



Экология микроорганизмов / Ecology of microorganisms  
Обзорная статья / Review article  
УДК 504.72 : 620.95  
DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-166-183

## МИКРОВОДОРОСЛИ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ И ЗАЩИТЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

<sup>1,5</sup>Ильмутдин М. Абдулагатов\*, <sup>1</sup>Алибек Б. Алхасов, <sup>2</sup>Гасан Д. Догеев,  
<sup>3</sup>Нариман Р. Тумалаев, <sup>4</sup>Расул М. Алиев, <sup>1</sup>Гасан Б. Бадавов,  
<sup>5,6</sup>Аслан М. Алиев, <sup>7</sup>Асият С. Салихова  
<sup>1</sup>Институт проблем геотермии ДНЦ РАН,  
Махачкала, Россия, [ilmutdina@gmail.com](mailto:ilmutdina@gmail.com)  
<sup>2</sup>Дагестанский НИИ сельского хозяйства имени Ф.Г. Кисриева,  
Махачкала, Россия  
<sup>3</sup>ОАО "Денеб", Махачкала, Россия  
<sup>4</sup>Дагестанский государственный технический университет,  
Махачкала, Россия  
<sup>5</sup>Институт физики имени Х.И. Амирханова ДНЦ РАН, Махачкала, Россия  
<sup>6</sup>Горный ботанический сад ДНЦ РАН, Махачкала, Россия,  
<sup>7</sup>Институт социально-экономических исследований ДНЦ РАН,  
Махачкала, Россия

**Резюме.** Цель данной работы – показать возможность и эффективность крупномасштабного промышленного производства микроводорослей в Республике Дагестан для развития сельского хозяйства (корма для животных и птицы) и других технологических применений в пищевой и фармацевтической промышленности для получения альгиновой муки (экохлеб), физиологически необходимых для человека полиненасыщенных жирных кислот (омега-3, омега-6), биологически активных веществ (астаксантин, фикоцианин), антибиотиков нового поколения, биотоплива и другой биотехнологической продукции с высокой добавленной стоимостью. Рассматриваются проблемы использования микроводорослей для биоремедиации окружающей среды, в частности, очистки геотермальных вод от фенолов перед их сбросом в канализацию. **Методы.** Выращивание микроводорослей производится в установках закрытого и открытого типов, а извлечение из них ценных компонентов будет осуществляться путем использования сверхкритической флюидной технологии непрерывного действия. **Результаты.** Сравнительная оценка эффективности использования микроводорослей как биологического сырья по сравнению с традиционно используемыми масличными культурами. **Заключение.** Для Дагестана, расположенного на берегу Каспийского моря, имеющего теплый климат и изобилие солнечной и геотермальной энергии, развитие этой технологии является задачей, имеющей большое народнохозяйственное значение. Преимущества микроводорослевых технологий являются основой для создания крупномасштабного производства микроводорослей в Южной России. Биотехнология в Дагестане может стать не только прибыльной, но и высокотехнологичной и инновационной отраслью.

**Ключевые слова:** Республика Дагестан, геотермальные воды, питательная среда, микроводоросли, цианобактерии, производство спирулины, очистка геотермальных вод от фенолов.

**Формат цитирования:** Абдулагатов И.М., Алхасов А.Б., Догеев Г.Д., Тумалаев Н.Р., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Алиев А.М., Салихова А.С. Микроводоросли и их технологические применения в энергетике и защите окружающей среды // Юг России: экология, развитие. 2018. Т.13, N1. С.166-183. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-166-183



## TECHNOLOGICAL APPLICATION OF MICROALGAE IN POWER INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

<sup>1,5</sup>Ilmutdin M. Abdulagatov \*, <sup>1</sup>Alibek B. Alkhasov, <sup>2</sup>Gasan D. Dogeev,  
<sup>3</sup>Nariman R. Tumalaev, <sup>4</sup>Rasul M. Aliev, <sup>1</sup>Gasan B. Badavov,  
<sup>5,6</sup>Aslan M. Aliev, <sup>7</sup>Asiyat S. Salikhova

<sup>1</sup>Institute for Geothermal Research, Dagestan Scientific Center,  
RAS, Makhachkala, Russia, [ilmutdina@gmail.com](mailto:ilmutdina@gmail.com)

<sup>2</sup>F.G. Kisriyev Dagestan Research Institute of Agriculture, Makhachkala, Russia

<sup>3</sup>ООО Deneb, Makhachkala, Russia

<sup>4</sup>Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia

<sup>5</sup>H.I. Amirkhanov Institute of Physics, Dagestan Scientific Center of RAS,  
Makhachkala, Russia

<sup>6</sup>Mountain Botanical Garden of the RAS, Makhachkala, Russia,

<sup>7</sup>Institute of Social and Economic, Dagestan Scientific Center of RAS,  
Makhachkala, Russia

**Abstract. Aim.** The aim of the study is to show the possibility and efficiency of large-scale industrial production of microalgae in the Republic of Dagestan for the development of agriculture (feed for animals and poultry) and other technological applications in the food and pharmaceutical industries for the production of algalin flour (eco bread), polyunsaturated fatty acids (omega-3, omega-6) physiologically necessary for humans, biologically active substances (astaxanthin, phycocyanin), new-generation antibiotics, biofuels and other high added value biotechnological products. The problems of using microalgae for bioremediation of the environment, in particular, purification of geothermal waters from phenols before discharging into the sewage system are considered. **Methods.** Microalgae are grown in closed and open type plants. Valuable algae components can be extracted using supercritical fluid technology of continuous action. **Results.** We give a comparative evaluation of the efficiency of using microalgae as a biological raw material in comparison with traditionally used oilseeds. **Conclusion.** For Dagestan, located on the shore of the Caspian Sea, with its warm climate and an abundance of solar and geothermal energy, the development of this technology is a task of great economic importance. The advantages of microalgae technologies are the basis for the creation of large-scale production of microalgae in southern Russia. Biotechnology in Dagestan can become not only profitable, but also a high-tech and innovative industry.

**Keywords:** Republic of Dagestan, geothermal waters, nutrient medium, microalgae, cyanobacteria, spirulina production, purification of geothermal waters from phenols.

**For citation:** Abdulagatov I.M., Alkhasov A.B., Dogeev G.D., Tumalaev N.R., Aliev R.M., Badavov G.B., Aliev A.M., Salikhova A.S. Technological application of microalgae in power industry and environmental protection. *South of Russia: ecology, development*. 2018, vol. 13, no. 1, pp. 166-183. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-166-183

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня биомасса спирулины на коммерческой основе производится и потребляется более чем в 60 странах мира. Наиболее крупные биотехнологические фирмы расположены в США, Мексике, Таиланде, Индии, Китае, Японии, Канаде, Австралии, где производство водорослей превышает 1 тыс. т в год. За последние 15 лет производство спирулины в мире увеличилось в 6 раз. По данным за 2005 год Россия по производству спирулины занимала 65 место в мире.

В СНГ производством спирулины занимаются такие известные фирмы, как ООО "Агро-Виктория" в Краснодарском крае (директор Виктория Хмелевская), ООО "Гидрофит" в Приднестровье (директор Валерий Продиус) и ООО "Абшеронские биотехнологии" в Азербайджане (директор Ровшан Махмуд). В Крыму в Институте биологии южных морей им. А.О. Ковалевского установлен опытно-промышленный вихревой аквариум, не имеющий аналогов в мире. Его предполагается использовать для полу-



чения спирулины в ходе длительных космических полетов как продукта питания и как источника кислорода, поскольку спирулина поглощает выделяющийся углекислый газ и выделяет кислород.

В России приоритет в данной области принадлежит ученым Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В настоящее время единственным предприятием в России, выращивающим спирулину в промышленных объемах является НПО "Биосоляр МГУ" (генеральный директор профессор Михаил Лямин). Промышленная биотехнология культивирования спирулины впервые была разработана в МГУ в 1990 г и затем внедрена на "дочерних" предприятиях в Молдавии (1992), Украине (1994), Прибалтике (1995). С 2010 г. в ЗАО "Институт фармацевтических технологий" (г. Москва) под руководством д.т.н., проф. Кедик С.А. налажено производство БАД на основе порошка спирулины под названием Фармаспирулина.

В 2015 году Роснано совместно с американской компанией Solix AlgreDients открыла на площадке РГУ нефти и газа им. Губкина R&D центр "Соликс БиоСистемз Восток", на базе которого предполагается наладить производство биологически активных веществ, таких как SolAstaTM, содержащий астаксантин - один из самых сильных природных антиоксидантов и Омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты, а также Сойлент – продукт порошкового питания, содержащий масло, полученное из микроводорослей. Фотобиореактор Lumian AGS260 позволяет контролировать основные параметры культивирования микроводорослей как источников антиоксидантов, пигментов и антибиотиков. Конечный продукт используют в косметике, детском питании и пищевых добавках. Над проектом работает международная команда исследователей.

Производство биомассы микроводорослей заключается в синтезе ими белков, углеводов, липидов, витаминов и других ценных соединений из углекислого газа, соды, воды и минеральных солей, находящихся в питательной среде, с помощью энергии света. Идея культивирования микроводорослей в промышленных масштабах возникла в Германии в середине прошлого столетия, когда пытались получать пищевые масла из диатомовых водорослей.

Выращивание микроводорослей имеет и ряд преимуществ по сравнению с обычными масличными культурами. Микроводоросли имеют короткий цикл роста и неприхотливы: для их выращивания необходимы только вода, солнечный свет и простые питательные вещества, они не занимают плодородные земли, нет сезонных ограничений.

