

ДВЕ ФОРМЫ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ВОДЫ В ПРОТОПЛАЗМЕ ЖИВЫХ КЛЕТОК И ИХ РОЛЬ В БИОЭНЕРГЕТИКЕ

Галль Л.Н.¹, Кулешова Т.Э.^{1,2}, Галль И.Р.¹

¹ Институт аналитического приборостроения РАН
ул. Ивана Черных 31-33, г. Санкт-Петербург, 198095, РФ; e-mail: lngall@yandex.ru

² Агрофизический научно-исследовательский институт
Гражданский проспект 14, г. Санкт-Петербург, 195220, РФ
Поступила в редакцию 20.07.2023. DOI: 10.29039/rusjbpс.2023.0616

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному подтверждению особенностей состояния воды в цитоплазме живых растительных клетках, и установлению роли этого состояния в физиологии. Под состоянием воды далее будем понимать структурную организацию водной компоненты цитоплазмы клетки, в значительной степени определяющую физико-химические свойства цитоплазмы и механизм квантовой биоэнергетики живого организма. Изучение водной среды живой клетки показывает, что она является коллоидной средой, организованной по двум различным механизмам. Первый из них - континуальное подвижное жидкое состояние, в котором водная среда цитоплазмы локально напряжена растворенными в ней клеточными элементами: органеллами, биополимерами, малыми биомолекулами и ионами, в основном – Na^+ и K^+ . Второе – малоподвижное, отвечающее самоорганизации молекул воды на гидрофильных центрах биополимеров в фракталоподобные энергонапряженные стержневые структуры, предсказанное в теории Бульенкова. Эта форма структурирования воды является основой образования молекулярно-водной системы любого живого организма - главного вещественного элемента биоэнергетики. В данной работе существование обоих типов структурирования воды в цитоплазме показано методом спектральной L-диэлькометрии в эксперименте с листьями хлорофитума в условиях искусственной засухи.

Ключевые слова: протоплазма клетки, структурирование воды, биоэнергетика, L-диэлькометрия, искусственная засуха.

Постановка задачи. Ни один живой организм не может развиваться без обеспечения энергией молекулярных систем его клеток. Изучение биоэнергетики клетки является главным условием в развитии ее физиологии, общая задача которой – выявление *причинно-следственных* связей в функционировании как клетки, так и живого организма в целом. В свою очередь эти связи в живом организме в обязательном порядке увязаны с его биоэнергетикой, понимаемой не только как система биохимических процессов зарядки энергией молекул АТФ, но и как способы доставки энергии к молекулярным системам клеток, и как физические законы управления энергетикой межмолекулярных и межклеточных процессов. Поскольку все энергетические процессы развиваются в цитоплазме клетки и в межклеточной среде, изучение этих сред живого и выявление подлинной роли их водной составляющей становится главным вопросом проблемы биоэнергетики, т.е. энергетики живых клеток и организмов. При этом изучение состояния воды в живых клетках в процессе протекания физиологических реакций, в том числе – в условиях стресса, на данный момент остается нерешенной задачей, вызывающий постоянный интерес физиологов.

Водная среда живой клетки, то есть цитоплазма, это совершенно особая водная коллоидная система с необычными свойствами, существующими только в молекулярных системах живого. В ней присутствуют все возможные формы структурирования молекул воды, создаваемые примесями, находящимися в этой водной среде. Они в такой степени искажают структуру исходной воды, что эта водная система уже не может называться раствором, поскольку «свободной воды», структура которой не искажена каким-либо физико-химическим процессом, вызванным примесями, в цитоплазме нет вообще. Соответственно, физико-химической моделью цитоплазмы живой клетки является многокомпонентная система на основе воды, молекулы которой связаны со всеми присутствующими в ней химическими соединениями – гетероструктурными биополимерами, гидрофильными и гидрофобными биомолекулами, положительно и отрицательно заряженными ионами, молекулами не диссоциировавших солей, наночастицами и другими неорганическими соединениями, в связи с чем водная среда цитоплазмы является коллоидной средой, полностью измененной по сравнению с исходной структурой жидкой воды [1].

