



ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ БИОЭНЕРГЕТИКИ*

Н.И. Чернова¹, С.В. Киселева¹, Ю.Ю. Рафикова¹, М.С. Власкин²

¹НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

д. 1, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия
тел.: +7(495)939-42-57; e-mail: k_sophia_v@mail.ru

²Объединенный институт высоких температур РАН
д. 13, ул. Ижорская, Москва, 125412, Россия
тел.: +7(495) 485-10-55

doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.030-041

Заключение совета рецензентов: 12.09.19 Заключение совета экспертов: 16.09.19 Принято к публикации: 23.09.19

Несмотря на доминирование углеводородного топлива в топливно-энергетическом комплексе мира и России, продолжают исследования в области получения биотоплива из различных видов биомассы. Эти работы являются актуальными как с точки зрения получения фундаментального знания и развития технологий, так и поиска условий рентабельного производства биотоплива с помощью различных технологий переработки биомассы. В статье в качестве источника биомассы для получения топлива рассматриваются микроводоросли (МКВ).

К настоящему времени разработан и апробирован ряд методов конверсии МКВ в биотопливо (биодизель, биоэтанол, биобутанол, биомасло, биочар, биометан, биоводород и т.д.). Одним из узких мест этих технологий является высокая влажность биомассы МКВ, требующая значительных затрат энергии на сушку перед переработкой биомассы в топливо. Кроме того, в случае производства биотоплива, например, биодизеля, конвертируется только липидная часть биомассы, в то время как оставшееся сырье, включая белки и углеводы, не участвует в производстве биотоплива. В связи с этим в последние годы к МКВ была применена технология гидротермального сжижения (*Hydrothermal liquefaction* – НТЛ), не требующая сушки биомассы, и, следовательно, обеспечивающая более низкие производственные затраты.

Для повышения экономической привлекательности биотоплива большое значение придается получению попутных целевых продуктов, дающих дополнительную прибыль. В этих же целях проводят территориальный анализ и поиск площадок для размещения производственных мощностей, где культивирование и переработка МКВ требует минимальных затрат. В представленной работе проведен анализ влияния региональных, климатических и инфраструктурных факторов на производство и комплексное использование биомассы МКВ. В качестве объекта исследований были выбраны МКВ *Arthrospira platensis* и *Dunaliella salina*, а в качестве региона исследований – Республика Дагестан в связи с благоприятными климатическими условиями и наличием ресурсов для культивирования МКВ (морская вода как источник макро- и микроэлементов, геотермальные месторождения как низкотемпературный источник тепла, цементные заводы и тепловые электростанции как источник CO₂). Определены районы Республики, потенциально пригодные для получения биотоплива и попутных целевых продуктов из МКВ.

Ключевые слова: микроводоросли; биотопливо; сопутствующие продукты; пространственный анализ; артроспира и дуналиелла; открытые культиваторы; климат; инфраструктура; оценка ресурсов.

*Чернова Н.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю., Власкин М.С. Пространственный анализ ресурсного потенциала для оптимального размещения объектов биоэнергетики // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;22-27:30-41.



SPATIAL ANALYSIS OF RESOURCE POTENTIAL FOR OPTIMAL BIOENERGY OBJECTS PLACEMENT

N.I. Chernova¹, S.V. Kiseleva¹, Yu.Yu. Rafikova¹, M.S. Vlaskin²

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

1 Leninskie Gori, Moscow, 119991, Russia

tel.: +7 (495) 939 42 57, e-mail: k_sophia_v@mail.ru

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

13/2 Izhorskaya St., Moscow, 125412, Russia

tel.: +7 (495) 485 10 55

doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.030-041

Referred 12 September 2019 Received in revised form 16 September 2019 Accepted 23 September 2019

Despite the dominance of hydrocarbon fuel in the fuel and energy complex of the world and particularly in Russia, there is a research interest in the field of biofuels from various types of biomass. These works are relevant both from the point of view of obtaining fundamental knowledge and the development of technologies, as well as the search for conditions for cost-effective production of biofuels using various biomass processing technologies. In the article, microalgae are considered as a source of biomass for producing fuel.

Nowadays a number of methods for the conversion of microalgae to biofuels (biodiesel, bioethanol, biobutanol, bio-oil, biochar, biomethane, biohydrogen, etc.) have been developed and tested. One of the problems of these technologies is the high humidity of the microalgae biomass, which requires a significant expenditure of energy for drying before processing the biomass into fuel. In addition, in the case of the production of biofuels (for example, biodiesel) only the lipid part of the biomass is converted, while the remaining raw materials, including proteins and carbohydrates, are not involved in the production of biofuels. Due to this fact, in recent years, the technology of hydrothermal liquefaction (HTL) has been applied to microalgae, which does not require drying of biomass, and, therefore, provides lower production costs.

In order to increase the economic attractiveness of biofuels, great importance is given for obtaining associated target products that provide additional profit. For the same purposes, they conduct a territorial analysis and search for sites for production facilities, where the cultivation and processing of microalgae requires minimal costs. In this work, we have analyzed the influence of regional, climatic and infrastructural factors on the production and integrated use of microalgae biomass. The microalgae *Arthrospira platensis* and *Dunaliella salina* are chosen as the object of research, and the Republic of Dagestan is chosen as the research region due to favourable climatic conditions and the availability of resources for the cultivation of microalgae (sea water as a source of macro- and microelements, geothermal deposits as a low-temperature heat source, cement plants and thermal power plants as a source of CO₂). As a result the article presents a map of the areas that are potentially suitable for the production of biofuel and associated target products from microalgae and their estimated productivity.

Keywords: microalgae; biofuel; co-product; spatial analysis; *Arthrospira* and *Dunaliella*; outdoor cultivators; climate; infrastructure; resource assessment.



Ндежда Ивановна
Чернова
Nadezhda Chernova

Сведения об авторе: канд. биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: биолого-почвенный факультет МГУ (1974 г.).

Область научных интересов: биоконверсия солнечной энергии; водорослевая энергетика; скрининг микроводорослей и цианобактерий для целей энергетике.

Публикации: более 150, в том числе патенты.
h-index 11 (по РИНЦ); ORCID 0000-0002-8578-8495
Research ID E-6714-2014
Scopus Author ID 56319554900

Information about the author: Ph.D. in Biology, Associate Professor, Senior Researcher at Renewable Energy Sources Laboratory, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography.

Education: Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, 1974.

Research interests: bioconversion of solar energy; algal energetic; screening of microalgae and cyanobacteria for energy.

Publications: more than 150, including patents.





