

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ

*Г.Е. Рязанова, Н.В. Рязанцев*

В процессе гидрохимического анализа природной воды методом прямой контактной кондуктометрии впервые обнаружено явление незатухающих колебаний удельной электропроводности. Предложена методика определения удельной электропроводности в нестандартных условиях. Обсуждены возможные причины возникновения колебательного процесса.

*Ключевые слова:* Гидрохимический анализ, удельная электропроводность, кондуктометрия, незатухающие колебания, биологическая мембрана, система хищник–жертва.

...И жизнь – повсюду, жизнь в материи самой.  
В глубинах вещества от края и до края  
Торжественно течет в борьбе с великой тьмой,  
Страдает и горит, нигде не умолкая.

*А.Л. Чижевский*

Для гидрохимического анализа природных вод важно измерение различных параметров, в том числе удельной электропроводности (УЭП) воды.

Впервые наблюдаемый эффект зафиксирован нами в ходе работы по определению пригодности для искусственного рыборазведения одного из прудов, находящихся на территории учебного научно–производственного комплекса «Агроцентр» Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова. При проведении эксперимента по определению УЭП воды пруда «Агроцентра» методом прямой контактной кондуктометрии измерения осуществлялась с помощью кондуктометра-концентраметра «Анион–7020» (Новосибирск), измерительный элемент которого представлен ячейкой Кольрауша с разностью потенциалов между электродами в 1 В (для данного прибора), частотой импульсов 500 Гц и скважностью 2. После аномально жаркого лета 2010 года мы зафиксировали новое необычное явление. Показания УЭП прудовой воды не были постоянными. Они периодически изменялись

через интервал времени 1...2 с и представляли собой незатухающие колебания с практически постоянными минимальными значениями УЭП около 1000 мкСм/см и хаотически изменяющимися максимальными значениями порядка 2500...6000 мкСм/см. Для фиксации непрерывно изменяющихся показаний прибора нами была применена видеосъемка его экрана.

Видеозаписи колебаний УЭП и построенные по ним графики зависимости УЭП от времени показали, что характер колебаний УЭП одной и той же пробы прудовой воды, измеренной с интервалом 2 месяца (ноябрь 2010, январь 2011), различен. Возросла амплитуда колебаний и их детерминированность (рис. 1).

Наш эксперимент показал, что колебания УЭП характерны только для воды пруда «Агроцентра». Значения УЭП водопроводной воды, вод четырех родников разных районов Саратовской области («Белый ключ», «Шелковичный», «Алексеевский», «Лысогорский»), а также воды из бассейна Волгоградского водохранилища в окрестностях села Усовка Воскресенского района Саратовской области и Алексеевских прудов Ленинского района Саратова, оказались стабильными.

Обнаруженный эффект является препятствием в практике определения электропроводности природных вод, так как не дает возможность измерить УЭП и определить соответствующую ей величину общей минерализации.

Необходимо было решить проблему определения УЭП при наличии колебательного процесса. Мы предположили, что наблюдаемый эффект не связан с величиной общей минерализации, а является отражением метаболических процессов микрофлоры воды пруда. Для проверки биогенного происхождения колебаний электропроводности нами проведен ряд экспериментов. Прежде всего мы предприняли попытку устранить колебания УЭП с помощью инактивации водных организмов. Для этого мы прокипятили анализируемую воду в течение пяти минут. После кипячения воду охладили и повторили измерение УЭП. Прибор показывал постоянное значение УЭП без каких-либо колебаний показаний кондуктометра. Изучая свойства наблюдаемой системы, мы установили, что колебания УЭП наблюдаются только в определенном интервале температур примерно +12...+23 °С и прекращаются при более низких и более высоких температурах.

Кроме того, мы предположили, что на колебания УЭП влияет численность микроорганизмов воды пруда и концентрация в ней их метаболитов. Для проверки этого предположения мы произвели разбавление прудовой воды дистиллированной. Установлено, что разбавление на 10% не оказывает никакого влияния на колебательный процесс. Измерение УЭП прудовой воды при разбавлении на 20, 30, 40 и 50% продемонстрировало полное отсутствие колебания показаний кондуктометра.

