

УДК 577.3:57.086.8

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ В ОЦЕНКЕ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ МИКРОВОДОРΟΣЛЕЙ

Хмель Н.В.

*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины.
E-mail: dreval@ire.kharkov.ua*

Проведено исследование диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения суспензии микроводорослей для анализа гидратного окружения клеточных структур в аспекте солнечной активности. При концентрации микроводорослей выше 10^{12} кл/л, характерной для периода активного «цветения» водоёмов, показан эффект превышения ϵ' суспензии микроводорослей над ϵ' дистиллированной воды. Представленные экспериментальные данные диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения обосновывают связь жизнедеятельности микроводорослей с характеристиками солнечной и геомагнитной активности.

Ключевые слова: микроводоросли, солнечная активность, гидратация, диэлектрическая проницаемость, поверхностное натяжение, миллиметровый диапазон радиоволн.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе своей жизнедеятельности микроводоросли выработали определенные механизмы адаптации, в основе которых, помимо изменения метаболической активности и биохимических реакций поддержания клеточного гомеостаза, лежат изменения физических параметров поверхностного натяжения, а также диэлектрические свойства внутриклеточных и мембранных составляющих [1]. Первоначально Солнце определяет приспособленность микроводорослей к существованию практически в любых условиях: при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в Антарктиде и $+85\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в горячих источниках. В условиях вечной мерзлоты Арктики «во время полярного дня ... непрерывное освещение и изобилие питательных солей создают в верхних слоях моря исключительно благоприятные условия для существования растительной жизни. Начинается бурное развитие микроскопических, преимущественно, одноклеточных водорослей» [Ушаков 1990, 574]. Как показывают результаты последних исследований северных льдов [2], в связи с изменением солнечной и геомагнитной активности произошло существенное изменение характеристик ледового покрова. С появлением талых озер, занимающих 25–50 % ледового покрытия, наблюдается активное развитие фитопланктона в приповерхностных водах на глубине около 1 м; причем эта биомасса превышает биомассу верхних слоев почти в 10 раз.

Для фундаментальных исследований биологических и физико-химических особенностей жизнедеятельности микроводорослей всё большее применение находят неинвазивные методы регистрации электромагнитного сигнала от

микроводорослей, основанные на откликах биосистем на клеточном и субклеточном уровнях вплоть до специфических мембранных структур и отдельных биохимических реакций. Перспектива исследования поведения микроводорослей в переменном электромагнитном поле очевидна ввиду быстроты получения данных в широком диапазоне частот ($f = 0,1 \text{ Гц} \div 50 \text{ ГГц}$), скорости обработки полученного экспериментального материала, а также нахождения тех чувствительных функциональных параметров микроводорослей, которые связаны с их жизнеспособностью.

Так, диэлектрические спектры зигоспор микроводорослей талых вод, полученные методом электроротации в диапазоне частот нескольких герц – нескольких сотен мегагерц, характеризуют процессы холодной акклиматизации с изменением структуры клеточной стенки и мембраны *Chloromonas nivalis* и *Chlamydomonas nivalis* [3]. Диэлектрическая спектроскопия на частотах β -дисперсии позволяет контролировать концентрацию биомассы микроводорослей в биореакторах для интенсификации процессов ферментации промышленного сырья [4]. Методом КВЧ-диэлектрметрии на частотах дисперсии диэлектрической проницаемости свободной воды получена достаточно высокая корреляция между гидратацией микроводорослей и числом солнечных пятен «sunspot number» в аспекте моделирования солнечной активности с помощью терагерцового лазера, энергия излучения которого соизмерима с энергией водородной связи биомолекулы [1]. Показатели водного режима клеток, анализируемые в высокочастотном электромагнитном поле ($f = 37,7 \text{ ГГц}$), являются перспективными в исследовании фотосинтетической активности микроводорослей. При этом регистрация состояния ассоциатов молекул связанной воды, формирующихся на основе гидратных центров NH, CO и полярных групп аминокислот, дает информацию об конформационных превращениях макромолекул клеточных структур, возникающих под действием различных физико-химических факторов, включая антропогенные поллютанты [5].