Софья
Валентиновна
Киселева
Sofia Kiseleva

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: физический факультет МГУ (1987 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; оценка ресурсов ВИЭ; лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

Публикации: более 200, в том числе патенты на изобретения.

h-index 12 (по РИНЦ)

ORCID 0000-0001-5836-8615

Research ID E-3324-2014

Scopus Author ID 57201352245

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher at the Renewable Energy Sources Laboratory, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography.

Education: Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, 1987.

Research interests: renewable energy sources; resource evaluation; ecology-geographical aspects of renewable energy; laboratory modeling of ocean and atmosphere's dynamical process.

Publications: more than 200, including patents.



Юлия Юрьевна
Рафикова
Yulia Rafikova

Сведения об авторе: канд. географ. наук, старший научный сотрудник НИЛ возобновляемых источников энергии, географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: МГУ имени М.В. Ломоносова (2004 г.).

Область научных интересов: ГИС в возобновляемой энергетике; геоинформационное картографирование.

Публикации: 80.

h-index 6 (по РИНЦ);

ORCID 0000-0003-3204-9135

Research ID D-7649-2012

Scopus Author ID 56451165800

Information about the author: Senior Researcher at the Scientific Laboratory of Renewable Energy Sources, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University.

Education: Lomonosov Moscow State University, 2004.

Research interests: GIS for renewable energy; resource assessment; geoinformational cartography.

Publications: 80.



Михаил Сергеевич
Власкин
Mikhail Vlaskin

Сведения об авторе: канд. тех. наук, заведующий лабораторией энергоаккумулирующих веществ Объединенного института высоких температур РАН.

Образование: МФТИ (2008 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; новые энергоносители; биоэнергетика.

Публикации: более 100, в том числе патенты на изобретения.

h-index 12 (по РИНЦ) 8; ORCID 0000-0001-6549-9939

Research ID Q-7100-2017

Publons: publons.com/a/1432449/

Scopus Author ID 25628784900

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Head of the Energy Accumulating Materials Laboratory of Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Science.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 2008.

Research interests: renewable energy sources; new energy carriers; bioenergy.

Publications: more than 100, including patents.

1. Введение

Технологии получения биотоплива из микроводорослей (МКВ) привлекают к себе значительное внимание вследствие их более высокой продуктивности по сравнению с традиционными культурами. Для выращивания МКВ можно использовать засоленные и сточные воды, а плантации размещать на непригодных для растениеводства землях. Помимо получения топлива, выращивание МКВ может служить средством для удаления углекислого газа из атмосферы и поддержания нулевого баланса углерода. Характерная для МКВ лабильность состава позволяет производить биомассу с заданными свойствами и, соответственно, повышать выход заданного типа биотоплива (например, выход биодизеля при увеличении содержания липидов в биомассе). Поскольку биомасса многих МКВ содержит ряд ценных

сопутствующих продуктов, в том числе, биологически активных добавок к кормам и пище, следует использовать это свойство для получения дополнительных доходов и, таким образом, улучшать экономические показатели производства биотоплива. Важным в этом контексте является также выбор наиболее оптимальных технологий конверсии биомассы. Так, перспективна технология гидротермального сжижения (HTL), когда не требуется сушка МКВ перед переработкой их в топливо (бионефть), и все микроводорослевое сырье (не только липиды или углеводы) преобразуются в конечный продукт – биотопливо.

Важный фактор достижения конкурентоспособности биотоплива из МКВ – максимальное снижение стоимости всех этапов производства. В связи с этим другим направлением исследований становится многофакторный анализ территории средствами геоин-

формационных систем (ГИС) с точки зрения физико-географических и инфраструктурных условий, которые могут обеспечить это снижение стоимости.

Ранее в работе [1] были обоснованы физико-географические условия, пригодные для культивирования МКВ *Arthrospira platensis* открытым способом, и выделены на этой основе для дальнейшего деталь-

ного исследования территории Юга России. В представленной статье на примере Республики Дагестан помимо климатических условий учтено также влияние инфраструктурных факторов на выбор регионов, где производство биотоплива и ценных сопутствующих продуктов может быть наиболее близко к уровню рентабельности.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$C_6H_{12}O_6$	Глюкоза
CO_2	Углекислый газ
H_2O	Вода
NO_x	Общая формула оксидов азота
NO_2	Двуокись азота
O_2	Кислород
photons	Фотоны
SO_x	Общая формула оксидов серы
<i>Аббревиатуры</i>	
НТЛ	Гидротермальное сжижение
БАД	Биологически активная добавка
ГИС	Геоинформационные системы
МКВ	Микроводоросли
ТЭС	Теплоэлектростанция
ТЭЦ	Теплоэлектроцентраль
ФАР	Фотосинтетически активная радиация

2. Теоретические основы выбора территорий для оптимального размещения плантаций микроводорослей

Задача повышения эффективности производства энергетических и иных целевых продуктов из МКВ является одной из ключевых в области микроводорослевых биотехнологий. Поэтому значительный объем экспериментальных работ посвящен разработке и апробации различных методов культивирования, включая конструкцию культиваторов, способы сбора и переработки биомассы, поиск дешевых источников CO_2 , микро- и макроэлементов для питательных сред, которые позволили бы существенно снизить стоимость производства биомассы. При этом очевидным был выбор южных регионов как наиболее благоприятных по физико-географическим условиям для минимизации затрат на освещение и обогрев плантаций МКВ, особенно при открытом культивировании. Так, в ходе выполнения крупного исследовательского проекта [2] была оценена продуктивность МКВ *Haematococcus pluvialis* при двухстадийном культивировании на Гавайских островах и рассчитана себестоимость биодизеля из МКВ. В дальнейшем это направление исследований получило широкое развитие. Для оценки производительности микроводорослевых плантаций в различных климатических условиях предпринимались как экспериментальные, так и теоретические исследования. В [3] на основе экспериментальных работ по выращиванию МКВ *Dunaliella salina* и получения из нее каротина на юге Испании (Кадисский залив) определены зависимости продуктивности от внешних климати-

ческих условий и технических параметров культиваторов. Поскольку использовались открытые плоскостные культиваторы, в качестве определяющих внешних условий были рассмотрены средние месячные уровни приходящей солнечной радиации. Так как затраты воды на культивирование, в том числе компенсация испаренной из культиваторов воды, часто является критичным фактором, учитывались также средняя месячная влажность, осадки, максимальные и минимальные значения температуры воздуха, количество часов солнечного сияния. Среди технических параметров культивирования рассматривались толщина слоя культуральной жидкости, скорость движения суспензии МКВ в процессе перемешивания, плотность клеток и др. Измеренная продуктивность МКВ в различные сезоны года и в зависимости от технических параметров установок позволяет прогнозировать эффективность микроводорослевых плантаций такого типа в близких природно-климатических условиях.

