

АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПРЕСНОМ ЛЬДУ

© 2012 Г. С. Бордонский, С. В. Цыренжапов, Ю. В. Харин

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, ул. Недорезова 16а, 672014 Чита, Россия

Поступила в редакцию 18.10.2011 г.

Аннотация. Выполнены измерения электродвижущей силы (ЭДС), возникающей в ледяных структурах под воздействием механических напряжений. Обнаружено возникновение периодической ЭДС в пресном монолитном льду. Экспериментальные данные позволяют предположить, что электрические автоколебания связаны с акустоэлектрическим эффектом. Он возникает при пластической деформации кристаллов льда при их течении по базисным плоскостям.

Ключевые слова: лед, акустоэлектрический эффект, пластическая деформация, автоколебания.

ВВЕДЕНИЕ

Лед, являясь протонным полупроводником [1], обладает рядом особых электрических свойств. Например, при замерзании на границе лед — вода возникает значительная разность потенциалов [2]. При освещении образцов из льда светом меняется его проводимость [1], в случае загрязненного льда в нем возникает ЭДС при появлении градиентов температуры [3] и т. д. В работе [4] приведены результаты изучения особенностей ЭДС, возникающей вследствие воздействия на лед механических напряжений, — «псевдопьезоэффекта». Механизм возникновения псевдопьезоэффекта связан с миграцией ориентационных (L- и D-) дефектов под действием неоднородных механических напряжений [4]. Эффект зависит от характера механических напряжений, вида примесей и концентрации дефектов.

В наших исследованиях с замороженными в ледяной покров пресного озера электродами, изготовленными из одинакового металла и расстоянием между ними ~ 0.1 м, были обнаружены электрические потенциалы порядка 0.1 В. Они заметно изменялись при механическом воздействии на лед, например, при движении вблизи установленных электродов транспортных средств. Последующие измерения неожиданно выявили периодический характер возникающей ЭДС, которая по форме напоминала меандр. Следует отметить, что в [5] также были обнаружены периодические импульсы низкочастотного излучения, однако они возникали при росте льда из жидкой фазы.

Импульсные электромагнитные излучения с частотой до единиц мегагерц ранее изучались при хрупком разрушении льда, например, при торшении ледяных полей [6].

В наших исследованиях, однако, ЭДС была обнаружена в монолитном льду без признаков его разрушения, явно выраженных градиентов механических напряжений и фазовых превращений воды в лед. Возникновение электродвижущей силы внутри объектов и на границах с другими телами необходимо учитывать при разнообразных электрических измерениях мерзлых сред, а также при определении электрических и электрохимических явлений на поверхности твердых включений и конструкций при их контакте со льдом. Поэтому изучение особенностей электрических явлений в ледяных структурах представляет интерес для многочисленных приложений.

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование особенностей переменной ЭДС в ледяных структурах с целью уточнения механизма ее возникновения. Измерения проведены для двух объектов: природного ледяного покрова озера и лабораторного образца, образованного при замораживании воды в холодильнике. При этом было обращено внимание на влияние механических напряжений на изучаемый эффект.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент с ледяным покровом проведен на неглубоком пресном водоеме Забайкальского края — озере Арахлей, расположенном на Яблоновом хребте на высоте около 1 км над уровнем

моря. Минерализация вод озера приблизительно равна 120 мг/л, вода — гидрокарбонатная натриево-кальциевая. Озеро имеет вытянутую форму с размерами 10 км на 5 км и глубиной до 22 метров. Минерализация льда ~ 2—3 мг/кг.