Целью настоящей работы является представление диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения как информативных характеристик в исследовании жизнедеятельности микроводорослей в аспекте солнечной и геомагнитной активности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – фитопланктон открытых водоёмов Харьковской области, образцы которого были взяты в летнее время в период активного «цветения» водоёмов. Микроводоросли из *Chlorophyta* – представители родов *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, а также из *Cyanophyta* – представители рода *Myrocystis*, имеющие количественное преимущество в изучаемых образцах, были инкубированы в фотобиореакторе при температуре $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ и освещении $6,6 - 7,4 \text{ Вт/м}^2$ для дальнейшего микроскопирования под световым микроскопом $\times 600$.

Диэлектрическую проницаемость (ϵ') суспензии микроводорослей оценивали по электромагнитному отклику биологической системы (U , дБ) при экспозиции клеток в измерительной ячейке 8-мм волноводного тракта на частоте $f = 37,7 \text{ ГГц}$, входящей в область дисперсии диэлектрической проницаемости свободной воды (f

= 10 ГГц ÷ 50 ГГц). Объем суспензии микроводорослей в измерительной кювете не превышал $V = 12$ мкл. Точность относительных измерений по ϵ' составила $\Delta = \pm 1$ %; точность измерений по абсолютным значениям ϵ' составила $\pm 3,5$ %.

Измерение коэффициента поверхностного натяжения суспензии микроводорослей (σ), пропорционального медианной частоте ($F_{med.}$), проводилось с помощью кюветы, размещенной на пьезо-платформе и помещенной в раскрыт 8-мм волновода при скрининге («sweep»-режим) звуковых частот ($f = 20 \div 60$ Гц), входящих в область собственных колебаний системы пьезо-платформа-измерительная кювета. Температурная коррекция приводилась к $t = 25$ °С. Калибровка и рабочие номограммы осуществлялись по водно-спиртовым, водно-кислотным и солевым растворам.

Частотный анализ проводился с помощью специально разработанного программного обеспечения с помощью быстрого Фурье-преобразования (БФП), при этом объем измерительной сессии (комплексного ММВ и звукового файла) не превышал 0,5 Гб; длительность не более 120 сек. Точность измерений, с учетом погрешности дозатора, не более $\pm 0,05$ Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что характер взаимодействия электромагнитной волны с биологическим объектом определяется как параметрами излучения (частотой, скоростью распространения, когерентностью колебания, поляризацией волны), так и физическими свойствами (диэлектрическая проницаемость, поверхностное натяжение и др.) биологического объекта как среды, в которой распространяется электромагнитная волна. Электрические свойства клеток в диапазоне радиочастот достоверно характеризуют их биологическую полноценность и находятся в непосредственной связи с целостностью физико-химической структуры клеточной оболочки, ответственной за её поляризационные свойства [6].

В ходе эксперимента регистрировался электромагнитный отклик суспензии микроводорослей в дневное и вечернее время, в дни с различной солнечной и геомагнитной активностью, характеризующиеся определенным числом солнечных пятен «sunspot number» и параметром K-index, соответственно. На рисунках 1 и 2 представлен частотный анализ электромагнитного отклика (измерительная сессия 12.08.2014 г. и 13.08.2014 г.) для определения медианных частот и поверхностного натяжения в области акустического резонанса 1-го мода колебаний при «sweep»-режиме акустических частот для дистиллированной воды и суспензии микроводорослей. Совпадение спектральных данных по дистиллированной воде 12.08.2014 г. и 13.08.2014 г. обусловлено температурой в лаборатории в дневные и вечерние часы, которая отличалась не более чем на 0,3 °С (эти дни августа совпали с температурным максимумом 2014 г. по Харьковской области).

