

УДК 551.463.7

ПРОЯВЛЕНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© 2021 г. С. М. Коротаев^{1, *}, Н. М. Буднев², В. О. Сердюк¹, Д. А. Орехова¹, Р. Р. Миргазов², Е. О. Киктенко¹

¹Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск, Россия

*e-mail: korotaev@igemi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 22.05.2020 г.

После доработки 21.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

По данным длительного эксперимента по мониторингу вертикальной компоненты электрического поля на базе поверхность—дно в озере Байкал выявлены колебания с квазипериодами десятки-сотни суток, которые не вызваны какими-либо внутренними источниками, но обнаруживают тесную связь с перемежающимися колебаниями потока рентгеновского излучения Солнца. Эта связь характеризуется высокой (до 0.9) корреляцией при большом (многосуточном) запаздывании. Вариации электрического поля естественно интерпретируются как проявление изменчивости тока на гидросферном участке глобальной электрической цепи над Байкальским рифтом. Большое запаздывание может быть объяснено опосредованным механизмом влияния в потоков рентгеновского излучения Солнца на конвекционную компоненту тока в атмосфере через его сложное воздействие на метеорологические процессы. При этом уровень корреляции рентгеновского излучения с электрическим полем всегда весьма высок, в то время как запаздывание в различные годы может меняться на порядок.

DOI: 10.31857/S0016794021020073

1. ВВЕДЕНИЕ

Концепция глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в основных чертах общепринята [Анисимов и Мареев, 2008], она экспериментально обоснована наблюдениями в атмосфере, но не литосфере, где обнаружению поля тока ГЭЦ препятствует его малая величина сравнительно с другими полями и трудность измерения вертикальной компоненты. Такая ограниченность не является недостатком с точки зрения атмосферного электричества, поскольку, ввиду гигантской разницы проводимостей тропосферы и литосферы, влияние последней на электрическое поле в воздухе практически эквивалентно влиянию идеально проводящей поверхности, интересоваться полем под которой бессмысленно. Однако факты корреляции литосферной и ионосферной активности привели к признанию наличия гальванической связи структур литосферы и ионосферы и поиску ее конкретных механизмов, которые, наряду с током проводимости, учитывают важную роль конвекционного тока, которая должна быть

особенно велика над активными разломами [Пулинец и др., 2013]. Прямому обнаружению поля тока ГЭЦ в литосфере препятствует крайне его малая среднепланетарная величина (порядка 10^{-12} А/м²) по сравнению с полями других источников, создаваемых неоднородностями земной коры и технические трудности сколь-нибудь точных измерений вертикальной компоненты поля в скважинах. Наиболее благоприятные условия для измерения тока в ГЭЦ под атмосферой должны быть в местах его ожидаемого превышения над среднепланетарным уровнем, как за счет конвективной, так и кондуктивной (вследствие эманации радона [Моргунов, 2000]) составляющих и в однородной гидросфере, т.е. над подводными рифтовыми разломами. При этом глубина водного слоя должна быть велика для развертывания высокоточных длиннобазовых измерений электрического поля. Однако в океане эти преимущества гасятся высокой проводимостью морской воды, ослабляющей поле. Уникальное сочетание природных условий для измерения тока ГЭЦ под

атмосферой представляет оз. Байкал – самый глубокий пресноводный водоем – зарождающийся океан, расположенный над активным рифтовым разломом.

С 2003 г. в юго-западной части озера в районе Байкальской глубоководной нейтринной обсерватории проводится эксперимент по измерениям вертикальной компоненты электрического поля E_z на базе поверхность–дно. По масштабам вертикальной базы и длительности этот эксперимент пока не имеет аналогов в мировой практике. Хотя начальной целью эксперимента было только изучение полей гидросферных и литосферных источников, в первой же годовой серии были обнаружены колебания поля с периодом колебаний Ригера, характерных для наиболее жесткого рентгеновского излучения Солнца [Rieger et al., 1984], которые можно было интерпретировать только как эффект тока ГЭЦ [Шнеер и др., 2007]. После этого изучение таких вариаций поля, их связи с солнечной и метеорологической активностью вошло в число основных задач эксперимента. Его результаты показали, что наблюдаемые величины тока действительно много выше типичных для ГЭЦ, и что наблюдаемые вариаций имеют большое запаздывание относительно их первопричин [Коротаев и др., 2011, 2013, 2015а, б, 2016, 2018а, б]. Эксперимент выявил как надежно повторяемые в годовых сериях черты вариаций и их связи с солнечной активностью, так и нетривиальные противоречия.