Оценку продуктивности МКВ по биомассе и целевым продуктами (белкам, липидам, углеводам) проводят также на основе теоретических представлений об эффективности фотосинтеза и значений приходящей солнечной радиации. Авторы [4] на основе анализа территории Эфиопии рассмотрели 5 регионов, предположительно наиболее оптимальных для культивирования биомассы МКВ с точки зрения достаточности приходящей солнечной радиации и с учетом изменений температуры воздуха в течение года. Исходя из указанных характеристик, были сделаны оценки потенциальной производительности открытых плантаций МКВ по биомассе и липидам, а



также по получению биодизеля и секвестра (сокращения) выбросов CO₂. Расчеты были основаны на уравнении фотосинтеза ($6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{photons} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$), согласно которому на утилизацию одной молекулы CO₂ требуется 8 фотонов. Продуктивность единицы площади плантации по биомассе рассчитывалась из уровня приходящей солнечной радиации и теоретических значений доли в ней ФАР (фотосинтетически-активной радиации) – 45,8 %. Кроме того, в модель включена оценка эффективности утилизации фотонов МКВ, которая зависит от доли отраженной радиации и проникновения фотонов в клетку МКВ и определяется особенностями систем культивирования, спектральным составом солнечного излучения, долей площади поверхности земли, занятой культиваторами. Предполагалось, что коэффициент преобразования энергии фотонов в энергию химических соединений в составе биомассы составляет 33 %. Продуктивность МКВ по липидам рассчитывалась с учетом доли липидной фракции в составе биомассы МКВ и потерю энергии МКВ на дыхание и фотоингибирование при высоких уровнях радиации.

Для количественных оценок максимальной продуктивности МКВ по биомассе и липидам, а также секвестра CO₂ были использованы многолетние средние данные о приходе солнечной радиации на территории Эфиопии, а также осредненные характеристики, приведенные в научной литературе (энергосодержание биомассы и липидов в составе МКВ, доля липидов в составе биомассы и т.д.). В результате продуктивность МКВ для условий Эфиопии была оценена как 85,76 г/м²/сутки (биомасса), 101 249 л/га/год (липиды), 82,7 т CO₂/га/год (потенциальное сокращение выбросов CO₂).

Подобная теоретическая задача количественной оценки потенциала промышленного производства биодизеля из водорослей была поставлена и решена для территории Индии в [5]. Поскольку вариации прихода солнечной радиации и температуры воздуха на территории Индии в силу ее протяженности существенны, целью исследования был выбор подходящих областей для выращивания биомассы МКВ с учетом этих природных факторов, а также наличия свободных площадей. Оценки показали, что в зависимости от уровня радиации ежегодный урожай МКВ на доступных для их культивирования площадях может составить от 159 т/га/год до 345 т/га/год (по биомассе) и от 57 000 л/га/год до 162 000 л/га/год (по биодизелю).

В [6], помимо оценки продуктивности биомассы МКВ *Chlorella vulgaris* на основе данных о приходе солнечной радиации на территории Сицилии, были учтены и другие факторы, которые могут ограничить или вовсе сделать непригодными территории для выращивания биомассы МКВ в открытых культиваторах с целью получения биодизеля. В качестве таких факторов были рассмотрены:

– уклон поверхности (исключались территории с уклоном более 5 %);

– высота над уровнем моря (исключались территории с высотой более 500 м);

– средняя годовая температура воздуха (исключались территории с температурой менее +15 °С);

– тип землепользования (исключались территории в частной собственности, сельскохозяйственные и селитебные земли, особо охраняемые территории);

В результате были построены карты распределения максимальной теоретической продуктивности МКВ *Chlorella vulgaris* по биомассе и липидам с разрешением 30 м, на которые были наложены картографические слои, отражающие указанные факторы. Это позволило определить те районы, где возможно производство МКВ с максимальной урожайностью, и не имеющие ограничений для этого производства.

В последние годы началось все более активное применение инструментов картографирования и геоинформационных технологий (ГИС-технологий) для анализа природных и инфраструктурных условий производства МКВ и выбора наиболее оптимальных территорий. В частности эти подходы были использованы в серии работ, выполненных в национальной лаборатории возобновляемой энергетики США (NREL US). Так, для территории Индии был проведен углубленный анализ следующих климатических и инфраструктурных факторов [5, 7], которые были представлены в виде карт:

– уровень прихода солнечной энергии, температура воздуха с учетом сезонности;

– источники низкокачественных вод, пригодных для культивирования МКВ;

– дешевые источники питательных веществ для культивирования (в том числе источники CO₂, промышленных и коммунальных сточных вод).

– неиспользуемые (маргинальные) земли: деградированные пахотные земли, пастбища и леса, промышленные и природные пустоши, которые возможно использовать для размещения плантаций МКВ.

Было рассчитано потенциальное производство липидов (водорослевого масла) при использовании только 10 % маргинальных земель – от 22 млн т/год до 55 млн т/год. Выдвинутая в работе идея совмещения культивирования МКВ для получения энергетических и иных целевых продуктов с производствами, отходы которых можно использовать для роста МКВ (ко-локализация), получила в дальнейшем широкое развитие. Справедливо было указано, что улавливание CO₂ плантациями МКВ до его выброса в атмосферу предоставляет возможность получения углеродных кредитов, что улучшает экономические характеристики проектов.

Аналогичные расчеты потенциальной продуктивности открытых плантаций МКВ *Nannochloropsis oculata* были проведены для 864 районов США с учетом многолетних актинометрических данных о приходе солнечной радиации [8]. Учитывалось наличие доступных для производства МКВ земель и источников CO₂, уклон поверхности Земли (не более 5 %) и площадь единичной плантации (не менее 400 га). Опреде-



лена чувствительность оценки пригодных территорий к плечу транспортировки CO₂. В результате были получены несколько серий карт, в том числе карты реализуемого потенциала продуктивности МКВ на доступных территориях в континентальной части США с учетом минимального размера плантации МКВ и наличия промышленных источников CO₂.

Территория России – в силу своих климатических особенностей – безусловно, имеет гораздо меньшие возможности для размещения микроводорослевых производств. Кроме того, при наличии значительных запасов углеводородов энергетическое направление использования МКВ в настоящее время не может быть конкурентоспособным. Однако, выращивание МКВ для комплексного их применения с получением ценных целевых продуктов и одновременной утилизацией сточных вод и выбросов CO₂ может рассматриваться как перспективное направление биоэнергетики.