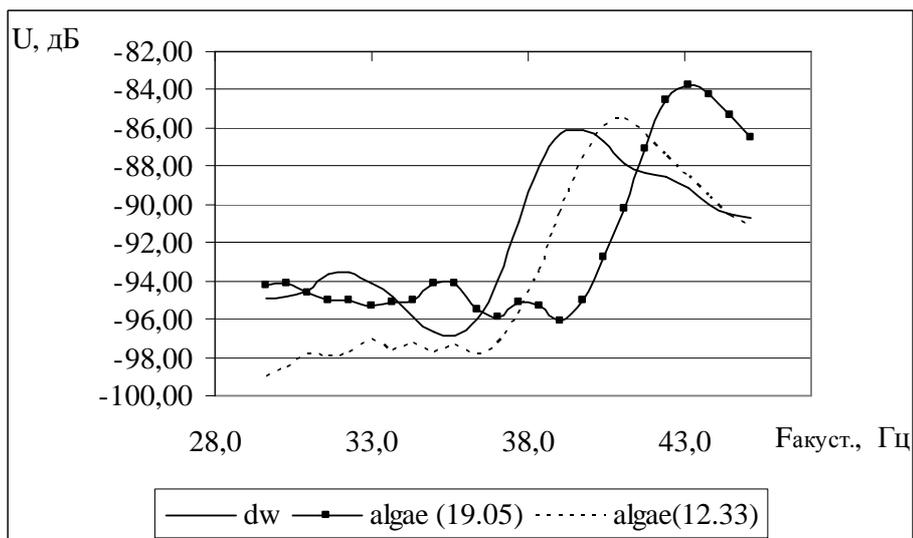


Рис. 1. Электромагнитный отклик (U , дБ) суспензии микроводорослей в области акустического резонанса 1-го мода колебаний при «sweep»-режиме ($f = 28 \div 50$ Гц) по отношению к дистиллированной воде ($t = 12.33$ – Солнце в зените; $t = 19.05$ – закат Солнца). Измерения 12.08.2014 г.

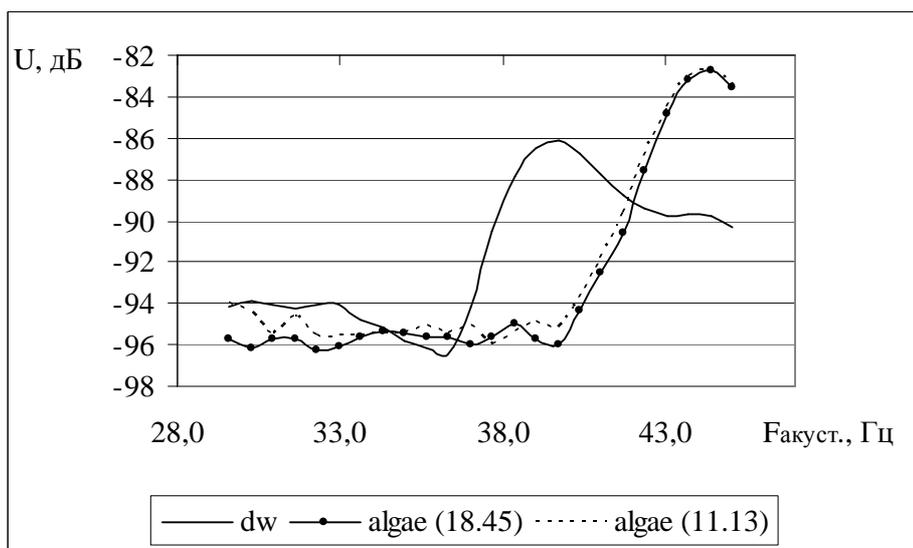


Рис. 2. Электромагнитный отклик (U , дБ) суспензии микроводорослей в области акустического резонанса 1-го мода колебаний при «sweep»-режиме ($f = 28 \div 50$ Гц) по отношению к дистиллированной воде ($t = 11.13$ – Солнце в зените; $t = 18.45$ – закат Солнца). Измерения 13.08.2014 г.