Уже сейчас установки по выращиванию микроводорослей открытого типа используются в Италии, Израиле, Болгарии, Мексике, Чили, Бразилии, Таиланде, Индии, Китае, США (Калифорния), Средней Азии, Казахстане, Азербайджане, Молдове и др. К микроводорослям, имеющим важное значение для промышленного производства, относятся *Spirulina* sp., *Chlorella* sp., *Dunaliella* sp., *Nannochloropsis salina*, *Porphyridium* sp., *Odontella* sp., *Phaeodactylum* sp., *Nostoc*, *Anabaena* [1; 2]. Они представляют собой микроскопические организмы, которые преимущественно культивируются в водном растворе неорганических солей.

**Целью данной работы** является изучение возможности развития биотехнологий микроводорослей в Республике Дагестан для получения биотоплива и ценных биологически активных соединений, что может быть не только высокотехнологичным, но и прибыльной и биоориентированной инновационной отраслью региона [3-9].

Данная статья в некоторой степени является продолжением и развитием работ, выполненных ранее в Дагестанском государственном педагогическом институте доцентом Тумалаевым Н.Р. и одновременно началом нового цикла исследований, посвященных адаптации технологий возобновляемых источников энергии к крупномасштабному производству микроводорослей для сельского хозяйства, получения биотоплива и очистки геотермальных вод от фенолов.

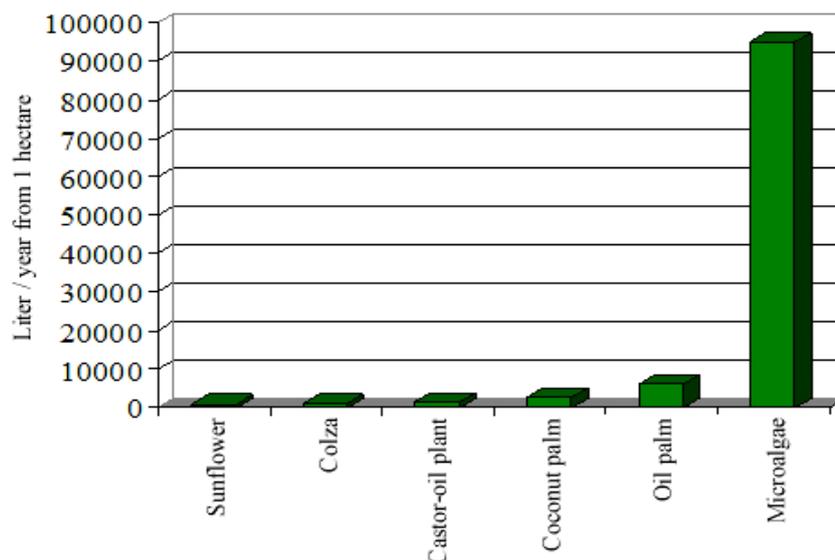
Широкое использование ископаемых видов топлива в современном индустриальном мире привело к проблемам дефицита ресурсов и загрязнению окружающей среды, в связи с чем создание недорогого биотоплива становится одной из главных задач человечества. Сегодня более чем в 17 странах мира занимаются исследованиями и разработками в области технологий для биотопливной промышленности. В их числе такие мировые гиганты и корпорации, как Chevron, Shell, Mitsubishi, De Beers, Nestle,



Boing, Chrysler Next Diesel.

Научно-исследовательские работы в этой области направлены на решение главных задач производства биотоплива – поиску новых штаммов микроводорослей, спо-

собных быстро расти и накапливать значительные количества липидов [10]. На рис. 1 приведены данные о продуктивности различных видов растительного сырья для получения биотоплива.



**Рис.1. Производство масла из растительного сырья (для микроводорослей приведен теоретический расчет)**

**Fig.1. Production of oil from vegetable raw materials (theoretical calculation for microalgae)**

В США водорослевые исследовательские институты и компании имеются почти во всех уголках страны, работает более 500 водорослевых предприятий, а ежегодные инвестиции в эту сферу достигают 500 млн.\$.

В настоящее время лидером в водорослевом мире стала компания Heliae (Хилия) из г. Гилберт штат Аризона, которая в апреле 2013 г. заявила о запуске инновационной технологической платформы Volaris для получения микроводорослей высокой чистоты, разработкой которой она занималась более десяти лет. Так, в США уже разработали новую технологию получения авиационного топлива из микроводорослей. Разработка и производство находится в ведении двух частных компаний – SAIC и General Atomic. Созданные технологии позволяют получать до 9 тыс. л топлива с 1 га.

Планы по производству биотоплива на государственном уровне имеют более 38 стран мира. В 2012 г. инвестиции в научные разработки в сфере биотоплива составили около 1,7 млрд. долл. Из них более 2/3 (около 1,1 млрд. долл.) – из государственных бюджетов, в то время как инвестиции из

частного сектора составили около 500 млн. долл.

Общий объем производства биотоплива – в том числе биоэтанола и биодизеля – в 2016 г. составил 130 млрд. литров (рост к 2003 г. в 4 раза). Мировыми центрами производства биотоплива являются США, Бразилия и Европейский Союз. Это три самых больших рынка в мире, сконцентрировавшие в 2010 г. 85% мирового производства биологического топлива. Самая большая доля приходится на США – 48% биотоплива в мире. Для производства биотоплива только в 2012 г. была освоена переработка более 100 новых видов растений.

Наибольшим потенциалом для расширения производства биотоплива обладают страны Африки и Южной Америки. Начался быстрый рост производства биотоплива в Азии. В настоящее время Китай находится на третьем месте по производству биоэтанола, и ожидается, что это производство будет расти в течение следующих десяти лет более чем на 4% в год.

Китай является четвертой после США, Франции и Финляндии страной в мире, которая самостоятельно смогла



создать биотопливо для авиации. Так, крупнейшая в Китае нефтеперерабатывающая компания Sinopec уже объявила об успешном проведении

первого испытательного 85-минутного полета на созданном собственными силами биотопливе [11; 12].

### ОБСУЖДЕНИЕ

**Сверхкритическая флюидная технология извлечения ценных компонентов.** Липидный состав микроводорослей может различаться не только в зависимости от вида, но также и от условий их роста [13].

Качество получаемого биотоплива напрямую зависит от компонентного состава микроводорослей. Соединения с числом атомов углерода ( $C_{16}$ - $C_{18}$ ) считаются оптимальными для получения топлива, остальные, попутно экстрагирующие соединения, ухудшают качество получаемого продукта. Для получения качественного биотоплива необходима селективная экстракция необходимых жирных кислот [14].

Наиболее распространенным растворителем липидов являются гексан, хлороформ, смесь бутанола и метанола и т.д. Однако данные растворители не позволяют проводить селективную экстракцию. Полу-

ченные перечисленными способами экстракты требуют дополнительного фракционирования, что является сложной технологической задачей, или очистки уже полученного биотоплива.

Для получения жирных кислот для последующей переэтерификации их в биотопливо оптимально подходит сверхкритическая флюидная экстракция, поскольку данная методика позволяет влиять на состав получаемых экстрактов простым изменением давления и температуры процесса [15]. В Республике Дагестан активно развиваются технологии сверхкритической экстракции, в том числе для применения при переработке микроводорослей [16-19]. В этих работах в качестве объектов исследования были выбраны микроводоросли *Nannochloropsis salina*, любезно предоставленные американской компанией Solix (рис. 2).



**Рис.2.** Замороженные микроводоросли (*Nannochloropsis salina*), полученные от компании Solix (USA, Colorado)

**Fig.2.** Frozen microalgae (*Nannochloropsis salina*) obtained from Solix company (USA, Colorado)

Из микроводорослей экстрагировали липиды методом сверхкритической углекислотной экстракции. Основными жирными кислотами в полученном экстракте были: пальмитолеиновая кислота (24.72%), олеиновая кислота (20.13%), пальмитиновая кис-

лота (17.64%), тимнодоновая кислота (13.06%), арахидоновая кислота (5.63%).

Для снижения себестоимости выращиваемых микроводорослей в технологическом процессе их производства в качестве (и в составе) питательной среды можно ис-



пользовать низкопотенциальные и сбросные геотермальные воды, содержащие карбонатные, хлоридные, сульфатные, фосфатные соли и микроэлементы. Высокая насыщенность их углекислым газом – ключевое конкурентное преимущество, снижающее затраты производства.

При этом режим термостатирования может обеспечиваться как геотермальной водой, так и солнечной энергией. В Дагестане немало мест с таким благоприятным сочетанием факторов. Особенно следует подчеркнуть, что плантации для выращивания микроводорослей можно размещать на засоленных и пустынных почвах, непригодных для земледелия. Условия солончаков в Дагестане не уступают тем, которые имеются в странах, специализирующихся на промышленном производстве микроводорослей (США, Израиль, Япония, Китай).

Климатические условия Каспийского побережья России идеально подходят для массового индустриального выращивания микроводорослей в открытых бассейнах и получения из них как биотоплива, так и экологически чистых продуктов питания и биологически активных веществ.

Основные направления биотехнологической индустрии микроводорослей следующие:

1. Промышленное производство биотоплива.
2. Производство продуктов питания для человека и кормообеспечение сельского хозяйства.
3. Производство биосырья для фармацевтической промышленности.
4. Решение экологических проблем.

Одним из направлений применения микроводорослей в пищевой промышленности является получение экстрактов в качестве компонентов функционального питания, поскольку помимо питательных свойств они оказывают благотворное влияние на функции организма. Они содержат большое количество физиологически необходимых для человека полиненасыщенных жирных кислот - Омега-3 и Омега-6 [2; 20-22].

Также выявлен иммуномодулирующий эффект экстрактов микроводорослей за счет активации врожденной иммунной системы путем увеличения производства интерферона человека [23]. Экстракты спирулины активны против вирусов герпеса,

гриппа, цитомегаловируса и способны ингибировать канцерогенез [24].

Применение микроводорослей для подкормки животных улучшает не только их иммунитет, но и пищевую ценность получаемой фермерской продукции [25]. Влияние кормовых добавок из микроводорослей на здоровье животных уже достаточно хорошо исследовано [26; 27].

