



DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-179-190


EDN: YUFUXW

УДК 57.042.5

Обзорная статья / Review article

Методы исследования эффектов электромагнитного излучения на микроорганизмы

Г.А. Щеглов  , В.А. Маслобоев 

*Институт проблем промышленной экологии Севера
Федерального исследовательского центра Кольского научного центра
Российской академии наук, Анатиты, Российская Федерация*
 g.scheglov@ksc.ru

Аннотация. Все живые организмы окружены электромагнитными излучениями (ЭМИ) естественного и искусственного происхождения, которые оказывают воздействие на организмы. Количество источников искусственных излучений растет, однако механизмы воздействия ЭМИ на живые организмы до сих пор исследованы не полностью, несмотря на большое количество работ. При этом понимание механизмов воздействия различных ЭМИ может дать толчок в развитии различных биотехнологий. Чтобы решить проблему понимания действия ЭМИ на организмы и разработать новые биотехнологии, необходимо применять новые методы исследования. Следовательно, изучение методов исследования является актуальной задачей. Приведен обзор исследований и методов исследования эффектов ЭМИ на организмы. Подобраны работы, рассматривающие различные подходы к изучению и существующие гипотезы механизмов воздействия излучений. Цель обзора – анализ и оценка методологических подходов к исследованию воздействия ЭМИ. Рассмотрены исследования по воздействию ЭМИ на микроорганизмы, эубактерии. Предложено изучать воздействие излучений длительностью несколько часов с применением методов спектрофотометрии и флюориметрии.

Ключевые слова: биотехнологии, методы, электромагнитные поля, биологические эффекты, облучение, миллиметровые волны

Благодарности и финансирование. Работа поддержана грантом РФФИ 19-05-50065 Микромир «Комплексная оценка воздействия микрочастиц в выбросах горных и металлургических предприятий Мурманской области на экосистемы и состояние здоровья населения Арктики».

Вклад авторов: Г.А. Щеглов – анализ источников и подготовка текста статьи; В.А. Маслобоев – руководство направлением и критический анализ текста статьи.

© Щеглов Г.А., Маслобоев В.А., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>


История статьи: поступила в редакцию 12.08.2022; доработана после рецензирования 12.12.2022; принята к публикации 10.01.2023.

Для цитирования: Щеглов Г.А., Маслобоев В.А. Методы исследования эффектов электромагнитного излучения на микроорганизмы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 179–190. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-179-190>

Methodological approaches to the electromagnetic radiation effects on microorganisms

Gleb A. Shcheglov  , Vladimir A. Masloboev 

Institute of Industrial Ecology Problems in the North, Kola Science Center, Russian Academy of Science (INEP KSC RAS), Apatity, Russian Federation

g.scheglov@ksc.ru

Abstract. All living organisms are surrounded by natural and artificial origin electromagnetic radiation (EMR), which affects organisms. The artificial radiation sources number is increasing, but the EMR influence mechanisms on living organisms have not yet been fully investigated, despite the large number of studies. However, understanding the EMR action mechanisms can give impetus to the development of various biotechnologies. To solve the problem of understanding the EMR effects on organisms and develop new biotechnologies, it is necessary to apply new research methods. Therefore, the study of research methods is an urgent task. This research is a review of studies and research methods on the effects, of EMR on organisms. It brings together studies that consider different approaches to the study and existing hypotheses of the mechanisms of radiation effects. The aim of the paper is to review and evaluate methodological approaches to investigate the effects of EMR. The paper considers research on the EMR effects on microorganisms, eubacteria. Based on the results of the work, it is proposed to study the effect of radiation lasting several hours. As well as to apply spectrophotometry and fluorimetry methods.

Keywords: biotechnologies, methods, electromagnetic fields, biological effects, irradiation, millimeter waves

Acknowledgements and Funding. The work was supported by the RFBR grant 19-05-50065 Mikromir “Comprehensive assessment of the impact of microparticles in emissions from mining and metallurgical enterprises of the Murmansk region on ecosystems and the health status of the Arctic population”.