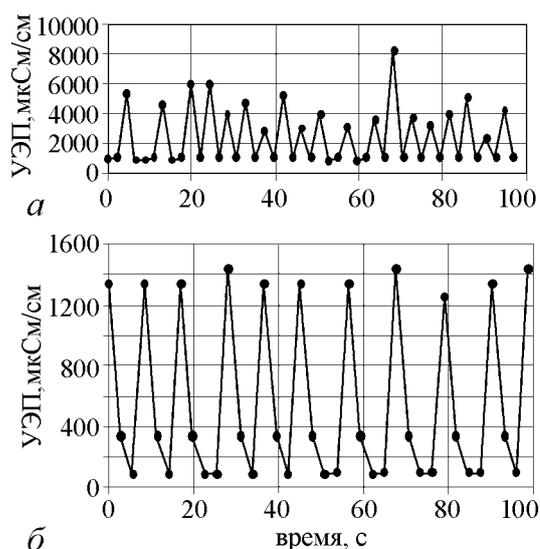


Рис. 1. Динамика зависимости удельной электропроводности прудовой воды от времени: а – измерения от 15.11.2010; б – от 15.01.2011

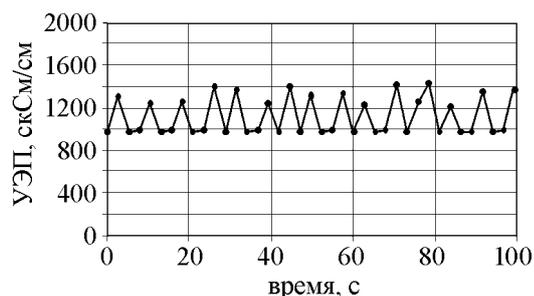


Рис. 2. График колебаний удельной электропроводности искусственной водной среды

Проверку выдвинутого предположения происхождения флуктуаций электропроводности мы продолжили с помощью микробиологического анализа пробы. Проведенное определение общего микробного числа (ОМЧ) воды пруда «Агроцентра» показало значительное содержание микроорганизмов, составляющее 10816 клеток в 1 мл прудовой воды. Преобладающей морфологической формой являются грамположительные спорообразующие клетки (60%). В то же время ОМЧ водопроводной воды составило 5 микробных клеток в 1 мл пробы с доминирующей морфологической формой неспорообразующих палочек (90%).

Обнаружение значительного количества бактерий в воде пруда «Агроцентра» является показателем загрязнения водоема органическими веществами. Об этом свидетельствует также увеличение перманганатной окисляемости прудовой воды в 2010 году, почти в два раза по сравнению с 2009 годом на фоне уменьшения содержания фосфатов в два раза и незначительно изменившихся концентраций остальных ионов.

Для более глубокого обоснования выдвинутого предположения, объясняющего наблюдаемое явление колебаний УЭП, нами поставлен опыт по созданию искусственного микробиологического гидроценоза. Искусственная среда представляла собой упрощенную модель естественного водоема. В аэробных условиях колбы находилась проба верхнего горизонта почвы, содержащего значительное количество микроорганизмов и питательных веществ, залитая водопроводной водой в объемном соотношении 1:8. В ходе мониторинга УЭП полученной системы зафиксировано возникновение колебаний, аналогичных колебаниям УЭП воды пруда «Агроцентра» (рис. 2), только через 6 месяцев с начала эксперимента.

На основании полученных результатов разработано несколько вариантов решения проблемы определения электропроводности природных вод в условиях наличия колебательных процессов

- Охлаждение до температуры ниже пороговой. Для этого нужно установить область температур, в которой наблюдаются колебания, и работать вне этой области.
- Инактивация водной микрофлоры с помощью кипячения. Применение методики требует учета изменения в ионном составе воды, связанные с переходом в нерастворимые соединения солей карбонатной жесткости и нарушением строения коллоидных частиц.
- Разбавления пробы дистиллированной водой. Методика предполагает введение поправочного коэффициента, пропорционального степени разбавления.

### Обсуждение результатов

Результаты проведенного эксперимента выявили нестандартное поведение системы раствора природного электролита при определении его электропроводности. Осмысление наблюдений поставило перед нами ряд сложных вопросов на стыке химии, физики, биофизики, микробиологии, синергетики.

Анализ литературных источников по возникшей проблеме выявил отсутствие описания наблюдений, аналогичных зафиксированным нами.

