

РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУХЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОБСЕРВАТОРИИ "ПАРАТУНКА" (КАМЧАТКА) С ПОМОЩЬЮ ФЛЮКСМЕТРОВ CS110 И "ПОЛЕ-2"

Хомутов С.Ю.

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Камчатский край, khomutov@ikir.ru*

Введение

Атмосферное электрическое поле является объектом активных экспериментальных и теоретических исследований. В ИКИР ДВО РАН такие исследования ведутся уже много лет, в т.ч. и мониторинговые наблюдения вертикального градиента потенциала E_z атмосферного электрического поля (АЭП), выполняемые на Геофизической обсерватории "Паратунка". Основные используемые приборы — электрометры-флюксометры "Поле-2" и "Градиент-3", хорошо зарекомендовавшие себя при долговременных измерениях. Однако, механическая часть этих флюксометров (ФМ) значительно изношена, схемные решения и используемые комплектующие устарели, обслуживание становится излишне трудоёмким. В связи с этим ИКИР ДВО РАН в 2015 г. в рамках проекта РНФ приобрёл современный цифровой электрометр CS110, который до некоторой степени является стандартным устройством в мировой практике наблюдений за АЭП. Предполагалось также, что сравнение результатов CS110, разработанного на технологических принципах, отличающихся от уже используемых флюксометров, позволит повысить достоверность получаемых данных.

В докладе рассмотрены результаты измерений CS110 и "Поле-2", полученные практически за два года. Основной акцент сделан на описание статистики измерений АЭП в условиях хорошей погоды (УХП) и оценку обнаруженной у CS110 особенности — сезонное изменение чувствительности.

Аппаратура, условия измерений

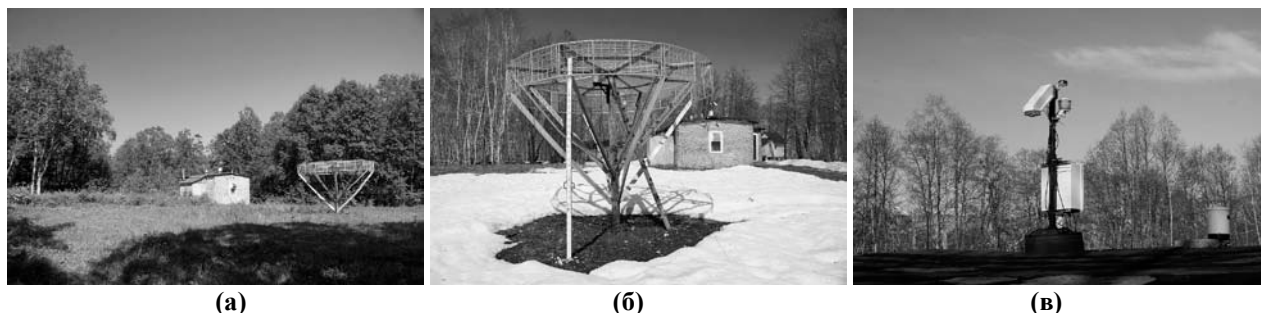
Датчик напряженности электрического поля "Поле-2М" разработки ГФО им. А.И.Воейкова (Ленинград) является стандартным устройством для измерения вертикального градиента потенциала E_z атмосферного электрического поля [1]. Датчик имеет чувствительный и грубый измерительные каналы, подключенные к АЦП L-Card E14-140, что обеспечивает диапазон измерений около $\pm 200 \pm 2000$ В/м и чувствительность около 0.15 и 1.5 В/м, соответственно. Регламентом ФМ предусмотрена его калибровка с помощью средств, входящих в штатный комплект. Первичный преобразователь ФМ установлен на специальной опоре высотой около 3.5 м и диаметром около 2.5 м, обеспечивающей выравнивание эквипотенциальных поверхностей АЭП в области измерений и расположение датчика выше максимального уровня снега на обсерватории (до 3 м). Общий вид расположения датчика представлен на рис. 1(а,б). ФМ "Поле-2" используется для непрерывных измерений E_z на ГФО "Паратунка" с 1996 г. [4].