3. Материалы и методы исследования

Рассмотрим подходы к оценке ресурсного потенциала для производства биотоплива из МКВ в условиях Российской Федерации. Основой производства биотоплива является биомасса МКВ, которая в климатических условиях России может быть выращена открытым способом или на открытых площадках в течение теплого времени года или в тепличных комплексах круглогодично.

В связи с этим под ресурсным потенциалом в дальнейшем примем площадь территории, которая может быть использована для производства биомассы МКВ открытым способом, а также потенциальную годовую урожайность МКВ и количество биотоплива, полученных на этой территории с помощью той или иной применяемой технологии. Таким образом, оценка ресурсов и факторный анализ территории – обязательные при проектировании солнечных, ветровых, гидроэнергетических и иных объектов возобновляемой энергетики (ВЭ) – включаются и в тематику исследовательских работ в области микроводорослевой энергетики.

Проведение многофакторного пространственного анализа целесообразно на основе ГИС-технологий. Данное исследование проводилось с помощью инструментария свободной геоинформационной системы с открытым кодом QGIS и базировалось на открытых источниках пространственных данных, таких как: Open Street Map [9]; База данных NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) [10]; Агроэкологический атлас России и сопредельных стран [11]; цифровая модель рельефа SRTM [12]; ГИС-Атлас «Недра России» [13].

Условия, необходимые для культивирования МКВ, в том числе собственный опыт культивирования, позволили сформировать перечень физико-географических факторов, определяющих возможность получения биомассы в открытых культиваторах без энергии внешних источников (кроме термальных вод) (табл. 1).

Таблица 1

Физико-географические факторы производства биомассы МКВ как сырья для получения биотоплива

Table 1

Physical-geographical factors of microalgae biomass production as feedstock for biofuel production

Физико-географические факторы	Вид фактора	Величина фактора/качественная характеристика
Климатические	Солнечная радиация (средняя суточная сумма суммарной солнечной радиации)	Не ниже 4 кВт·ч/м ² /сутки (или 14 МДж/м ² /сутки)
	Продолжительность светового периода в течение суток (соотношение световой и темновой фазы роста МКВ)	Не менее 6:18 (световая фаза к темновой фазе, в часах)
	Температура воздуха	Средняя суточная температура не ниже +15 °С
Природные источники микро- и макроэлементов для питательных сред и низкотемпературного тепла	Наличие источника термальных вод	Желательно
	Температура термальных вод	Не ниже +(35÷40) °С
	Наличие источника пресной или морской воды	Необходимо
Геоморфологические факторы	Уклон поверхности Земли	Не более 5 %

Как было показано ранее [1], на территории РФ нет регионов, пригодных для круглогодичного выращивания МКВ без дополнительных затрат энергии на освещение и отопление плантаций. Суммарная солнечная радиация заданного уровня (более 4 кВт·ч/м²/сутки) характерна для значительной территории страны в теплые полгода (апрель – сентябрь) и для всей территории – в летние месяцы. Но по температурному

режиму и продолжительности солнечного сияния для выращивания МКВ пригодны лишь территории Юга РФ (Ставропольский край, Краснодарский край, Ростовская область, Астраханская область, Республика Дагестан, Республика Крым), где средняя температура приземного слоя воздуха превышает 18 °С в течение не менее 6 месяцев в году.

В качестве территории, для которой был проведен анализ влияния инфраструктурных факторов на ресурсный потенциал производства биотоплива из МКВ, была выбрана Республика Дагестан. Выбор определялся климатическими условиями, позволяющими проводить культивирование МКВ в течение теплого времени года без дополнительных затрат тепловой и световой энергии (табл. 2). Близость Каспийского моря обеспечивает выращивание галофильных МКВ на морской воде, поэтому для проведения анализа были выбраны МКВ *Arthrospira platensis* и галофильная МКВ *Dunaliella salina*. Эти

два вида МКВ выращивают в мире в промышленных масштабах недорогим открытым способом как для применения в качестве биологически активных добавок к кормам и пище (БАД), так и для получения биотоплива [3, 7, 14, 15]. Площадь территории Республики Дагестан небольшая (50 300 км²), широтно-долготная протяженность не превышает 4° с севера на юг и с запада на восток. В связи с этим приход солнечной радиации практически одинаков на всей территории, а распределение температур воздуха определяется в первую очередь высотной зональностью и близостью к акватории Каспийского моря.

Таблица 2

Климатические характеристики территории Республики Дагестан, значимые для культивирования МКВ (средние многолетние данные за 2005–2018 гг. для г. Махачкалы по данным [16, 17])*

Table 2

Climatic characteristics of the Dagestan territory (long-term meteorological data for the period 2005–2018 for the city of Makhachkala) [16, 17]*

	Средняя температура воздуха, °С	Солнечное сияние, часы	Отношение световой и темновой фазы (часы, среднее за месяц)	Средняя суточная сумма суммарной солнечной радиации, МДж/м ²
Январь	+0,4	73	7,40:16,20	4,64
Февраль	+1,2	72	9,41:14,19	6,7
Март	+5,4	108	11,49:12,11	10,36
Апрель	+10,5	175	14,12:9,48	16,38
Май	+17,1	244	16,18:7,42	21,87
Июнь	+22,6	276	17,32:6,28	23,95
Июль	+25,2	286	16,58:7,02	23,17
Август	+25,6	273	15,04:8,56	20,28
Сентябрь	+21,0	197	12,46:11,14	14,82
Октябрь	+14,3	153	10,29:23,31	9,97
Ноябрь	+7,8	85	08,18:15,42	5,4
Декабрь	+4,0	66	07,30:16,30	4,0

*Желтым цветом выделены те значения климатических факторов, которые соответствуют требованиям к условиям выращивания МКВ в открытых культиваторах без дополнительных затрат энергии на отопление и освещение. Красным шрифтом отмечены месяца года с оптимальным соотношением климатических условий

В дополнение к климатическим факторам для территории Дагестана были рассмотрены такие физико-географические характеристики, как уклон поверхности, наличие геотермальных месторождений и источников морской воды.

4. Результаты и их обсуждение

Согласно [18], на территории республики Дагестан выделяются следующие геоморфологические районы: в северной части и центральной частях республики, а также на Прикаспийской побережье расположены равнинные территории с уклоном менее 2°, в южной части – предгорья (уклон от 2° до 8°) и горы Большого Кавказа (горный и высокогорный районы с уклоном поверхности более 8°). Согласно международной практике, для крупномасштабного выращивания МКВ принято считать пригодными только территории с уклоном менее 5°. Поскольку территория предгорного Дагестана сильно расчленена, и участки с уклоном поверхности менее 5° со-

ставляют лишь 10÷15 % всей ее площади, в качестве более перспективных мы выделили равнинные районы северного Дагестана и Прикаспийскую низменность в юго-восточной части республики (рис. 1).