Обширный исторический обзор изучения физико-химических периодических явлений в процессах жизнедеятельности организмов различных уровней сложности сделали Ф.М. Шемякин и П.Ф. Михалев [1]. Они проанализировали также результаты наблюдений периодических процессов, возникающих при подведении электрического тока на катоде или аноде в искусственных системах с определенными концентрациями известных реагентов.

Ю.Б. Шауб с сотрудниками исследовал влияние различных факторов (глубина, наличие течения и др.) на флуктуации электропроводности морских вод. Однако колебательный процесс при определении электропроводности не был зафиксирован [2].

В работе последователей А.Л. Чижевского установлена корреляция между солнечной активностью, выраженной в числах Вольфа, и электропроводностью дистиллированной воды, что важно для живых организмов, в которых вода является одной из основных составляющих. Биохимия клеток, в первую очередь, определяется электрохимическими реакциями в водных растворах [3,4]. Получены данные о наличии определенной ритмики в общем хаотическом характере флуктуаций электропроводности в зависимости от времени года [5,6].

В.В. Калинин и А.В. Казак [7,8] разработали методику измерения электропроводности поверхностных природных вод. Методика предполагает унификацию характеристик измерительных приборов для возможности сопоставления результатов различных авторов. Разработанная схема измерительного устройства для определения электропроводности природных вод допускает его серийное производство. Однако проблема, связанная с наличием колебательного режима при определении электропроводности, перед авторами не возникала.

Изложенные выше данные позволяют сделать вывод, что мы обнаружили колебательный процесс изменения электропроводности природной воды, связанный с явлением самоорганизации [9–13], проявившей себя в виде незатухающих колебаний.

Явление детерминированного хаоса для открытой системы прудовой воды возможно при определенных условиях. К таким условиям в диссипативной системе природной воды, далекой от термодинамического равновесия, относятся следующие факторы: температура; определенное число обитающих в воде микроорганизмов; достаточная концентрация органических веществ, являющихся питательной средой для микроорганизмов; присутствие веществ белковой природы, являющихся продуктами метаболизма водной биоты; наличие полиэлектролитов и высокомолекулярных соединений, подверженных воздействию электромагнитных полей (электрофорез и адсорбция).

Мы предположили, что колебательный режим электропроводности природной воды может быть связан с проявлением жизнедеятельности микроорганизмов в условиях стресса, возникшего под действием электрического тока кондуктометра.

Современные представления о биофизике живой клетки и биофизике мембран представлены в работах М.В. Волькенштейна, Ю.А. Владимирова, В.Ф. Антонова, А.Г. Пасынского, Ю.А. Чизмадзева, С.Э. Шноля, в трудах института биологической физики АН СССР и РАН [14–22].

В 1950-е годы представление о существовании клеточных мембран описывали Л.М. Чайлахян и его единомышленники [23]. В настоящее время представления о функциях мембран стали глубоко аргументированными, но многие тонкие детали их функционирования еще требуют выяснения [24].

М.В. Волькенштейн [25] отмечает, что биологическая система не только может, но и должна быть колебательной. Это – результат длительной эволюции. За время эволюции устойчивые системы уравновесились, стали частью природы, а неустойчивые системы распались. Могли сохраниться только открытые системы, далекие от равновесия, внутренние движения которых имеют колебательную природу. В таких системах вероятно возникновение динамического порядка, новых типов организации в пространстве и времени. Особый интерес представляют возбудимые мембраны.

Обнаруженные нами колебания электропроводности могут быть проявлением взаимодействия системы со средой. Внешнее воздействие оказывается фактором внутренней самоорганизации системы.

Нами предпринята попытка объяснения наблюдаемого колебательного процесса УЭП с точки зрения современных представлений теории электропорации – теории создания пор в бислоидной мембране под действием электрического тока. Электропорация основана на способности мембраны концентрировать электрическое поле. Клеточная мембрана является очень сложной системой, выполняющей барьерную функцию с помощью бимолекулярного слоя фосфолипидов, находящегося в жидкокристаллическом состоянии, который является диэлектриком.

