

УДК: 551.463.7

СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

© 2013 г. С. М. Коротаев¹, Е. О. Киктенко¹, С. П. Гайдаш², Н. М. Буднев³, Р. Р. Миргазов³,
А. И. Панфилов⁴, А. А. Халезов¹, В. О. Сердюк¹, В. С. Шнеер¹

¹Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН, г. Троицк, г. Москва

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк, г. Москва

³Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск

⁴Институт ядерных исследований РАН, г. Троицк, г. Москва

e-mail: korotaev@igemi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 18.04.2012 г.

После доработки 15.02.2013 г.

На материалах глубоководных измерений вертикальной компоненты электрического поля в оз. Байкал изучена связь вариаций поля с вариациями фонового рентгеновского излучения Солнца. Обнаружена высокая корреляция этих вариаций на периодах больше трех месяцев.

DOI: 10.7868/S0016794013060072

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на озере Байкал ведется глубоководный эксперимент по измерению вертикальной компоненты электрического поля на базе поверхность – дно (около полутора км). Эксперимент является уникальным в практике морских электромагнитных исследований как по величине вертикальной базы, так и по длительности. Несмотря на технические перерывы, получено четыре годовых серии измерений. Исследование показало, что теллурическая составляющая в вертикальной компоненте электрического поля здесь отсутствует, а наблюдаемое поле является суперпозицией поля индуцированного течениями (в диапазоне периодов от ~14 ч до 10 сут), и поля тока замыкания глобальной электрической цепи (на периодах десятки и сотни суток) [Шнеер и др., 2007; Коротаев и др., 2011а]. Кроме того, при землетрясениях наблюдаются сильные поля, связанные с их непосредственным эффектом, предвестниками и длительной релаксацией [Коротаев и др., 2011б].

Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению вариаций вертикальной компоненты электрического поля в водной толще Байкала, связанных с током замыкания на участке глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Вывод о наличии таких вариаций поля был впервые сделан в работе [Шнеера и др., 2007] на основе спектрального анализа первой серии измерений 2003/2004 гг., обнаружившего сигнал большой амплитуды на периодах “перемежающихся” (“intermittent”) колебаний (100–

150 сут), связанных с вариациями наиболее жесткой компоненты волнового излучения Солнца [Rieger et al., 1984; Lean and Bruesckner, 1989; Kuznetsova and Tsurulnik, 2002]. Этот вывод был подтвержден результатами спектрального анализа второй годовой серии наблюдений на Байкале (2007/2008 гг.) [Коротаев и др., 2011а]. Однако это было сделано только на выявлении характерной периодичности в вариациях поля, без прямого сравнения с солнечными данными.

Цель настоящей работы – восполнить этот пробел и провести совместный анализ вертикальной компоненты электрического поля в водной толще с потоком солнечного рентгеновского излучения на расширенной наблюдательной базе за счет привлечения третьей годовой серии.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Установка для измерения вертикальной компоненты поля E_z расположена в юго-западной части озера рядом с Байкальским нейтринным телескопом НТ-200 (ИЯИ РАН). Она представляет собой вертикальную антенну, заземленную в воде при помощи слабополяризующихся свинцовых электродов на ее концах. Глубина озера в месте установки антенны 1360 м. Верхний электрод находится на глубине 60 м под поверхностью, нижний – на высоте 50 м над дном. Блок электроники помещен в контейнере, расположенном вблизи уровня верхнего электрода. Регистрация поля ведется со скважностью 10 с и относительной погрешностью

порядка 0.1%. Расстояние установки от берега ~10 км. Более подробное описание аппаратуры приведено в работе [Шнеера и др., 2007].