**Использование геотермальных вод при культивировании микроводорослей для получения кормового и пищевого белка.** Научно-технический прогресс, революционизирующий промышленное производство, всё больше охватывает сельское хозяйство. Из-за дефицита белка в рационах происходит огромный перерасход кормов. Особенно заметен этот процесс в последние десятилетия. Растениеводство и животноводство переходят на новую промышленную основу, и сейчас мы говорим об инновационных подходах к производству зерна, мяса, молока, требующих мощной кормовой базы, способной обеспечить резкий подъём сельского хозяйства.

В России большое значение придается разработке научных основ практического использования микроскопических водорослей – хлореллы, спирулины и др. Интерес к микроводорослям возрос в связи с различными аспектами их практического применения: для получения высокобелковых кормовых концентратов, для создания биологических систем жизнеобеспечения в космических летательных аппаратах, для очистки окружающей среды и др. [28-34].

В состав сухого вещества хлореллы входят белки – 50%, жиры – 20-30%, углеводы – 10-20%. В составе белка хлореллы имеются такие незаменимые аминокислоты, как триптофан, валин, треонин, лейцин. Водоросли являются ценным сырьем для получения органических веществ: аминокислот, ферментов, гормонов, витаминов, ростовых веществ, антибиотиков и других биологически активных соединений для нужд пищевой, химической и фармацевтической промышленности. Кроме того, большой интерес представляет использование водорослей для очистки сточных вод, регенерации воздуха и для повышения плодородия почв.



Биомасса хлореллы особенно ценна содержанием большого количества витаминов: каротина, тиамина, рибофлавина, биотина, аскорбиновой, пантотеновой и фолиевой кислот.

Повышенное содержание питательных веществ дает возможность использовать одноклеточные водоросли в кормовых и пищевых рационах. Положительные результаты получены при добавке в рацион питания крупного рогатого скота и свиней одноклеточных водорослей. Опыты по кормлению молочных коров хлореллой, которые проводились в Польше, показали возможность замещения до 50% концентрированных кормов загущенной суспензией [31].

Биомасса хлореллы находит широкое применение при кормлении птиц, отмечено положительное влияние на качество мяса бройлеров. В качестве кормового сырья, водоросли выращиваются как пища для зоопланктона, что является важным звеном в рыбоводстве [30].

Микроводоросли являются более высокоурожайными по сравнению с высшими растениями: за 7 месяцев культивирования урожайность их в открытых бассейнах составляет более 30-50 т сухой массы с 1 га водной поверхности при толщине слоя воды 10-15 см [33].

Весьма значителен вклад белорусских ученых из Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси в разработку технологий выращивания микроводоросли спирулины и хлореллы, созданию Коллекции штаммов и Каталога генетического фонда микроводорослей [35]. Опытные работы по выращиванию микроводорослей в производственных и полупроизводственных установках открытого циркуляционного типа проводились в Ленинградской области [34], в Таджикистане [32], в Узбекистане [33].

В работах многих исследователей показано, что продуктивность микроводорослей находится в тесной зависимости от биологических и физико-химических параметров культивирования, таких как биологическая специфичность штамма, условия минерального и углекислого питания, освещенность и температура.

В отличие от высших растений водоросли легко приспосабливаются к

различным концентрациям солей. Как известно, в состав основных питательных сред, предложенных для культивирования водорослей, входят следующие соли:  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KCl}$ . Кроме того, в жизнедеятельности водорослей большое значение имеют микроэлементы: железо, медь, марганец, кобальт, цинк, ванадий, кремний, бор, молибден.

Вышеперечисленные соли входят в состав искусственных питательных сред и применение их в больших масштабах экономически нецелесообразно, поэтому в последнее время большое внимание уделяется использованию вод естественных минеральных источников в качестве питательных сред. Первые опыты по использованию минеральных источников, проведенные в Болгарии, в Польше и в странах бывшего СССР дали обнадеживающие результаты.

С 1970 года в Дагестане проводятся исследования по массовому культивированию микроводорослей в животноводческих и птицеводческих хозяйствах [36-42]. Выявлены положительные и отрицательные стороны массового культивирования микроводорослей в хозяйствах. Положительным является то, что производство биомассы хлореллы обеспечивает хозяйства белково-витаминным концентратом и экономически выгодно. Отмечено увеличение привеса животных и птиц, увеличение яйценосности кур, каротина в яйцах и уменьшение падежа. Все затраты, связанные с организацией производства биомассы хлореллы, окупаются в течение 6-8 месяцев. Вместе с тем опыт показал, что организация массового культивирования хлореллы на местах страдает рядом недостатков: отсутствием в хозяйствах квалифицированных биотехников и централизованного обеспечения всеми необходимыми солями и углекислым газом. С учетом перечисленных выше недостатков дальнейшие исследования были направлены на поиски дешевой питательной среды для культивирования хлореллы. Зная, что водоросли – водные организмы и хорошо приспосабливаются к различным концентрациям солей, питательные среды



стали готовить на основе геотермальной воды.

На территории Дагестана находится достаточное количество геотермальных источников, которые имеют коммунально-бытовое, сырьевое, энергетическое, бальнеологическое значение. Проведенные исследования показали, что геотермальные воды, содержащие в достаточном количестве биогенные элементы, являются благоприятной средой для культивирования хлореллы, других микроводорослей с целью получения кормовых белков и витаминов.

Предварительный отбор геотермальных источников проводился по данным Института геологии Российской академии наук. Подобранные источники исследовались на наличие биогенных элементов, углекислого газа, фенолов и нефтепродуктов. В абсолютном большинстве исследованные воды были сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатно-натриевого и гидрокарбонатно-натриевого типа. Наиболее оптимальными для культивирования водорослей оказались геотермальные воды гидрокарбонатно-сульфатно-натриевого типа, со степенью минерализации 3,5-12 г/л, температурой 50-80°C, РН 7,0-7,6, содержащие все необходимые макро- и микроэлементы, включая углекислый газ в количестве 0,5-3,5 г/л.

Хлореллу культивировали на чистой геотермальной воде, на питательной среде Тамийя, а также на питательной среде, приготовленной на основе геотермальной воды с добавлением солей среды Тамийя в различных разведениях от 5 до 50%.

Характеристика роста и продуктивности хлореллы была изучена при накопительном режиме культивирования при интенсивности света 50 тыс. эрг. см<sup>2</sup> и оптимальных температурных условиях роста (36°C). Скорость роста учитывали по числу клеток в популяции, продуктивность – по накоплению сухого веса биомассы. Пробы на определение оптической плотности, числа клеток и сухого веса отбирались через каждые 5 часов в течение 50 часов.

На основании полученных данных были рассчитаны вес индивидуальной клетки, оптическая плотность, прирост биомассы и коэффициент размножения культуры.

Хлореллу культивировали на геотермальной воде в установке лоткового типа по 16 часов в сутки при температуре 28°C и освещенности 15 тыс. люкс, перемешивали через 1 час. На 8-й день плотность клеток составила 250 млн/мл, а сухой вес 5,2 г/л. Культура имеет темно-зеленый цвет, отличается интенсивным ростом клеток в суспензии. При этом выход биомассы хлореллы в два раза выше, а по биохимическим показателям не уступает биомассе, полученной на известных питательных средах.

Полученные результаты культивирования хлореллы на различных питательных средах, приготовленных на основе геотермальных вод приведены в табл. 1 [37].

Наибольшую биомассу хлорелла накапливала при выращивании на геотермальной воде скважины Махачкала 160 с внесением 20-25% солей среды Тамийя. Высокая продуктивность хлореллы на геотермальной воде объясняется наличием легко усваиваемых солей, микроэлементов, углекислого газа и оптимального рН среды.

На прирост биомассы хлореллы, культивируемой на геотермальной воде скважины Тернаир 20, оказывает большое влияние концентрация фенолов и нефтепродуктов, которые препятствуют интенсивному фотосинтезу. Массовое культивирование хлореллы и других микроводорослей на геотермальной воде не только обеспечит хозяйства дешевым кормовым белком, но и предотвратит загрязнение окружающей среды сбросовыми водами.

Предварительные расчеты показали, что стоимость биомассы хлореллы, выращенной на геотермальной воде, в два раза ниже по сравнению со стоимостью биомассы, полученной на среде Тамийя. При культивировании хлореллы на геотермальной воде отпадает необходимость в привозном углекислом газе, как одном из факторов интенсификации накопления биомассы.

Питательная среда на основе термоминеральной воды позволяет выращивать дешевую биомассу микроводорослей за счет экономии минеральных солей и углекислого газа. Кроме того, тепло геотермальных вод позволяет выращивать микроводоросли круглогодично.



**Таблица 1**

**Накопление биомассы при культивировании хлореллы на геотермальной воде  
(грамм сухого веса на 1 л среды)**

**Table 1**

**Biomass accumulation during cultivation of *Chlorella* on geothermal water  
(gram of dry weight per 1 liter of medium)**

Варианты / Variants	Геотермальные источники / Geothermal sources		
	Махачкала 160 / Makhachkala 160	Тернаир 20 / Ternair 20	Кизляр 4т / Kizlyar 4T
Чистая геотермальная вода / Pure geothermal water	1,5	1,2	1,0
5% среда / 5% culture medium	2,5	1,8	1,5
10% среда / 10% culture medium	3,2	2,6	2,2
15% среда / 15% culture medium	3,8	3,0	2,5
20% среда / 20% culture medium	5,2	3,6	2,8
25% среда / 25% culture medium	5,2	3,9	3,4
30% среда / 30% culture medium	5,0	4,2	3,8
35% среда / 35% culture medium	4,8	4,6	3,8
40% среда / 40% culture medium	4,5	4,6	4,2
45% среда / 45% culture medium	4,5	4,5	4,0
50% среда / 50% culture medium	4,0	3,8	3,6

**Очистка геотермальных вод от фенолов.** Водоросли можно использовать для утилизации органических отходов. Это направление очень перспективно, поскольку водоросли потребляют фенолы, нитраты, фосфаты и сокращают количество бактерий и токсинов в воде. Наиболее перспективным считается использование микроводорослей для очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности, рыбоводных хозяйств, животноводческих ферм, птицефабрик, боен [43-46].