Целью данной работы является представление последних (2019 г.) результатов эксперимента, обобщение основных результатов за все его годы и анализ их противоречий.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СЕРИИ НАБЛЮДЕНИЙ 2019 г.

Электрическое поле E_z измерялось глубоководной установкой в конфигурации, неизменной с 2013 г. Место измерений находится в 5 км от Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, в 10 км от берега, при глубине 1337 м. Измерительная база равна 1290 м (между горизонтами 47 и 1337 м). Относительная погрешность измерений не более 0.01%. Дискретность измерений поля 10 с. С помощью спаренных электродов контролируется дрейф их собственных потенциалов. Установка работает в автономном режиме с частичным или полным подъемом на лед в марте каждого года для снятия данных, смены питания и, при необходимости, ремонта. Помимо измерений поля ведутся измерения температуры и течений на горизонтах 50 и 450 м. Подробное описание установки, режимов ее работы по основным и вспомогательным каналам и методики обработки

данных приведено в работах [Коротаев и др., 2015а, б, 2016, 2018а].

Как показали результаты предшествующих лет, сигнал в E_z , коррелирующий с солнечной активностью, наблюдается при периодах более месяца. Отклик на 27-суточную изменчивость крайне слаб, отклика на индивидуальные события (вспышки) не наблюдается. Относительно возможных помех, прежде всего, следует отметить полное отсутствие теллурической составляющей, что входило в саму идею эксперимента и определялось первоначально самим выбором места измерения в соответствии с результатами математического моделирования [Pankratov et al., 2004], затем многократно проверялось экспериментально [Коротаев и др., 2015а, б, 2016] и, наконец, вновь верифицировалось моделированием, детально учитывающим геоэлектрическое строение Байкальского рифта [Коротаев и др., 2018а]. Реальную помеху могло бы составить поле, индуцированное течениями. На Байкале это поле существенно в полосе периодов синоптических течений (2–10 сут) и в окрестностях периода инерционных колебаний (14–17 ч), при периодах более месяца оно слабо. Однако несущественность этой помехи необходимо контролировать по каждой серии наблюдений. Идея контроля состоит в том, что, как известно [Sanford, 1971], вертикальная компонента поля течения с высокой точностью равна средней ЭДС по длине межэлектродной базы: $E_z = \langle V_y \rangle B_x$, где V_y – магнито-зональная компонента скорости, B_x – горизонтальная компонента магнитного поля Земли. Для определения средней скорости потребовались бы измерения на множестве горизонтов (задача, из-за своей громоздкости редко решаемая в гидрологии). Но поскольку скорости течений в Байкале резко убывают с глубиной, то если вместо $\langle V_y \rangle$ использовать имеющиеся измерения V_y на горизонте 50 м, (практически совпадающем с верхним концом межэлектродной базы 47 м), можно утверждать, что из природного условия $V_y \gg \langle V_y \rangle$, для поля индуцированного течением заведомо справедливо ограничение $E_z < V_y B_x$.

На рисунке 1 представлены амплитудные спектры E_z и $V_y B_x$ серии 2019 г. в диапазоне периодов 30–220 сут. Видно, что во всем этом диапазоне $E_z > V_y B_x$. Следовательно, природа всех спектральных максимумов поля в этом диапазоне никак не связана с течениями.

В предыдущих работах подчеркивалось и иллюстрировалось [Коротаев и др., 2015б], что длиннопериодные колебания E_z больше коррелируют с потоком рентгеновского излучения Солнца, чем с другими индексами солнечной активности. На рисунке 2 тот же спектр E_z сопоставлен со спектрами рентгеновского излучения X по дан-