Установка рассчитана на непрерывную работу с перерывом на ежегодный частичный подъем для считывания данных и смены питания. Эта операция выполняется в конце марта со льда. По техническим и гидрометеорологическим причинам подъем станции не удавалось делать каждый год. В этих случаях установка исчерпывала резерв автономности и наблюдения прерывались. Всего было получено четыре серии наблюдений длительностью не менее года каждая: 2003/2004 гг., 2007/2008 гг., 2008/2009 гг. и 2009/2010 гг. Начало и конец каждой серии соответствуют последним числам марта соответствующего года. При этом серия 2008/2009 гг. оказалась сильно возмущенной сейсмoeлектрическим полем, которое интересно самим по себе [Коротаев и др., 2011б], но представляет помеху для изучения ГЭЦ, поэтому данные этой серии не использовались.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Хотя концепция ГЭЦ в планетарной геофизике стала общепринятой уже довольно давно [Моргунов, 2000; Пивоваров, 2000; Троицкая и др., 2000] и активно развивается [Анисимов и Мареев, 2008], она экспериментально обоснована лишь наблюдениями в атмосфере, но не в литосфере или гидросфере. Обнаружению тока ГЭЦ в литосфере препятствует его малая величина, техническая трудность измерения вертикальной компоненты и высокая неоднородность среды, приводящая к возникновению теллурической помехи. В океане последние два препятствия отпадают, но первое усугубляется из-за высокой проводимости морской воды. В больших озерах условия однородности и достаточно высокого сопротивления среды выполняются, но почти во всех из них глубина недостаточна для реализации длиннобазовых высокочувствительных измерений. С другой стороны, геофизически наиболее благоприятны для обнаружения тока ГЭЦ зоны активных глубинных разломов, над которыми за счет эманации радона 222 наблюдается повышенная проводимость нижней атмосферы, и можно ожидать плотности вертикального тока существенно превышающие среднепланетарные значения [Морозов и др., 2000]. Озеро Байкал, как самое глубокое, расположенное над активным рифтовым разломом, в наибольшей степени удовлетворяет этим требованиям. При достаточном удалении от берега и вне непосредственной проекции приповерхностных разломов, как в описываемом эксперименте, вертикальная компонента теллурического тока (главная помеха) практически отсутствует, что показывают результа-

ты математического моделирования, сделанные для данного района [Pankratov et al., 2004].

Анализ наблюдений по двум сериям 2003/2004 гг. [Шнеер и др., 2007] и 2007/2008 гг. [Коротаев и др., 2011а] показал, что длиннопериодные (более месяца) вариации поля большой амплитуды (~10 мкВ/м) могут быть связаны только с током ГЭЦ. Теоретически вертикальный ток может складываться из тока смещения, тока проводимости и конвекционного тока. Элементарная оценка показывает, что ток смещения на столь длинных периодах практически отсутствует.

Ток проводимости должен меняться при изменениях электронной концентрации средней атмосферы вызываемых вариациями солнечного коротковолнового излучения. Амплитудные спектры вертикальной компоненты электрического поля в воде показали наличие всех характерных для этого излучения периодов в диапазоне от 27 сут до полугода. Подчеркнем, что теллурическая составляющая поля, общеизвестным образом связанная с солнечной активностью, в измеренном сигнале полностью отсутствует, поэтому данный факт является нетривиальным.

Наибольшей амплитудой в первой серии наблюдений обладал максимум на периоде ~140 сут. Поскольку Фурье-спектр в области периодов, сопоставимых с длиной ряда, ненадежен, был выполнен громоздкий, но наиболее надежный (с точки зрения точности совместного определения периода и амплитуды) расчет методом глобального минимума [Кузнецова и др., 2000]. В результате достоверность этой наиболее типичной 140-суточной вариации, свойственной перемежающимся колебаниям, была подтверждена [Шнеер и др., 2007]. В серии 2007/2008 гг. этот период оказался несколько короче и добавился полугодовой максимум.

Особенностью спектров E_z явилось, однако, то, что они оказались гораздо более круто падающими, чем у любых обычных индексов солнечной активности: максимумы на периодах более 100 сут в ~5 раз превосходили максимум на 27-суточном периоде.