В опытах по культивированию хлореллы нами отмечено, что в процессе роста клетки микроводоросли снижают количество фенолов в геотермальной воде до 0,002 мг/л. Поэтому способность культуры хлореллы к дефенолизации и деминерализации геотермальной воды необходимо использовать на практике при осуществлении сброса отработанных геотермальных вод в канализацию и поверхностные водоёмы.

В процессе эксплуатации Тернаирских скважин в Махачкале в геотермальной воде были обнаружены высокие концентрации фенолов (50мг/л), в 50000 раз превышающие предельно допустимые значения. Возникла проблема обесфеноливания геотермальных вод перед их сбросом в море.

Известно, что под действием различных бактерий, актиномицетов, грибов и водорослей происходит окисление фенола, снижение его концентрации в сточной воде.

Для обесфеноливания геотермальных вод после первичного снятия тепла (тепллицы, коммунальное хозяйство, ГеоТЭС) перед их сбросом предложены альго- и бактериальные комплексы [47-52].

Геотермальные воды гидрокарбонатно-натриевого типа характеризуются повышенной минерализацией (22-24 г/л). Содержание микрокомпонентов составляет: бром – 52-65 мг/л, йод – 8-13 мг/л, магний – 15-16 мг/л, аммоний – 22-55 мг/л, HCO<sub>3</sub> – 600 мг/л. Концентрация нафтеновых кислот колеблется от 1,6 до 31,1 мг/л, бензола – от 0,8 до 2,4 мг/л.

Характерной особенностью исследуемых вод является повышенное содержание фенолов – от 2,5 до 50 мг/л. Углекислого газа содержится 4,6-6,8% (1,2 г/л), pH – 8,6. Температура воды перед сбросом 35-38°C. Обесфеноливание геотермальных вод проводили с помощью альго- и бактериальных культур: *Chlorella vulgaris*, *Ps. fluorescens*, *Symplica thermalis*.

Фенол окисляющую активность исследуемых культур определяли на различных питательных средах, содержащих фенол в концентрации до 50 мг/л. Среду Тамийя, минеральную среду и геотермальную воду разливали в колбы и инокулировали клетками водорослей и бактерий из расчета 1 млн / мл среды.

Инкубировали в течение 10 суток при 35-40°C, освещенности 12-15 тыс. люкс, pH



7,2-7,4. Перемешивали воздухом без подачи углекислого газа. На 3-й, 5-й, 7-й и 10-е сутки инкубации определяли количество фенола, альго- и бактериальных клеток. Стерилизованная фенолсодержащая геотермальная вода служила контрольной средой. Повторность опытов была четырехкратной.

В процессе пассирования через фенолсодержащие питательные среды из почвенных образцов и водных проб выделили

альго- и бактериальные культуры, способные расти на средах, содержащих до 50 мг/л фенола. Окисление фенола альго- и бактериальными культурами на различных средах происходило с неодинаковой интенсивностью (см. табл. 2). Наиболее интенсивное окисление фенола наблюдали на среде Тамийя, наименьшее – на геотермальной воде [53].

Таблица 2

Окисление фенола альго- и бактериальными культурами на различных средах

Table 2

Oxidation of phenol by algal and bacterial cultures on various media

Питательная среда / The nutrient medium	Фенол, мг/л / Phenol, mg/l
1. Среда Тамийя / The nutrient medium of Tamiya	0,005
2. Минеральная вода / Mineral water	7
3. Геотермальная вода / Geothermal water	24
4. Стерилизованная минеральная вода / Sterilized mineral water	50

Окисление фенола в геотермальной воде зависит от биохимической активности альго- и бактериальных культур и сроков инкубации. Максимальное снижение концентрации фенола (5 мг/л) происходит на 10-е сутки совместной инкубации *Chlorella vulgaris* и *Ps. Fluorescens*. Слабая активность альго- и бактериальных культур по отношению к фенолу связана с дефицитом азота и фосфора в воде. Для интенсификации процесса биохимического окисления фенола в

геотермальную воду в качестве источника азота вносили сульфат аммония – 0,5 мг/л, куриный помет – 2 мг/л или фекальную жидкость – 10 мг/л. Резкое снижение фенола (на 99,95%) отмечено в геотермальной воде с фекальной жидкостью на 10-е сутки совместной инкубации, хлореллы и *Pseudomonas*. В остальных случаях результаты были сходными или незначительно отличались от контрольных значений (рис. 3).

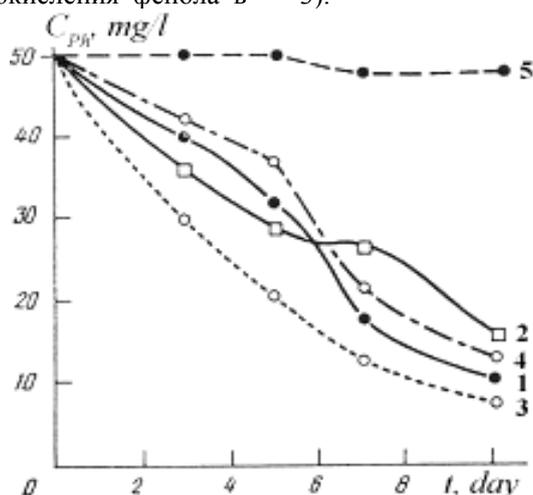


Рис.3. Динамика окисления фенола геотермальной воды с добавлением хлореллы (1), *Pseudomonas* (2), хлореллы и *Pseudomonas* (3), сине-зеленых водорослей (4) и контрольной среды (5)

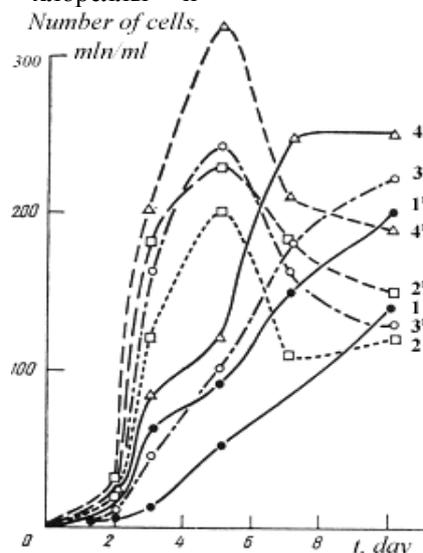
Fig.3. Dynamics of phenol oxidation of geothermal water with the addition of *Chlorella* (1), *Pseudomonas* (2), *Chlorella* and *Pseudomonas* (3), Blue-green algae (4), and control medium (5)

Динамика роста альго- и бактериальных клеток в фенолсодержащей геотермаль-

ной воде коррелирует со сроками инкубации и концентрацией фенола (рис. 4). Интенсив-

ный рост числа альго- и бактериальных клеток и окисление фенола наблюдали при совместном культивировании хлореллы и

*Pseudomonas*, что объясняется их взаимно стимулирующим влиянием.

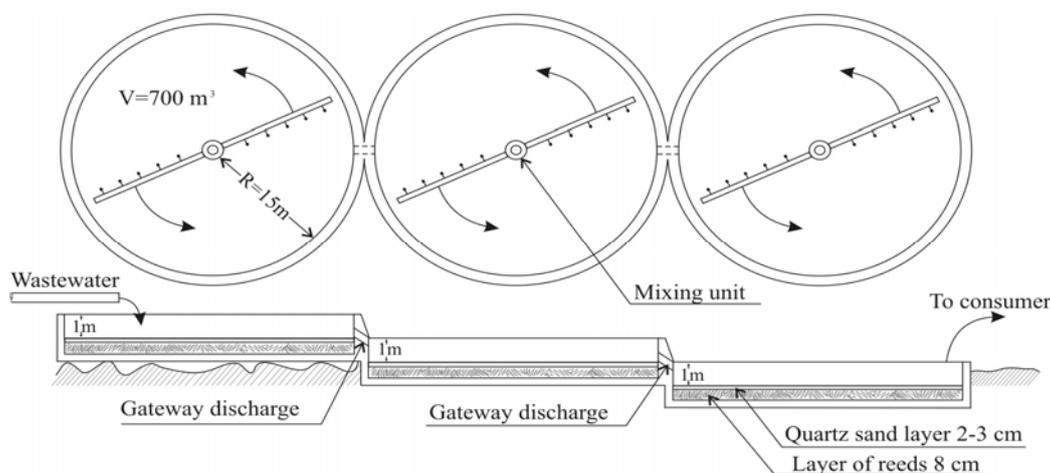


**Рис.4.** Прирост биомассы альго- и бактериальных клеток в термоминеральной воде: количество клеток хлореллы в геотермальной воде с фенолом (1), без фенола (1'); *Pseudomonas* с фенолом (2), без фенола (2'); Хлореллы при совместном культивировании с *Pseudomonas* с фенолом (3), без фенола (4); *Pseudomonas* с хлореллой и фенолом (3'), без фенола (4')

**Fig.4.** Growth of biomass of algal and bacterial cells in thermomineral water: the number of *Chlorella* cells in geothermal water with phenol (1), without phenol (1'); *Pseudomonas* with phenol (2), without phenol (2'); *Chlorella* in co-cultivation with *Pseudomonas* with phenol (3), without phenol (4); *Pseudomonas* with *Chlorella* and phenol (3'), without phenol (4')

Для обесфеноливания геотермальных вод Махачкалинского тепличного комбината предложена трехбассейновая установка, в которой после первичного снятия тепла выращивали альго- и бактериальные культуры. Установка представляла собой три

круглых бетонированных бассейна (d – 30 м, высота – 0,5 м), связанных между собой шлюзами. На дно бассейна укладывали слой камыша высотой 3 см, покрытый слоем кварцевого песка высотой 2-3 см (см. рис. 5).