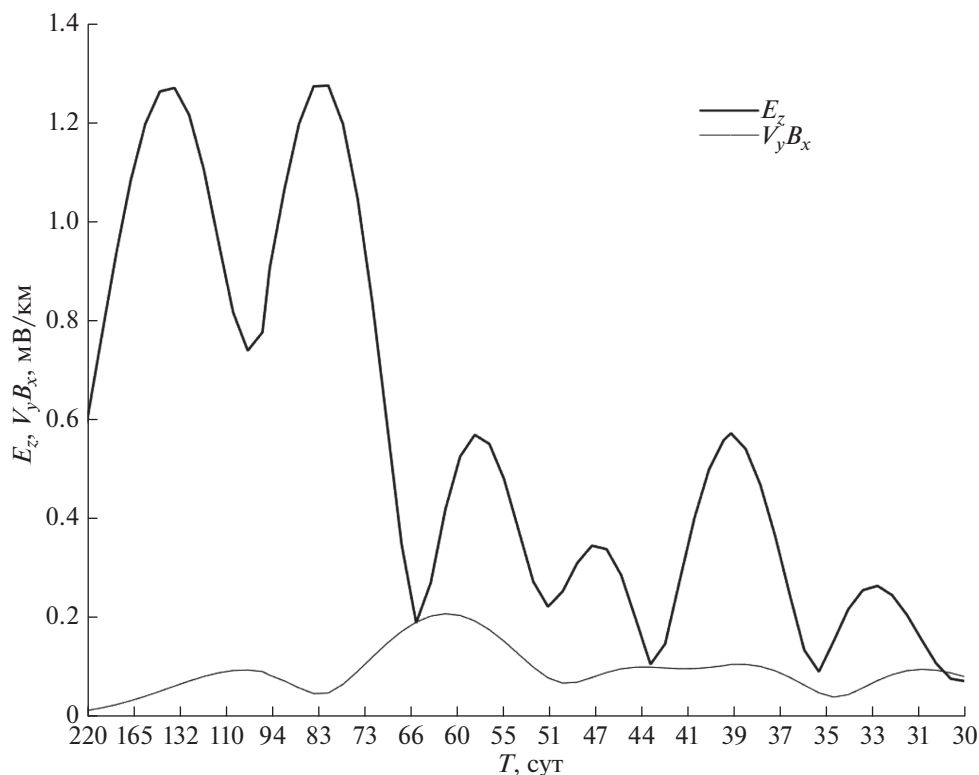


Рис. 1. Амплитудные спектры E_z и ЭДС $V_y B_x$ в диапазоне периодов T 30–220 сут.

ным GOES в диапазоне длин волн 5–40 нм и радиоизлучения R на длине волны 10.7 см (величина R характеризует общий уровень волновых и корпускулярных проявлений солнечной активности, в том числе хорошо антикоррелирует с потоком галактических космических лучей).

Из рисунка 2 видно, что подобие спектра E_z с X значительно выше, чем с R . Особенно хорошо заметно подобие спектральных максимумов 83 и 58 сут. При и этом, (отсутствующий в R) максимум в X на классическом периоде Ригера 154 сут выглядит подавленным, но его отклик в E_z имеет почти ту же величину, что и отклик на периоде 83 сут. Отметим, что величина E_z на обоих главных максимумах 83 и 154 сут значительна — при удельном сопротивлении воды в Байкале около 200 Ом м, они соответствуют плотности тока 6×10^{-9} А/м².

Для изучения корреляции E_z с X использовался ряд X , начинающийся на два месяца раньше и заканчивающийся на два месяца позже полученного в эксперименте ряда E_z . Это делало расчет корреляционной функции равнозначным в исследуемом диапазоне сдвигов времени ± 60 сут. Перед расчетом оба ряда подвергались полосовой фильтрации $83 > T > 27$ сут, соответствующей области наибольшего подобия спектров.

Полученная корреляционная функция $r(\tau)$ представлена на рис. 3. Главный максимум кор-

реляции $r = 0.89 \pm 0.04$ наблюдается при запаздывании E_z относительно X на 39 ± 3 сут. Положительный знак корреляции здесь соответствует отклонению поля от среднего в направлении вверх при увеличении потока солнечного рентгена.

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗА РАЗНЫЕ ГОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, отметим, что результаты за разные годы не вполне однородны. Эксперимент был начат в марте 2003 г. с весьма простой установкой, описанной в работе Шнеера и др. [2007], с менее совершенными электродами, отсутствием контроля их собственных потенциалов и условий измерения (наклонов измерительной линии, температуры) и ограниченным самоконтролем работы блока электроники. Эта установка проработала до марта 2010 г. и исчерпала свой ресурс. В эксперименте наступил двухлетний перерыв, пока марте 2012 г. ей пришла на смену новая установка, конфигурация которой была немного изменена в марте 2013 г. и остается неизменной до настоящего времени. Эта установка кратко описана в начале предыдущего раздела и подробно — в приведенных ссылках. Несмотря на технические различия установок, заметных различий в характере данных двух установок нет, и фактическая разница сводится в меньшей степени дове-