Authors’ contributions: G.A. Shcheglov – literature analysis and the article text preparation; V.A. Masloboev – direction guidance and the article text critical analysis.

Article history: received 12.08.2022; revised 12.12.2022; accepted 10.01.2023.

For citation: Shcheglov GA, Masloboev VA. Methodological approaches to the electromagnetic radiation effects on microorganisms. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2023;31(2):179–190. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-2-179-190>

Введение

Землю окружает большое количество электромагнитных полей (ЭМП) и электромагнитных излучений (ЭМИ) естественного и искусственного происхождения. Источниками естественных излучений является ЭМП Земли,

различные явления, такие как удары молний, а также излучения от космических объектов. Эти источники излучения существовали еще до появления жизни на Земле. Поэтому организмы научились адаптироваться к их фоновым значениям и закономерным изменениям.

Источниками искусственных излучений являются многочисленные электрические устройства и приборы, системы генерации энергии, линии электропередач, трансформаторные подстанции, системы радиосвязи, Интернет и устройства спутниковой связи, созданные человеком. Искусственные источники создают ЭМИ, различное по своей мощности, частоте, характеру. И количество источников постоянно растет с развитием технологий. Механизмы, объясняющие действия излучений на человека и живую природу, ясны не до конца. Результаты исследований свидетельствуют, что одни диапазоны частот могут оказывать стимулирующее, а другие угнетающее воздействие на организмы [1; 2]. Имеются и исследования, направленные на разработку методов защиты от ЭМИ [3]. Такие исследования носят мультидисциплинарный характер и требуют специальных методов изучения.

Цель исследования – рассмотреть, какими методами пользовались ученые, и оценить эти методы. В обзор включены статьи, найденные в Google Scholar, WOS. Ключевыми словами для поиска являлись Impact, Exposure, Effect, Biological, Field effect, Radiation, Electromagnetic field, Millimeter range, Shortwave frequencies, Extremely high frequencies, Low intensity microwaves, а также их русскоязычные эквиваленты.

Теоретические основы

Организмы осуществляют свою жизнедеятельность под воздействием факторов окружающей среды. К таким факторам относят окружающую температуру, наличие питания, освещение, состав воздуха и воды, влажность воздуха и почвы. И гораздо реже берется во внимание фактор – электромагнитный фон.

Воздействие ЭМП на микроорганизмы

Большое количество работ [1–16] изучает воздействия ЭМП на организмы.

J. Lipiec и др. [4] изучали воздействия колебательного импульсного магнитного поля на патогенные микроорганизмы в картофеле: *Erwiniacarotovora*, *Streptomyces scabies* и *Alternaria solani*. Разряды конденсатора высокого напряжения через соленоид из медного провода создавали магнитное поле. Пробирки с микроорганизмами обрабатывали колебательным магнитным полем с амплитудой 5, 10, 15 и 20 Тл с последующим культивированием. Авторы получили значимые результаты по угнетению патогенных микроорганизмов картофеля. Авторы делают предположение, что полученные эффекты могут быть вызваны созданием вращающегося электрического поля от воздействия импульсных магнитных полей.

L. Cellini и др. [5] изучали воздействие переменного магнитного поля 50 Гц ЭМП (0,1–1,0 мТ) на бактерии *E. coli*. В исследовании оценивали: количество бактерий и состояние жизнеспособности; паттерны восприимчивости; морфологические аспекты; анализ ДНК и РНК. Катушка соленоид, в который помещался объект, является источником излучения. Катушка создавала переменное, однородное, синусоидальное магнитное поле с частотой 50 Гц и плотностью магнитного потока 0,1, 0,5 и 1,0 мТл. Культуру облучали в течение 20 мин (1 поколение) и 120 мин (6 поколений) и затем культивировали без воздействия 24 ч. Авторы отметили увеличение жизнеспособности клеток при воздействии поля. Однако воздействие ЭМП 50 Гц является стресс фактором для бактерий.

