ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2019, том 59, № 5, с. 666–670

УДК 550.37

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© 2019 г. Л. Б. Безруков[1, *], В. П. Заварзина[1], И. С. Карпиков[1], А. С. Курлович[1], Б. К. Лубсандоржиев[1], А. К. Межох[1], В. П. Моргалюк[2], В. В. Синёв[1]

[1]Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), г. Москва, Россия

[2]Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (ИНЭОС РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: bezrukov@inr.ac.ru

Поступила в редакцию 12.10.2018 г.
После доработки 26.12.2018 г.
Принята к публикации 24.01.2019 г.

Предложена модель, в которой электрическое напряжение, измеряемое между электродами в озере Байкал, является следствием двух эффектов: электрохимических процессов около электродов и тока положительного заряда, текущего через озеро. Электрохимическая компонента напряжения в случае использования свинцовых электродов возникает из-за разности концентраций карбонат-аниона – CO_3^{2-} на разных глубинах. В случае использования хлор-серебряных электродов измеряется только эффект тока положительного заряда, текущего через озеро. Предложена интерпретация зарегистрированного увеличения электрического напряжения в озере Байкал при землетрясении в августе 2008 года, согласно которой наблюдаемый эффект обусловлен выбросом положительно заряженных водородосодержащих газов из земных недр.

DOI: 10.1134/S0016794019040059

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье [Безруков и др., 2018] предложена гидридная модель земного электричества (ГМЭ), в которой ток разряда земного конденсатора проходит через земную кору и достигает отрицательный электрод земного конденсатора, расположенный под корой Земли. Ток заряда земного конденсатора представляет собой струи горячих положительно заряженных водородосодержащих газов, вырывающихся с больших глубин, в основном, в районах рифтов. Таким районом также является озеро Байкал (ниже будем использовать просто слово Озеро).

В состав газов входят положительные ионы этих газов и ион водорода – протон. Проходя через водную толщу, газы частично охлаждаются и растворяются в воде. Таким образом, в водной среде Озера появляются дополнительные протоны, которые являются основными носителями тока в воде. Эти протоны присоединяются к току разряда земного конденсатора. Поэтому в Озере мы можем в одних местах наблюдать ток, движущийся вверх, а в других местах ток, движущийся вниз. Причем, именно в Байкале можно ожидать, что величины этих токов значительно превосходят величины средних токов, текущих в атмосфере. Эти токи должны быть подвержены значительным флуктуациям.

В работах [Коротаев и др., 2011, 2015] экспериментально изучалась вертикальная компонента падения электрического напряжения в озере Байкал. При этом в работе [Коротаев и др., 2011] использовались свинцовые электроды, а в работе [Коротаев и др., 2015] – морские метрологические Ag–AgCl электроды.

Задача данной статьи дать интерпретацию экспериментальным данным из работ [Коротаев и др., 2011, 2015] на основе ГМЭ. В работе [Безруков и др., 2018] также рассматривалась взаимосвязь ГМЭ с землетрясениями. При этом использовались модельные представления о процессах при землетрясениях. Модель ГМЭ вводит понятие избытка положительного заряда в коре Земли в виде протонов, что может приводить к образованию положительно заряженных водородосодержащих газов на глубинах порядка 10 км и, как следствие, к появлению на этих глубинах многочисленных пор и трещин. Последнее наблюдается в сверхглубоких скважинах. Быстрый выход этих заряженных газов на поверхность Земли может сопровождать землетрясение и даже быть его причиной, так как давление газов в порах при этом упадет. Также можно себе представить, что

процесс разряда Земного конденсатора иногда приводит к электрическому пробою на больших глубинах. Этот подземный пробой также может сопровождать землетрясение и даже быть его причиной. Поэтому дополнительной задачей данной статьи является дать объяснение наблюдавшейся в работе [Коротаев и др., 2011] реакции вертикальной компоненты падения электрического напряжения в Озере на землетрясение в августе 2008 г.

2. ПРИРОДА РАЗНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ МЕЖДУ СВИНЦОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

В работе [Коротаев и др., 2011] исследовалась вертикальная компонента напряженности естественного электрического поля. Использовалась подводная установка со свинцовыми электродами, расположенными на вертикальном буйрепе с притопленным буем. Расстояние между электродами составляло $d = 1250$ м. Измерялось электрическое напряжение между электродами.

