятия больше не смогут позволить себе регулярное нарушение нормативов по защите окружающей среды и будут вынуждены внедрять современные технологии очистки, останавливая свой выбор на наиболее практичных и рентабельных.

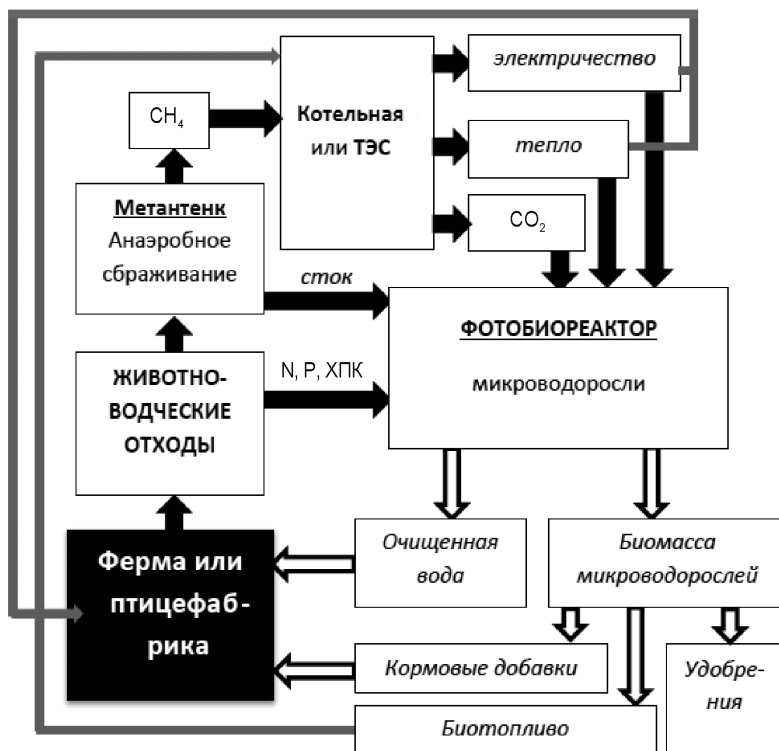
Кроме того, грамотная PR-политика, направленная на формирование у агропромышленного предприятия имиджа “зеленой” компании, будет способствовать продвижению ее продукции на рынке. В основу PR-компании такого предприятия могут лечь такие факторы, как использование “органических” кормов (с добавками из МВ), ответственное отношение к окружающей среде (производство

сельскохозяйственной продукции без сброса сточных вод, отходов и эмиссии парниковых газов).

Выводы и перспективы

Микроводоросли обладают уникальными природными механизмами для эффективного биоизъятия связанного N и P из среды, в том числе и из животноводческих стоков. Будучи фотоавтотрофами, МВ выделяют растворенный O₂, способствующий быстрому окислению органических компонентов сточных вод. Благодаря этим свойствам, МВ могут быть с успехом использованы для очистки сточных вод животноводческих предприятий и переработки их отходов. Резюмируя результаты многочисленных модельных экспериментов, можно заключить, что инкубация взвешенных или иммобилизованных клеток МВ в сточных водах является весьма перспективным подходом для третичной (заключительной) стадии их очистки. Впрочем, успешное культивирование МВ на животноводческих стоках, прошедших минимальную подготовку (сепарирование), свидетельствует о возможности осуществления полного цикла очистки животноводческих стоков с применением культур МВ.

Оптимальный для умеренных и более холодных широт метод культивирования МВ — интенсивное культивирование в ФБР. Решающее значение для успешной реализации технологии биологической очистки животноводческих стоков с использованием МВ имеют: 1) выбор быстрорастущего штамма МВ, толе-



Возможная схема интегрированной технологии с замкнутым циклом для глубокой переработки отходов животноводства с попутным производством биомассы микроводорослей

рантного к росту в эвтрофных условиях и адаптированного к специфическим особенностям состава стоков конкретного хозяйства; 2) энергоэффективный ФБР для выращивания МВ на стоках, спроектированный и построенный с учетом специфических требований интенсивного культивирования МВ и 3) глубокое понимание физиологии МВ, позволяющее найти режим культивирования, сочетающий сбалансированную нагрузку на биомассу с оптимальной освещенностью, скоростью перемешивания и температурой.