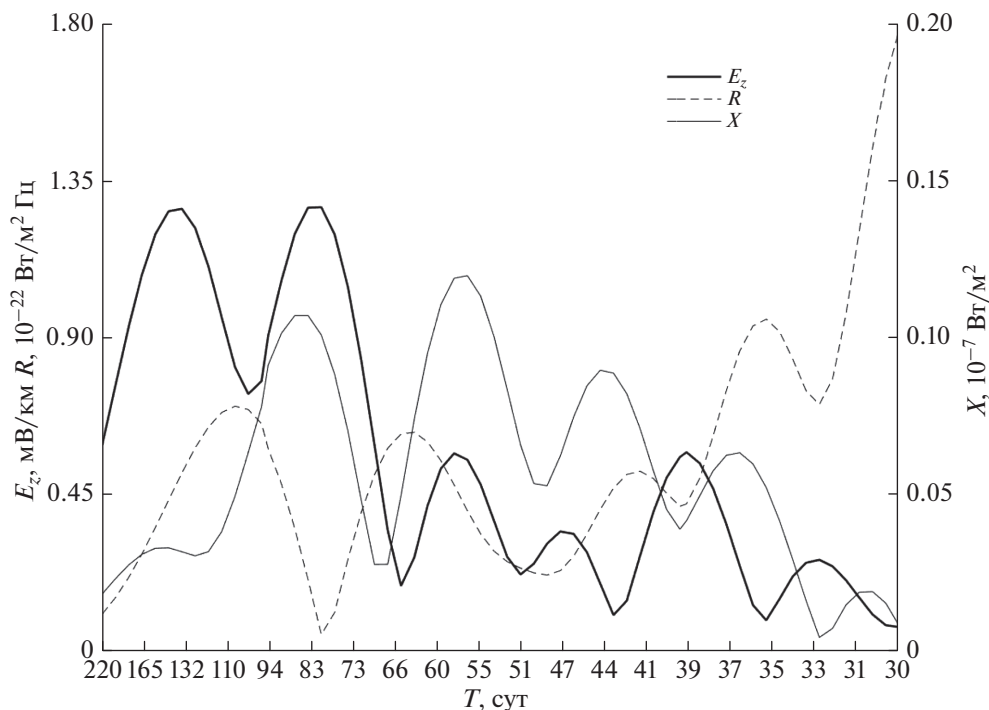


Рис. 2. Амплитудные спектры E_z и потока солнечного рентгеновского излучения X и радиоизлучения R в диапазоне периодов T 30–220 сут.

рия точности количественных результатов полученных с первой из них. К сожалению, в работе о установок были технические сбои, приводившие к потерям данных в годовых сериях, поскольку вмешаться в их работу можно было только во время короткого весеннего ледового сезона. В середине срока успешной серии 2008 г. произошло

сильное землетрясение с эпицентром вблизи установки, прекрасно проявившееся в E_z , что важно само по себе, но вместе с предвестниками и афтершоками разорвало ряд E_z , который мог бы быть пригодным для сопоставления с солнечной активностью. В итоге всего было получено 8 полноценных серий с началом в 2003, 2007, 2009, 2012, 2013, 2014, 2015, 2019 гг. Из-за перерывов в работе при мартовских подъемах установки, необходимого времени стабилизации электродов после ее повторного погружения, а иногда из-за изменения конфигурации, годовые ряды приходилось рассматривать по отдельности. Лишь один раз, ввиду минимального перерыва удалось, без сомнений в корректности объединить серии 2014 и 2015 гг. в единый двухлетний ряд что позволило охватить диапазон периодов до 460 сут (то есть практически весь спектр перемежающихся колебаний [Lean and Brueckner, 1989]).

Качественно результаты всех предшествующих серий измерений E_z , одинаковы, количественно – в положении спектральных максимумов в диапазоне перемежающихся колебаний, их величине, уровню корреляции с X и ее запаздыванию – имеются различия [Шнеер и др., 2007; Коротаев и др., 2011, 2013, 2015а, б, 2016, 2018а, б]. Результаты серии 2019 г. не выходят за пределы этих различий ни по одному из параметров.