**Рис.5.** Схема бассейновой установки для выращивания альго- и бактериальных культур  
**Fig.5.** Diagram of a basin plant for the cultivation of algal and bacterial culture

Бассейны располагались каскадно. Каждый последующий бассейн находился ниже предыдущего на 30 см. Общая рабочая емкость установки равнялась 2100 м<sup>3</sup>. Суспензию альго- и бактериальных культур перемешивали мешалкой через каждый час в течение 10 мин. Все три бассейна оборудо-

вали стационарным электродвигателем марки АО-52-4 (1400 об/мин). Установка рассчитана на круглосуточную эксплуатацию. Интенсивный рост водорослей поддерживался за счет углекислого газа геотермальной воды (см. рис. 6).

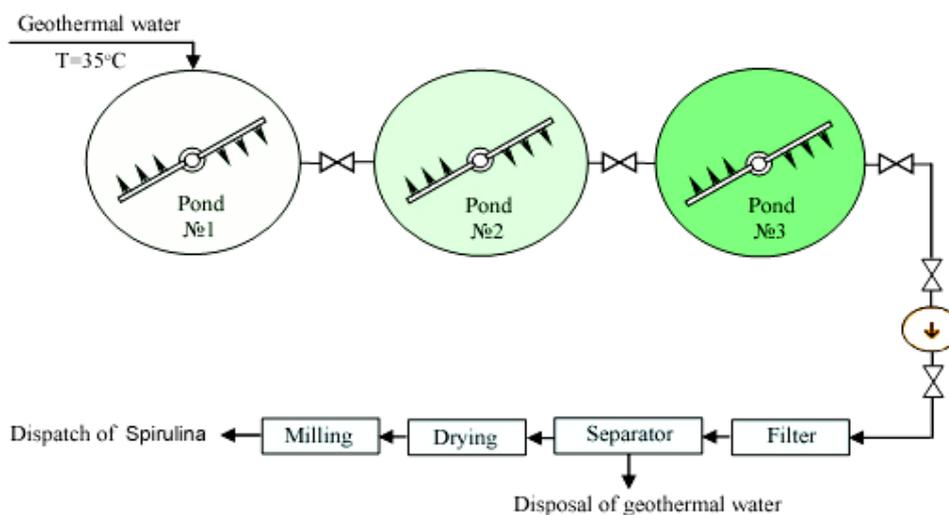


Рис. 6. Схема бассейновой установки для дефенолизации отработанной геотермальной воды

Fig. 6. Scheme of a basin plant for dephenolization of spent geothermal water

Первый бассейн заполняли геотермальной водой, вносили фекальную жидкость, инокулировали суспензией хлореллы и *Pseudomonas* из расчета 20 млн. клеток на 1 л воды. После трехсуточного культивирования, содержимое первого бассейна выпускали во второй, а первый бассейн заполняли геотермальной водой. Содержание второго бассейна после трехсуточной инкубации выпускали в третий бассейн, откуда после трехсуточного культивирования выкачивали 50 м<sup>3</sup> суспензии, которую отправляли потребителям или же сливали в сток. В процессе биохимического воздействия альго- и бактериальных культур концентрация фенола в геотермальной воде (при начальном его содержании 50 мг/л) в конце третьих суток снижалась в первом бассейне на 20%, во

втором – на 50% и в третьем – на 99,5 %.

Биомасса альго- и бактериальных культур представляет значительный интерес как белково-витаминный концентрат для животных и птицы. Выход сухой биомассы составляет 1,8 г/л с содержанием 45,5% белка, 29,2% жиров и 15,6% углеводов. В биомассе имеется каротин, тиамин, рибофлавин, пиридоксин, никотинамид, аскорбиновая кислота. В составе белка встречаются более 18 аминокислот.

Таким образом, биохимический способ обесфеноливания термоминеральных вод обеспечил безотходное использование тепла, химических элементов геотермальных вод и предотвратил опасность загрязнения воды при сбросе их в море.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты собственных исследований авторов по извлечению из микроводорослей ценных компонентов с использованием сверхкритической флюидной технологии непрерывного действия, а также по очистке геотермальных вод от фе-

нолов перед их сбросом в канализацию или поверхностные водоёмы.

Выявлены оптимальные параметры сверхкритической углекислотной экстракции липидной фракции из микроводоросли *Nannochloropsis salina* – перспективной циа-



нобактерии для получения биодизельного топлива [16; 54]. Выявлен компонентный состав жирных кислот, образующих триацилглицериды липидной фракции, установлено содержание большого количества полиненасыщенных жирных кислот, что перспективно с точки зрения лекарственного применения жиров, полученных из этой микроводоросли.

Показано, что поскольку микроводоросли способны поглощать углекислый газ в больших количествах, их можно использовать как "ловушки" диоксида углерода на тепловых электростанциях. Например, ис-

пользуя выбросы CO<sub>2</sub> и угарного газа, образующиеся в течение года на Махачкалинской ТЭЦ (18 МВт), можно производить до 25 тыс. т микроводорослей и снизить накопление в атмосфере столицы CO<sub>2</sub> на 50 тыс. т.

Преимущества микроводорослей являются хорошей предпосылкой для создания в Дагестане промышленного производства микроводорослей и получения из них биотоплива и ценных биологически активных веществ. В будущем биотехнология может стать высокотехнологичной и инновационной отраслью экономики республики.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pulz O., Gross W. Valuable products from biotechnology of microalgae // *Applied microbiology and biotechnology*. 2004. Vol. 65, no. 6. P. 635–648. DOI: 10.1007/s00253-004-1647-x
2. Kim S.-K., Chojnacka K., ed. *Marine Algae Extracts: Processes, Products, and Applications*, 2 Volume Set, John Wiley & Sons, 2015. 707 p.
3. Абдулагатов И.М., Бадавов Г.Б., Алиев А.М. Технология коммерческого производства микроводорослей в качестве сырья для биотоплива, белково-витаминных кормов и ценных биоактивных соединений с использованием возобновляемой энергии на территории Республики Дагестан: бизнес-план инвестиционного проекта // *Материалы объединенного семинара NIST (Боулдер, США) и Института проблем геотермии ДНЦ РАН (Махачкала, Южная Россия)*. 2011. С. 5–157.
4. Бадавов Г.Б. Состояние и проблемы использования геотермальной энергии в Республике Дагестан // *О состоянии и проблемах развития энергетики, транспорта и связи Республики Дагестан. Перспективы использования возобновляемых источников энергии // Материалы общественных слушаний. Общественная Палата Республики Дагестан. Махачкала, 25 октября 2012. С. 3–5.*
5. Догеев Г.Д., Ханбабаев Т.Г. Развитие новой технологической модели аграрной экономики региона // *Горное сельское хозяйство*. 2017. N 2. С. 6–8.
6. Открытие физиков из России поможет заменить бензин водорослями. URL: <http://www.energsovet.ru/news.php?zag=1497980875> (дата обращения: 21.06.2017).
7. Роснано совместно с американским партнером инвестирует в биотехнологии. URL: <http://www.cleandex.ru.orenda.ru> (дата обращения: 28.10.2015).
8. Производство энергии из биотоплива – крупнейший возобновляемый источник в мире. URL: <http://www.cleandex.ru; infobio.ru> (дата обращения: 26.06.2017).
9. В США открылся первый в мире полностью экологичный завод биотоплива. URL: <http://www.cleandex.ru/news/2017/07/27/>; [teknoblog.ru](http://teknoblog.ru) (дата обращения: 27.07.2017).
10. Horn S.J., Aasen I.M., Østgaard K. Ethanol Production from Sea-weed Extract // *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2000. Vol. 25, iss. 5. P. 249–254.
11. Katre G., Joshi C., Khot M., Zinjarde S., Ravikumar A. Evaluation of single cell oil (SCO) from a tropical marine yeast *Yarrowia lipolytica* NCIM 3589 as a potential feedstock for biodiesel // *AMB Express*. 2012. vol. 2, iss.1. 36 p. doi: 10.1186/2191-0855-2-36
12. Knothe G. "Designer" Biodiesel: Optimizing Fatty Ester Composition to Improve Fuel Properties // *Energy & Fuels*. 2008, vol. 22, no. 2. P. 1358–1364. DOI: 10.1021/ef700639e
13. Olmstead I.L., Kentish S.E., Scales P.J., Martin G.J. Low solvent, low temperature method for extracting biodiesel lipids from concentrated microalgal biomass // *Bioresour. Technol.* 2013. vol. 148. P. 615–619. doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.022
14. Saraf S., Thomas B. Influence of feedstock and process chemistry on biodiesel quality // *Process. Saf. Environ.* 2007. Vol. 85, iss. 5. P. 360–364.
15. Knothe G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters // *Fuel processing technology*. 2005. vol. 86, no. 10. P. 1059–1070. DOI: 10.1016/j.fuproc.2004.11.002
16. Aliev A.M., Abdulagatov I.M. The study of microalgae *Nannochloropsis salina* fatty acid composition of the extracts using different techniques. SCF vs conventional extraction // *Journal of Molecular Liquids*. 2017, vol. 239. P. 96–100. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.08.021
17. Aliev A.M., Radjabov G.K., Stepanov G.V. Composition of Extract of the *Juniperus Oblonga* M. Bieb. Fruits Obtained by Supercritical CO<sub>2</sub> extraction // *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2013. Vol. 7, no. 7. P. 795–801. DOI: 10.1134/S1990793113070038
18. Aliev A.M., Stepanov G.V. The visual investigation of solubility of biological active substances // *Proceed-*