Исследования, результаты которых рассматриваются в настоящем обзоре, свидетельствуют, что наиболее перспективными являются интегрированные технологии, включающие этапы анаэробной обработки животноводческих стоков с целью генерации биогаза и снижения нагрузки эффективной конверсией содержащихся в них органических и неорганических загрязнителей в биомассу МВ с ценными свойствами. Переработка биомассы в кормовые добавки и органические удобрения должна повысить рентабельность традиционных технологий переработки животноводческих отходов. Однако рентабельность систем глубокой переработки и конверсии отходов животноводства с использованием МВ еще нуждается в тщательном анализе, который невозможен без ре-

зультатов пробного внедрения полупромышленных опытных установок.

В заключение следует отметить, что предпочтательными являются системы переработки животноводческих стоков и отходов по замкнутой схеме, подобной представленной на рисунке. Отдельные решения в рамках этой схемы, такие как инфраструктура для первичной переработки и метантенки, являются вполне устоявшимися, тогда как разработка других компонентов (например, ФБР и инфраструктура для переработки биомассы МВ) только начинается. Одна из проблем — получение штаммов МВ, толерантных к высоким концентрациям CO_2 и эвтрофным условиям культивирования на животноводческих стоках. Значительную сложность представляет интеграция биотехнологий на основе МВ в цикл очистки и переработки отходов животноводства. Однако последние успехи в биотехнологии микроводорослей дают надежду на скорое решение этих проблем.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (контракт № 14.515.11.0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mulbry W., Kondrad S., Pizarro C., Kebede-Westhead E.* Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers // *Bioresour. Technol.* 2008. Vol. 99. P. 8137—8142.
2. *Kim M.K., Park J.W., Park C.S., Kim S.J., Jeune K.H., Chang M.U., Acreman J.* Enhanced production of *Scenedesmus* spp. (green microalgae) using a new medium containing fermented swine wastewater // *Bioresour. Technol.* 2007. Vol. 98. P. 2220—2228.
3. Нтп 17—99. Нормы технологического проектирования систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. М.: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, 2001. 84 с.
4. *Афанасьев А.* Анализ технологий переработки навоза и помета // *Вестн. ВНИИМЖ.* 2012. Т. 4. P. 28—35.
5. *Oswald W.J., Gotaas H.B.* Photosynthesis in sewage treatment // *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 1957. Vol. 122. P. 73—105.
6. *Sivakumar G., Xu J., Thompson R.W., Yang Y., Randol-Smith P., Weathers P.J.* Integrated green algal technology for bioremediation and biofuel // *Bioresour. Technol.* 2011.
7. *Muñoz R., Guieysse B.* Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review // *Water Res.* 2006. Vol. 40. P. 2799—2815.
8. *Mallick N.* Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review // *biometals.* 2002. Vol. 15. P. 377—390.
9. *Crawford M., Golfetto I., Ghebremeskel K., Min Y., Moodley T., Poston L., Phylactos A., Cunnane S., Schmidt W.* The potential role for arachidonic and docosahexaenoic acids in protection against some central nervous system injuries in preterm infants // *Lipids.* 2003. Vol. 38. P. 303—315.
10. *Wang X., Lin H., Gu Y.* Multiple roles of dihome-gamma-linolenic acid against proliferation diseases // *Lipids in Health and Disease.* 2012. Vol. 11. P. 25.
11. *Cohen Z., Khozin-Goldberg I.* Searching for pufa-rich microalgae // *Single Cell Oils / Eds. Z. Cohen, C. Ratledge.* 2010, American Oil Chemists' Society: Champaign IL. P. 201—224.
12. *Guschina I.A., Harwood J.L.* Algal lipids and their metabolism // *Algae for biofuels and energy / Eds. M.A. Borowitzka, N.R. Moheimani.* Dordrecht; Heidelberg; New York; London: Springer, 2013 P. 17—36.
13. *Dhankhar J., Kadian S.S., Sharma A.* Astaxanthin: a potential carotenoid // *Intern. J. Pharmaceut. Scien. Res.* 2012. Vol. 3. P. 1246—1259.
14. *Takaichi S.* Carotenoids in algae: distributions, biosyntheses and functions // *Mar. Drugs.* 2011. Vol. 9. P. 1101—1118.
15. *Park J.B.K., Craggs R.J., Shilton A.N.* Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production // *Bioresour. Technol.* 2011. Vol. 102. P. 35—42.
16. *Georgianna D.R., Mayfield S.P.* Exploiting diversity and synthetic biology for the production of algal biofuels // *Nature.* 2012. Vol. 488. P. 329—335.
17. *Pittman J.K., Dean A.P., Osundeko O.* The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources // *Bioresour. Technol.* 2011. Vol. 102. P. 17—25.
18. *Fu W., Guðmundsson Ó., Paglia G., Herjólfsson G., Andrésson Ó., Pálsson B., Brynjólfsson S.* Enhancement of carotenoid biosynthesis in the green microalga *Dunaliella salina*

na with light-emitting diodes and adaptive laboratory evolution // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2013. Vol. 97. P. 2395—2403.