Электрометр CS110 разработки Campbell Scientific, Inc., США [5] представляет собой устройство, работающее на том же принципе, что и ФМ "Поле-2" — модуляция электростатического поля движущейся пластиной (field mill). Чувствительность в диапазоне ± 2200 В/м составляет 0.32 В/м, предусмотрен автоматический переход на расширенный диапазон измерений (± 22300 В/м) с чувствительностью на порядок ниже. Датчик смонтирован на штанге, на которой также закреплены влагозащищённый бокс с электроникой, метеорологические датчики и GPS-антенна. Все компоненты устройства заземлены. Электрометр установлен на крыше технического павильона, высота относительно крыши составляет около 1.2 м, относительно уровня земли - около 5 м. Также на крыше находится датчик осадков из комплекта CS110 и антенна WiFi-связи с регистрирующим компьютером. Общий вид ФМ CS110 показан на рис. 1(в). Более подробное описание представлено в [6]. Регулярные измерения с помощью CS110 начаты в ноябре 2015 г.

Существуют несколько важных различий в описываемых приборах:

1) в ФМ "Поле-2" модуляция выполняется быстро вращающейся пластиной, в ФМ CS110 — с помощью пластины, выполняющей возвратно-поступательное движение с частотой измерений (используется шаговый двигатель). Такой подход обеспечивает ресурсосберегающий режим работы CS110, в отличие от "Поля", где механический износ двигателя и подвижных узлов является

чувствительной проблемой при непрерывных мониторинговых измерениях. Однако, опыт эксплуатации CS110 показал, что в тёплое время года медленное движение его модулирующей пластины не препятствуют проникновению в измерительную часть датчика насекомых, например, пауков. Это может приводить к искажениям результатов измерений;



(а)

(б)

(в)

Рис. 1. Флюксометры "Поле-2" и CS110 на обсерватории "Паратунка". (а) поляна диаметром около 25 м, окружённая с востока, юга и запада деревьями высотой до 10 м, трава и кусты убраны; справа опорная площадка для ФМ "Поле-2", на заднем плане технический павильон, на крыше которого установлен ФМ CS110. (б) — опорная площадка высотой около 3.5 м с рейкой для измерения уровня снега, в центре площадки установлен ФМ "Поле-2", на заднем плане к северо-востоку от площадки - технический павильон с ФМ CS110. (в) — ФМ CS110 на крыше технического павильона; на стойке закреплены (снизу вверх) бокс с электроникой и системой питания, датчик CS110, вентилируемая коробка с датчиками температуры и влажности, антенна GPS; справа - датчик осадков; на крыше также находится антенна WiFi-связи датчика с регистрирующим компьютером.

2) измерительный элемент датчика CS110 ориентирован вниз, в то время как у ФМ "Поле-2" он повернут вверх. При этом, несмотря на то, что быстро вращающаяся модулирующая пластина "Поле-2" создаёт поток воздуха от датчика, рассеивающего осадки, при сильных ливнях происходит накопление воды внутри датчика, а при снегопадах датчик сверху полностью закрывается снегом, и результаты измерений становятся недостоверными;

3) калибровка "Поле-2" является процедурой, выполняемой вручную и приводящей к потере данных (на ГФО "Паратунка" такая калибровка выполняется ежемесячно, а также после технических работ с прибором или его замены). Разработчиком CS110 декларируется, что калибровка выполняется после сборки электрометра и в условиях пользователя не требуется (по меньшей мере, в течение двух лет; или больше, если не вносились изменения в состав измерительной части). Однако, в случае, если такая калибровка понадобится, то это будет непростой задачей, т. к. потребуются специальная калибровочная установка;

4) ФМ "Поле-2" является электрометром с аналоговым выходом, требующим АЦП и пользовательских решений по синхронизации со шкалой UTC. CS110 — полностью цифровое устройство с WiFi-каналом связи с компьютером, GPS-синхронизацией внутреннего таймера, позволяющее подключать метеорологические датчики и с возможностями для пользователя модернизировать встроенное программное обеспечение в соответствии с конкретными задачами.

Необходимо также отметить, что условия, в которых находятся электрометры, различаются в зависимости от сезона. Зимой-весной снег с крыши технического павильона, на которой установлен CS110, убирается практически сразу же после окончания снегопада, поэтому только в редких случаях его уровень мог быть 20-40 см в течение одних-двух суток. В противоположность этому, снег на поляне, где расположен ФМ "Поле-2", накапливается до максимума в марте (например, максимальный уровень в 23.03.2016 г. был 160 см, а 13.03.2017 г. - 235 см). В тёплое время года может сказываться различие в подстилающей поверхности. Например, ожидается, что битумная крыша, на которой установлен CS110, в солнечный день будет вызывать существенно более сильные восходящие потоки воздуха из-за нагрева, чем грунт под опорной площадкой ФМ "Поле-2", поросший невысокой травой.