Воздействие ЭМП исследовалось на *Spirulina platensis* [6] с целью разработать технологию культивирования. Катушка, создающая магнитное поле, находилась вокруг трубки, через которую проходила суспензия с водорослью. Интенсивность индукции магнитного поля варьировалась 0 (контроль); 0,1; 0,25; 0,4; 0,55 Т. Зафиксировано увеличение скорости роста водоросли пропорциональное росту ЭДС. Авторы создали технологию, позволяющую повысить скорость выращивания водорослей и улучшить их состав.

Влияние ЭМП на микроводоросль хлореллу

Хлорелла (*Chlorella Beij.*, 1890) – обширно распространенная в природе одноклеточная планктонная микроводоросль, также используется как объект исследований в области изучения воздействия ЭМИ и ЭМП.

Хлорелла применяется для производства кислорода; создания биотоплива; восстановления водоемов и отчистки сточных вод; тест-объект экологических исследований. Например, в работе [7] была установлена способность хлореллы, выращенной в условиях азотного голодания, к очистке сточных вод карьеров от нитрат-ионов с эффективностью 85–90%.

Н.А. Суховский [8] разработал методику, позволяющую увеличить скорость выращивания хлореллы в два раза. Для оценки прироста скорости роста применялись световая микроскопия и спектрофотометрия. Для создания воздействия на клетки хлореллы использовали пластины электродов с напряжением 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 кВ и диэлектрические шарики, покрытые графеном. Методика, разработанная автором, позволяет провести исследование двойного электрического слоя. Время воздействия было 1, 5, 10, 15, 30 мин и 72 ч. По результатам экспериментов скорость роста была выше в 2,05 раза по сравнению с контролем при облучении в течение 72 ч. Также было отмечено, что максимальный размер клетки достигается при воздействии 5 и 15 кВ.

В другой работе [9] изучалось хроническое и непродолжительное воздействие СВЧ-излучения от 2,4 мВт/см² до 10 мВт/см² на различные микроорганизмы. Было отмечено снижение количества биомассы и увеличение числа мертвых клеток *Chlorella vulgaris* от воздействия СВЧ-излучения при частоте 10,4 ГГц и ППЭ 2,4 мВт/см².

Воздействия ЭМИ миллиметрового диапазона на живые организмы

Т.А. Рыжкова и др. [10] изучали влияние ЭМИ миллиметрового диапазона на способность бактерий к биопленкообразованию. Частоты 61,0 и 42,2 ГГц были изучены. *Corynebacterium diphtheriae* – тест объект исследования. Пробирки с жидкой культурой подвергались воздействию излучения 3 часа без перемешивания при температуре 20 °С. Затем культивировались сутки. Способность к образованию биопленок оценивалась по оптической плотности суспензии при длине волны 492 нм. Авторы приходят к следующим выводам. ЭМИ 61,0 ГГц стимулирует способность бактерий к образованию биопленок. При исследовании воздействия ЭМИ частотой 42,2 ГГц на биопленкообразование тест-культур бактерий отмечено угнетение.

Авторами [11] изучалось влияние комбинированного воздействия ЭМИ и химических реагентов на биологические системы. В диапазоне 53–75 ГГц рассматривали частоты 59, 65, 67 ГГц. Установлено, что комбинированное воздействие излучением 65 ГГц длительностью 15 мин с фенолом 5 мг/л стимулирует появление клеток с повышенной способностью адаптироваться к неблагоприятным условиям среды. Также установлено, что излучение снижает уровень воздействия биологически активных веществ. Автор приходит к выводу, что ЭМИ крайне высоких частот (КВЧ) способно уменьшать токсичность сточных вод.

М.Г. Гапочка [12] также изучалось влияние ЭМИ низкой интенсивности на токсичность водной среды. Объектом исследования служит десятидневная культура *Scenedesmus quadricauda* Vreb., выращенная в среде Кратца–Майерса. В экспериментах сравнивались культуры в присутствии фенола 0,3 г/л вместе с Cd и Co 0,3 мг/л и фенола 0,1 г/л вместе с Cd и Co 0,1 мг/л. Растворы токсичных веществ облучались излучением с длиной волны 7,1 мм перед внесением культуры в раствор. Затем оценивалась численность микроорганизмов в течение 50 сут. Было зафиксировано снижение токсичности при воздействии излучения. Сделан вывод о возможности применения ЭМИ для снижения токсичности сточных вод.