19. *Vance C.P., Uhde-Stone C., Allan D.L.* Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource // *New Phytol.* 2003. Vol. 157. P. 423—447.

20. *Лебедев Е.* Возможные экологические последствия избыточного применения азотных удобрений // *Минеральный и биологический азот в СССР.* М.: Наука, 1985. С. 41—60.

21. *Carpenter S.R., Caraco N.F., Correll D.L., Howarth R.W., Sharpley A.N., Smith V.H.* Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen // *Ecol. Appl.* 1998. Vol. 8. P. 559—568.

22. *Mulbry W., Kondrad S., Buyer J.* Treatment of dairy and swine manure effluents using freshwater algae: fatty acid content and composition of algal biomass at different manure loading rates // *J. Appl. Phycol.* 2008. Vol. 20. P. 1079—1085.

23. *Mulbry W., Westhead E.K., Pizarro C., Sikora L.* Recycling of manure nutrients: use of algal biomass from dairy manure treatment as a slow release fertilizer // *Bioresour. Technol.* 2005. Vol. 96. P. 451—458.

24. *Olguin E.J.* Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes // *Biotechnol. Adv.* 2003. Vol. 22. P. 81—91.

25. *Aslan S., Kapdan I.K.* Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae // *Ecol. Eng.* 2006. Vol. 28. P. 64—70.

26. *Ruiz-Marin A., Mendoza-Espinosa L.G., Stephenson T.* Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater // *Bioresour. Technol.* 2010. Vol. 101. P. 58—64.

27. *Kebede-Westhead E., Pizarro C., Mulbry W.W.* Treatment of swine manure effluent using freshwater algae: production, nutrient recovery, and elemental composition of algal biomass at four effluent loading rates // *J. Appl. Phycol.* 2006. Vol. 18. P. 41—46.

28. *Lincoln E., Wilkie A., French B.* Cyanobacterial process for renovating dairy wastewater // *Biomass Bioenergy.* 1996. Vol. 10. P. 63—68.

29. *Pizarro C., Mulbry W., Bliersch D., Kangas P.* An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent // *Ecol. Eng.* 2006. Vol. 26. P. 321—327.

30. *Travieso L., Benitez F., Dupeiron R.* Sewage treatment using immobilized microalgae // *Bioresour. Technol.* 1992. Vol. 40. P. 183—187.

31. *Hoffmann J.P.* Wastewater treatment with suspended and nonsuspended algae // *J. Phycol.* 2002. Vol. 34. P. 757—763.

32. *Jimenez-Perez M., Sanchez-Castillo P., Romera O., Fernandez-Moreno D., Pérez-Martinez C.* Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure // *Enzyme Microb. Technol.* 2004. Vol. 34. P. 392—398.

33. *Richmond A.* Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview // *Hydrobiologia.* 2004. Vol. 512. P. 33—37.

34. *Zarmi Y., Bel G., Aflalo C.* Theoretical analysis of culture growth in flat-plate bioreactors: the essential role of timescales // *Handbook of Microalgal Culture* / Eds. A. Richmond, Q. Hu. Wiley-Blackwell, 2013. P. 205—224.

35. *Lee C.G., Palsson B.G.* High-density algal photobioreactors using light-emitting diodes // *Biotechnol. Bioeng.* 1994. Vol. 44. P. 1161—1167.

36. *Richmond A., Cheng-Wu Z., Zarmi Y.* Efficient use of strong light for high photosynthetic productivity: interrelationships between the optical path, the optimal population density and cell-growth inhibition // *Biomol. Eng.* 2003. Vol. 20. P. 229—236.

37. *Vejraska C., Janssen M., Streefland M., Wijffels R.H.* Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in attenuated, flashing light // *Biotechnol. Bioeng.* 2012.

38. *Konig A., Pearson H., Silva S.A.* Ammonia toxicity to algal growth in waste stabilization ponds // *Water Sci. Technol.* 1987. Vol. 19. P. 115—122.

39. *Masseret E., Amblard C., Bourdier G., Sargos D.* Effects of a waste stabilization lagoon discharge on bacterial and phytoplanktonic communities of a stream // *Water Environ. Res.* 2000. Vol. 72. P. 285—294.

40. *Javanmardian M., Palsson B.O.* High-density photoautotrophic algal cultures: design, construction, and operation of a novel photobioreactor system // *Biotechnol. Bioeng.* 2004. Vol. 38. P. 1182—1189.