В начале зимнего периода 2008—2009 гг. под тонкий лед (при его толщине около 40 см) устанавливалась система электродов для измерения ЭДС и четыре терморезистора для контроля распределения температуры по высоте (рис. 1). Система электродов состояла из центрального электрода (1) и шести электродов ($p1—p6$), расположенных на расстоянии 10 см от центрального и ориентированных по линиям перпендикулярным друг другу, как в горизонтальной плоскости, так

и по высоте. Центральный электрод был установлен на глубину 65 см. Терморезисторы устанавливались на глубину от 5 см до 50 см от верхней границы ледяного покрова. Электроды представляли собой графитовые пластины размерами $15 \times 10 \times 5$ мм³. Выводы от них изготовлены из тонкого медного провода во фторопластовой изоляции. Место контакта провода и пластины покрывалось лаком для изоляции ото льда. Использование электродов одинакового химического состава позволяет исключить электрохимические явления при измерениях потенциалов в замкнутой цепи. Датчики устанавливались в западной части озера на расстоянии 1 км от береговой линии. После вморзания датчиков в ледяной покров выполнялись измерения электродвижущей силы относительно центрального электрода. Толщина льда в конце марта достигала 140 см, а снежного покрова ~ 10—20 см.

Для регистрации сигналов использована многоканальная система сбора данных фирмы Agilent Technologies и ноутбук. Запись всех сигналов в каналах проводилась с периодичностью 1 с, что позволяло регистрировать переменную ЭДС в спектре с верхней частотой до 0,5 Гц. Приборы питались от аккумуляторных батарей и функционировали в автономном режиме.

Были выполнены отдельные измерения в разные месяцы, а также в течение нескольких суток перед началом таяния льда. Кроме того, выполнены лабораторные измерения ЭДС с использованием вмороженных в лед медных и позолоченных электродов. В этом случае лед получали в пластиковом стакане объемом 250 мг при температурах $-20—50$ °С. После замораживания воды образец нагревали за время около 15 минут до температуры -1 °С. Далее, снова охлаждали образец до -20 °С за время около 10 минут. Относительно быстрые температурные изменения приводили к неоднородным напряжениям во льду из-за переменных градиентов температуры в среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В середине февраля 2009 года ЭДС в системе электроды — лед имела значение около 1 мВ. Температура воздуха днем в это время опускалась ниже -20 °С, а в ночное время ниже -30 °С (температура льда около электродов составляла приблизительно -10 °С).

В конце марта значение ЭДС на электродах достигало ± 50 мВ при температуре льда -3 °С. Наименьшее значение (приблизительно в два раза)

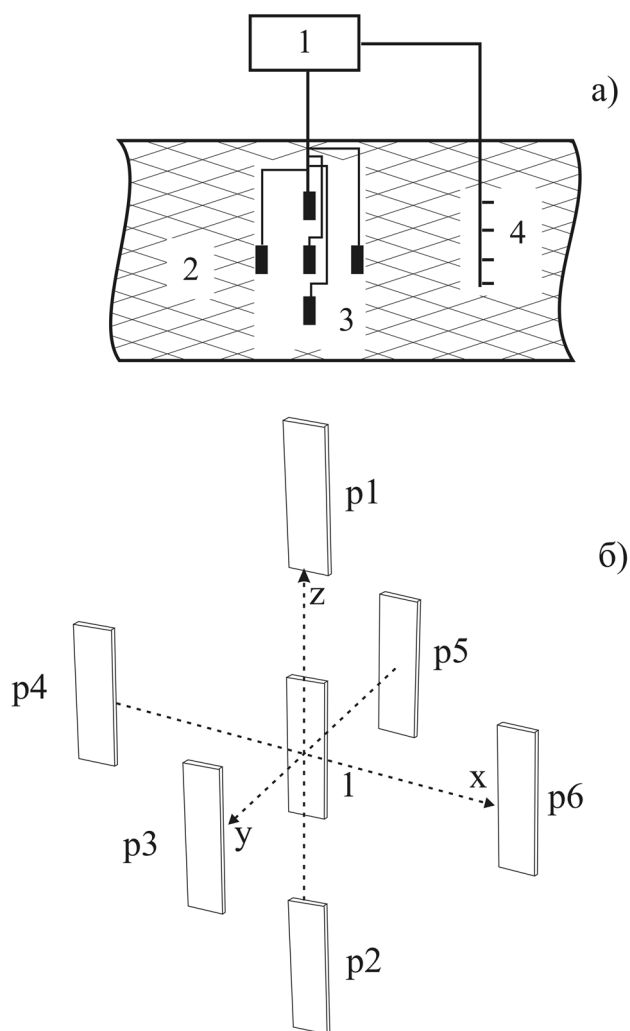


Рис. 1. *a* — Схема экспериментальной установки: 1 — система сбора информации, 2 — ледяной покров, 3 — система электродов; 4 — датчики температуры; *б* — Расположение электродов (в трех измерениях x, y, z), 1 — центральный электрод; $p1, p2$ — электроды, расположенные в вертикальной плоскости; $p3—p6$ — в горизонтальной плоскости