А.В. Неркаряян и др. [13] исследовал влияние низкоинтенсивного не-теплого когерентного ЭМИ крайне высоких частот (КВЧ) на общую активность и изоферментный состав пероксидазы в пшенице. Исследуемый диапазон 37,5–53,5 ГГц, время экспозиции 20, 30 и 60 минут. В вариантах экспериментов облучалась вода, в которой замачивались семена без облучения семян. Воздействие оценивали по оптической плотности экстракта из семян при длине волны 430 нм. В результате наблюдались стимулирующие эффекты от излучения. Наибольший эффект наблюдался при частоте 49 ГГц. Замечено, что эффект оказывает как облучение семян, так и облучение воды. Таким образом, авторы заключают, что первичным звеном воздействия ЭМИ КВЧ на биосистемы является вода.

Позднее М.Г. Гапочка [1] продолжил исследования и описал экологические аспекты взаимодействия ЭМИ миллиметрового диапазона с биологическими объектами. Изучаемые частоты 37,5; 42,25; 46,95; 53,57 ГГц.

Объектами исследования служили различные микроорганизмы. В рамках экспериментов сравнивались варианты сред с фенолом, Cd и Cu. По результатам работы отмечается снижение токсичности загрязнителей. На наш взгляд, результаты могут найти свое применение для биологической очистки вод.

А.П. Зарубина [14] продолжала идеи Гапочки в своем исследовании влияния ЭМИ низкой интенсивности на токсичность бытовых стоков. В рамках исследования проводилось измерение токсичности воды разной степени очистки с помощью биотестирования. Вода облучалась ЭМИ 42,25 ГГц в течение 30 мин. Зафиксировано увеличение токсичности воды. При этом чем выше степень очистки, тем меньше влияние излучения на токсичность.

Е.А. Прониной [15] изучалось, как ЭМИ частоты молекулярного спектра поглощения и излучения (МСПИ) оксида азота (150 ГГц) и атмосферного кислорода (129 ГГц) с плотностью потока мощностью 0,3 мВт/см с длительностью экспозиции 30 мин воздействует на кишечную палочку (*E. coli*). В результате исследований было установлено, что под воздействием излучения на изучаемых частотах повышалось количество мутаций у *E. coli*, а также снижалась устойчивость к левомицетину, стрептомицину и канамицину. Таким образом, действие ЭМИ на микроорганизм было угнетающим.

Подобные работы смогли сконцентрировать большое количество подтверждений наличия различных эффектов на биологические объекты, но не установили единого объяснения причины возникновения эффектов. В ряде работ эффекты от воздействия ЭМИ объясняются тепловым воздействием [3], наряду с ними описываются и нетепловые механизмы воздействия, такие как изменение ЭМИ окислительно-восстановительного потенциала воды в клетках организмов [15], мобилизующие или информационные свойства ЭМИ [2], а также радиовибрационные механизмы воздействия [16].

Методологические подходы

При анализе статей были отмечены некоторые особенности в методологических подходах к исследованиям.

Микроскопия является наиболее популярным методом исследования воздействия ЭМИ на организмы в рассмотренных работах. Чаще всего исследователи оценивали изменение количества живых особей, а также общий прирост популяции. Реже оценивались изменения активности и организации объектов. Например, подвижность клеток или организация в группы. Достоинства метода: доступность, простота и изученность метода; объективность результатов и простота интерпретации. Недостатки метода: сложно наблюдать изменения в микроорганизмах, так как ЭМИ не видно человеческому глазу; нет возможности или сложно осуществить наблюдение непосредственно во время воздействия на микроорганизм; наглядность зафиксированных изменений.

Спектрофотометрия – второй по частоте метод в рассмотренных статьях. Оценка оптической плотности растворов и экстрактов более

современный метод, чем микроскопия. В рассмотренных исследованиях с помощью данного метода оценивали концентрацию микроорганизмов в жидкой среде и изменение количества биомассы. Достоинства спектрофотометрии: простота метода; точность метода. Спектрофотометрия может использоваться как эталонный метод при использовании других непрямых методов анализа. Недостатки метода: не позволяет проводить анализ во время воздействия.