41. *Chen C.-Y., Yeh K.-L., Aisyah R., Lee D.-J., Chang J.-S.* Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review // *Bioresour. Technol.* 2011. Vol. 102. P. 71—81.

42. *Ugwu C.U., Aoyagi H., Uchiyama H.* Photobioreactors for mass cultivation of algae // *Bioresour. Technol.* 2008. Vol. 99. P. 4021—4028.

43. *Camacho Rubio F., Sánchez Mirón A., Cerón García M., García Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y.* Mixing in bubble columns: a new approach for characterizing dispersion coefficients // *Chem. Eng. Sci.* 2004. Vol. 59. P. 4369—4376.

44. *Holland A.D., Wheeler D.R.* Intrinsic autotrophic biomass yield and productivity in algae: modeling spectral and mixing-rate dependence // *Biotechnol. J.* 2011. Vol. 6. P. 584—599.

45. *Guschina I.A., Harwood J.L.* Algal lipids and effect of the environment on their biochemistry // *Lipids in Aquatic Ecosystems* / Eds. M. Kainz, M. Brett, M. Arts. Dordrecht, Heidelberg, L.; N.Y.: Springer, 2009. P. 1—24.

46. *Lau P., Tam N., Wong Y.* Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater // *Environ. Pollut.* 1995. Vol. 89. P. 59—66.

47. *Lavoie A., de la Noüe J.* Hyperconcentrated cultures of *Scenedesmus obliquus*: a new approach for wastewater biological tertiary treatment? // *Water Res.* 1985. Vol. 19. P. 1437—1442.

48. *Johnson M.B., Wen Z.* Development of an attached microalgal growth system for biofuel production // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010. Vol. 85. P. 525—534.

49. *Abeliovich A., Azov Y.* Toxicity of ammonia to algae in sewage oxidation ponds // *Appl. Environ. Microbiol.* 1976. Vol. 31. P. 801.

50. *Azov Y., Goldman J.C.* Free Ammonia inhibition of algal photosynthesis in intensive cultures // *Appl. Environ. Microbiol.* 1982. Vol. 43. P. 735.

51. *Brennan L., Owende P.* Biofuels from microalgae: a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2010. Vol. 14. P. 557—577.

52. *Соловченко А., Лобакова Е., Барский Е., Саванина Я., Дольникова Г., Лукьянов А., Кирпичников М.* Эколо-

гические фотобиотехнологии для очистки сточных вод // Биотехнология. 2011. № 6.

53. *Abeliovich A.* Water purification: algae in wastewater oxidation ponds // *Handbok of microalgal culture: biotechnology and applied phycology* / Ed. A. Richmond. Blackwell, 2004. P. 430–438.

54. *Grobbelaar J.* Microalgal biomass production: challenges and realities // *Photosynthesis Res.* 2010. Vol. 106. P. 135–144.

55. *Morweiser M., Kruse O., Hankamer B., Posten C.* Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010. Vol. 87. P. 1–11.

56. *Molina Grima E., Fernandez F., Garcia Camacho F., Chisti Y.* Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scale-up // *J. Biotechnol.* 1999. Vol. 70. P. 231–247.

57. *Pulz O., Scheibebogen K.* Photobioreactors: design and performance with respect to light energy input // *Bioprocess and algae reactor technology* / Ed. T. Scheper. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. P. 123–152.

58. *de-Bashan L.E., Bashan Y.* Immobilized microalgae for removing pollutants: review of practical aspects // *Biore-sour. Technol.* 2010. Vol. 101. P. 1611–1627.

59. *Abe K., Takahashi E., Hirano M.* Development of laboratory-scale photobioreactor for water purification by use of a biofilter composed of the aerial microalga *Trentepohlia aurea* (Chlorophyta) // *J. Appl. Phycol.* 2008. Vol. 20. P. 283–288.

60. *Zhang E., Wang B., Wang Q., Zhang S., Zhao B.* Ammonia-nitrogen and orthophosphate removal by immobilized *Scenedesmus* sp. isolated from municipal wastewater for potential use in tertiary treatment // *Biore-sour. Technol.* 2008. Vol. 99. P. 3787–3793.

61. *Molina Grima E., Belarbi E.H., Acien Fernandez F., Robles Medina A., Chisti Y.* Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics // *Biotechnol. Adv.* 2003. Vol. 20. P. 491–515.

62. *Divakaran R., Sivasankara Pillai V.* Flocculation of algae using chitosan // *J. Appl. Phycol.* 2002. Vol. 14. P. 419–422.