Роль конвекционного тока весьма существенна. Путем совместного анализа E_z с приземными метеоэлементами по первым двум сериям установлено [Коротаев и др., 2011а], что межгодовая изменчивость метеорологической активности (в данном случае, прежде всего, меридиональной компоненты ветра) за счет изменения интенсивности турбулентного обмена ведет к значительному изменению амплитуд поля. Так, несмотря на понижение среднегодовой солнечной активности, амплитуда вариаций поля в метеорологически аномально активной серии 2007/2008 гг. увеличи-

лась по сравнению с 2003/2004 гг. в ~ 6 раз. Однако форма спектров при этом изменялась мало.

4. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 показаны нормированные амплитуды спектров E_z и потока рентгеновского излучения Солнца X в диапазоне $0.5\text{--}4 \text{ \AA}$ в диапазоне периодов от 10 до 220 сут (рассчитанные по среднесуточным данным методом интеграла Фурье с предварительным снятием тренда, аппроксимируемого кубическим полиномом) по всем трем сериям наблюдений. Нормировка позволяет избавиться от эффекта межгодовой изменчивости амплитуд. Во всех трех сериях видно хорошее совпадение положения максимумов в длиннопериодной части спектра. Самый длиннопериодный – полугодовой максимум в первой серии отсутствует и в X , и в E_z . Следующий максимум отвечает перемежающимся колебаниям, его период в разных сериях несколько меняется (в пределах 103–150 сут). Заметим, что наиболее точное совпадение форм в длиннопериодной части спектра наблюдается в метеорологически самой активной серии 2007/2008 гг. На периодах короче примерно трех месяцев подобие спектров X и E_z теряется. Вариации, связанные с вращением Солнца, хорошо заметные в спектре X , имеют гораздо меньшую относительную амплитуду в E_z .

Таким образом, подтверждается предположение о том, что имеется соответствие спектра E_z с той частью спектра относительно мягкого рентгеновского излучения, который необходимо соответствует жесткому.

Вторым шагом был корреляционный анализ X и E_z . Поскольку спектры оказались подобны только в длиннопериодной части диапазона, данные были предварительно подвергнуты низкочастотной фильтрации $T > 86$ сут. Вообще граничный период высоко- и низкоррелированных вариаций, определенный по спектрам, несколько отличается в каждой серии. Величина $T = 86$ сут соответствует серии 2007/2008 гг., она является наибольшей из трех и поэтому взята как общая для сопоставимости результатов. Для расчета корреляционной функции временные ряды среднесуточных значений X взяты начинающимися на 100 сут раньше начала и кончающимися 100 сут позже конца соответствующих рядов E_z . По этим фильтрованным данным рассчитывалась корреляционная функция $r(\tau)$, где $\tau > 0$ соответствовало запаздыванию E_z относительно X , $\tau < 0$ – опережению.

Результаты расчетов показаны на рисунке 2. Величины максимумов составляют: для серии 2003/2004 гг. $r = 0.89 \pm 0.03$, для 2007/2008 гг. $r = \pm 0.86 \pm 0.03$, для 2009/2010 гг. $r = 0.61 \pm 0.05$. Все три величины удовлетворяют критерию реаль-