Результаты теоретических работ [2-4] позволяют считать полностью обоснованным представление о биополимере в водной среде как об энергетической машине – источнике квантов электромагнитного поля – солитонов [2], способствующих специфическому структурированию водной среды, примыкающей к биополимеру [3,4]. Теория Бульенкова [5] позволила описать это структурирование в рамках представлений об электростатической организации молекулы воды. Симметричная рассредоточенность зарядовых центров этой молекулы и ее большой дипольный момент обеспечивают образование молекулами воды не только различных аномалий свойств ее жидкой фазы, но и постоянную самоорганизацию в ней фракталоподобных энергонапряженных стержневых структур, установленную и описанную в [6]. На возможность образования в живых клетках структур воды, растущих на биополимерах и отличных от структур, характерных для цитоплазмы,

в своих работах уже указывал Д.Александр [3], обсуждая результаты гидратации биополимеров, однако прямых экспериментальных доказательств образования структур типа фрактальных квазикристаллических цепей ранее не было представлено. Доказательство их существования имеет принципиальное значение для обоснования модели биоэнергетики [7], базирующейся на теоретических работах [2-4]. Соответственно, целью данной работы было прямое экспериментальное подтверждение существования в живых клетках механизма структурирования воды на биополимерах при их гидратации, для чего была предложена и реализована методика измерения методом спектральной L-диэлькометрии спектров тангенса диэлектрических потерь водной компоненты в листьях растений в процессе их искусственной засухи.

Экспериментальная часть. Метод L-диэлькометрии относится к совокупности радиоспектроскопических методов исследования строения вещества, а также физических и химических процессов в нём, основанных на резонансном поглощении электромагнитного поля. Физический механизм любого метода радиоспектроскопии аналогичен хорошо известной спектрофотометрии: если частота электромагнитной волны, падающей на некоторое вещество или сложную молекулярную систему, близка или совпадает с одной из собственных частот внутрисистемных колебаний, на этой частоте можно зафиксировать поглощение электромагнитной энергии. Соответственно, при изменении частоты можно наблюдать спектр пиков, указывающий частоты, на которых происходит поглощение энергии, и тем самым зафиксировать спектр внутримолекулярных или внутрисистемных колебаний. Физический смысл такого спектра состоит в том, что по нему можно получить информацию о строении молекулы, о растворе или о молекулярной системе. Диэлькометрия позволяет проводить такие исследования водных растворов в диапазоне частот 10^4 - 10^6 Гц, в котором проявляются внутрисистемные колебания гидратов молекул, позволяющие определить энергии межмолекулярных напряжений структурированной водной среды. Этот частотный диапазон крайне сложен для исследований водных растворов, поскольку для большинства реализаций радиоспектроскопических методов предполагаемые эффекты оказываются недоступными для измерений из-за высокой проводимости растворов. Исключением является метод низкочастотной индуктивной диэлькометрии (L-диэлькометрии) [8], в котором для снижения влияния проводимости исследуемый объект размещается не в емкости, а в катушке индуктивности колебательного контура, являющейся как источником поля, действующего на объект исследования, так и элементом измерительной системы.

В методе L-диэлькометрии присутствие структур воды устанавливается по спектру тангенса диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), изменяющегося при изменении частоты ЭМП, задаваемой генератором колебательного контура, причем величина $\text{tg}\delta$ вычисляется непосредственно из величин, измеряемых в эксперименте: параметров резонанса контура как без пробы [8], так и с пробой, внесенной в пробирку в соленоид контура. Для проведения измерений с растворами низких концентраций на основе измерителя добротности VM-560 фирмы Тесла была разработана установка и были разработаны катушки индуктивности L с минимальными величинами собственной индуктивности, емкости и сопротивления.

Разработка оптимальных катушек позволила существенно увеличить чувствительность метода, что в свою очередь дало возможность выявить спектральный характер изменения тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ измеряемого раствора [9]. Куметр VM-560 построен на аналоговой электронике, что в данном случае очень удобно для точной настройки его режима в резонанс на задаваемой частоте. Настройка производится с помощью изменения величины высокоточной настроечной емкости C до достижения резонанса, и параметры резонанса считываются непосредственно с приборов, установленных на лицевой панели куметра. Этими параметрами являются величина добротности контура Q и величина настроечной емкости C. При измерении на каждой установленной частоте f они измеряются вначале – при отсутствии пробы в катушке индуктивности L, а затем – при введении в катушку пробирки с пробой. Именно эти величины – Q_1, C_1 - без пробы, и Q_2, C_2 – с пробой, затем используются для вычисления тангенса диэлектрических потерь в измерении на данной частоте f, а именно $\text{tg}\delta = (Q_1 C_1 - Q_2 C_2) / Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)$.