Известно [Верещагин, 1949], что в воде Озера содержатся анионы Cl^- : 0.7; SO_4^{2-} : 5.0; CO_3^{2-} : 0.6–0.06; HCO_3^- : 63.6; PO_4^{3-} : 0.02–0.06 (первая цифра – концентрация в мг/л на поверхности, вторая – на дне). Из них потенциально значение имеют Cl^-, SO_4^{2-} и CO_3^{2-}, поскольку они при контакте со свинцом образуют на его поверхности труднорастворимые хлорид, сульфат и карбонат свинца – $PbCl_2$, $PbSO_4$ [Михайлов и др., 2008] и $PbCO_3$ [El-Egamy, 1996], обладающие свойствами электродов второго рода, и способны обменивать анионы Cl^-, SO_4^{2-} и CO_3^{2-}. Однако концентрации Cl^- и SO_4^{2-} по всей глубине Озера одинаковы, поэтому электрохимическими процессами с участием $PbCl_2$ и $PbSO_4$ мы можем пренебречь. Наибольший интерес представляет концентрация CO_3^{2-}, т.к. с глубиной она изменяется. Поэтому мы можем полагать, что в эксперименте [Коротаев и др., 2011] имел место случай концентрационного гальванического элемента с карбонатно-свинцовыми электродами второго рода, обменивающего карбонат-анионы CO_3^{2-}

$$PbCO_3 + 2e \leftrightarrow Pb + CO_3^{2-}. \quad (1)$$

При этом водная среда Озера служит ионным мостом, соединяющим полуэлементы: катод К(–) и анод А(+), где К(–): $Pb/PbCO_3$ // А(+): $Pb/PbCO_3$.

В работе [El-Egamy, 1996] изучалась реакция (1) и для нее приведен электродный потенциал для стандартных условий $E_0 = -0.5$ В. Для условий Озера можно пересчитать электродный потенциал при помощи уравнения Нернста. Если не учитывать ток положительного заряда, текущий в Озере, то электродвижущая сила ε концентрационного гальванического элемента с карбонатно-свинцовыми электродами второго рода будет равна разности электродных потенциалов, которые вычисляются из уравнения Нернста:

$$\varepsilon = U_b - U_t = \frac{RT}{nF}\ln\left(\frac{\left[CO_3^{2-}\right]_t}{\left[CO_3^{2-}\right]_b}\right) = 0.028 \text{ В}, \quad (2)$$

где $\left[CO_3^{2-}\right]_t$ – концентрация иона CO_3^{2-} около верхнего электрода, равная 0.6 мг/л;

$\left[CO_3^{2-}\right]_b$ – концентрация иона CO_3^{2-} около нижнего электрода, R – универсальная газовая постоянная 8.31 Дж/(моль К);

F – постоянная Фарадея 96 485.35 Кл/моль;

T – абсолютная температура в К;

n – число электронов, которые участвуют в реакции (в нашем случае для свинца $n = 2$).

В нашей электрохимической ячейке ток J течет вверх через вольтметр и вниз через Озеро. Напишем обобщенный закон Ома для этой замкнутой цепи:

$$JR = \varepsilon - JR_1, \quad (3)$$

где R – входное сопротивление вольтметра, R_1 – сопротивление озера току между электродами.

Известно, что сопротивление между двумя шаровыми электродами с радиусом r, помещенными в бесконечную среду с удельным сопротивлением ρ, равно:

$$R_1 = \rho/2\pi r.$$

Согласно [Русинек и др., 2012] для байкальской среды $\rho = 150$ Ом м. Видно, что R_1 много меньше входного сопротивления вольтметра. Поэтому член JR_1 в (3) мы не будем учитывать в дальнейшем.

Уравнение (2) справедливо для случая одинаковой температуры обоих электродов. Однако на глубине расположения верхнего электрода температура водной среды меняется в течение года в пределах от 2.5 до 5.5°С, а на глубине расположения нижнего электрода температура сохраняется около 3.3°С. Из уравнения (2) видно, что электродвижущая сила концентрационного элемента пропорциональна температуре и изменение температура на 3°С в районе 0°С приводит к изменению электродвижущей силы только приблизительно на 1%. Учет изменения давления с глубиной также не приведет к смещению нашей оценки электродвижущей силы (2), так как вода является несжимаемой субстанцией, и количество молекул воды вокруг электрода с большой точностью не изменится при увеличении давления. Интересным является факт независимости электродвижущей силы от формы и размеров

электродов для электродов с линейным размером больше 1 см (формулы (2), (3) и $R_1 = \rho/2\pi r$). В случае, если электроды были изготовлены из материала одного тигля, собственная разность электродных потенциалов в течение длительной работы не должна превышать 0.5 мВ [Шулейкин, 1968], что значительно меньше значения (2), поэтому в этой статье мы ограничимся оценкой (2).