Фосфолипидный бислой пронизан белками, выполняющими роль селективных  $Na^+ - K^+$ ,  $H^+$ ,  $Ca^{2+}$  каналов (насосов) для ионов и метаболитов. Еще в середине XX века установлено, что клеточные мембраны способны время от времени менять свою проницаемость для ионов натрия и калия, а в ряде случаев мембрана некоторых клеток может выступать в роле периодически действующего физико-химического генератора. Управляющие этим явлением вещества изучены недостаточно, однако предполагается, что наблюдаемые колебания связаны с колебаниями концентрации этих веществ. Ионный ток является непрерывной функцией мембранного потенциала. За счет активного транспорта через биологические мембраны создаются градиенты концентраций и электрических потенциалов, давления, которые удерживают организм в неравновесном состоянии, оптимальном для жизненных процессов [14].

Под влиянием значимых внешних воздействий (например, электрический ток) возникает стрессовое состояние клетки, при котором могут возникать дефекты типа сквозных пор [17–20]. Специфическое воздействие электричества на мембрану микроорганизмов навязывает живой системе определенное функционирование. В нем проявляется борьба за жизнь микроорганизмов, которые в стрессовых условиях начинают вести себя по закону «все или ничего». Возникает изменение ионной симметрии, противоестественный механизм выхода из клетки ионов  $K^+$  и входа ионов  $Na^+$ , что приводит к изменению внутриклеточной концентрации ионов  $Na^+$  и  $K^+$  [16]. Происходит перезарядка мембранного потенциала, возникновение потенциала действия, увеличение электропроводности [15]. В этих условиях на мембране клетки возникают сквозные поры, которые под действием сил поверхностного натяжения и метаболических процессов могут затягиваться и мембрана остается целой. Результатом этого является восстановление на мембране исходного потенциала покоя, характерного для нее в отсутствие стресса.

Однако, если величина внешнего напряжения превысит величину потенциала пробоя, возникает явление самопробоя и биологическая гибель клетки [21, 22].

Возможно, наблюдаемые нами колебания электропроводности являются аддитивным отражением предпробойных процессов. Зафиксированные колебания являются незатухающими. Это свидетельствует о том, что электрическое воздействие (пробой мембраны) не приводит к возникновению незалечивающихся пор.

Наблюдаемое явление, вероятно, можно трактовать как модель «хищник–жертва». В качестве хищника выступает электрический ток, воздействие которого на мембраны микроорганизмов приводит к изменению характера метаболизма, а в качестве жертвы – живые микробные клетки, которые включают потенциал действия, чтобы восстановить исходное состояние в борьбе за жизнь [26].

Проблема изучения обнаруженного при измерении электропроводности природной воды колебательного процесса находится на стыке нескольких наук. Установление механизма этого процесса требует проведения дополнительных совместных исследований химиков, физиков, биологов, микробиологов, математиков.

### Заключение

В работе впервые представлены экспериментальные результаты обнаружения незатухающих колебаний электропроводности природной воды, являющихся препятствием при определении ее общей минерализации и засоленности. Высказаны предположения, что наблюдаемый эффект является отражением метаболических процессов водной микрофлоры пруда, которое обсуждено в аспекте теории электропорации. Предложена методика определения электропроводности природной воды в нестандартных условиях, основанная на устранении причины возникновения колебательного процесса.

### Библиографический список

1. *Шемякин Ф.М., Михалев П.Ф.* Физико-химические периодические процессы. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938.
2. *Шауб Ю.Б.* Кондуктометрия. Владивосток: Изд-во Дальнаука, 1996.
3. *Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976.
4. *Агеев И.М., Шишкин Г.Г.* Корреляция солнечной активности с электропроводностью воды // Биофизика. 2001. Т. 41, № 5. С. 829.
5. *Ермилов В.И., Лучков М.Н.* Годовые и более короткие циклы колебаний электропроводности водных сред. Иваново: Деп. в ВИНТИ 20.07.2004, № 1270. В. 2004.
6. *Ермилов В.И., Лучков М.Н.* Взаимосвязь флуктуаций изолированных водных растворов хлорида натрия. Иваново: Деп. в ВИНТИ 13.04.2004, № 604 В. 2004.
7. *Калинин В.В., Казак А.В.* Методика измерения электропроводности поверхностных природных вод. Основы теории // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2008, № 2. С. 58.
8. *Калинин В.В., Казак А.В.* Методика измерения электропроводности поверх-