наблюдалось на электроде (p_1), расположенным выше центрального электрода. Характерной особенностью зависимости напряжения от времени в конце марта является нерегулярный характер его изменения, регистрируемый используемой аппаратурой в полосе частот 0—0,5 Гц (рис. 2). Полярность ЭДС различается на противоположных электродах ($p_1—p_2, p_3—p_5, p_4—p_6$). По мере роста температуры льда на записях электрического сигнала появилась периодичность, причем период колебаний стал расти; 03.04.2009 он достиг ~4 минут. Эволюция изменения характера ЭДС с 29 марта по 6 апреля представлена на рис. 2 для одного из электродов, расположенного в горизонтальной плоскости. 9 апреля, когда ледяной покров стал проницаем для воды по порам, пульсации ЭДС практически исчезли, однако наблюдали ее градиент по высоте покрова.

Были выполнены лабораторные измерения ЭДС в образце льда, приготовленного путем замораживания дистиллированной воды в тонкостенном пластиковом стакане с небольшими медными электродами.

Измерение ЭДС в данном случае осуществляли с интервалом времени 0,2 с. В холодильной камере задавали изменения температуры в интервале от 0 °С до –65 °С за время порядка 10 минут. В этих экспериментах также наблюдали пульсирующий сигнал с периодом ~1 минуты, изменяющимся во времени. Размах ЭДС составлял значение ~ 4 мВ. В другом лабораторном эксперименте с позолоченными штыревыми электродами диаметром

1,5 мм наблюдали период колебаний около 1 с. Наблюдали также редкие сигналы пилообразного вида большой длительности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаруженные осцилляции электрических сигналов в пресном льду регистрировались также и другими исследователями. Как отмечено выше, в ранее выполненных работах изучался рост кристаллов льда, и одновременно регистрировалось переменное электрическое поле вблизи образца. В экспериментах наблюдались периодические выбросы электрического поля с характерными частотами до единиц килогерц [5]. Эти импульсы авторы объясняли скачкообразным ростом ледяных кристаллов.

В нашем эксперименте, однако, роста кристаллов не наблюдали, т.к. ледяной покров сформировался и находился при отрицательных температурах. Зарегистрированные сигналы в электрически симметричной системе весьма необычны. Действительно, в случае расположения электродов в ледяном покрове, т.е. в системе со слабыми температурными эффектами сжатия-растяжения льда и отсутствии градиентов температуры, а также неоднородных напряжений в горизонтальных слоях, заметные электрические эффекты не должны были возникать. Появление ЭДС указывает на то, что в системе имеет место определенного вида асимметрия. Поскольку обнаружена переменная ЭДС, то асимметрия каким-то образом должна быть связана с динамическими явлениями.