Из представленных на рисунках 1 и 2 экспериментальных данных электромагнитного отклика суспензии микроводорослей следует превышение параметра ε' относительно ε' воды на $1,7 \cdot 10^{-12}$ ф/м, что составило разницу в 0,2 единицы ε' в системе СГС (после соответствующего пересчета медианных частот и уровня электромагнитного сигнала в реальную часть диэлектрической проницаемости); при этом разница в коэффициенте поверхностного натяжения составила $\sigma = 2,3$ дин/см. Известно, что жизнедеятельность микроводорослей имеет тесную связь с бактериальным окружением, которое изменяет свою активность в зависимости от действия факторов биотической и абиотической природы. «Цветение» воды приходится на период температурных максимумов окружающей среды и высокого уровня надводной освещенности; при этом бактериальное окружение характеризуется интенсивным делением клеток, интенсификацией процессов дыхания и продуцирования органических веществ [7]. Окружающая микроводоросли биомасса бактерий в этот период максимальна по величине и видовому разнообразию и подобна «бахроме» со строго упорядоченной структурой, в которой молекулы воды выстраиваются определенным образом с индикатрисой рассеяния электромагнитного сигнала, обеспечивающей диэлектрическую проницаемость биологической системы (микроводоросли-бактериальное окружение) $\varepsilon' > 23$ при концентрации микроводорослей более 10^{12} кл/л.

Обобщенные данные измерений диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения суспензии микроводорослей с учетом характеристик солнечной активности приведены в таблице 1. Следует отметить, что измерения по абсолютному значению действительной части диэлектрической проницаемости не были строго синхронизованы с измерительными сессиями по определению медианных частот и, соответственно, поверхностного натяжения. Разброс по времени составлял около 3-х часов.

Таблица 1

Изменение диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения суспензии микроводорослей в аспекте солнечной активности

Дата	Время	$\Delta\varepsilon' \cdot 10^{-12}$ ф/м	$\Delta F_{\text{мед.}}$, Гц	$\Delta\sigma$, дин/см	sunspot number
12.08.2014	12.30	$0,5 \pm 0,7$	$0,9 \pm 0,1$	$0,65 \pm 0,2$	82
	19.00	$1,7 \pm 0,7$	$3,3 \pm 0,1$	$1,63 \pm 0,2$	82
13.08.2014	11.30	$1,9 \pm 0,7$	$3,9 \pm 0,1$	$1,92 \pm 0,2$	80
	19.00	$2,5 \pm 0,7$	$4,6 \pm 0,1$	$2,23 \pm 0,2$	80

$$\Delta\varepsilon' = \varepsilon'_{\text{alg.}} - \varepsilon'_{\text{dw.}}, \text{ где}$$

$\varepsilon'_{\text{alg.}}$ и $\varepsilon'_{\text{dw.}}$ – диэлектрическая проницаемость микроводорослей и дистиллированной воды, соответственно;

$$\Delta F_{\text{мед.}} = F_{\text{мед. alg.}} - F_{\text{мед. dw.}}, \text{ где}$$

$F_{\text{мед. alg.}}$ и $F_{\text{мед. dw.}}$ – медианная частота электромагнитного отклика микроводорослей и дистиллированной воды, соответственно;

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{Fmed.alg.}} - \sigma_{\text{Fmed.dw.}}, \text{ где}$$

$\sigma_{\text{Fmed.alg.}}$ и $\sigma_{\text{Fmed.dw.}}$ – поверхностное натяжение микроводорослей и дистиллированной воды, соответственно.