63. *Olaizola M.* Microalgal removal of CO₂ from flue gases: changes in medium pH and flue gas composition do not appear to affect the photochemical yield of microalgal cultu-

res // *Biotechnology and Bioprocess Engineering.* 2003. Vol. 8. P. 360–367.

64. *Соловченко А.* Физиологическая роль накопления нейтральных липидов эукариотическими микроводорослями при стрессах // *Физиол. раст.* 2012. Т. 59. С. 192–202.

65. *Vooren G.V., Le Grand F., Legrand J., Cuiñé S., Pel-tier G., Pruvost J.* Investigation of fatty acids accumulation in *Nannochloropsis oculata* for biodiesel application // *Biore-sour. Technol.* 2012.

66. *Solovchenko A., Khozin-Goldberg I., Recht L., Boussi-ba S.* Stress-induced changes in optical properties, pigment and fatty acid content of *Nannochloropsis* sp.: implications for non-destructive assay of total fatty acids // *Mar. Biotechnol.* 2011. Vol. 13. P. 527–535.

67. *Wilkie A.C., Mulbry W.W.* Recovery of dairy manure nutrients by benthic freshwater algae // *Biore-sour. Technol.* 2002. Vol. 84. P. 81–91.

68. *Woertz I., Feffer A., Lundquist T., Nelson Y.* Algae grown on dairy and municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and lipid production for biofuel feedstock // *J. Environ. Eng.* 2009. Vol. 135. P. 1115–1122.

69. *An J.-Y., Sim S.-J., Lee J., Kim B.* Hydrocarbon production from secondarily treated piggery wastewater by the green alga *Botryococcus Braunii* // *J. Appl. Phycol.* 2003. Vol. 15. P. 185–191.

70. *Korzhenevskaya T., Baulina O., Gorelova O., Lobaco-va E., Butenko R., Gusev M.* Artificial syncyanoses: the potential for modeling and analysis of natural symbioses // *Symbiosis.* 1993. Vol. 15. P. 77–103.

71. *Antal T.K., Kolacheva A., Maslakov A., Riznichenko G.Y., Krendeleva T.E., Rubin A.B.* Study of the effect of reducing conditions on the initial chlorophyll fluorescence rise in the green microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* // *Photo-synthesis Res.* 2013. Vol. 114. P. 143–154.

72. *Holland A.D., Wheeler D.R.* Intrinsic autotrophic biomass yield and productivity in algae: modeling spectral and mixing-rate dependence // *Biotechnol. J.* 2011. Vol. 6. P. 584–599.

73. *Holzwarth A.R., Lenk D., Jahns P.* On the analysis of non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching curves I) Theoretical considerations // *Biochim. Biophys. Acta (BBA) — Bioenergetics.* V.

Поступила в редакцию
16.05.13

POSSIBILITIES OF MICROALGAL BIOCONVERSION OF AGRICULTURAL WASTE

A.E. Solovchenko, A.A. Lukyanov, S.G. Vasilieva, Ya.V. Savanina, O.V. Solovchenko, E.S. Lobakova

The present review considers a new methodology of biological treatment and conversion of farm waste (manure and wash water) with the use of intensively cultivated phototrophic microorganisms (microalgae). Criteria for selection of microalgae and peculiarities of their intensive cultivation for efficient removal of biogenic elements and destruction of organic components of the wastes as well as the possibilities of cost-effective utilization of the resulting microalgal biomass are reviewed. Advantages and drawbacks of the new methodology are compared with those of conventional anaerobic techniques. Special attention is paid to the integrated technologies combining the aerobic conversion methods with microalgal post-treatment.

Key words: anaerobic conversion, bioremoval, microalgae, photobioreactor, photosynthetic aeration.

Сведения об авторах

Соловченко Алексей Евгеньевич — докт. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ. Тел: 8-495-939-25-87; e-mail: solovchenko@mail.bio.msu.ru

Лукьянов Александр Андреевич — канд. биол. наук, науч. сотр. кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ. Тел: 8-495-939-25-87; e-mail: loockart@mail.ru

Васильева Светлана Геннадьевна — канд. биол. наук, науч. сотр. кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ. Тел: 8-495-939-25-87; e-mail: vankat2009@mail.ru

Саванина Янина Вячеславовна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ. Тел: 8-495-939-41-69; e-mail: gene_b@mail.ru

Соловченко Ольга Владимировна — канд. биол. наук, лаборант кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ. Тел: 8-495-939-25-87; e-mail: olyasov@mail.ru

Лобакова Елена Сергеевна — докт. биол. наук, проф. кафедры биоинженерии биологического факультета МГУ. Тел: 8-495-939-41-69; e-mail: elena.lobakova@rambler.ru