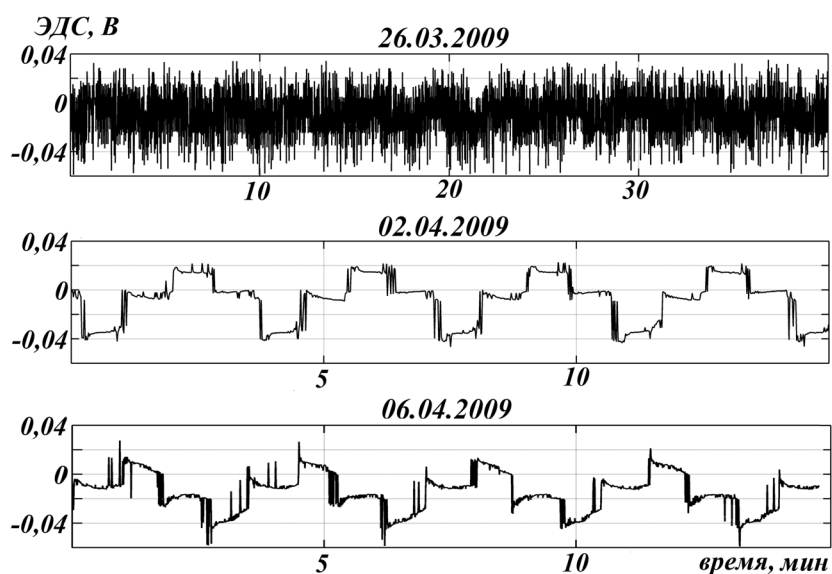


Рис. 2. Изменение характера записей ЭДС для электрода p_1 : выборки в близкое время суток в разные дни измерений с 26.03 по 06.04.2009

Для объяснения наблюдаемых эффектов было высказано следующее предположение, основанное на двух особенностях ледяных структур. Во-первых, некоторая начальная асимметрия может возникать в процессе роста кристаллов льда в ледяном покрове, которая связана с определенной преимущественной пространственной ориентацией кристаллических осей. Во-вторых, возникшая структурная анизотропия может проявиться при динамическом процессе — течении (пластической деформации) среды под действием механических напряжений. Второе предположение — о связи электрических явлений с пластической деформацией, насколько нам известно, другими авторами не рассматривалось. В работах гляциологов экспериментально установлено, что кристаллы льда обладают анизотропией и нелинейностью механических свойств, при относительно малых нагрузках. Кристаллы льда наиболее легко деформируются, сдвигаясь вдоль базисных плоскостей кристалла [1, 2], причем имеет место нелинейная связь механических напряжений и деформации с появлением области отрицательной производной для данной функциональной зависимости. Поэтому при некотором значении напряжения происходит резкое изменение размеров кристалла со сбросом механических напряжений. В такой системе имеет место отрицательная дифференциальная вязкость, что может приводить к неустойчивости в среде и возникновению автоколебаний [7, 8].

Для подтверждения данного предположения были выполнены дополнительные измерения деформации льда с помощью специального датчика в виде стального тросика, соединенного с пружиной и закрепленного в натянутом состоянии между двумя точками ледяного покрова на расстоянии три метра. Деформацию регистрировали по изменению электрического сопротивления высокоточного переменного резистора, ось которого через рычаг соединялась с концом тросика, соединенного с пружиной. Эти измерения выявили в некоторые моменты времени скачкообразные деформации верхнего слоя ледяного покрова — рис. 3. На рисунке приведен график изменений размеров датчика, из которого следует нелинейность локальной деформации ледяного покрова от времени.

Изменение размеров ледяного поля, по видимому, анизотропно и должно зависеть от кристаллической структуры, например, от преимущественной пространственной ориентацией главных оптических осей кристаллов льда (С-оси).

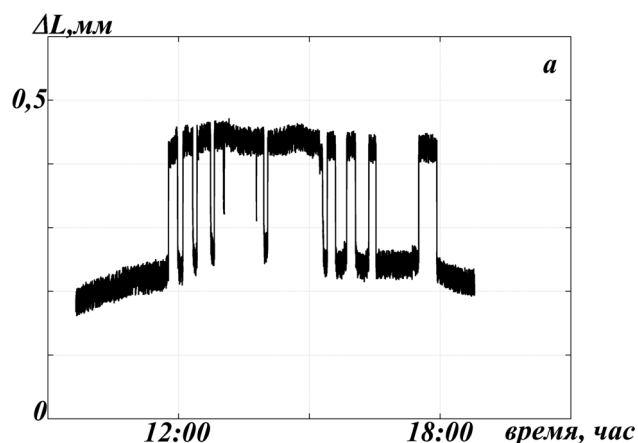


Рис. 3. Результаты измерений деформации (ΔL) верхнего слоя ледяного покрова оз. Арахлей на длине датчика 3 м 12 апреля 2010 г.