Результаты измерений

Одна из основных проблем, возникающих при анализе данных флюксометров, - очень большой диапазон изменений E_z , достигающий тысяч В/м, при том, что вариации являются следствием естественных, природных причин, а не аппаратурных проблем или технических помех при измерениях. На рис. 2а в качестве примера показаны усреднённые за 5 мин. значения E_z , полученные на ГФО "Паратунка" в 2016-2017 гг. с помощью ФМ "Поле-2" и CS110 (помехи, сбои аппаратуры, записи при калибровках или технических работах исключены). Действительный размах вариаций E_z

по исходным данным достигает $\pm(4000-5000)$ В/м, но у ФМ "Поле-2" сигнал аппаратно усечён диапазоном ± 2000 В/м, а вариации для CS110 ограничены на графике для лучшей сопоставимости. Интересующие нас междусуточные и более медленные вариации E_z лежат в диапазоне первых сотен В/м и полностью маскируются огромными быстрыми вариациями, связанными с метеорологическими факторами. Применяемый обычно анализ данных, полученных при условиях хорошей погоды (УХП), осложняется тем, что корректное выделение УХП является достаточно непростой задачей, и дней, которые для Паратунки можно отнести к УХП, очень немного. Например, в соответствии с погодным журналом обсерватории за период, показанный на рис. 2, только 30% записей имеют качественную отметку "ясно", т.е., с определённой вероятностью фиксируют отсутствие облачности. Другие важные факторы, например, ветер, туманы, аэрозоли, зимняя позёмка, изолированные облака и т.п. зачастую остаются неучтёнными.

На рис. 2б показаны 5-минутные данные E_z , отобранные по критериям УХП, в т.ч. взяты полные сутки, для которых в погодном журнале для всех трёх сроков наблюдений (00, 04 и 20UT) отмечено "ясно". Количество 5-минутных значений для обоих электрометров, отобранных по такому критерию, составляет около 15%. Используемый критерий УХП является достаточно жёстким по сравнению, например, с [3], поскольку практически полностью исключает измерения при облачности, в т.ч. и переменной, осадках и тумане. С другой стороны, им учитываются условия только в дневное время (с 08 до 16 час. по местному времени), возможны пропуски изолированных облаков и не принимается во внимание ветер, а сам погодный журнал включает фактор субъективности наблюдателя.