- ings, 9th Meeting on Supercritical Fluids, Trieste, Italy, 2004. P. 13–16.
19. Алиев А.М., Степанов Г.В. Исследование влияния давления на процесс сверхкритической экстракции биологически активных веществ из растительного сырья // Сверхкритические Флюиды: теория и практика. 2006. Т. 1, N 1. С. 101–105.
20. Santoyo S., Jaime L., Herrero M., Señorans F.J., Cifuentes A., Ibáñez E. Functional characterization of pressurized liquid extracts of *Spirulina platensis* // European Food Research and Technology. 2006. Vol. 224, no. 1. P. 75–81. DOI: 10.1007/s00217-006-0291-3
21. Olmos J., Paniagua-Michel J. *Bacillus Subtilis* a Potential Probiotic Bacterium to Formulate Functional Feeds for Aquaculture // J Microb & Biochem Technol. 2014. Vol. 6, no. 7. P. 361–365. doi: 10.4172/1948-5948.1000169
22. Schörken U., Kempers P. Lipid Biotechnology: Industrially Relevant Production Processes // European journal of lipid science and technology. 2009. Vol. 111, iss. 7. P. 627–645. DOI: 10.1002/ejlt.200900057
23. Hirahashi T., Matsumoto M., Hazeki K., Saeki Y., Ui M., Seya T. Activation of the Human Innate Immune System by *Spirulina*: Augmentation of Interferon Production and NK Cytotoxicity by Oral Administration of Hot Water Extract of *Spirulina Platensis* // International Immunopharmacology. 2002. Vol. 2, no. 4. P. 423–434.
24. Capelli B., Cysewski G.R. Potential Health Benefits of *Spirulina Microalgae* // Nutrafoods. 2010. Vol. 9, iss. 2. P. 19–26.
25. Caroprese M., Albenzio M., Ciliberti M.G., Francavilli M., Sevi A. A mixture of phy-tosterols from *Dunaliella tertiolecta* affects proliferation of peripheral blood mononuclear cells and cytokine production in sheep // Veterinary immunology and immunopathology. 2012. Vol. 150, iss. 1. P. 27–35. doi: 10.1016/j.vetimm.2012.08.002
26. Ganesan K., Kumar K.S., Rao P.V.S. Comparative assessment of antioxidant activity in three edible species of green seaweed, *Enteromorpha* from Okha, Northwest coast of India // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2011. Vol. 12, no. 1. P. 73–78. DOI: 10.1016/j.ifset.2010.11.005
27. Kannan G., Saker K.E., Terrill T.H., Kouakou B., Galipallia S., Gelayea S. Effect of seaweed extract supplementation in goats exposed to simulated pre-lactation stress // Small Ruminant Research. 2007. Vol. 73, iss. 1-3. P. 221–227. Doi: 10.1016/j.smallrumres.2007.02.006
28. Владимирова М.Г., Семенов В.Е. Интенсивная культура одноклеточных водорослей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 59 с.
29. Винберг Г.Г. Культивирование зеленых планктонных водорослей на сточной жидкости // Микробиология. 1964. Т. 33, N 1. С. 508–515.
30. Гаевская Н.С. Проблемы промышленного использования одноклеточных водорослей // Вопросы ихтиологии. 1959. Вып. 12. С. 67–69.
31. Грыцык Б. Опыт замещения концентратов в кормлении молочных коров загущенной суспензией хлореллы // Материалы 4-го координационного собрания и научного симпозиума по теме VI-2,5 СЭВ. Краков, 1966. С. 52–56.
32. Махамадбеков С.М., Хаитова Л.Т. Продуктивность хлореллы и перспективы ее использования в хозяйственных целях // Физиология растений - сельскому хозяйству: Сб. статей. Душанбе: Изд-во АН ТаджССР, 1965. С. 55–63.
33. Музафаров А.М., Таубаев Т.Т. Массовое культивирование хлореллы и ее использование в животноводстве. Ташкент: Фан, 1968. 160 с.
34. Пиневич В.В., Верзилин Н.И. Культивирование протококковых водорослей в установках под открытым небом // Вестник ЛГУ. Серия биологическая. 1965. Т. 15, N 3. 54 с.
35. Мельников С.С. Спирулина: Справочное пособие в вопросах и ответах. Минск: Право и экономика, 2005. 51 с.
36. Тумалаев Н.Р., Рамазанов З.М. Культивирование протококковых водорослей для получения кормового и пищевого белка // Матер. конф. Европейских биохимических обществ: тезисы доклада. Копенгаген, 1977. С. 175–176.
37. Тумалаев Н.Р., Рамазанов З.М. Перспективы использования термоминеральных вод для получения белково-витаминных кормов // Низкопараметрическая геотермальная энергетика: сб. статей. Махачкала: Даг.ФАН, 1979. С. 104–108.
38. Тумалаев Н.Р. Продуктивность и биохимическая активность альго- и бактериальных популяций в искусственной экосистеме // Микроорганизмы в сельском хозяйстве: матер. всесоюзной конференции. Москва: МГУ, 1986. С. 25–26.
39. Тумалаев Н.Р., Тумалаева П.К. Влияние химического состава термоминеральных вод на биохимические показатели биомассы хлореллы // Материалы региональной конференции «Химия Северного Кавказа народному хозяйству», Махачкала, 1987. С. 56–57.
40. Тумалаев Н.Р. Биодegradация органических веществ термоминеральных вод в искусственной экосистеме // Социально-экологические проблемы интенсивного освоения устьевых приморских регионов: матер. всесоюзного совещания. Ростов-на-Дону, 1987. С. 28–29.
41. Тумалаев Н.Р., Османов Х.А., Тумалаева П.К. Перспективы культивирования зеленых и синезеленых микроводорослей в Дагестане // Актуальные проблемы современной альгологии: материалы всесоюзной конференции. Киев: Наукова думка, 1987. С. 274–275.
42. Спруж Я.Я., Тумалаев Н.Р. Перспективы использования хлореллы: рекомендации. Махачкала: Госагропром ДАССР, 1990. 68 с.
43. Zhang L., Cheng J., Peia H., Pan J., Jiang L., Hou Q., Han F. Cultivation of microalgae using anaerobically



digested effluent from kitchen waste as a nutrient source for biodiesel production // *Renewable Energy*. 2018, vol. 115, iss. C. P. 276–287. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.034

44. Olsson J., Xin Mei Feng, Ascue J., Gentili F.G., Shabiimam M.A., Nehrenheim E., Thorin E. Co-digestion of Cultivated Microalgae and Sewage Sludge from Municipal Wastewater Treatment // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 171. P. 203–210. Doi: 10.1016/j.biortech.2014.08.069

45. Трифонов В.Ю. Технология, способная решать проблемы "парникового эффекта" // *Экологический вестник России*. 2010. N 3. С. 2–4.

46. Трифонов В.Ю. Использование дымовых газов, образующихся в процессе термической переработки твердых бытовых отходов, для выращивания микроводоросли *Spirulina Platensis* // *Экологический вестник России*. 2009. N 11. С. 28–32.

47. Егоров А.А. Некоторые данные физиологии бактерий, окисляющих фенол при высокой температуре // *Микробиология*. 1946. Т. 15, N 6. С. 467–477.

48. Роговская Ц.И., Лазарева М.Ф. Интенсификация процессов биохимической очистки промышленных сточных вод. Микробиологическая характеристика активных илов, очищающих различные промышленные сточные воды // *Микробиология*. 1959. Т. 28, N 4. С. 565–573.

49. Лабинская А.С. О микробиологическом методе обесфеноливания сточных вод // *Ученые записки Московского института санитарии и гигиены*. 1960. N 3. С. 34–36.

50. Винберг Г.Г., Остапеня П.В. Биологические пруды в практике сточных вод // *Очистка сточных вод в биологических прудах*. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. С. 3–43.

51. Сивко Г.Н. Опыт очистки в биологических прудах сточных вод Минска // *Очистка сточных вод в биологических прудах*. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. С. 43–102.

52. Путилина Н.Т. Описание микробного метода обесфеноливания сточных вод // *Микробный метод обесфеноливания сточных вод*. Киев: Здоров'я, 1964. С. 23–28.

53. Тумалаев Н.Р. Очистка термоминеральных вод от фенолов с использованием альго- и бактериальных культур // *Химия и технология воды*. 1986. N 4. С. 81–83.

54. Магомедов М.-Р.Д., Власова О.К., Гасанова А.Ш. Геотермальные воды и микроводоросли *Nannochloropsis salina* // *Материалы первого международного форума «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR-2013»*, Москва, 22–23 октября 2013. С. 397–398.

## REFERENCES

1. Pulz O., Gross W. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 2004, vol. 65, no. 6, pp. 635–648. doi: 10.1007/s00253-004-1647-x

2. Kim S.-K., Chojnacka K., ed. *Marine Algae Extracts: Processes, Products, and Applications*, 2 Volume Set, John Wiley & Sons, 2015, 707 p.