С точки зрения доступности источников морской воды, наиболее пригодными являются районы, занимающие побережье Каспийского моря. Сравнительный анализ состава макро- и микроэлементов в питательных средах для МКВ *Arthrospira* (классическая среда Заррука) и воде Каспийского моря [19, 20] показал, что использование морской воды компенсирует сернокислый калий и магний, хлористый натрий и кальций [21] в составе культуральной среды. Для получения полной культуральной среды достаточно добавить в воду азотное, фосфорное и углеродное питание. Для выращивания *Dunaliella* необходимо дополнительное внесение хлористого натрия и сернокислого магния в среду Семеновко – Абдуллаева [22]. Содержание микроэлементов в морской воде соответствует требуемой концентрации в средах для культивирования этих МКВ.



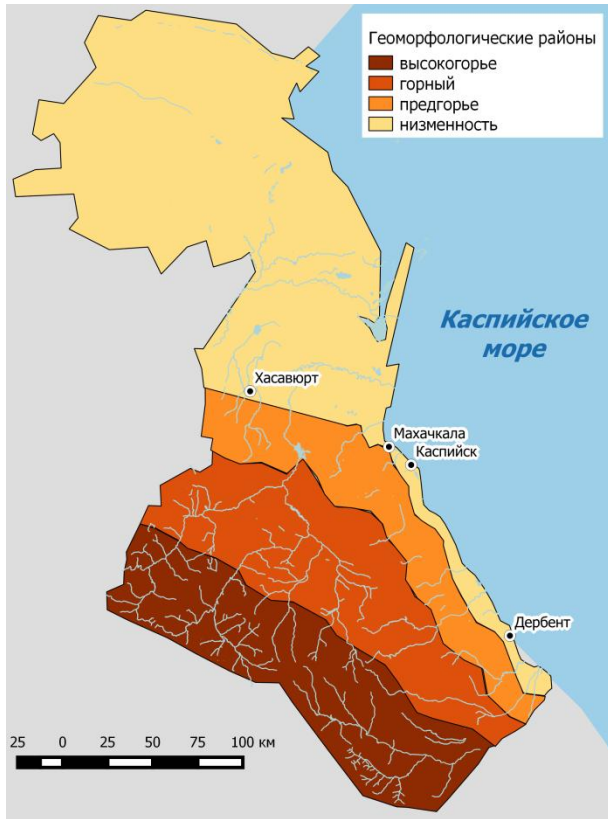


Рис. 1 – Геоморфологическая дифференциация территории Дагестана
Fig. 1 – Geomorphological differentiation of the Dagestan territory

Геотермальные месторождения рассматривались как источники низкопотенциальной тепловой энергии для выращивания МКВ. Большая часть Дагестана находится в зоне распространения термальных вод с температурой от +50 °С до +100 °С. Перспективными для размещения производства биомассы МКВ можно считать районы Махачкалы, Избербаша, где добываемые с глубин 1÷1,5 км термальные воды имеют характеристики, достаточные для отопления и горячего водоснабжения. Пригодность геотермальных вод как источника макро- и микроэлементов следует рассмотреть и учитывать, что является нашей дальнейшей задачей.

В качестве инфраструктурных факторов, значимых для оптимизации процесса производства биомассы МКВ и биотоплива из них, были рассмотрены (рис. 2):

- 1) транспортные пути (дорожная и/или автомобильная сеть);
- 2) линии электропередач;
- 3) промышленные источники низкопотенциального тепла (теплоэлектростанции, промышленные предприятия);
- 4) промышленные источники биогенных элементов и CO₂;
- 5) потребители целевого продукта (биотоплива) и сопутствующих продуктов;
- 6) особо охраняемые природные территории, на которых любое производство запрещено; иные виды землепользования, несовместимые с объектами производства биотоплива из МКВ.

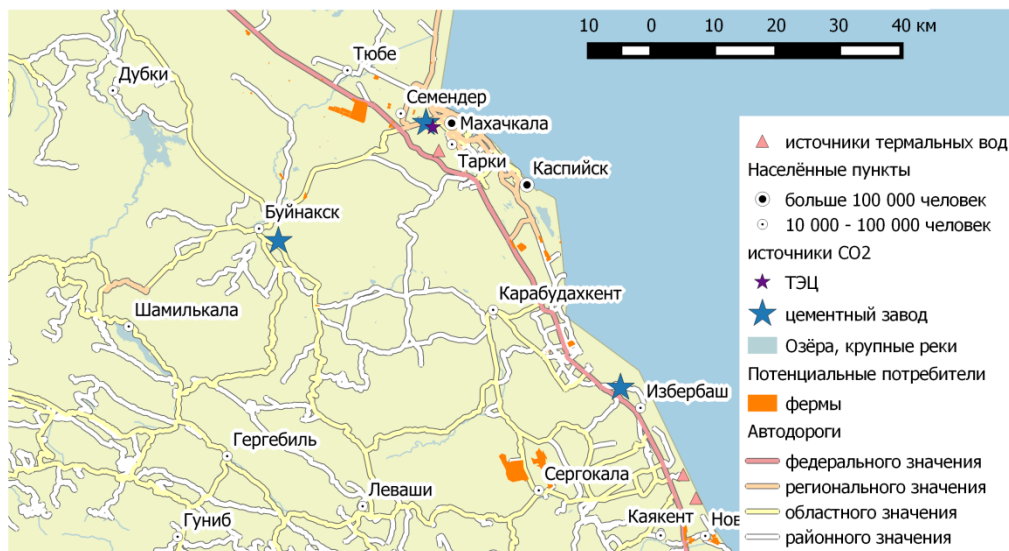


Рис. 2 – Фрагмент карты объектов инфраструктуры, влияющих на эффективность производства МКВ
Fig. 2 – A fragment of the infrastructure facilities map affecting the efficiency of microalgae production

Транспортная доступность территорий является фактором, говорящим в пользу размещения производства МКВ, однако более оптимальным будет колокализация (co-localization), то есть расположение плантаций рядом с источниками сырья, воды и по-

требителями основных и сопутствующих продуктов производства МКВ (например, рядом с предприятиями по производству комбикормов для животноводства). Во многих современных исследованиях, посвященных оценке конкурентоспособности произ-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



водства биотоплива, ко-локализация производственных процессов и источников сырья подразумевается априори, а энергетические затраты на перемещение ресурсов, промежуточных и целевых продуктов предполагаются нулевыми.