Чтобы убедиться в достоверности характеристик вариаций E_z , связанных с X , и реальности

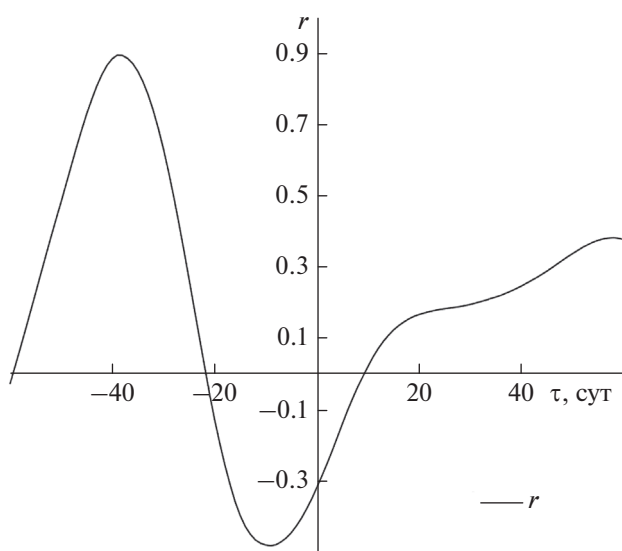


Рис. 3. Корреляционная функция E_z и X . τ – сдвиг времени X относительно E_z , сут.

их изменчивости, помимо стандартных методов спектрального и корреляционного анализа, примененных в предыдущем разделе, использовались также другие, значительно более совершенные современные методы. Так, имея в виду недостаточную надежность применения Фурье-спектров к вариациям с меняющейся амплитудой и фазой, для количественного сопоставления E_z с перемежающимися вариациями уже в первой работе [Шнеер и др., 2007] использовался метод глобального минимума [Кузнецова и др., 2000]. Этот метод позволяет, в отличие от методов максимальной энтропии или максимального правдоподобия, получить наиболее достоверную оценку положения спектрального максимума, не теряя достоверности оценки амплитуды. Поскольку существенных расхождений с Фурье-спектрами не оказалось, в дальнейшем можно было ими пользоваться с достаточной уверенностью. С другой стороны, формулируемая, начиная с работы [Коротаев и др., 2011], гипотеза об опосредованном атмосферными процессами влиянии солнечного рентгеновского излучения на E_z , выглядела странно, в том смысле, что обычно рассматривают влияние солнечной активности на атмосферу посредством ионизации, в которой главную роль играет корпускулярная, а не волновая составляющая. Поскольку обе составляющие коррелируют (антикоррелируют для космических лучей), то, казалось бы, естественным считать, что X — лишь косвенный индекс, отражающий реальную причину, но не сама причина. Такого рода непрямые корреляции действительно встречаются в разных областях. В пользу гипотезы, что корреляция E_z именно с X выше корреляции с другими солнечными индексами, но это превышение невелико [Коротаев и др., 2015б]. Поэтому помимо корреляционного, был применен строгий, хотя более сложный метод причинного анализа [Коротаев и др., 2016, 2018а] Оказалось, что при том же запаздывании, что и корреляционная функция, функция причинности имеет максимум, доказывающий причинную связь $X \rightarrow E_z$. Кроме того, оказалось, что максимуму причинности и величины корреляции соответствует минимум функции независимости E_z от X . Функция независимости определяется через условную и безусловную энтропии и, в отличие от корреляционной функции адекватна как линейной, так и любой нелинейной связи переменных. Совпадение экстремумов свидетельствует, что в оценке запаздывания возможная нелинейность связи несущественна.

Обобщение результатов всех серий показывает, что в диапазоне перемежающихся колебаний положение спектральных максимумов E_z и X всегда совпадает, но их амплитуды не всегда пропорциональны. Уровень корреляции в разных се-

риях меняется от 0.6 до 0.9, и он не связан с фазой цикла солнечной активности. То же касается изменений амплитуд E_z , но для них обнаружена связь со среднегодовым уровнем метеорологической активности. Этот вопрос был детально исследован в работе [Коротаев и др., 2011]. Исследовалась связь вариаций E_z в разные годы с метеорологическими параметрами по обсерватории Иркутск: модулем скорости ветра и ее компонентами, облачностью и давлением. Оказалось, что повышению амплитуд E_z соответствует примерно пропорциональное увеличение амплитуд меридиональной компоненты скорости по всему спектру. При этом внутригодовая корреляция этих величин практически отсутствует. Такая корреляция обнаружена только с давлением, она достигает 0.65 при запаздывании E_z относительно давления на 37 сут.