- ностных природных вод. Результаты эксперимента // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2008, № 3. С. 48.
9. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Едиториал УРСС, 2003.
  10. Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2002.
  11. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Синергетика как новое мировоззрение: Диалог с И. Пригожиным // Вопросы философии. 1992. № 12. С. 3.
  12. Рузавин Г.И. Проблемы простого и сложного в эволюции наук // Вопросы философии. 2008. № 3. С. 102.
  13. Капица С.П., Курдюмов С.П. Синергетика и прогнозы будущего. М.: Едиториал УРСС, 2003.
  14. Антонов В.Ф. Биофизика. М.: ВЛАДОС, 2003.
  15. Пасынский А.Г. Биофизическая химия. М.: Высшая школа, 1968.
  16. Шноль С.Э. Физико-химические факторы биологической эволюции. М.: Наука, 1979.
  17. Абидор И.Г., Аракелян В.Б., Пастушенко В.Ф., Тарасевич М.Р., Черномордик Л.В. Электрический пробой липидной бислоидной мембраны // Док. АН СССР. 1978. Т. 240. С. 733.
  18. Антонов В.Ф. Мембранный транспорт // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 6. С. 14.
  19. Биофизика мембран. Ионные каналы и их модели / Под ред. акад. П.Г. Костюк. М.: Изд-во АН СССР, 1982. Т. 2.
  20. Антонов В.Ф. Липидные поры: Стабильность и проницаемость мембран // Соросовский образовательный журнал. 1998, № 10. С. 10.
  21. Чизмаджев Ю.А., Аракелян В.Б., Пастушенко В.Ф. Биофизика мембран. М.: Наука. 1981.
  22. Владимиров Ю.А. Биомембраны и незапрограммированная смерть клетки // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 9. С. 2.
  23. Либерман Е.А., Чайлахян Л.М. О природе потенциала действия // Биофизика. 1959. Т. 4, вып. 5. С. 622.
  24. Бржестовский П.Д. Архитектура рецептор-управляемых ионных каналов биологических мембран // Биофизика. 2011. Т. 56, вып. 1. С. 62.
  25. Волькенштейн М.В. Биофизика. М.: Наука, 2003.
  26. Трубецков Д.И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 2. С. 69.

Саратовский государственный  
аграрный университет им. Н.И. Вавилова

Поступила в редакцию 20.09.2011

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CONTINUOUS VIBRATIONS IN ELECTROCONDUCTIVITY OF NATURAL WATERS

*G.E. Ryazanova, N.V. Ryazantsev*

In the process of hydrochemical analysis of natural waters by the direct contact conductometry method the phenomenon of continuous vibrations in specific electroconductivity was discovered for the first time. The possible reasons of the appearance of the vibration process are discussed.

*Keywords:* Hydrochemical analysis, specific electroconductivity, conductometry, continuous vibrations, biological membrane, predator–prey model.

*Рязанова Галина Евгеньевна* – окончила химический факультет СГУ (1958). Кандидат химических наук (1968), доцент (1971). В настоящее время доцент кафедры химии, агрохимии и почвоведения СГАУ им. Н.И. Вавилова. Почетный профессор СГАУ (2001), почетный работник высшего профессионального образования РФ (2009). Область научных интересов – полярнографическое изучение органических реактивов, динамика физико-химических и агроэкологических свойств природных объектов, философские вопросы химии, технология преподавания химии. Автор более 150 публикаций, в том числе монографии «Пространство и время химического движения» (1984, в соавторстве); 30 учебных пособий, в том числе 4 учебных пособий с грифом УМО РФ по агрономическому и агроэкологическому образованию (2003, 2006, 2007, 2009); двух компьютерных обучающих и контролирующих программ (2006, 2007) для вузов сельскохозяйственного профиля. Лауреат Всероссийской выставки-презентации изданий РАЕН «Золотой фонд отечественной науки» (М., 2011).



410012 Саратов, Театральная пл., 1  
Саратовский аграрный университет им. Н.И. Вавилова  
E-mail: ryazanovage@sgau.ru

*Рязанцев Никита Валерьевич* – родился в 1991 году. Окончил среднюю школу Саратова (2009). В настоящее время студент 3 курса агрономического факультета Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова. Победитель областного конкурса Министерства образования Саратовской области «Студенческая наука 2010» в номинации «Естественные науки и медицина».



410012 Саратов, Театральная пл., 1  
Саратовский аграрный университет им. Н.И. Вавилова  
E-mail: ryaznikval@mail.ru