В качестве промышленных источников тепловой энергии (низкопотенциального тепла) в данной работе были учтены, помимо геотермальных месторождений, теплостанции (ТЭС), в первую очередь, Махачкалинская ТЭС электрической мощностью 18 МВт и тепловой мощностью 416 Гкал/ч. Основное топливо ТЭС – природный газ, резервное – мазут [23].

Стационарными источниками CO₂ и других биогенных элементов, необходимых для выращивания МКВ, могут выступать ТЭС, цементные, стекольные заводы и заводы по производству удобрений. Выбросы CO₂ от цементной промышленности Дагестана и Махачкалинской ТЭС составляют около 2 555 000 т/год [24]. Ассимиляция МКВ выбросов CO₂ в течение вегетационного периода (5 месяцев) при средней продуктивности биомассы 20 г/м²/сутки и отсутствии лимитирования по другим биогенным элементам обеспечит урожайность порядка 575 000 т МКВ (см. табл. 2) и позволит проводить культивирование на значительных площадях (порядка 190 км²). Это показывает, что CO₂ не является в данном случае лимитирующим фактором. Махачкалинская ТЭС служит также источником выбросов диоксида серы (4 т/год), оксидов азота (в пересчете на NO₂ – 21 т/год). Азот и сера являются биогенными элементами и необходимы при выращивании МКВ, поэтому выбросы NO_x и SO_x после их очистки также могут быть ассимилированы МКВ.

В качестве потребителей целевого и сопутствующих продуктов были приняты котельные, сельскохозяйственная техника, тепличные комплексы (для биотоплива), предприятия птицеводства и животноводства (для биологически активных добавок из МКВ). Для Дагестана это особенно актуально, так как регион лишь на 30 % обеспечивает свои потребности в мясе птицы. В приоритетном проекте развития республики «Эффективный АПК» данная отрасль отмечена как одна из самых значимых [25]. Для развития птицеводства требуется производство качественных сбалансированных по всем элементам питания кормов. Использование части выращенной биомассы артроспиры/спирулины в качестве кормовой и биологически активной добавки к комбикормам способно повысить основные зоотехнические показатели птицы и может послужить стимулом производства птицы, а также приблизить к рентабельности производство биотоплива из МКВ. Согласно нашим исследованиям [26], для имеющегося поголовья птицы в Дагестане требуется около 300 т биомассы МКВ в год в качестве кормовой добавки (при содержании ее в кормах 1 %). В перспективе можно предусмотреть целевое производство вита-

минных добавок (каротиноиды, витамины групп А и В) из МКВ, а оставшуюся большую часть биомассы использовать для трансформации в биотопливо.

В качестве территорий, на которых размещение крупных микроводорослевых производств запрещено по причине ограничений на хозяйственную деятельность, в данной работе были приняты особо охраняемые природные территории, промышленные территории, зоны отдыха, виноградники и сады, зоны жилой застройки.

Совместный анализ этих физико-географических и инфраструктурных факторов средствами ГИС позволил выделить как перспективные территории, расположенные в пределах Прикаспийской низменности и частично включающие в себя Каякентский, Кизилюртовский и Докузпаринский административные районы (рис. 3).



Рис. 3 – Территории Республики Дагестан, пригодные для культивирования микроводорослей
 Fig. 3 – Territories most suitable for cultivation of microalgae in the territory of the Dagestan Republic

Площадь территории, не имеющей ограничений для размещения предприятий по выращиванию МКВ, была рассчитана с помощью программных инструментов QGIS и составила 1 500 км². В предположении, что 5 % этой территории (75 км²) будет занято производственными мощностями, на основе данных о продуктивности *Dunaliella salina* в близких



климатических условиях Андалусии [3], а также собственного опыта культивирования *Arthrospira platensis* [27] было рассчитано потенциальное количество биомассы МКВ, которое возможно вырастить на этих территориях при средней суточной продуктивности 20 г/м²/сутки и продолжительности вегетационного периода 5 месяцев (см. табл. 2), – 225 000 т биомассы в год. При переработке этой биомассы МКВ методом НТЛ (температура +330 °С) выход бионефти, согласно [23], составит около 40 % от исходной биомассы, поэтому максимальный потенциал производства биотоплива из МКВ на доступной для производства территории Дагестана составляет 90 000 т ежегодно.

В работе [8] авторы обосновали размер единичной водорослевой плантации не менее 400 га, при этом еще 90 га нужно отвести под инфраструктуру. Эта площадь водорослевых плантаций принята как базовая в дальнейших расчетах. Производительность такой единичной плантации в условиях Дагестана за вегетационный период (5 месяцев) составит 12 000 т (по биомассе) и 4 800 т/год (по бионефти).

5. Заключение

Пространственный анализ влияния климатических и инфраструктурных факторов на ресурсный потенциал производства МКВ и биотоплива из них показал, что в соответствии с климатическими особенностями территории России, производство МКВ способом открытого культивирования возможно только в теплые полгода на территории Юга России (Ставропольский край, Краснодарский край, Ростовская область, Астраханская область, Республика Дагестан, Республика Крым).

Методами картографирования для территории Республики Дагестан были выделены районы, пригодные для выращивания МКВ по физико-географическим условиям, обеспеченные транспортной доступностью, электросетями, источниками антропогенного CO₂ (ТЭЦ, цементные заводы), морской водой, минерализованными подземными водами, источниками низкопотенциального тепла (термальные воды с температурой не менее 40 °С). Учтены также потенциальные потребители биотоплива и сопутствующих продуктов (птицефабрики, животноводческие комплексы) и ограничения землепользования.

Территории, оптимальные для размещения производств МКВ площадью порядка 1 500 км², расположены на побережье Каспийского моря и частично включают в себя Каякентский, Кизилортовский и Докузпаринский административные районы. При использовании только 5 % площади указанной территории для выращивания МКВ возможно получить за теплый период года открытым методом культивирования 225 000 т биомассы и 90 000 т бионефти методом НТЛ.

При размещении водорослевых плантаций на площади 400 га (обоснованная с технико-экономической

точки зрения площадь единичной плантации), количество выращенной за вегетационный период биомассы составит 12 000 т и бионефти – 4 800 т/год.

Исследованная территория перспективна для эффективного выращивания биомассы МКВ, таких как артроспира и дуналиелла, с точки зрения климатических, инфраструктурных факторов и оптимального использования местных ресурсов. Полученная биомасса может быть применена как для трансформации в бионефть, так и для получения ценных сопутствующих продуктов.