K-index – основной параметр геомагнитной активности, описывающий вариации магнитного поля Земли, при этом геомагнитная активность, тесно связанная с солнечной активностью, является важным элементом космической погоды, влияющей на многие процессы жизнедеятельности биологических систем различных уровней организации [8]. Концентрация фотосинтетического пигмента хлорофилла *a* в клетках микроводорослей может достигать в период активного «цветения» максимального уровня (до 2,5 мг/л); при этом отмечается корреляция количества микроводорослевых клеток и концентрации хлорофилла *a* с параметрами гидратации [5], солнечной и геомагнитной активностью [9–11]. На рисунке 3 показан суточный ход геомагнитной активности 12.08.2014 г. и 13.08.2014 г.

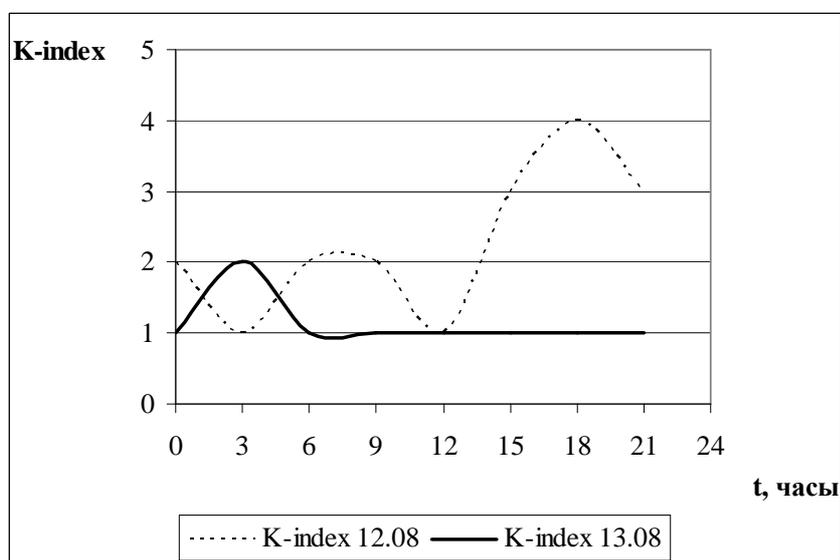


Рис. 3. Суточный ход уровня геомагнитной активности. K-index – 4 (12.08.2014 г.) и K-index – 1 (13.08.2014 г.).

Анализируя полученные результаты электромагнитного отклика микроводорослей в аспекте солнечной активности («sunspot number») и геомагнитной активности (K-index), следует отметить достаточно выраженную взаимосвязь поверхностного натяжения (σ) с K-index. Так, 12.08.2014 г. почти весь день регистрировался переменный характер K-index по сравнению с уровнем K-index 13.08.2014 г., когда с пяти часов утра и до конца дня уровень его не менялся и

составлял 1,0 [<http://www.spaceweather.com>], [<http://www.geospace.com.ua>]. В ходе эксперимента 12.08.2014 г. в 11.33 на уровне электромагнитного отклика суспензии микроводорослей $U = -90$ дБ была зарегистрирована $F_{\text{мед.}} = 38,7$ Гц, а 13.08.2014 г. в 11.33 на том же уровне электромагнитного отклика $F_{\text{мед.}}$ составила 42,1 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показан эффект превышения значений параметров диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения микроводорослей в период активного «цветения» водоёмов (при определенной концентрации клеток) над таковыми параметрами воды, что связано с определенной взаимосвязью микроводорослей с бактериальным окружением их клеток.
2. Показана связь параметров диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения с процессами жизнедеятельности микроводорослей в аспекте солнечной и геомагнитной активности (sunspot number, K-index).