3. Abdulagatov I.M., Badavov G.B., Aliev A.M. Tekhnologiya kommercheskogo proizvodstva mikrovodorosley v kachestve syr'ya dlya biotopliva, belkovo-vitaminnykh kormov i tsennykh bioaktivnykh soedineniy s ispol'zovaniem vozobnovlyаемой энергии na territorii Respubliki Dagestan: biznes-plan investitsionnogo proyekta [Technology of Commercial Production of Microalgae as Raw Material for Biofuel, Protein-Vitamin Feeds and Valuable Bioactive Compounds using Renewable Energy in the Territory of the Republic of Dagestan: Business-plan of the Investment Project]. *Materialy obyedinennogo seminar NIST (Boulder, USA) i instituta problem geotermii DNTs RAN* [Proceedings of Joint Workshop of NIST (Boulder, USA) & Institute for Geothermal Research, DSC RAS (Makhachkala, South Russia)]. Makhachkala, 2011, pp. 5–157. (In Russian)

4. Badavov G.B. Sostoyaniye i problemy ispol'zovaniya geotermal'noy energii v Respu-blike Dagestan [State and Problems of Geothermal Energy Utilization in the Republic of Dagestan]. *Materialy obshchestvennykh slushaniy. Obshchestvennaya Palata Respubliki Dage-*

*stan, 25 oktyabrya, 2012* [Proceedings of Hearings, the Public Chamber of the Republic of Dagestan "State and Problems of the Development of Energy, Transport and Communications in the Republic of Dagestan. Prospects for the Use of Renewable Energy". Makhachkala, 25 October, 2012]. Makhachkala, 2012, pp. 3–5. (In Russian)

5. Dogeev G.D., Khanbabaev T.G. The development of new technological models of the agrarian economy of the region. *Gornoye sel'skoye khozyaystvo* [Mountain Agreculture]. 2017, no. 2, pp. 6–8. (In Russian)

6. *Otkrytie fizikov iz Rossii pomozhet zamenit' benzin vodoroslyami* [The Discovery of Physicists from Russia Will Help Replace Gasoline with Algae] (In Russian). Available at: <http://www.energsovet.ru/news.php?zag=1497980875> (accessed 21.06.2017).

7. *Rosnano sovmestno s amerikanskim partnerom investiruet v bio-tekhnologii* [Rosnano Together with an American Partner Invests in Biotechnology]. (In Russian). Available at: <http://www.cleandex.ru.orenda.ru> (accessed 28.10.2015).

8. *Proizvodstvo energii iz biotopliva – krupneishii vozobnovlyаемый istochnik v mire* [Energy Production from Biofuels is the Largest Renewable Source in the World]. (In Russian). Available at: <http://www.cleandex.ru; infobio.ru> (accessed 26.06.2017).



9. V SShA *otkrylsya pervyi v mire polnost'yu ekologichnyy zavod bio-topliva* [In the US, the World's First Fully Nature-friendly Biofuel Plant was Opened]. (In Russian). Available at: <http://www.cleandex.ru/news/2017/07/27/>; [teknoblog.ru](http://teknoblog.ru) (accessed 27.07.2017).
10. Horn S.J., Aasen I.M., Østgaard K. Ethanol Production from Seaweed Extract. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2000, vol. 25, iss. 5, pp. 249–254.
11. Katre G., Joshi C., Khot M., Zinjarde S., Ravikumar A. Evaluation of single cell oil (SCO) from a tropical marine yeast *Yarrowia lipolytica* NCIM 3589 as a potential feedstock for biodiesel. *AMB Express*, 2012, vol. 2, iss. 1, 36 p. doi: 10.1186/2191-0855-2-36
12. Knothe G. "Designer" Biodiesel: Optimizing Fatty Ester Composition to Improve Fuel Properties. *Energy & Fuels*, 2008, vol. 22, no. 2, pp. 1358–1364. doi: 10.1021/ef700639e
13. Olmstead I.L., Kentish S.E., Scales P.J., Martin G.J. Low solvent, low temperature method for extracting biodiesel lipids from concentrated microalgal biomass. *Bioresour. Technol.*, 2013, vol. 148, pp. 615–619. doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.022
14. Saraf S., Thomas B. Influence of feedstock and process chemistry on biodiesel quality. *Process. Saf. Environ.* 2007, vol. 85, iss. 5, pp. 360–364.
15. Knothe G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel processing technology*, 2005, vol. 86, no. 10, pp. 1059–1070. DOI: 10.1016/j.fuproc.2004.11.002
16. Aliev A.M., Abdulagatov I.M. The study of microalgae *Nannochloropsis salina* fatty acid composition of the extracts using different techniques. SCF vs conventional extraction. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, vol. 239, pp. 96–100. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.08.021
17. Aliev A.M., Radjabov G.K., Stepanov G.V. Composition of Extract of the *Juniperus Oblonga* M. Bieb. Fruits Obtained by Supercritical CO<sub>2</sub> extraction. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2013, vol. 7, no. 7, pp. 795–801. DOI: 10.1134/S1990793113070038
18. Aliev A.M., Stepanov G.V. The visual investigation of solubility of biological active substances // Proceedings, 9th Meeting on Supercritical Fluids, Trieste, Italy, 2004. pp. 13–16.
19. Aliev A.M., Stepanov G.V. Investigation of the effect of pressure on the process of supercritical extraction of biologically active substances from plant materials. *Sverkhkriticheskiye flyuidy: teoriya i praktika* [Supercritical Fluids: Theory and Practice]. 2006, vol. 1, no. 1, pp. 101–105. (In Russian)
20. Santoyo S., Jaime L., Herrero M., Señoras F.J., Cifuentes A., Ibáñez E. Functional characterization of pressurized liquid extracts of *Spirulina platensis*. *European Food Research and Technology*, 2006, vol. 224, no. 1, pp. 75–81. DOI: 10.1007/s00217-006-0291-3
21. Olmos J., Paniagua-Michel J. *Bacillus Subtilis* a Potential Pro-biotic Bacterium to Formulate Functional Feeds for Aquaculture. *J Microb & Biochem Technol*, 2014, vol. 6, no. 7, pp. 361–365. doi: 10.4172/1948-5948.1000169
22. Schörken U., Kempers P. Lipid Biotechnology: Industrially Relevant Production Processes. *European journal of lipid science and technology*, 2009, vol. 111, iss. 7, pp. 627–645. DOI: 10.1002/ejlt.200900057
23. Hirahashi T., Matsumoto M., Hazeki K., Saeki Y., Ui M., Seya T. Activation of the Human Innate Immune System by *Spirulina*: Augmentation of Interferon Production and NK Cytotoxicity by Oral Administration of Hot Water Extract of *Spirulina Platensis*. *International Immunopharmacology*. 2002, vol. 2, no. 4, pp. 423–434.
24. Capelli B., Cysewski G.R. Potential Health Benefits of *Spirulina* Microalgae. *Nutrafoods*. 2010, vol. 9, iss. 2, pp. 19–26.
25. Caroprese M., Albenzio M., Ciliberti M.G., Francavilla M., Sevi A. A mixture of phytosterols from *Dunaliella tertiolecta* affects proliferation of peripheral blood mononuclear cells and cytokine production in sheep. *Veterinary immunology and immunopathology*, 2012, vol. 150, iss. 1, pp. 27–35. doi: 10.1016/j.vetimm.2012.08.002
26. Ganesan K., Kumar K.S., Rao P.V.S. Comparative assessment of antioxidant activity in three edible species of green seaweed, *Enteromorpha* from Okha, Northwest coast of India. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 73–78. DOI: 10.1016/j.ifset.2010.11.005
27. Kannan G., Saker K.E., Terrill T.H., Kouakou B., Galipallia S., Gelayea S. Effect of seaweed extract supplementation in goats exposed to simulated pre-lactation stress. *Small Ruminant Research*, 2007, vol. 73, iss. 1-3, pp. 221–227. Doi: 10.1016/j.smallrumres.2007.02.006
28. Vladimirova M.G., Semenenko V.E. *Intensivnaya cultura odnokletochnykh vodorosley* [Intensive Culture of Unicellular Algae]. Moscow, AN SSSR Publ., 1962, 59 p. (In Russian)
29. Vinberg G.G. Cultivation of Green Plankton Algae on Sewage. *Mikrobiologiya* [Microbiology]. 1964, vol. 33, no. 1, pp. 508–515. (In Russian)
30. Gaevsкая N.S. Problems of Industrial Use of Unicellular Algae. *Voprosy ikhtologii* [Journal of Ichthyology]. 1959, no. 12, pp. 67–69. (In Russian)
31. Grytsyk B. Opyt zameshcheniya kontskormov v kormlenii molochnykh korov zagushchenoy suspenziy khlorely [The Experience of Concentrates Substitution in the feeding of dairy cows with a thickened suspension of chlorella]. *Materialy 4-go koordinatsionnogo so-braniya i nauchnogo simpoziuma po teme VI-2,5 SEV, Krakov, 1966* [Proceedings of the 4th Coordination Meeting of the CMEA Countries on the topic VI-2,5, Krakov, 1966]. Krakov, 1966, pp. 52–56. (In Russian)