Список литературы

- [1] Материалы Международного конгресса REENCON-XXI Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность. 13–14 октября 2016 г., Москва, ОИВТ РАН, 2016 / Н.И. Чернова // Чернова Н.И. Влияние климатических и инфраструктурных факторов на ресурсный потенциал производства биотоплива из микроводорослей / Н.И. Чернова, С.В. Киселева, Ю.Ю. Рафикова. – М., 2016. – С. 45–49.
- [2] Huntley, M.E. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal [Text] / M. E. Huntley, D. G. Redalje // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. – 2007. – Vol. 12. – P. 573–608; DOI: 10.1007/s11027-006-7304-1
- [3] García-González, M. Conditions for open-air outdoor culture of *Dunaliella salina* in southern Spain / M. García-González [et al.] // Journal of Applied Phycology. – 2003. – Vol. 15. – P. 177–184.
- [4] Asmare, A.M. Theoretical Estimation the Potential of Algal Biomass for Biofuel Production and Carbon Sequestration in Ethiopia / A.M. Asmare, B.A. Demessie, G.S. Murthy // International Journal of Renewable Energy Research. – 2013. – Vol. 3. – No. 3. – P. 260–270.
- [5] Sudhakar, K. A Mathematical Model to Assess the Potential of Algal Bio-fuels in India [Text] / K. Sudhakar, M. Rajesh, M. Premalatha // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2012. – Vol. 34. – P. 1114–1120; DOI: 10.1080/15567036.2011.645121
- [6] Brusca, S. A Site Selection Model to Identify Optimal Locations for Microalgae Biofuel Production Facilities in Sicily (Italy) / S. Brusca [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – No. 24. – P. 16058–16067.
- [7] Milbrandt, A. Resource Evaluation and Site Selection for Microalgae Production in India / A. Milbrandt, E. Jarvis. – USA, Colorado, National Renewable Energy Laboratory, 2010. – 79 p.
- [8] Quinn, J.C. Geographical Assessment of Microalgae Biofuels Potential incorporating Resource Availability [Text] / J.C. Quinn [et al.] // BioEnergy Research. – 2013. – Vol. 6. – Is. 2. – P. 591–600.
- [9] Официальный сайт проекта Open Street Map [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.openstreetmap.org. – OpenStreetMap. – (Дата обращения: 14.09.2019.).



[10] База данных NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/>. – NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. – (Дата обращения: 14.09.2019.).

[11] Афонин А.Н., Грин С.Л., Дзюбенко Н.И.; Фролов А.Н. (ред.) Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения [DVD-версия]. 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.agroatlas.ru>. – Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их болезни, вредители и сорные растения. – (Дата обращения: 14.09.2019.).

[12] Официальный сайт проекта «Цифровая модель рельефа» (SRTM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://srtm.csi.cgiar.org>. – SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. – (Дата обращения: 14.09.2019.).

[13] ГИС-Атлас «Недра России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://webmapget.vsegei.ru/> – (Дата обращения: 14.09.2019.).

[14] Chernova, N.I. Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae / N.I. Chernova [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 112. – P. 1–6.

[15] Chernova, N.I. Biofuel production from microalgae by means of hydrothermal liquefaction: advantages and issues of the promising method [Text] / N.I. Chernova, S.V. Kiseleva, M.S. Vlaskin // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2017. – Vol. 18. – P. 132–145.

[16] Официальный сайт проекта «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rp5.ru>. – Расписание погоды. – (Дата обращения: 14.09.2019.).

[17] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. – Ленинград, Гидрометеиздат, 1990. – 342 с.

[18] Атаев, З.В. Геоморфологическая дифференциация ландшафтных поясов Дагестана [Текст] / З.В. Атаев, В.В. Братков, З.М. Гаджимурадова // Мониторинг. Наука и технологии. – 2013. – № 4. – С. 7–10.

[19] Брезгунов, В.С. Содержание ряда микроэлементов в Каспийском море в связи с различными типами распределения растворенных элементов в морской среде (по результатам экспедиционных работ 1995 г.) [Текст] / В.С.Брезгунов, В.И. Ферронский // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31. – № 1. – С. 73–77.

[20] Зенин, А.А. Гидрохимический словарь / А.А. Зенин, Н.В. Белоусова. – Л.: Гидрометеиздат, 1988.

[21] Zarrouk, C. Contribution a l'etude d' une cyanophycee. Influence de diverse facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler (Ph.D. thesis). France: University of Paris, 1966.

[22] Каталог культур микроводорослей в коллекциях СССР. – М.: ИФР РАН. – 1991. – С. 51.

[23] Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии [Электронный ресурс]: ИТС 38-2017 – Введ.2018-07-01. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/556173718> – (Дата обращения: 14.09.2019.).

[24] Цементная промышленность и экология / Б.Э. Юдович [и др.] // Цемент. – 1998. – № 3. – С. 11–19.

[25] Официальный сайт Министерства сельского хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mcs.ru/press-service/regions/v-dagestane-rastut-obemy-proizvodstva-myasa-ptitsy/>. – В Дагестане растут объемы производства мяса птицы. – (Дата обращения: 14.09.2019.).

[26] Патент 2034499 Российская Федерация, МПК7 С1 6 А 23 К 1/16. Способ приготовления премикса для сельскохозяйственной птицы на основе микроводоросли спирулина / Околелова Т.М., Байковская И.П., Байковская Е.Ю., Криворучко Л.И., Соловьев А.А., Лямин М.Я., Чернова Н.И.; заявитель и патентообладатель Всероссийский науч.-исслед. и технолог. ин-т птицеводства. – № 92002713/15; заявл.28.10.92; опубл. 10.05.95, Бюл. № 13. – 5 с.

[27] Чернова, Н.И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива / Н.И. Чернова [и др.] // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" (ISJAEE). – 2008. – № 9. – С. 68–74.

[28] Vlaskin, M.S. A new procedure of hydrothermal liquefaction of microalgae after different thermochemical pre-treatments / M.S. Vlaskin [et al.] // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16 August 10–15. – Beijing, China, 2018. – P. 1–7.

References

[1] Chernova N.I., Kiseleva S.V., Rafikova Yu.Yu. Influence of climatic and infrastructural factors on the resource potential of biofuel production from microalgae (Vliyanie klimaticheskikh i infrastrukturykh faktorov na resursnyi potentsial proizvodstva biotopliva iz mikrovodoroslei). *Materialy Mezhdunarodnoy kongressa REENCON-XXI Vozobnovlyemaya energetika XXI vek: Energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost'*. 13–14 October 2016, Moscow, JIHT RAS Publ., 2016, pp. 45–49 (in Russ.).