Спектрофотометрия довольно востребованный метод, зарекомендовавший себя в области исследования микроорганизмов, при биотестировании воды и почв. На его основе разработаны различные методики исследования, например ГОСТ 17.1.4.02-90 «Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а».

Особенности излучения. В приведенных работах были отмечены различные подходы к воздействию на объекты. Первое, на что стоит обратить внимание, это диапазон и свойства излучения. Отмечено три подхода: изучать воздействие на одной частоте; сравнивать воздействие нескольких частот (чаще всего 2–4 частоты); изучать воздействие диапазона частот.

При изучении одной конкретной частоты существует риск упустить данные, которые можно получить при других частотах. Подобные исследования важны для описания общих концепций, однако не дают увидеть полную картину.

Другой вариант, когда изучается воздействие нескольких частот. Данный подход позволяет увидеть больше закономерностей и тенденций при изучении данных. Однако также существует риск «не попасть» в нужную частоту.

Третий вариант – изучение диапазона частот. Дает самое полное понимание того, какие процессы и изменения могут происходить и как они зависят от тех или иных частот.

Длительность воздействия. Похожие подходы наблюдаются при анализе времени воздействия. Авторы рассматривают воздействие одной продолжительности. При этом следует отметить, что длительность воздействия редко совпадает у разных авторов. Часть авторов рассматривают эффекты при воздействии разной длительности, выбирая 2–3 длительности воздействия. Реже исследователи рассматривают целые временные диапазоны, варьируя длительность воздействия от пары минут до нескольких часов. Данный подход наиболее информативен, позволяет увидеть различные тенденции и зависимости, но при этом требует максимальных трудовых затрат.

Рассматривая временные параметры воздействия, можно комбинировать время после облучения, а также циклы облучения. Так можно изучать эффекты: сразу после воздействия; через некоторый период времени после воздействия; эффекты от циклов с облучением и без облучения. Также может отличаться и сам характер излучения: непрерывная генерация; импульсная генерация. Многие генераторы, испускающие излучение миллиметрового диапазона, способны к генерации прямоугольных симметричных импульсов;

синусоидальные сигналы и т.д. Сочетание всех этих характеристик может существенно влиять на результаты воздействия.

Водная среда. Так как часто микроорганизмы исследуют в водной среде, вода имеет большое значение в исследованиях по ряду причин. Водная среда сама по себе способна воздействовать на организмы. В роли водной среды может выступать дистиллированная вода; проточная вода; вода из естественных источников; вода с добавлением питательной среды; вода с добавлением различных химических веществ. Выбор среды может сильно повлиять на результаты исследования. Это стоит учитывать как с точки зрения достоверности полученных данных, так и с точки зрения поиска новых результатов от совместного воздействия среды и излучения. Кроме того, ряд работ [1; 11–14] свидетельствуют о том, что излучение способно воздействовать на водную среду, которая, в свою очередь, изменяет условия существования организмов.

В данном контексте большой интерес представляют те исследования, в которых сравнивают эффекты: воздействие излучения на организмы; воздействие излучения на воду; воздействие облученной воды на организмы. В вариантах экспериментов можно рассматривать организмы, выращенные на фоне облучения или выращенные на облученной воде. Особого внимания заслуживают исследования комбинированного воздействия ЭМИ с водной средой, загрязненной химическими веществами.

Результаты и обсуждение

После анализа всей собранной информации мы пришли к выводу, что диапазон излучений с длиной волны 30...300 ГГц заслуживает большего внимания по нескольким причинам. Во-первых, излучение в гигагерцовом диапазоне используется в радиосвязи и для работы сетей Интернет. Например, внедряются стандарты связи 5G, которые базируются на частотах 1...100 ГГц. Во-вторых, имеется большое количество работ, показывающих стимулирующее действие миллиметрового диапазона частот. Изучение такого излучения является перспективным с точки зрения создания методик культивирования и стимулирования организмов.