Наиболее противоречива последовательность определений запаздывания E_z относительно X по положению максимума корреляционной функции: 18 сут (2003), -1 сут (2007, результат нефизичен и, несомненно, порожден погрешностью за счет весьма плоского максимума r , можно лишь утверждать, что в этой серии запаздывание относительно мало), 28 сут (2009), 39 сут (2012), 87 сут (2013), 4 сут (2014), 4 сут (2014–2015), 39 сут (2019).

До появления последних данных мы были склонны считать, что разброс результатов в известной мере связан со случайными погрешностями определения вершины широкого корреляционного максимума. Наибольшее доверие вызывала величина 4 сут, как подтверждения причинным анализом и неизменная при увеличении ряда с одного до двух лет. Но полученная в серии 2019 корреляционная функция, показанная на рис. 3 имеет наиболее острый глобальный максимум среди всех полученных, относительная случайная погрешность определения его вершины составила всего 8%. Поэтому наблюдаемую существенную изменчивость запаздывания следует считать реальной. При этом легко видеть, что последовательность эффективных запаздываний, полученная на интервале 16 лет (хотя и с пробелами) никак не связана с фазой цикла солнечной активности. Можно лишь предположить, что изменения запаздывания связаны с изменчивостью атмосферных процессов в широком диапазоне высот, опосредующих влияние X на E_z .

Мы пока не в состоянии предложить модель, количественно объясняющую наблюдаемую совокупность фактов. На качественном уровне основные черты модели как гипотезы наметить можно, причем с указанием путей эмпирической проверки. На гидросферном участке ГЭЦ E_z создается ток проводимости, который является продолжением тока на атмосферном участке, являющимся суммой тока проводимости и конвекционного тока. Конвекционный ток в крупных

масштабах трудно непосредственно измерить, но он может превосходить ток проводимости или, во всяком случае, иметь тоже порядок [Морозов и др., 2000; Kumar et al., 2009; Panneerselvavam et al., 2010]. Как отмечалось во Введении, особенностью места эксперимента над активным Байкальским рифтом является сочетание высокой эманации радона, ионизирующей воздух, и тепловой аномалии усиливающей конвективные процессы, что приводит к увеличению обеих составляющих атмосферного тока, причем не только прямо, но и перекрестно [Пулинец и др., 2015]. Это приводит к аномально высокой плотности тока ГЭЦ.

Ключевое значение имеет большое запаздывание отклика E_z на вариации рентгеновского излучения. Даже принимая во внимание статистическую связь этих вариаций с основным ионизирующим фактором — космическими лучами, запаздывание должно практически отсутствовать, а при учете возмущений солнечного ветра — не превышать двух суток. Эффект усиления стратосферного тока жестким рентгеном за счет электронов отдачи при комптоновском рассеянии [Moldavanov, 2003] также практически не имеет запаздывания. Единственной возможностью является многоступенчатое опосредование влияние рентгеновского излучения медленно эволюционирующими атмосферными процессами. Первой ступенью здесь, очевидно, является воздействие на температуру озонового слоя, т.е. на глубину атмосферы до тропопаузы. Изменение температуры тропопаузы влияет на условия конвекции в стратосфере. Изменения вертикального турбулентного обмена прямо влекут изменения конвекционного тока, и косвенно, еще в большей степени — через изменения в фазовых переходах атмосферной влаги. Последние также влияют на ток проводимости. Влияние изменения верхнего граничного условия постепенно распространяется на всю глубину тропосферы до приземного пограничного слоя, воздействуя как непосредственно на конвекционный ток, так и, через вертикальную турбулентную диффузию радона, на ток проводимости. Оценка постоянной времени этого процесса порядка десятка суток представляется естественной. Знак эффекта можно предсказать определенно: поглощение энергии рентгеновских лучей ведет к нагреву тропопаузы, поэтому при увеличении их потока конвекция затрудняется, ток спокойной погоды уменьшается. Именно это наблюдается в эксперименте (рис. 3) — положительной вариации X отвечает запаздывающая вариация E_z направленная от среднего уровня вверх, т.е. ей отвечает уменьшение тока спокойной погоды.