Теперь перейдем к анализу реальной ситуации. Выше упоминалось, что токи заряда и разряда земного конденсатора протекают через Озеро, обозначим их вертикальную результирующую плотности тока в месте расположения буйрепа $j_{ext}(t)$ и введем в уравнение (3):

$$J_{Pd}R = \varepsilon - j_{ext}\rho, \quad (4)$$

где положительное значение j_{ext} соответствует направлению тока сверху вниз.

Ток j_{ext} в модели ГМЭ может поменять направление в случае выхода из недр большого количества горячих, положительно заряженных газов в районе установки. В этом случае член $j_{ext}\rho d$ поменяет знак.

Экспериментально наблюдаемая в работе [Коротаев и др., 2011] величина $J_{Pb}R$ (см. рис.) перед и после землетрясения составляет ~10 мВ. Из (4) и (2) следует, что для объяснения этой величины, вклад от внешнего тока, текущего вертикально вниз в августе, в Южном Байкале, в 3-х километрах от берега в невозмущенных условиях, должен быть равен:

$$j_{ext}\rho d = 18 \text{ мВ}. \quad (5)$$

Таким образом, наша модель двух источников напряжения: электрохимический источник и движение избытка положительного заряда в водной среде Озера, предсказанного в ГМЭ, позволяет нам из (5) оценить величину вертикальной результирующей плотности тока в месте расположения буйрепа. На момент измерения она оказалась $j_{ext} = 10^{-8}$ А м$^{-2}$. Эта величина значительно больше средней плотности тока, текущего в атмосфере.

Отметим, что наше рассмотрение предсказывает изменчивость измеряемого электрического напряжения в Озере в случае использования свинцовых электродов за счет изменения концентрации карбонат иона в поверхностных слоях Озера из-за дыхания микроорганизмов и за счет фотохимических реакций у водорослей. Также можно ожидать, что измеряемое электрическое напряжение зависит и от изменения концентрации свободных протонов в непосредственной близости от поверхности электродов.

3. ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ИЗМЕРЯЕМОГО МЕЖДУ ХЛОРСЕРЕБРЯНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

В работе [Коротаев и др., 2015] использовались метрологические Ag–AgCl электроды. Как отмечалось выше, концентрации ионов Cl^- в приповерхностных и в придонных слоях Озера равны [Верещагин, 1949]. Поэтому в случае Ag–AgCl электродов концентрационный гальванический элемент не образуется. Уравнение (4) для Ag–AgCl электродов примет вид:

$$J_{Ag}R \approx -j_{ext}\rho d. \quad (6)$$

Знак минус означает, что направление тока J_{Ag} совпадает с направлением тока j_{ext} и имеет обратное направление по сравнению со случаем свинцовых электродов, если отсутствует значительный выход из недр горячих, положительно заряженных газов в районе установки. Наблюдаемая в [Коротаев и др., 2015] нестабильность j_{ext} может объясняться конкуренцией между током тепловых протонов, идущих вниз в районе рассматриваемой установки и нестабильным током горячих газов, поднимающихся вверх, в стороне от рассматриваемой установки. Байкал является активным сейсмическим районом, поэтому выход горячих положительно заряженных газов должен наблюдаться постоянно. Согласно [Коротаев и др., 2015] в течение 2013 года величина $J_{Ag}R$ менялась от 26 до 8 мВ. В августе экспериментальное значение составило J_{Ag} $R = 13$ мВ. Из нашего анализа эксперимента со свинцовыми электродами мы получили оценку (5) для августа 2008 года $j_{ext}\rho d = 18$ мВ.

Видно, что эти значения для j_{ext} ρ d, полученные из данных для свинцовых электродов и из данных в случае хлор-серебряных электродов в рамках нашей модели, близки по величине. Отметим, что ГМЭ предсказывает, что в случае свинцовых электродов измеряемый ток большую часть времени должен быть направлен вверх (3) из-за наличия электрохимической компоненты.

4. РЕАКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В АВГУСТЕ 2008 ГОДА

В работе [Коротаев и др., 2011] было зарегистрировано увеличение напряжения при землетрясении в августе 2008 года, эпицентр которого находился на расстоянии в 16.5 км от буйрепа и на глубине 17 км (см. рис. 1).