Характеристики излучения

Что касается характеристик излучения, необходимо сравнить воздействие от непрерывно генерируемого излучения и излучения, генерируемого импульсами. Кроме того, целесообразно изучить воздействие в течение нескольких циклов, причем периоды воздействия и без воздействия могут варьироваться. Также стоит сравнивать эффекты при разной длительности воздействия. Имеет смысл сравнивать диапазоны времени от нескольких минут до нескольких часов. Целью подобных исследований является определение оптимальной длительности воздействия.

Микроскопия и спектрофотометрия. Данные методы хорошо зарекомендовали себя и показывают точные результаты. Микроскопия дает представление об активности микроорганизмов, подвижности, способности

клеток скапливаться в группы. Спектрофотометрия позволяет точно рассчитывать количество биомассы и содержание элементов и пигментов в нем.

Флюориметрия. Изучение эффектов, происходящих непосредственно во время воздействия, достаточно сложный процесс, особенно когда нужно измерить количественные показатели. Метод измерения флюоресценции хлорофилла очень чувствительный способ, позволяющий сделать оценку изменений общего физиологического состояния любого растения [17, с. 347–384]. Изменения в интенсивности испускания флюоресценции прямо или косвенно соотносятся со всеми этапами световой фазы фотосинтеза. Измерения показателей флюоресценции хлорофилла применяются в сельскохозяйственной практике и экологических исследованиях. Мы же предлагаем использовать флюориметрию для оценки воздействия ЭМИ на организмы.

Преимущества метода:

- позволяет изучать организмы непосредственно во время воздействия;
- не оказывает дополнительного стресса на организмы;
- позволяет рассчитать количественные показатели содержания фотосинтетических пигментов и проводить анализ фотосинтетической активности;
- дает возможность изучения в полевых условиях с получением результатов на месте.

Недостатки метода:

- требует дорогостоящее оборудование и умение работы с ним;
- количественный анализ проводится косвенным методом и требует калибровки (спектрофотометрическим методом).

Таким образом, применение флюориметрии может помочь в полевых условиях и в случае необходимости проведения оценки эффектов во время воздействия, не создавая дополнительный стресс на организм.

Заключение

В ходе подготовки обзора были выявлены новые перспективы для исследований. В ряде исследований изучены свойства ЭМИ к снижению токсичности сточных вод. В других работах установлена способность *Chlorella vulgaris* к поглощению азота сточных вод. Также были проведены работы по стимулированию *Chlorella vulgaris* ЭМИ. На наш взгляд, перспективным является проведение исследований с целью выявления возможности с помощью ЭМИ улучшить способность *Chlorella vulgaris* к очистке сточных вод от азота и других соединений, а также ее способности к накоплению металлов в биомассе.

На основе полученных данных удастся разработать методики, ускоряющие культивирование микроводоросли, а также методики очистки сточных вод и восстановления водоемов от загрязнений различными токсичными соединениями, в том числе отходов горного производства: тяжелые металлы

и неорганический азот, фосфор, а также биогенного загрязнения коммунальных хозяйств.