4. ВЫВОДЫ

Последние результаты длительного глубоководного эксперимента в озере Байкал по измерениям вертикальной компоненты электрического поля подтвердили существование ее высокой корреляции с перемежающимися вариациями потока солнечного рентгеновского излучения. Корреляция имеет существенное запаздывание, величина которого имеет межгодовую изменчивость на порядок величины — от нескольких суток до десятков суток и эта изменчивость не связана с фазой солнечного цикла.

Измеренные вариации интерпретируются как вариации поля тока ГЭЦ на гидросферном участке ее замыкания. Влияние солнечного рентгеновского излучения на них опосредовано медленными многоступенчатыми атмосферными процессами с существенной ролью конвекционной составляющей тока. Качественное рассмотрение гипотезы, конкретизирующей ступени передачи воздействия вариаций рентгеновского излучения на вариации тока приводит к результатам согласующимся основными экспериментальными фактами и позволяющим понять противоречивый характер оценок запаздывания этого воздействия в различные периоды времени.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-05-00001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. № 10. С. 8–18. 2008.
- Коротаев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Зурбанов В.Л., Миргазов Р.Р., Мачинин В.А., Киктенко Е.О., Бузин В.Б., Новыш А.В., Портянская И.А. Результаты мониторинга вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал // Физика Земли. № 4. С. 148–157. 2015а.
- Коротаев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Зурбанов В.Л., Миргазов Р.Р., 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 аэрномия. Т. 55. № 3. С. 406–418. 2015б.
- Коротаев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Киктенко Е.О., Горохов Ю.В. Глубоководный электромагнитный мониторинг в Байкале — классический и неклассический аспекты // Вопросы естествознания. № 2. С. 41–53. 2016.
- Коротаев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Орехова Д.А., Кругляков М.С., Киктенко Е.О., Миргазов Р.Р., Зурбанов В.Л., Горохов Ю.В., Рябов Е.В. Байкальский электромагнитный эксперимент // Геофизические процессы и биосфера. Т. 17. № 4. С. 92–126. 2018а.

- *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. 2011.
- *Коротаев С.М., Киктенко Е.О., Гайдаш С.П., Буднев Н.М., Миргазов Р.Р., Панфилов А.И., Халезов А.А., Сердюк В.О., Шнеер В.С.* Связь вариаций вертикальной компоненты электрического поля в водной толще озера Байкал с солнечной активностью // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т. 53. № 6. С. 817–820. 2013.
- *Коротаев С.М., Сердюк В.О., Буднев Н.М.* Связь вертикальной компоненты длиннопериодных вариаций вертикальной компоненты электрического поля в Байкале с солнечной активностью // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т. 58. № 1. С. 149–152. 2018б.
- *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. АН сер. физ.* Т. 64. № 9. С. 1880–1886. 2000.
- *Моргунов В.А.* Пространственные неоднородности электрического поля атмосферы как фактор литононосферных 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.
- *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Боярчук К.А., Тертышников А.В., Юдин Ю.А.* Единая концепция признаков подготовки сильного землетрясения в комплексной системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера // *Гелиогеофизические исследования.* Вып. 6. С.81–90. 2013.
- *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В.* Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, инициируемых ионизацией // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т. 55. № 4. С. 540–558. 2015.
- *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.
- *Kumar C.P.A., Panneerselvavam C., Nair K.U., Jeeva K., Selvaraj C., Jeyakumar H.J., Gurubaran S.* Measurement of atmospheric air-earth current density from a tropical station using improvised Wilson’s plate antenna // *Earth Planets Space.* V. 61. P. 919–926. 2009.
- *Lean J.L., Brueckner G.E.* Intermediate-term solar periodicities: 100–500 days // *Astrophys. J.* V.337. P. 568–578. 1989.
- *Moldavanov, A.V.* Stratospheric discharges during solar gamma flares // *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 36. P. L1–L4. 2003.
- *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. Geophysics.* V. 47. № 1. P. 151–156. 2004.
- *Panneerselvavam C., Kumar C.P.A., Nair K.U., Selvaraj C., Gurubaran S., Pathan B.M.* Instrumentation for the surface measurements of atmospheric electrical parameters at Maitri, Antarctica: First results // *Earth Planets Space.* V. 62. P. 545–549. 2010.
- *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.
- *Sanford T.B.* Motionally induced electric and magnetic fields in the sea // *J. Geophys. Res.* V. 76. P. 3476–3492. 1971.