[2] Huntley M.E., Redalje D.G. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007;12:573–608; DOI: 10.1007/s11027-006-7304-1.

[3] García-González M., Moreno J., Cañavate J.P., Anguis V., Prieto A., Manzano C., Florencio F.J., Guerrero M.G. Conditions for open-air outdoor culture of *Dunaliella salina* in southern Spain. *Journal of Applied Phycology*, 2003;(15):177–184.

[4] Asmare A.M., Demessie B.A., Murthy G.S. Theoretical Estimation the Potential of Algal Biomass for Biofuel Production and Carbon Sequestration in Ethiopia. *International Journal of Renewable Energy Research*, January, 2013;3(3):260–270.



- [5] Sudhakar K., Rajesh M., Premalatha M. A Mathematical Model to Assess the Potential of Algal Biofuels in India. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2012;34:1114–1120, DOI: 10.1080/15567036.2011.645121.
- [6] Brusca S., Famoso F., Lanzafame R., Messina M., Wilson J. A Site Selection Model to Identify Optimal Locations for Microalgae Biofuel Production Facilities in Sicily (Italy). *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017;12(24):16058–16067.
- [7] Milbrandt A., Jarvis E. Resource Evaluation and Site Selection for Microalgae Production in India, USA, Colorado, National Renewable Energy Laboratory, 2010; 79 p.
- [8] Quinn J.C. et al. Geographical Assessment of Microalgae Biofuels Potential incorporating Resource Availability. *BioEnergy Research*, 2013;6(2):591–600.
- [9] OpenStreetMap [E-resource]. Available at: <https://www.openstreetmap.org/#map=5/51.500/-0.100> (14.10.2019).
- [10] NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources) [E-resource]. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/> (14.10.2019).
- [11] Afonin A.N., Grin S.L., Dzyubenko N.I., Frolov A.N. (red.) Agroecological atlas of Russia and neighboring countries: economically significant plants, their pests, diseases and weeds (Agroekologicheskii atlas Rossii i sopredel'nykh stran: ekonomicheskii znachimye rasteniya, ikh vrediteli, bolezni i sornye rasteniya) [DVD-version], 2008. Available at: <http://www.agroatlas.ru/> (14.10.2019) (in Russ.).
- [12] SRTM [E-resource]. Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (14.10.2019) (in Eng.).
- [13] GIS-Atlas «Nedra Rossii». Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/> - (14.10.2019) (in Russ.).
- [14] Chernova N.I., Kiseleva S.V., Vlaskin M.S., Rafikova Yu.Yu. Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae. *MATEC Web of Conferences*, 2017;112:1–6.
- [15] Chernova N.I., Kiseleva S.V., Vlaskin M.S. Biofuel production from microalgae by means of hydrothermal liquefaction: advantages and issues of the promising method. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017;(18):132–145.
- [16] Weather forecast (Raspisanie pogody) [E-resource]. Available at: <http://tp5.ru> (14.10.2019) (in Russ.).
- [17] Scientific-applied reference on the climate of the USSR. Series 3. Perennial data (Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990; 342 p. (in Russ.).
- [18] Atayev Z.V., Bratkov V.V., Gadzhimuradova Z.M. Geomorphological differentiation of landscape belts of Dagestan (Geomorfologicheskaya differentsiatsiya landshaftnykh pojasov Dagestana). *Monitoring. Science and Technologies (MST)*, 2013;(4):7–10 (in Russ.).
- [19] Brezgunov V.S., Ferronskii V.I. Content of a number of microelements in the Caspian Sea in connection with various types of distribution of dissolved elements in the marine environment (based on 1995 expeditionary work) (Soderzhanie ryada mikroelementov v Kaspiiskom more v svyazi s razlichnymi tipami raspredeleniya rastvorennykh elementov v morskoi srede (po rezul'tatam ekspeditsionnykh rabot 1995 g.). *Water Resources*, 2004;31(1):73–77 (in Russ.).
- [20] Zenin A.A., Belousova N.V. Hydrochemical dictionary (Gidrokhimicheskii slovar'). Gidrometeoizdat Publ., 1988 (in Russ.).
- [21] Zarrouk C. Contribution a l'etude d' une cyanophycee. Influence de diverse facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler. (Ph.D. thesis). France: University of Paris; 1966 (in French).
- [22] Catalog of microalgae cultures in the collections of the USSR (Katalog kultur mikrovdoroslei v kollektсийakh SSSR). Moscow: IFR RAS, 1991; 51 p. (in Russ.).
- [23] Czhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii. [E-resources]: ITS 38-2017 – Vved.2018-07-01. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/556173718> (09.14.2019) (in Russ.).
- [24] Yudovich B.E., Dmitriev A.M., Lyamin Yu.A., Zubehin S.A. Cement industry and ecology (Tsementnaya promyshlennost' i ekologiya), 1998;(3):11–19 (in Russ.).
- [25] V Dagestane rastut ob"emy proizvodstva myasa ptitsy [E-resource]. Available at: <http://mcx.ru/press-service/regions/v-dagestane-rastut-obemy-proizvodstva-myasa-ptitsy/> (14.10.2019) (in Russ.).
- [26] Okolelova T.M., Baikovskaya I.P., Baikovskaya E.Yu., Krivoruchko L.I., Solov'ev A.A., Lyamin M.Ya., Chernova N.I. Patent for invention 2034499 Russian Federation, MPK7 C1 6 A 23 K 1/16. A method of preparing a premix for poultry based on spirulina microalgae (Sposob prigotovleniya premiksa dlya sel'skokhozyaistvennoi ptitsy na osnove mikrovdorosli spirulina). Applicant and patent holder – All-Russian scientific research. and technologist. Institute of Poultry (Vserossiiskii nauch.-issled. i tekhnolog. in-t ptitsevodstva). №92002713/15; declared 28.10.92; published 10.05.95, Bul. № 13, 5 p. (in Russ.).
- [27] Chernova N.I., Kiseleva S.V., Korobkova T.P., Zaytsev S.I. Microvdorosli v kachestve sirya dlya polucheniya biotopliva. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2008;(9):68–74 (in Russ.).
- [28] Vlaskin M.S., Chernova N.I., Kiseleva S.V., Dombrovsky L.A. A new procedure of hydrothermal liquefaction of microalgae after different thermochemical pre-treatments. *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16*, August 10–15, 2018, Beijing, China. IHTC16-22357; pp. 1–7.

Транслитерация по BSI