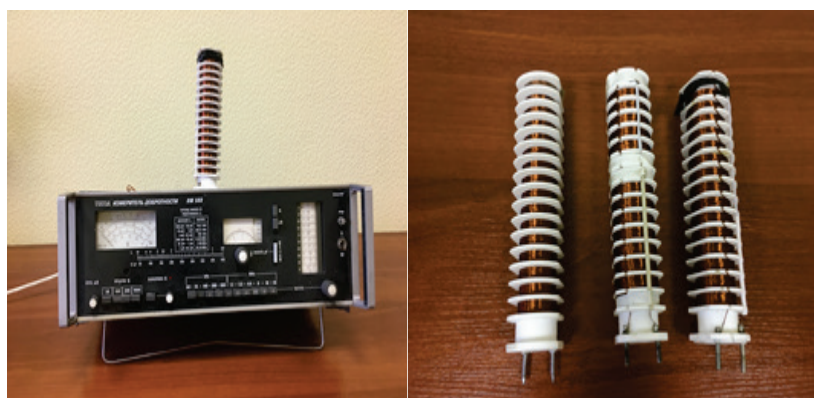


Рисунок 1. Внешний вид куметра VM-560 и три катушки с разными величинами индуктивности, позволяющие использовать диапазон частот 50КГц-1МГц

Этим методом при исследовании водных растворов солей металлов первой и второй групп и молекул биоактивных веществ было ранее показано [10], что в спектрах солей положение пиков на шкале частот зависит только от химической природы катиона или аниона, и что растворы биоактивных веществ образуют в растворах долгоживущие молекулярно-водные комплексы. Во всех случаях только присутствие воды в пробе позволяло получать спектральные зависимости $\text{tg}\delta$ от частоты: для сухих образцов диэлектрические потери не наблюдались.

В данном исследовании для получения информации о водных структурах цитоплазмы растения была использована методика искусственной засухи.

В качестве фитотест-объекта были выбраны растения хлорофитума (*Chlorophytum Ker Gawl.*). Измерения проводились следующим образом. Зеленая масса свежесрезанных листьев хлорофитума, известного своей засухоустойчивостью, взвешивалась, а затем помещалась в пробирку и проводилось измерение спектра $\text{tg}\delta$ в частотном диапазоне 100-600 КГц. После каждого измерения листья извлекались из пробирки и выдерживались на воздухе для подсушивания, после чего перед новым измерением потери воды определялись взвешиванием. Затем растения вновь помещались в пробирку и измерение $\text{tg}\delta$ повторялось. Эта процедура выполнялась до полного высыхания растений, которое для листьев хлорофитума составляло более месяца. На рисунке 2 приведен участок такого спектра в диапазоне частот 100-1300 КГц, при потере 50% воды, демонстрирующий сложный спектральный состав зависимости тангенса диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) от частоты. Такой спектр вполне отражает факт структурирования молекул воды цитоплазмы клеток листьев хлорофитума, но он не информативен для идентификации наблюдаемых пиков.

Далее на рисунке 3 представлена обобщенная картина последовательных изменений спектра $\text{tg}\delta$ при изменении количества воды в цитоплазме и в межклеточном пространстве листьев хлорофитума.