Список литературы

- [1] Гапочка М.Г. Экологические аспекты взаимодействия электромагнитных полей миллиметрового диапазона с биологическими объектами: дис. ... д-ра биол. наук. Москва, 2013. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30397922> (дата обращения: 27.09.2022).
- [2] Бецкий О.В., Котровская Т.И., Лебедева Н.Н. Миллиметровые волны в биологии и медицине. Радиолокация и радиосвязь // Материалы III Всерос. науч. конф. М., 2009. С. 146–150.
- [3] Касьяненко А.А., Евдокимова О.В., Барышев М.Г. О попытке компенсации влияния вредных электромагнитных излучений на биологические системы с помощью современных тканей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2005. № 1. С. 132–134.
- [4] Lipiec J., Janas P., Barabasz W. Effect of oscillating magnetic field pulses on the survival of selected microorganisms // Int. Agrophysics. 2004. Vol. 18, no. 4. P. 325–328.
- [5] Cellini L., Grande R., Di Campi E., Di Bartolomeo S., Di Giulio M., Robuffo I., Mariggio M.A. Bacterial response to the exposure of 50 Hz electromagnetic fields // Bioelectromagnetics. 2008. Vol. 29, no. 4. P. 302–311.
- [6] Li Z.Y., Guo S.Y., Li L., Cai M.Y. Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an air-lift photobioreactor // Bioresour. Technol. 2007. Vol. 98, no. 3. P. 700–705.
- [7] Солнышкова М.А. Снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающих предприятий мурманской области: дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2020. URL: <https://goos.su/N55RjSd> (дата обращения: 28.09.2022)
- [8] Суховский Н.А. Наличие электростатического поля в электростатическом биореакторе // Вестник АПК Верхневолжья. 2015. № 1. С. 92–94.
- [9] Козьмин Г.В., Егорова Е.И. Устойчивость биоценозов в условиях изменяющихся электромагнитных свойств биосферы // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 3. С. 61–72.
- [10] Рыжкова Т.А., Калиниченко С.В., Бабич Е.М., Коротких Е.О., Хворостяная В.А., Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на способность патогенных коринебактерий к образованию биопленок // Живые и биокосные системы. 2015. Т. 1, № 14. С. 1–9.
- [11] Шляхтин Г.В., Зотова Е.А., Малинина Ю.А. Изменение биологической активности клеток при комбинированном действии электромагнитного излучения крайне высоких частот и никотина // Известия Самарского научного центра РАН. 2007. Т. 9, № 4. С. 818–822.
- [12] Гапочка М.Г. Влияние электромагнитного излучения низкой интенсивности на токсичность водной среды // ВМУ физика астрономия. 2009. № 1. С. 67–69.
- [13] Неркарарян А.В., Шагинян М.А., Хачатря А.В., Вардеванян П.О. Влияние низкоинтенсивного нетеплового иоферментный состав пероксидазы // Биологический журнал Армении. 2011. Т. 4, № 63. С. 96–103.
- [14] Зарубина А.П., Гапочка М.Г., Новоселова Л.А., Гапочка Л.Д. Биотестирование тест-системой «эколом» влияния электромагнитного поля низкой интенсивности на токсичность бытовых стоков // Вестник Московского Университета. Биология. 2012. Т. 16, № 3. С. 39–43.

- [15] Пронина Е.А., Шуб Г.М., Швиденко И.Г. Экспрессия генов лекарственной устойчивости кишечной палочки под воздействием электромагнитного излучения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. 2009. №. 3. С. 5–9.
- [16] Даровских С.Н., Шишкова Ю.С., Попечителей Е.П., Цейликман О.Б., Вдовина Н.В., Лапшин М.Г. Радиовибрационный механизм взаимодействия биологической ткани организмов с электромагнитными полями и излучениями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14, №. 3. С. 5–10.
- [17] Kalaji H.M., Jajoo A., Oukarroum A., Brestic M., Zivcak M., Samborska I.A., Ahmad P. The Use of Chlorophyll Fluorescence Kinetics Analysis to Study the Performance of Photosynthetic Machinery in Plants // *Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance*. 2014. P. 347–384.