32. Makhmadbekov S.M., Khatova L.T. [Productivity of Chlorella and Prospects of its Use in Household Purposes]. In: *Fiziologiya rasteniy – sel'skomu khozyaystvu* [Physiology of plants to agriculture]. Dushanbe, 1965, pp. 55–63. (In Russian)
33. Muzafarov A.M., Taubayev T.T. *Massovoye kul'tivirovaniye khlorelly i yeyo ispol'zovaniye v zhivotnovodstve* [Mass Cultivation of Chlorella and Its Use in Livestock]. Tashkent, Fun Publ., 1968, 160 p. (In Russian)
34. Pinevich V.V., Verziln N.I. Cultivation of Proto-coccal Algae in Open Air Installations. *Vestnik LGU. Seriya biologicheskaya* [Bulletin of Pushkin Leningrad State University. Series Biological]. 1965, vol. 15, no. 3, 54 p. (In Russian)
35. Mel'nikov S.S. *Spirulina: Spravochnoye posobiye v voprosakh i otvetakh* [Spirulina: Reference Guide in Questions and Answers]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 2005, 51 p. (In Russian)
36. Tumalaev N.R., Ramazanov Z.M. Kul'tivirovaniye protokokkovykh vodorosley dlya polu-cheniya kormovogo i pishchevogo belka [Cultivation of Proto-coccal Algae to Obtain Feed and Food Protein]. *Materialy konferentsii Evropeiskikh biokhimicheskikh obshchestv, Kopenhagen, 1977* [Proceedings Conference of European Biochemical Societies, Copenhagen, 1977]. Copenhagen, 1977, pp. 175–176.
37. Tumalaev N.R., Ramazanov Z.M. Perspektivy ispol'zovaniya termomineral'nykh vod dlya polucheniya belkovo-vitaminnykh kormov [Prospects for the Use of Thermomineral Water for the Production of Protein-Vitamin Fodder]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Nizkopar-ametricheskaya geotermal'naya energetika"*, Makhachkala, 1979 [Proceedings of International Conference "Low-parametric geothermal power engineering", Makhachkala, 1979]. Makhachkala, 1979, pp. 104–108. (In Russian)
38. Tumalaev N.R. Produktivnost' i biokhimicheskaya aktivnost' al'go- i bakterial'nykh pop-ulyatsiy v iskusstvennoy ekosisteme [Productivity and Biochemical Activity of Algal and Bacterial Populations in an Artificial Ecosystem]. *Materialy Vsesoyuznoy konferentsii "Mikroorganizmy v sel'skom khozyaystve"*, Moskva, 1986 [Proceedings of the All-Union Conference "Microorganisms in agriculture", Moscow, 1986]. Moscow, MGU Publ., 1986, pp. 25–26. (In Russian)
39. Tumalaev N.R., Tumalaeva P.K. Vliyaniye khimicheskogo sostava termomineral'nykh vod na biokhimicheskiye pokazateli biomassy khlorelly [Effect of the Chemical Composition of Thermomineral Water on Biochemical Parameters of Chlorella Biomass]. *Materialy region-al'noi konferentsii «Khimiya Severnogo Kavkaza narodnomu khozyaystvu»*, Makhachkala, 1987 [Proceedings of the regional conference "Chemistry of the North Caucasus to the national economy", Makhachkala, 1987]. Makhachkala, 1987, pp. 56–57. (In Russian)
40. Tumalaev N.R. Biodegradatsiya organicheskikh veshchestv termomineral'nykh vod v iskusstvennoy ekosisteme [Biodegradation of Organic Substances of Thermomineral Waters in an Artificial Ecosystem]. *Materialy vsesoyuznogo soveshchaniya Sotsial'no-ekologicheskkiye problemy intensivnogo osvoyeniya ust'yevykh primorskikh regionov, Rostov-na-Donu, 1987* [Proceedings of the All-Union Session for Social-Economic Problems of the Intensive Development of the Estuarial Seaside Regions, Rostov-on-Don, 1987]. Rostov-on-Don, 1987, pp. 28–29. (In Russian)
41. Tumalaev N.R., Osmanov Kh.A., Tumalaeva P.K. Perspektivy kul'tivirovaniya zelenykh i sine-zelenykh mikrovodorosley v Dagestane [Prospects of Cultivation of Green and Blue-Green Microalgae in Dagestan]. *Materialy vsesoyuznoi konferentsii "Aktual'nye problemy sovremennoy algologii"*, Kiev, 1987 [Proceedings of the All-Union Conf "Urgent problems of modern algology", Kiev, 1987]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987, pp. 274–275. (In Russian)
42. Spruzh Ya.Ya., Tumalayev N.R. *Perspektivy ispol'zovaniya khlorelly: Rekomendatsii* [Prospects for Chlorella Using: Recommendations]. Makhachkala, Gosagroprom of DASSR, 1990, 68 p. (In Russian)
43. Zhang L., Cheng J., Peia H., Pan J., Jiang L., Hou Q., Han F. Cultivation of microalgae using anaerobically digested effluent from kitchen waste as a nutrient source for biodiesel production. *Renewable Energy*, 2018, vol. 115, iss. C, pp. 276–287. DOI: 10.1016/j.renene.2017.08.034
44. Olsson J., Xin Mei Feng, Ascue J., Gentili F.G., Shabimam M.A., Nehrenheim E., Thorin E. Codigestion of Cultivated Microalgae and Sewage Sludge from Municipal Wastewater Treatment. *Bioresource Technology*, 2014, vol. 171, pp. 203–210. Doi: 10.1016/j.biortech.2014.08.069
45. Trifonov V.Yu. Technology that Can Solve the Problems of the Greenhouse Effect. *Ekologicheskii Vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia]. 2010, no. 3, pp. 2–4. (In Russian)
46. Trifonov V.Yu. Use of Flue Gas Formed During the Thermal Processing of Solid Domestic Waste for Growing Microalgae *Spirulina Platensis*. *Ekologicheskii Vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia]. 2009, no. 11, pp. 28–32. (In Russian)
47. Egorov A.A. Some Data on the Physiology of Bacteria that Oxidize Phenol at High Temperature. *Mikrobiologiya* [Microbiology]. 1946, vol. 15, no. 6, pp. 467–477. (In Russian)
48. Rogovskaya C.I., Lazareva M.F. Intensification of the Processes of Biochemical Treatment of Industrial Wastewater. Microbiological Characteristics of Activated Sludge that Purifies Various Industrial Wastewater. *Mikrobiologiya* [Microbiology]. 1959, vol. 28, no. 4, pp. 565–573. (In Russian)
49. Labinskaya A.S. The Microbiological Method of Wastewater Dephenolization. *Uchenye zapiski Moskovskogo instituta sanitarii i gigiyeny* [Proceedings of



the Moscow Institute of Sanitation and Hygiene]. 1960, no. 3, pp. 34–36. (In Russian)

50. Vinberg G.G., Ostapeneya P.V. [Biological Ponds in Wastewater Practice]. In: *Ochistka stochnykh vod v biologicheskikh prudakh* [Wastewater Treatment in Biological Ponds]. Minsk, AN BSSR Publ., 1961, pp. 3–43. (In Russian)

51. Sivko G.N. [Experience of Minsk Wastewater Treatment in Biological Ponds]. In: *Ochistka stochnykh vod v biologicheskikh prudakh* [Wastewater Treatment in Biological Ponds]. Minsk, AN BSSR Publ., 1961, pp. 43–102. (In Russian)

52. Putilina N.T. [Description of the Microbial Method of Sewage Dephenolization]. In: *Mikrobnyy metod obesfenolivaniya stochnykh vod* [Microbial method of wastewater dephenolization]. Kiev, Zdorov'ya Publ., 1964, pp. 23–28. (In Russian)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Принадлежность к организации

**Ильмутдин М. Абдулагатов\*** – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, просп. Шамиля, 39-а, e-mail: ilmutdina@gmail.com

**Алибек Б. Алхасов** – доктор технических наук, профессор, директор Института проблем геотермии ДНЦ РАН, г. Махачкала, Россия.

**Гасан Д. Догеев** – кандидат экономических наук, директор Дагестанского НИИ сельского хозяйства им. Ф.Г. Кисриева, г. Махачкала, Россия.

**Нариман Р. Тумалаев** – кандидат химических наук, главный технолог ОАО "Денеб", г. Махачкала, Россия.

**Расул М. Алиев** – доктор технических наук, заведующий кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

**Гасан Б. Бадавов** – старший научный сотрудник Института проблем геотермии ДНЦ РАН, г. Махачкала, Россия.

**Аслан М. Алиев** – старший научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН, г. Махачкала, Россия.

**Асият С. Салихова** – аспирантка Института социально-экономических исследований ДНЦ РАН, г. Махачкала, Россия.

##### Критерии авторства

Ответственность за содержание и достоверность предоставленных сведений, за плагиат и другие неэтические проблемы несут все авторы. Авторы в равной степени принимали участие в этой работе.

##### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.12.2017  
Принята в печать 01.02.2018

53. Tumulayev N.R. Purification of Thermomineral Water from Phenols Using Algal and Bacterial Cultures. *Khimiya i tekhnologiya vody* [Chemistry and technology of water]. 1986, no. 4, pp. 81–83. (In Russian)

54. Magomedov M.-R.D., Vlasova O.K., Gasanova A.Sh. Geotermal'nyye vody i mikrovdorosli Nannochloropsis salina [Geothermal water and microalgae Nannochloropsis salina]. *Materialy pervogo mezhdunarodnogo foruma "Vozobnovlyayemaya energetika. Puti povysheniya energeticheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti" REENFOR-2013, 22-23 Oktyabrya, 2013* [Proceedings of the First International Forum "Renewable Energy: Ways to Increase Energy and Economic Performance, REENFOR-2013", 22-23 October, 2013]. Moscow, OIVTRAN Publ., 2013, pp. 397–398. (In Russian)

#### AUTHORS INFORMATION

##### Affiliations

**Ilmutdin M. Abdulagatov\*** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory, the Institute for Geothermal Research, DSC RAS. 367030, Republic of Dagestan, Makhachkala, 39-a Shamilya st., e-mail: ilmutdina@gmail.com

**Alibek B. Alkhasov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute for Geothermal Research, DSC RAS, Makhachkala, Russia.

**Gasane D. Dogeev** – Candidate of Economic Sciences, Director of the Dagestan Research Institute of Agriculture, Makhachkala, Russia.

**Nariman R. Tumalaev** – Candidate of Chemical Sciences, Chief technologist at "Deneb" Ltd. Company, Makhachkala, Russia.

**Rasul M. Aliev** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia.

**Gasane B. Badavov** – Senior Researcher, Institute for Geothermal Research, DSC RAS, Makhachkala, Russia.

**Aslan M. Aliev** – Senior Researcher, Amirkhanov Institute of Physics, DSC RAS, Makhachkala, Russia.

**Asiyat S. Salikhova** – Postgraduate student of Institute of Social and Economic Research, DSC RAS, Makhachkala, Russia.

##### Contribution

Responsibility for the content and reliability of the information provided, for plagiarism or other unethical issues are borne by all authors. The authors equally participated in the present research.

##### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.12.2017  
Accepted for publication 01.02.2018