Список литературы

1. Колесников В.Г. Связь солнечной активности с электромагнитным откликом микроводорослей открытых водоёмов Харьковской области / В.Г. Колесников, Н.В. Древаль, Ю.Е. Каменев, В.Г. Корж // Физика живого.– 2009.– Т. 17, № 1.– С. 98-104.
2. Arrigo K.R. Massive Phytoplankton Blooms Under Arctic Sea Ice / K.R. Arrigo, D.K. Perovich, R.S. Pickart [et al.] // Science.– 2012.– V. 336.– P. 1408.
3. Muller T. Dielectric single cell spectra in snow algae / T. Muller, Th. Schnelle, G. Fuhr // Polar. Biol.– 1998.– Vol. 20.– P. 303–310.
4. Alborno M.A. G. Strategies to overcome interferences during biomass monitoring with dielectric spectroscopy: submitted for the degree of Doctor of Philosophy / Manuel Alberto Garcia Alborno.– Heriot-Wall University, School of Engineering and Physical Sciences.– 2013.– 199 p.
5. Паршикова Т.В. Экспересс-контроль роста и физиологического состояния микроводорослей / Т.В. Паршикова, Л.А. Сиренко, Т.Ю. Щеголева, В.Г. Колесников // Альгология.– 2001.– Т.11, № 3.– С. 403–413.
6. Седунов Б.И. Диэлектрическая проницаемость биологических веществ / Б.И. Седунов, Д.А. Франк-Каменецкий // Успехи физических наук.– 1963.– Т.79.– Вып. 4.– С. 617-639.
7. Trabelsi A. Effect of bacterial community dynamics on DOC seasonal changes in the north-western Mediterranean Sea / A. Trabelsi, F. Rassoulzadegan // J. Plankton research.– 2011.– Vol. 33, № 8.– P. 1249–1262.
8. Rangarajan G.K. Time variations of geomagnetic activity indices K_p and A_p : an update / G.K. Rangarajan, T. Iyemori // Ann. Geophysicae.– 1997.– Vol.15.– P. 1271-1290.
9. Wu H. Effects of solar UV radiation on morphology and photosynthesis of filamentous cyanobacterium *Arthrospira platensis* / H. Wu, K. Gao, V. Villafañe, T. Watanabe, E. Helbling // Applied and Environmental Microbiology.– 2005.– Vol. 71.– P. 5004–5013.
10. Donkor V. Effects of ultraviolet irradiation on photosynthetic pigments in some filamentous cyanobacteria / V. Donkor, D. Hader // Aquatic Microbial Ecology.– 1996.– Vol. 11.– P. 143–149.
11. Hu W. Weather Variability, Sunspots, and the Blooms of Cyanobacteria / W. Hu, D. Connell, K. Mengersen, Sh. Tong // EcoHealth.– 2009.– Vol. 6.– P. 71–78.

PERMITTIVITY AND SURFACE TENSION FOR THE ESTIMATION OF MICROALGAE'S VITAL FUNCTION

Khmel N.V.

*Usikov Institute of radiophysics and electronics of National Academy of sciences of Ukraine,
Kharkov, Ukraine
E.mail: dreval@ire.kharkov.ua*

The investigation of permittivity and surface tension of microalgae's suspension for the analysis of cells structures hydration in aspect of solar activity was carried out. The effect of the excess ϵ' microalgae's suspension over ϵ' distilled water at concentration of microalgae above 10^{12} cells/l, which is typical for the period of active «bloom» of reservoirs was shown. The presented experimental data of permittivity and surface tension prove of communication of microalgae's vital function with characteristics of solar and geomagnetic activity.

Microalgae cells in the process of vital function the definite mechanisms of adaptation have developed. In the basis of these mechanisms there are changes of metabolic activity, biochemical reactions of cells homeostasis maintenance, and also changes of physical parameters as surface tension and permittivity of intracellular and membrane components.

For fundamental investigations of biological and physical and chemical features of microalgae's vital function the non-invasive methods of electromagnetic signal registration more and more have applied. In basis of methods is the high-sensitivity responses of biosystems at cellular and subcellular levels up to specific membrane structures and individual biochemical reactions. The perspective of investigation of microalgae's behaviour in a variable electromagnetic field is obvious in view of speed of data acquisition in a wide range of frequencies ($f = 0,1 \text{ Hz} \div 50 \text{ GHz}$), speeds of processing of the received experimental material, and also a finding of those sensitive functional parameters of microalgae which are connected with their vital function.