Изменение интенсивности и числа пиков в спектре зависимости тангенса диэлектрических потерь от частоты ЭМП для модельного растения, каковым в данном эксперименте выступает хлорофитум, при уменьшении количества воды в листьях в условиях искусственной засухи демонстрирует изменение условий структурирования и самоорганизации водной компоненты растения. При сохранении достаточного количества воды - спектры 1, 2 и 3 демонстрируют изменение формы спектра, отвечающее увеличению концентрации ионов, малых молекул и других примесей в цитоплазме при засухе, однако для идентификации пиков при этом информации в спектрах недостаточно. Информативным является только спектр, отвечающий почти полному высыханию воды, кусочек которого приведен на рис.3 под номером 4. На этом спектре четко выделяются две группы пиков. Первая - на частоте $f=110$ КГц, ранее [10] была идентифицирована, как структура воды, образованная ионом Na^+ . Пики этой группы растут при приближении количества воды к полному высыханию, с затем полностью исчезают в спектре, что свидетельствует о полном высыхании воды в цитоплазме. Пики второй группы (на частоте $f=190$ КГц) в это время хоть и вполне заметны, но изменяются мало. Но они присутствуют в спектре еще 8 дней, до тех пор, пока изменение веса листьев становится менее одного процента. Тогда они вдруг четко определяются, возрастают, и затем также исчезают. Эти результаты можно трактовать только как демонстрацию присутствия в листьях структур воды двух разных типов: напряженных ионами - в цитоплазме, и стержневых квазикристаллических - между гидрофильными центрами биополимеров. Они полностью коррелируют с опубликованными Казанской школой физиологов результатами, полученными методом импульсного ЯМР [11]. Авторами этих работ было показано существование в живом растении двух типов водных структур: подвижной и малоподвижной, причем последняя переходила от клетки к клетке.

На наш взгляд, «малоподвижные» структуры воды - это структуры, которые образуются и «растут» на гидрофильных центрах биополимеров при их гидратации. Их рост и устойчивость стимулируются тем, что водородные связи гидрофильных центров биополимеров ($\text{N}-\text{H}\cdots$, $\text{O}-\text{H}\cdots$, $\text{S}-\text{H}\cdots$), связываясь с молекулами воды, растягивают ковалентные связи атомов этих групп, увеличивая их жесткость и превращая их в осцилляторы солитонов. Именно эти процессы были впервые установлены и обоснованы в теоретико-экспериментальных



Рисунок 2. Типовой спектр листьев хлорофитума при уменьшении количества воды цитоплазмы на 20%