Изучение кернов льда вблизи места установки образцов показало, что на глубине установки электродов главные оптические оси кристаллов располагались преимущественно вертикально. Это было установлено по механическому разрушению керна льда. То же подтвердилось и при оптических поляризационных измерениях. Поскольку базисная плоскость кристалла льда перпендикулярна С-оси, имеет место облегченная деформация льда вдоль горизонтальных плоскостей ледяного покрова. Подобная ориентация С-осей в ледяных покровах неглубоких озер известна в гляциологии [9].

Лабораторный эксперимент также подтверждает возникновение пульсирующей ЭДС в среде между двумя одинаковыми по химическому составу электродами. Однако в этом случае, отсутствовала явно выраженная зависимость амплитуды сигнала от температуры. Сам характер сигнала напоминал автоколебания в нелинейной среде. [7].

Полученные экспериментальные результаты позволяют предложить конкретный механизм появления ЭДС в ледяном теле, отличающийся от предложенного в [4], и основанный на особенностях механических свойств льда. Он связан с акустоэлектрическим эффектом, возникающим в кристаллах, в частности, в пленке непьезоэлектрика при воздействии на них акустической волны [10]. Акустоэлектрический эффект заключается в возникновении разности потенциалов в кристаллической среде при распространении в ней акустической волны и увлечении носителей заряда; он появляется также во многих плоских структурах и широко применяется в акустоэлектрических устройствах [11]. Направление электрического поля в среде, т.е. знак измеряемой ЭДС, опреде-

ляется направлением акустической волны. В случае со льдом акустоэлектрический эффект своеобразен, так как он возникает в слоях, вдоль которых имеет место скольжение частей кристалла. В данном случае возникновение ЭДС связывается с появлением продольной акустической волны вдоль базисной плоскости при возникновении пластической деформации кристаллов. Такой эффект в кристаллических телах исследован, например, в работе [12]. Если кристаллы льда ориентированы, то из-за анизотропии их свойств эффект должен быть наиболее выражен по определенным направлениям ледяного тела из-за преимущественной деформации. Из рис. 2 можно сделать заключение, что деформации льда имеют периодический характер, т. е. сигнал имеет различную полярность. Знакопеременная ЭДС может быть объяснена изменением направления генерируемой продольной акустической волной между начальной и завершающей фазами скольжения частей кристаллов по базисным плоскостям из-за изменения направления относительного ускорения слоев. При этом приращение деформации может иметь любой знак, достаточно, чтобы она носила скачкообразный характер.

Представленные графики ЭДС (рис. 2) и деформаций (рис. 3) относятся к разным датам измерений. Кроме того, для достижения большей чувствительности используемого датчика деформации измеряли на участке длиной 3 м, в то время как электроды устанавливали на расстоянии 0.1 м. Однако эти особенности измерений не представляются существенным недостатком, так как нелинейность деформации льда является общим свойством любой ледяной структуры и проявляется всегда. Естественно ожидать, что ее особенности будут зависеть от геометрии объекта, его физико-химических свойств и характера приложенных механических напряжений. Поэтому форма ЭДС оказалась отличающейся для различных опытов. Например, в ледяном покрове наблюдали в некоторые моменты времени, нулевое значение ЭДС. Такое состояние можно объяснить отсутствием генерации акустической волны, которая, возможно, исчезнет при установившемся скольжении слоев кристаллов, и наиболее выражена при начальной и завершающей стадиях скачков деформации. Подобное поведение рассмотрено в [12], где акустический сигнал оказывался предвестником неустойчивой пластической деформации, т.е. возникал в начальной стадии развития ее скачка.

Отметим, что 06.04.2009 при измерениях на ледяном покрове наблюдали и некоторую постоянную составляющую ЭДС. Возможно, что при потеплении и приближении температуры среды к 0 °С из-за появления на электродах некоторого слоя жидкости, возникает ЭДС электрохимической природы (если пленки жидкости различаются на двух электродах). Вместе с тем, не исключается одновременное существование двух механизмов возникновения ЭДС — акустоэлектрического и связанного с миграцией (L и D) дефектов [4] при неоднородных механических напряжениях. Определение соотношения двух механизмов требует специального исследования.