References

- [1] Gapochka MG. *Ecological aspects of interaction of electromagnetic fields of the millimeter range with biological objects* (dissertation of the Doctor of Biological Sciences). Moscow; 2013. (In Russ.). Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30397922>
- [2] Beczkij OV, Kotrovskaya TI, Lebedeva NN. Millimeter waves in biology and medicine. Radar and radio communication. *III Russian Scientific Conference*. Moscow; 2009. p. 146–150. (In Russ.)
- [3] Kasyanenko AA, Evdokimova OV, Baryshev MG. The attempt to reduce harmful influence of electromagnetic radiation upon biological systems with usage of modern fabrics. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2005;(1):132–134. (In Russ.)
- [4] Lipiec J, Janas P, Barabasz W. Effect of oscillating magnetic field pulses on the survival of selected microorganisms. *Int. Agrophysics*. 2004;18(4):325–328.
- [5] Cellini L, Grande R, Di Campli E, Di Bartolomeo S, Di Giulio M, Robuffo I, Mariggio MA. Bacterial response to the exposure of 50 Hz electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2008;29(4):302–311.
- [6] Li ZY, Guo SY, Li L, Cai MY. Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an air-lift photobioreactor. *Bioresour. Technol.* 2007;98(3):700–705.
- [7] Solnyshkova MA. *Reduction of surface water pollution by inorganic nitrogen compounds in the impact zone of mining enterprises of the Murmansk region* (dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Saint Petersburg; 2020. (In Russ.) Available from: <https://goo.su/N55RjSd> (accessed: 28.09.2022).
- [8] Sukhovskiy NA. The presence of an electrostatic field in an electrostatic bioreactor. *Bulletin of the Agroindustrial complex of the Upper Volga region*. 2015;(1):92–94. (In Russ.)
- [9] Kozmin GV, Egorova EI. Stability of biocenoses in conditions of changing electromagnetic properties of the biosphere. *Biomedical technologies and radioelectronics*. 2006;(3):61–72. (In Russ.)
- [10] Ryzhkova TA, Kalinichenko SV, Babich EM, Korotkov EO, Hvorostyanaya VA, The effect of electromagnetic radiation of the millimeter range on the ability of pathogenic corynebacteria to form biofilms. *Living and biocontainable systems*. 2015;1(14):1–9. (In Russ.)
- [11] Shlyakhtin GV, Zotova EA, Malinina YuA. Changes in the biological activity of cells under the combined action of electromagnetic radiation of extremely high frequencies

- and nicotine. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2007;9(4):818–822. (In Russ.)
- [12] Gapochka MG. The influence of low-intensity electromagnetic radiation on the toxicity of the aquatic environment. *VMU physics astronomy*. 2009;1:67–69. (In Russ.)
- [13] Nerkararian AV, Shaginyan MA, Khachatryan AV, Vardevanyan PO. The effect of low-intensity non-thermal coherent EHF EMR on the overall activity and isoenzyme composition of peroxidase. *Biological Journal of Armenia*. 2011;63(4):96–103. (In Russ.)
- [14] Zarubina AP, Vapochka MG, Novoselova LA, Gaspochka LD. Biostatistics tet-system “Ecolum” the effect of the electromagnetic flow of low intensification on the toxicity of existing effluents. *Bulletin of the Moscow University*. 2012;16(3):39–43. (In Russ.)
- [15] Pronina EA, Shub GM, Shvidenko IG. Plasmid gene expression of escherichia coli drug resistance under the influence of electro8magnetic radiation. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2009;(3):5–9. (In Russ.)
- [16] Darovskikh SN, Shishkova YuS, Trusteitelev EP, Tseilikman OB, Vdovina NV, Lapshin MG. Radiovibration mechanism interaction of biological tissue of the organism with electromagnetic fields and radiation. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2014;14(3):5–10. (In Russ.)
- [17] Kalaji HM, Jajoo A, Oukarroum A, Brestic M, Zivcak M, Samborska IA, Ahmad P. The Use of Chlorophyll Fluorescence Kinetics Analysis to Study the Performance of Photosynthetic Machinery in Plants. *Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance*. 2014;347–384.

Сведения об авторах:

Щеглов Глеб Андреевич, инженер, Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, Российская Федерация, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Ферсмана, 14а. ORCID: 0000-0003-2870-3616. E-mail: g.scheglov@ksc.ru

Маслобоев Владимир Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, Российская Федерация, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Ферсмана, 14а. ORCID: 0000-0002-1536-921X. E-mail: v.masloboev@ksc.ru

Bio notes:

Gleb A. Shcheglov, Engineer, Institute of North Industrial Ecology Problems Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (INEP KSC RAS), 14a Fersman St, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-2870-3616. E-mail: g.scheglov@ksc.ru

Vladimir A. Masloboev, D. in Engineering, Chief Scientist, Institute of North Industrial Ecology Problems Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (INEP KSC RAS), 14a Fersman St, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1536-921X. E-mail: v.masloboev@ksc.ru