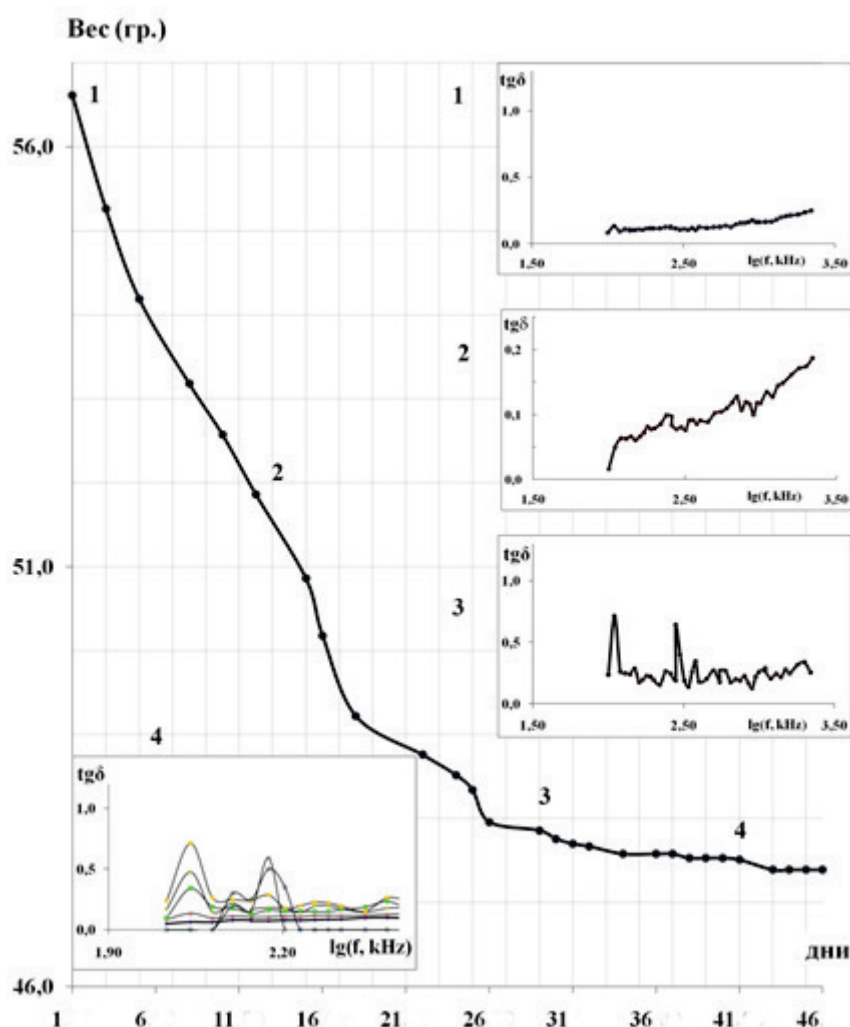


Рисунок 3. Изменения спектра $\text{tg}\delta$ по мере высыхания листьев: 1 – свежесрезанные листья; 2 – 50% потери веса; 3 – 95% потери веса; 4 – первая группа пиков: потеря веса от 98,4% до 99,6%; вторая группа пиков от 99,6% до 100%

работах [3,4]. А благодаря работам Бульenkова и Желиговской [5,6] эти водные структуры теоретически описаны и показана их главная особенность: они являются энергонапряженными, т.е. их длительное существование возможно именно в живых клетках, в которых они постоянно поддерживаются энергией солитонов. Образуя, совместно с биополимерами, молекулярно-водную структуру живой клетки, эти водные одномерные мосты являются важнейшей частью биоэнергетики и функционирования любого живого организма. При этом структуры воды, входящие в молекулярно-водные системы живых растений, будучи достаточно прочными, вполне возможно, выступают одним из элементов, определяющим засухоустойчивость растения.

Заключение и выводы. Таким образом, результаты, полученные методом низкочастотной спектральной L-диэлькометрии высокого разрешения, и поддержанные результатом, полученным методом импульсного ЯМР, совместно интерпретированные на основе современных теоретических представлений о структурировании воды ионами (электростатическое напряжение структуры воды) и гидрофильными центрами биополимеров, позволяют сделать следующие общие выводы.

1. Вода в цитоплазме живых растений структурирована по двум различным механизмам, первый из которых определяет состояние цитоплазмы как коллоидной системы, а второй является ранее не известным структурированием воды на гидрофильных центрах биополимеров, приводящим к образованию его цельной молекулярно-водной системы.

2. Методика искусственной засухи является крайне эффективной в исследованиях состояния воды при выявлении засухоустойчивых и морозоустойчивых растений.

3. Подтверждение образования устойчивых структур воды, выдерживающих длительное обезвоживание растений, является не только важным фитофактором, но также и экспериментальным подтверждением теории Н.А. Буленкова о структурировании воды на гидрофильных центрах биополимеров в энергонапряженные квазифрактальные структуры.

Список литературы / References:

1. Лященко А.К., Дуняшев В.С. *Пространственная структура воды. Сб. «Вода: структура, состояние, сольватация. Достижения последних лет».* Коллективная монография: Отв. ред. А.М.Кутепов. М.: Наука, 2003, 404 с. [Lyashchenko A.K., Duniyashov V.S. *Spatial structure of water. Sat, "Water: structure, state, solvation. Achievements of recent years. Collective monograph: Otv. ed. A.M. Kutevov. M.: Nauka, 2003, 404 p. (In Russ.)*].
2. Давыдов А.С. *Солитоны в молекулярных системах.* Киев. Наукова думка, 1984, 282 с. [Davydov A.S. *Solitons in molecular systems.* Kyiv. Naukova Dumka, 1984, 282p. (In Russ.)].
3. Alexander D.M., Krumhansl J.A. *Localized excitations in hydrogen-bonded molecular crystals.* *Phys. Rev. B*, 1986, vol. 33, pp. 7172-7185.
4. DelGiudice E., Doglia S., Milani M., Vitiello G. *A quantum field theoretical approach to the collective behavior of biological system.* *Nuclear Physics B251*, 1985, vol. FS 13, pp. 375-400.
5. Бульенков Н.А. Роль модульного дизайна в изучении процессов системной самоорганизации. *Биофизика*, 2005, т. 50, № 5, с. 620-664. [Bul'enkov N.A. The role of modular design in the study of system self-organization processes. *Biophysics*, 2005, vol. 50, no. 5, pp. 620-664 (In Russ.)].
6. Желиговская Е.А., Бульенков Н.А. Стержневые структуры связанной воды: их возможная роль в самоорганизации биологических систем и недиссипативной передаче энергии. *Биофизика*, 2017, т. 62, № 5, с. 837-845 [Zheligovskaya E.A., Bul'enkov N.A. Rod structures of bound water: their possible role in the self-organization of biological systems and non-dissipative energy transfer. *Biophysics*, 2017, vol. 62, no. 5, pp. 837-845 (In Russ.)].
7. Галль Л.Н. *Квантовая биоэнергетика живых клеток и организмов.* VII Съезд биофизиков России, Краснодар, апрель 2023, Тезисы докладов, с. 346. [Gall L.N. *Quantum bioenergetics of living cells and organisms.* VII Congress of Biophysicists of Russia, Krasnodar, April 2023, Abstracts, p. 346 (In Russ.)].
8. Семихина Л.П. *Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях.* Монография, Тюмень, ТГУ, 2006. [Semikhina L.P. *Dielectric and magnetic properties of water in aqueous solutions and biological objects in weak electromagnetic fields.* Monograph, Tyumen, TSU, 2006 (In Russ.)].
9. Галль Л.Н., Максимов С.И., Скуридина Т.С., Галль Н.Р. Низкочастотная индуктивная диэлькометрия – информативный метод для изучения структурирования воды в водных растворах. *Научное приборостроение*, 2016, т. 26, № 1, с. 19-24 [Gall L.N., Maksimov S.I., Skuridina T.S., Gall N.R. Low Frequency inductive dielcometry – informative method for the study of the structuring water in aqueous solutions. *Nauchnoe Priborostroenie*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 26-33, doi: 10.18358/np-26-1-i2633 (In Russ.)].
10. Галль Л.Н., Бердников А.С., Галль Н.Р., Максимов С.И., Галль И.Р. Структурные изменения и появление элементных пиков в низкочастотных спектрах диэлькометрического поглощения разбавленных водных растворов электрлитов. *ЖФХ*, 2022, т. 96, № 7, с. 983-988 [Gall L.N., Berdnikov A.S., Gall N.R., Maksimov S.I., Gall I.R. Structural changes and the appearance of elemental peaks in low-frequency spectra of dielcometric absorption of dilute aqueous solutions of electrlites. *ZhFH*, 20223, vol. 96, no. 7, pp. 983-988, doi: 10.31857/S0044453722070135 (In Russ.)].
11. Хохлова Л.П., Бочкарева М.А. Водный обмен растений: итоги ЯМР исследований. *Ученые записки Казанского государственного университета*, 2009, т. 151, № 4, с. 73-103. [Khokhlova L.P., Bochkareva M.A. Water exchange of plants: results of NMR research. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, vol. 151, no. 4, p. 73-103 (In Russ.)].

**TWO FORMS OF WATER STRUCTURING IN THE PROTOPLASM OF LIVING CELLS AND THEIR
ROLE IN BIOENERGETICS****Gall L.N.¹, Kuleshova T.E.^{1,2}, Gall I.R.¹**¹Institute for Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences
*Ivan Chernykh str. 31-33, St. Petersburg, 198095, Russia; e-mail: lngall@yandex.ru*²Agrophysical Research Institute*Grazhdansky Prospekt 14, St. Petersburg, 195220, Russia*

Received 20.07.2023. DOI: 10.29039/rusjbp.2023.0616

Abstract. The article describes experimentally confirmed peculiarities of the state of water in the cytoplasm of living plant cells, and offers a compelling explanation of its role. Under the “state of water” we mean structural organization of the water component of a cell’s cytoplasm, which largely determines physical and chemical properties of water and its role in bioenergetics’ mechanisms of living systems. Studying the aquatic environment of a living cell shows that it is organized according to two different mechanisms. The first one is a continual mobile liquid state, locally stressed by cell organelles, biopolymers and ions dissolved in the aquatic environment of the cytoplasm, mainly Na⁺ and K⁺. The second one is inactive, corresponding to self-organization of water molecules on the hydrophilic centers of biopolymers into fractal-like energy-intensive rod structures, predicted by Bul'enkov's theory. This form of water structuring is the basis for the formation of the molecular water system in any living organism – bioenergetics’ main material element. In the current study, existence of both types of water structuring in living plant cells was determined by an experiment with chlorophytum leaves which were observed under conditions of artificial drought. The experiment was carried out with the use of L-dielcometry method.

Key words: *cell protoplasm, water structuring, bioenergetics, L-dielcometry, artificial drought.*