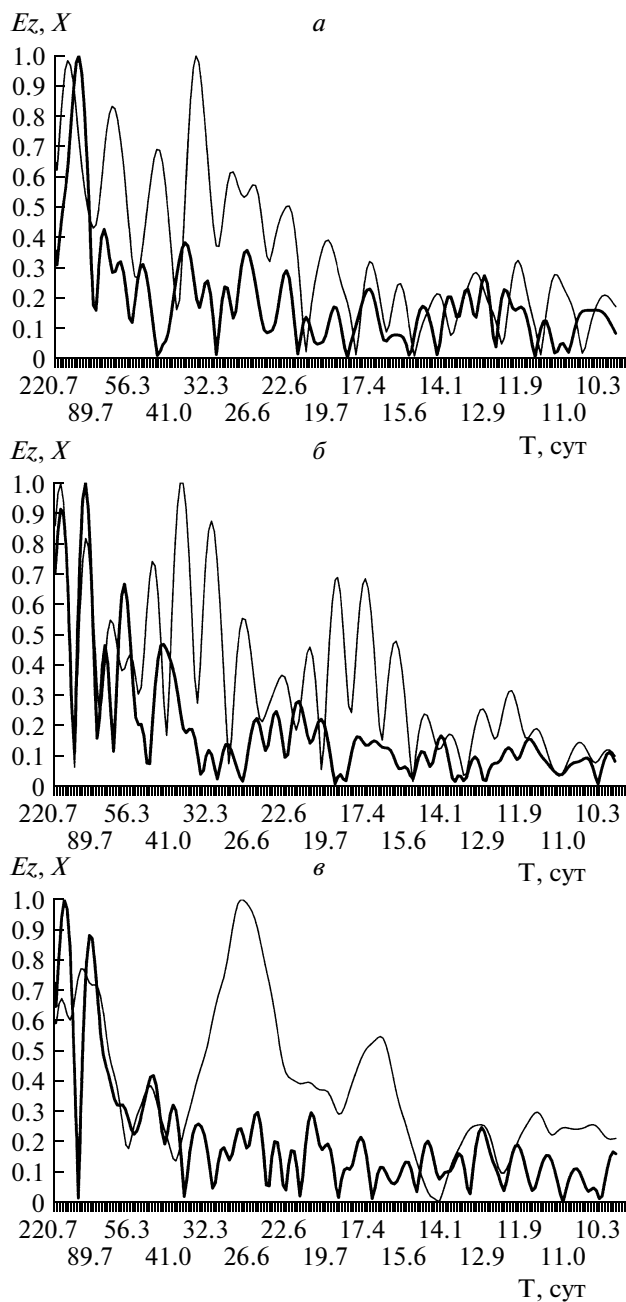


Рис. 1. Нормированные на максимальные значения амплитудные спектры E_z (жирные линии) и X (тонкие линии) по трем сериям наблюдений: а – 2003/2004 гг.; б – 2007/2008 гг.; в – 2009/2010 гг.

ности связи Визе ($|\delta r/r| > 10$). При этом величины коэффициентов корреляции оказались ранжированы в соответствии со среднегодовыми уровнями солнечной активности.

Однако расчет корреляционной функции в области низких частот по рядам длительностью лишь один год ведет к тому, что ее максимум оказывается весьма плоским, поэтому его положение недостаточно достоверно. Физически можно бы-

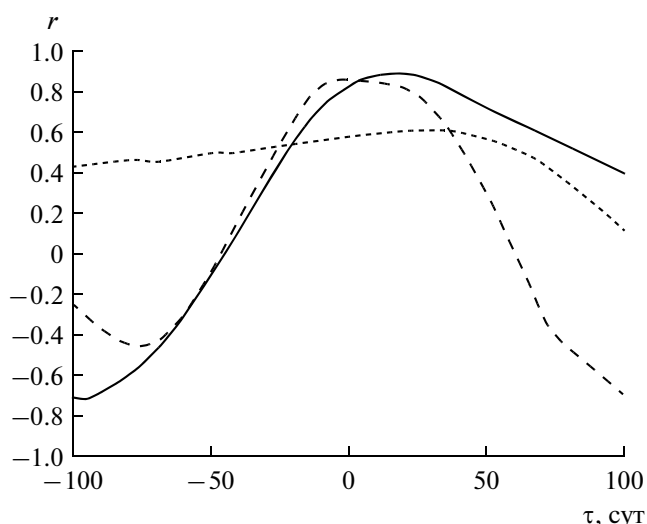


Рис. 2. Корреляционные функции Ez и X (сплошная линия – 2003/2004 г., штриховая – 2007/2008 г., пунктирная – 2009/2010 гг.).