Причем увеличение напряжения началось за полсуток до землетрясения с уровня $J_{Pb}R$ ~ 10 мВ, а непосредственно перед землетрясением оно достигло величины в ~37 мВ. Затем в момент землетрясения был зарегистрирован короткий импульс

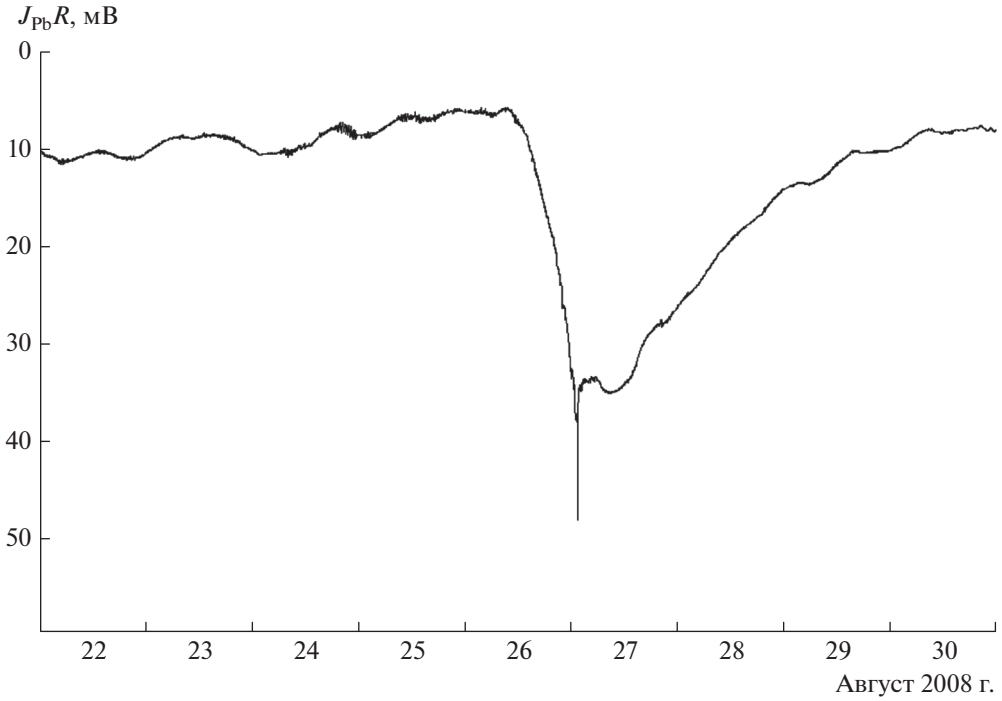

Рис. 1. Зависимость от времени электрического напряжения между вертикально расположенными свинцовыми электродами с расстоянием между ними 1250 м в озере Байкал. Величины по оси ординат пересчитаны из данных работы [Коротаев, 2011]. Электрическое напряжение регистрировалось каждую мин. Короткий пик соответствует моменту землетрясения.

величиной ~10 мВ. Напряжение плавно вернулось на уровень в ~10 мВ через трое суток после момента землетрясения.

Что в действительности регистрирует установка и почему она реагирует на землетрясение? Какова природа зарегистрированного короткого импульса во время землетрясения?

Предположим, что в соответствии с нашей моделью землетрясения [Безруков и др., 2018] заряженные положительно горячие водородосодержащие газы, возникшие и накопившиеся на глубине 17 км, образовали канал для выхода на поверхность в районе буйрепа со свинцовыми электродами. В этом случае j_{ext} в уравнении (4) может начать достаточно быстро меняться со временем:

$$J_{Pb}(t)R = \varepsilon - j_{ext}(t)\rho d. \quad (7)$$

Экспериментальные данные, согласно нашей модели, показывают, что выход горячего газа начался за полсуток до момента землетрясения. Поток газа увеличивался до момента землетрясения, и это привело к уменьшению величины $j_{ext}(t)$ и увеличению $J_{Pb}(t)R$. К моменту землетрясения $j_{ext}(t)$ поменял направление, т.е. ток в Озере стал течь вверх. Таким образом, в момент землетрясения:

$$J_{Pd}R > \varepsilon.$$

Согласно (2) $\varepsilon = 0.028$ В. Это значение меньше экспериментально наблюдаемого максимума напряжения непосредственно перед моментом землетрясения. После момента землетрясения поток газа стал уменьшаться и по истечении трех суток уменьшился до нуля. Значение $J_{Pb}R = \varepsilon - j_{ext}\rho d$ вернулось к своему значению до землетрясения.

Быстрое изменение регистрируемого напряжения в момент землетрясения связано с электромагнитной наводкой от подземного электрического пробоя на электрический контур нашей электрохимической ячейки. Экспериментальные данные работы [Коротаев и др., 2011], содержащие быстрое изменение электрического напряжения в момент землетрясения согласуются с представлением о подземном электрическом пробое, рассматриваемым в модели ГМЭ [Безруков и др., 2018].

5. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Предложена модель, в которой напряжение, измеряемое между электродами в озере Байкал [Коротаев и др., 2011, 2015], является следствием двух эффектов: электрохимических процессов около электродов и тока положительного заряда, текущего через Озеро и предсказанного моделью ГМЭ.

Отметим, что в данной работе мы не рассматриваем другие часто обсуждаемые эффекты, которые могли бы приводить к появлению измеримых токов между электродами в водной среде. Одним из таких эффектов является движение заряженных ионов, увлекаемых течениями, в магнитном поле Земли. В нашей модели ГМЭ возникает дополнительный аргумент в пользу этого эффекта, так как модель подразумевает наличие дополнительных положительных зарядов – протонов, коэффициент диффузии которых в воде велик. Однако, для рассматриваемой установки с электродами, расположенными в приповерхностном и придонном слоях озера Байкал, этот эффект незначителен по следующим соображениям. Во-первых, величина течений в озере Байкал не велика, характерные горизонтальные приповерхностные и придонные течения составляют 2 см/с. Во-вторых, угол между направлением течений в месте расположения установки и направлением магнитного поля Земли не велик. Эти рассуждения подтверждаются экспериментальными результатами из работы [Коротаев и др., 2015], в которой произведен поиск корреляции изменений магнитного поля Земли и величины электрического напряжения между электродами в озере Байкал. Таких корреляций обнаружено не было.

Наше рассмотрение предсказывает изменчивость электрического напряжения в Озере в случае использования свинцовых электродов как за счет изменения концентрации карбонат иона в поверхностных слоях Озера из-за продуктов метаболизма микроорганизмов и за счет фотохимических реакций у водорослей, так и из-за изменчивости величины и направления тока положительного заряда, текущего в Озере.

Нами предложено объяснение наблюдавшейся в работе [Коротаев и др., 2011] реакции вертикальной компоненты падения электрического напряжения в озере Байкал на землетрясение в августе 2008 года. Основной идеей является то, что перед моментом землетрясения и после него происходил выброс положительно заряженных водородосодержащих газов из земных недр в районе землетрясения, и он затронул район расположения установки. Быстрое изменение регистрируемого напряжение в момент землетрясения мы связываем с электромагнитной наводкой подземного пробоя на электрический контур установки.

Нам удалось в рамках модели ГМЭ самосогласованно объяснить экспериментальные результаты для свинцовых и хлор-серебряных электродов. Успех модели ГМЭ в объяснении наблюдаемых электрических явлений в Озере мог бы быть хорошим аргументом в пользу ее справедливости.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Н.М. Буднева, А.И. Панфилова и И.И. Ткачёва за плодотворные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Безруков Л.Б, Заварзина В.П., Курлович А.С., Лубсандоржиев Б.К., Межох А.К., Моргалюк В.П., Синёв В.В. Об отрицательно заряженном слое электрического поля Земли // Докл. АН. Т. 480. № 2. С. 155–157. 2018.

— Верещагин Г.Ю. Под редакцией Талиева Д.Н. Байкал. Научно-популярный очерк. М.: Географгиз. 228 с. 1949.

— Коротаев С.М., Шнеер В.С., Гайдаш С.П., Буднев Н.М., Мергазов Р.Р., Халезов А.А., Панфилов А.И. Эффект и предвестники землетрясения 27.08.2008 в вертикальной компоненте электрического поля в озере Байкал // Докл. АН. Т. 438. № 5. С. 683–686. 2011.

— Коротаев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Зурбанов В.А., Мергазов Р.Р., Шнеер В.С., Мачинин В.А., Киктенко Е.О., Бузин В.Б., Панфилов А.И. Новые результаты мониторинга вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал на базе поверхность-дно // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 3. С. 406–418. 2015.

— Михайлов В.А., Сорокина О.В., Савинкина Е.В., Давыдова М.Н. Ред. Цивадзе А.Ю. Химическое равновесие: учебное пособие. М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 197 с. 2008.

— Русинек О.Т. Тахтеев В.В., Гладкочуб Д.П., Ходжер Т.В., Буднев Н.М. Байкаловедение. Книга 1. Новосибирск: Наука, 467 с. 2012.

— Шулейкин В.В. Физика моря. Москва: Наука, 1083 с. 1968.

— El-Egamy S.S., Badawy W.A. Corrosion and passivation of Pb in CO_3^{2-} solutions // Indian J. Chemical Technology. V. 3. P. 37–43. 1996.