The phytoplankton of open reservoirs of the Kharkov region from *Chlorophyta* – *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Scenedesmus* and *Cyanophyta* – *Mycrocystis* in active «bloom» reservoirs was used as objects for investigation of electromagnetic response of microalgae's cells. Permittivity (ϵ') and surface tension (σ) of microalgae's suspension in aspect of solar and geomagnetic activity were measured. From experimental data of the electromagnetic response of microalgae's suspension excess of parameter ϵ' over ϵ' water on $1,7 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$; thus the difference in parameter surface tension was $\sigma = 2,3 \text{ dynes/cm}$.

It is known the definite connection between microalgae cells and their bacterial environment which changes their activity depending on action of biotic and abiotic factors. The biomass of bacteria surrounding microalgae in period of «bloom» reservoirs is presented as much as possible by quantity ($\sim 10^8$ cells/l) and a variety, and is similar to «fringe» with strictly ordered structure, in which water molecules are built definitely with indicatrix providing biological system the permittivity $\epsilon' > 23$ at microalgae concentration more than 10^{12} cells/l.

Analysis of the received results has been shown the significant connection of

microalgae's electromagnetic response with surface tension in aspect of solar activity («sunspot number») and geomagnetic activity (K-index).

Keywords: microalgae, solar activity, hydration, permittivity, surface tension, millimetric range of radio-waves.

References

1. Kolesnikov V.G., Dreval N.V., Kamenev Yu.E., Korzh V.G. The connection of solar activity with microalgae's electromagnetic response of open reservoirs of Kharkov region, *Physics of alive*, **17**, No 1, 98 (2009).
2. Arrigo K. R., Perovich D. K., Pickart R. S. [et al.]. Massive Phytoplankton Blooms Under Arctic Sea Ice, *Science*, **336**, 1408 (2012).
3. Muller T., Schnelle Th., Fuhr G. Dielectric single cell spectra in snow algae, *Polar. Biol.*, **20**, 303 (1998).
4. Albornoz M. A. G. *Strategies to overcome interferences during biomass monitoring with dielectric spectroscopy*, 199 p. (Heriot-Wall University, School of Engineering and Physical Sciences, 2013).
5. Parshikova T.V., Sirenko L.A., Shchegoleva T.Yu., Kolesnikov V.G. Express-control of growing and physiological state of microalgae, *Algology*, **11**, No 3, 403 (2001).
6. Sedunov B.I., Frank-Kamenetski D.A. Permittivity of biological substances, *Successes of physical sciences*, **79**, 4, 617 (1963).
7. Trabelsi A., Rassoulzadegan F. Effect of bacterial community dynamics on DOC seasonal changes in the north-western Mediterranean Sea, *J. Plankton research*, **33**, No 8, 1249 (2011).
8. Rangarajan G. K., Iyemori T. Time variations of geomagnetic activity indices Kp and Ap: an update, *Ann. Geophysicae*, **15**, 1271 (1997).
9. Wu H., Gao K., Villafan~e V, Watanabe T., Helbling E. Effects of solar UV radiation on morphology and photosynthesis of filamentous cyanobacterium *Arthrospira platensis*, *Applied and Environmental Microbiology*, **71**, 5004 (2005).
10. Donkor V., Hader D. Effects of ultraviolet irradiation on photosynthetic pigments in some filamentous cyanobacteria, *Aquatic Microbial Ecology*, **11**, 143 (1996).
11. Hu W., Connell D., Mengersen K., Tong Sh. Weather Variability, Sunspots, and the Blooms of Cyanobacteria, *EcoHealth*, **6**, 71 (2009).

Поступила в редакцию 07.11.2014 г.