На преобладание механизма акустоэлектрического происхождения переменной ЭДС во льду в наших экспериментах указывает одновременное существование двух особенностей: 1 — скачкообразное изменение ЭДС без плавных переходов; 2 — наличие знакопеременной ЭДС. Если бы имела место миграция заряженных дефектов, то ЭДС изменялась бы плавно с последующим резким падением после снятия механических напряжений при деформации кристаллов. При этом электрическое поле в среде должно было бы упасть до нулевого уровня, при релаксации зарядов, а не изменять направление (т. е. знак ЭДС).

ВЫВОДЫ

В ледяных структурах под действием механических напряжений возникает переменная ЭДС, которую можно объяснить акустоэлектрическим эффектом при пластической деформации, сопровождающейся генерацией продольных акустических волн. Волны возбуждаются при скачкообразной деформации и скольжении частей кристаллов по базисным плоскостям.

Направленная пластическая деформация создает знакопеременную ЭДС вследствие изменения направления акустической волны в начальной и завершающей стадиях деформации кристаллов. Эффект, по-видимому, наиболее выражен для объектов с преимущественным пространственным расположением главных оптических осей кристаллов в ледяной структуре из-за облегченного скольжения по базисной плоскости. Его особенность, в отличие от механизма, предложенного в [4] (где эффект связан с проявлением статических неоднородных деформаций), заключается в возникновении ЭДС при динамических процессах деформации, при которых генерируются акустические волны.

Пластические деформации льда всегда имеют место в ледяных структурах из-за термических напряжений, волновых движений среды и гравитационных воздействий. Поэтому измерение ЭДС, возникающей в разнообразных ледяных телах, может быть использовано для диагностики их состояния и детектирования внешних воздействий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-02-00088а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petrenko V. F., Whitworth R. W.* Physics of ice. Oxford Univ. Press, 2002. 374 p.
2. *Богородский В. В., Гаврило В. П.* Лед. Гидрометеоздат, 1981. 384 с.
3. *Колунин В. С., Колунин А. В.* // Криосфера Земли. 2008. № 3. С. 41.
4. *Евтушенко А. А., Петренко В. Ф.* // ФТТ. 1991. Т. 33. № 5. С. 1509.
5. *Shibkov A. A., Golovin Yu. I., Zheltov M. A., et al.* // J. of Crystal Growth. 2002. V. 236. P.434.
6. *Качурин Л. Г., Григорьев Н. О., Кузин Ю. Н. и др.* // ДАН. 1979. Т. 248. № 3. С. 583.
7. *Мун Ф.* Хаотические колебания. М.: Мир, 1990. 312 с.
8. *Баширцева И. А., Зубарев А. Ю., Исакова Л. Ю. и др.* // Нелинейная динамика. 2009. Т. 5. № 4. С. 603.
9. *Мансфельд Г. Д., Гуляев Ю. В., Косаковская З. Я. и др.* // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 4. С. 649.
10. *Пустовойт В. И.* // УФН. 1969. Т. 97. Вып. 2. С. 257.
11. *Кайно Г.* Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990. 652 с.
12. *Шибков А. А., Золотов А. Е., Желтов М. А.* // ФТТ. Т. 52. Вып.11. С. 2223.

Бордонский Георгий Степанович — д.ф.-мат.н., профессор, зам. директора Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН; тел.: (3022) 354063, e-mail: lgc255@mail.ru

Харин Юрий Владимирович — инженер лаборатории геофизики криогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН; e-mail: HarinJV@mail.ru

Цыренжапов Сергей Васильевич — м.н.с. лаборатории геофизики криогенеза Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН; e-mail: arahley@mail.ru

Bordonskiy George S. — grand PhD (Phys.-Math.), professor, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS; tel.: (3022) 354063, e-mail: lgc255@mail.ru

Kharin Yuri V. — engineer of Geophysics laboratories, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS; e-mail: HarinJV@mail.ru

Tsyrenzhapov Sergey V. — scientific employee of Geophysics laboratories, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS; e-mail: arahley@mail.ru