ло ожидать максимума при нулевом или небольшом положительном τ . На рисунке 2 для серии 2003/2004 гг. $\tau = 18$ сут, для 2007/2008 гг. $\tau = -1$ сут (нефизично), для 2009/2010 гг. $\tau = 28$ сут (явное искажение за счет вращения Солнца). Для достоверной оценки $\tau(r_{\max})$ необходимы ряды большей длины. К сожалению, при существующей методике постановки эксперимента, имеющиеся годовые серии рискованно объединять, даже если бы между ними не было перерыва, поскольку при спуске/подъеме установки возможен неконтролируемый сдвиг собственных потенциалов электродов. В будущем планируется преодоление этой трудности за счет увеличения автономности установки до нескольких лет и передачи данных по гидроакустическому каналу на береговой центр сбора данных в реальном времени.

5. ВЫВОДЫ

Установлена статистически достоверная связь вариаций вертикальной компоненты электрического поля Ez в оз. Байкал с потоком рентгеновского излучения Солнца на периодах более трех месяцев.

Гипотеза о пути замыкания вертикального электрического тока ГЭЦ через водную толщу оз. Байкал, помимо поставленных нами измерений Ez , опирается также на априорное представление о повышенной проводимости пограничного слоя атмосферы за счет эманиции радона над основным разломом Байкальского рифта. Изложенные в статье результаты являются мотивом для экспериментальной проверки этого представления и, тем самым, подтверждения гипотезы.

Авторы благодарят Г.В. Домогацкого за содействие в выполнении экспериментальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. № 10. С. 8–18. 2008.
- Коротаев С.М., Гайдаш С.П., Шнеер В.С., Сердюк В.О., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р., Бузин В.Б., Халезов А.А., Панфилов А.И. Межгодовая изменчивость вариаций вертикальной компоненты электрического поля в оз. Байкал // Физика Земли. № 2. С. 74–80. 2011а.
- Коротаев С.М., Шнеер В.С., Гайдаш С.П., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р., Халезов А.А., Панфилов А.И. Эффект и предвестники землетрясения 27.08.2008 в вертикальной компоненте электрического поля в озере Байкал // ДАН. Т. 438. № 5. С. 683–686. 2011б.
- Кузнецова Т.В., Цирульник Л.Б., Петров В.Г. Изменение межпланетного магнитного поля в различной области периодов по данным измерений во время космической эры // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 64. № 9. С. 1880–1886. 2000.
- Моргунов В.А. Пространственные неоднородности электрического поля атмосферы как фактор литоносферных связей // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ, С. 106–113. 2000.
- Морозов В.Н., Шварц Я.М., Шукин Г.Г. Глобальная электрическая цепь: физико-математическое моделирование и регулярные измерения в нижней атмосфере // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ, С. 55–67. 2000.
- Пивоваров В.Г. Теоретические аспекты исследования проблемы глобальной электрической цепи // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ, С. 12–17. 2000.
- Троицкая В.А., Моргунов В.А., Анисимов С.В. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек, М.: ОИФЗ, С. 5–11. 2000.
- Шнеер В.С., Гайдаш С.П., Трофимов И.Л., Коротаев С.М., Кузнецова Т.В., Цирульник Л.Б., Панфилов А.И., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р. Долговременные наблюдения вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал // Физика Земли. № 4. С. 71–75. 2007.
- Kuznetsova T.V., Tsurulnic L.V. Oscillations in the Sun-Earth system // Proc. the 4-th International Conference Problems of Geocosmos, Petersburg, 3–8 June. Vienna: Austrian Acad. of Sci. P. 8–11. 2002.
- Lean J.L., Brueckner G.E. Intermediate-term solar periodicities: 100–500 days // Astrophys. J. V. 337. P. 568–578. 1989.
- Pankratov O.V., Kuvshinov A.V., Avdeev A.B. Ez-response, as a monitor of Baikal rift fault electrical resistivity: 3-D-modeling studies // Ann. of Geophysics. V. 47. № 1. P. 151–156. 2004.
- Rieger E., Share G.H., Forrest D.G. A 154 day periodicity in the occurrence of hard flares // Nature. V. 312. P. 625–627. 1984.