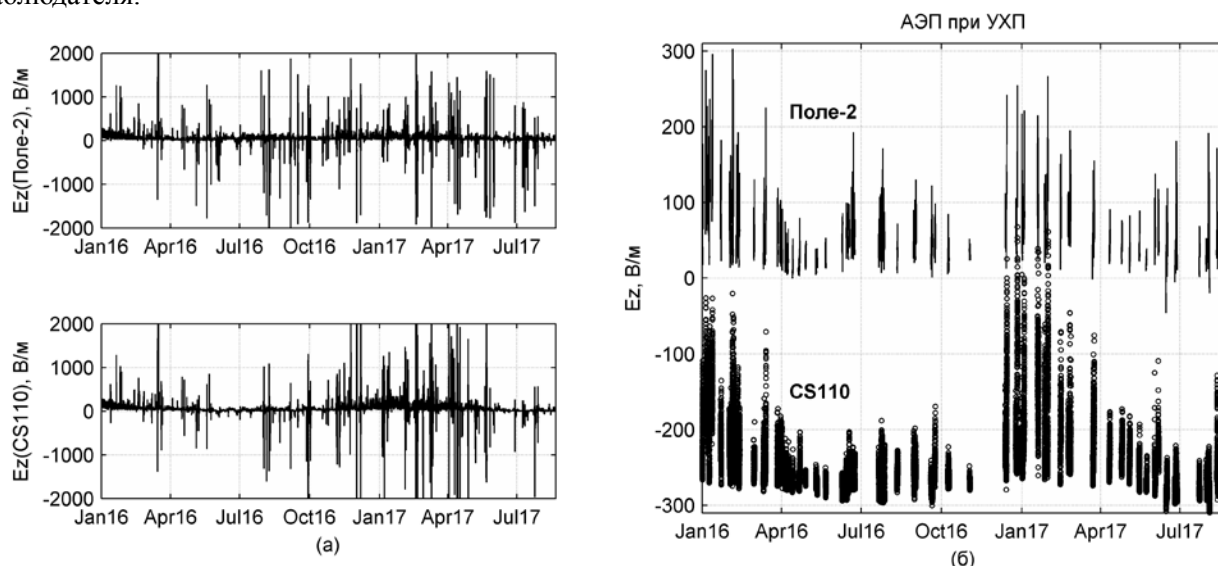


Рис. 2. Вариации градиента потенциала E_z по измерениям ФМ "Поле-2" и CS110 в 2016-2017 гг. (5-минутные значения). (а) исходные данные, пределы оси ординат для графика CS110 ограничены для лучшего сопоставления с E_z ("Поле-2"). (б) вариации при условиях хорошей погоды (данные для CS110 смещены по ординате на -300 В/м).

Результаты на рис. 2 показывают, что существуют сезонные изменения E_z , в т.ч. более высокие средние значения и изменчивость в зимнее время, чем в летнее, что совпадает с оценками в [2] по измерениям в 1998-2006 гг. Кроме того, по рис. 2 видно, что вариации в летнее время по измерениям с помощью ФМ "Поле-2" в целом больше, чем по измерениям CS110. Такое поведение E_z (CS110) было отмечено летом 2015 г., повторилось в 2016 г. и может быть интерпретировано как снижение чувствительности CS110. Для количественного выражения эффекта было получено отношение E_z (Поле) к E_z (CS110), результаты показаны на рис. 3. Хорошо видно на рис. 3(левая панель), что в мае-сентябре отношение возрастает примерно с 1 до 5-10, т.е. чувствительность CS110 уменьшается в несколько раз. Рис. 3(правая панель) в качестве примера даёт детализацию эффекта для одних суток (26.07.2016 г.), а также вариации температуры и влажности в датчике. Большой суточный перепад температуры связан с нагревом CS110 (и крыши) Солнцем, низкие значения относительной влажности — следствие использования силикагеля внутри датчика. Корреляции между аномальным поведением E_z (CS110) и такими факторами как, например, метеорологические параметры (внутренние и наружные температура и влажность) или ток утечки через электроды, который оценивается в CS110 для каждого измерения, предполагаются, однако они проявляются неустойчиво.

В качестве причины рассматривалось возможная активизация выделения аэрозолей из

битумной крыши при сильном нагреве прямыми солнечными лучами, однако тестовые записи CS110, сделанные на поверхности земли, показали, что этот фактор маловероятен. Более вероятной причиной представляются процессы, проходящие в измерительной части датчика с образованием конденсата. Действительно, чувствительность CS110 падает обычно перед закатом (астрономическим), т. е. при достаточно резком понижении температуры. Однако непосредственные измерения относительной влажности (если не предполагать их недостоверность) в самом датчике и уличной не показывают, что следует ожидать образования конденсата, например, на изоляторах или пластинах. Кроме того, ток утечки через изоляторы, причиной которого обычно является конденсат, регистрируется при измерениях и не показывает однозначной корреляции с изменением чувствительности электрометра. Необходимо отметить, что в конструкции датчика предусмотрено размещение силикагеля в измерительной области датчика CS110, и его замена не давала видимого эффекта.

Ещё одной причиной м. б. активность насекомых в измерительной части датчика, которая снижается в ночное время суток и полностью отсутствует в холодное время года. Основанием для такого предположения является принципиальная возможность попадания насекомых внутрь датчика из-за низкой скорости движения экранирующей пластины, например, при порывах ветра. Так, во время профилактики в июле 2017 г. в области обтюлятора была обнаружена паутина, а внутри датчика — живой паук и кокон. Чистка датчика с одновременной заменой силикагеля восстановила чувствительность, однако через некоторое время эффект снова начал проявляться.

Существует также вероятность, что мы имеем дело с чисто аппаратным сбоем, возможно, требующим действий со стороны разработчика. Проблема остаётся нерешённой, в т.ч. и из-за некоторой её спонтанности: в конце августа 2017 г. без каких-либо видимых оснований чувствительность CS110 восстановилась и сохраняется на приемлемом уровне.

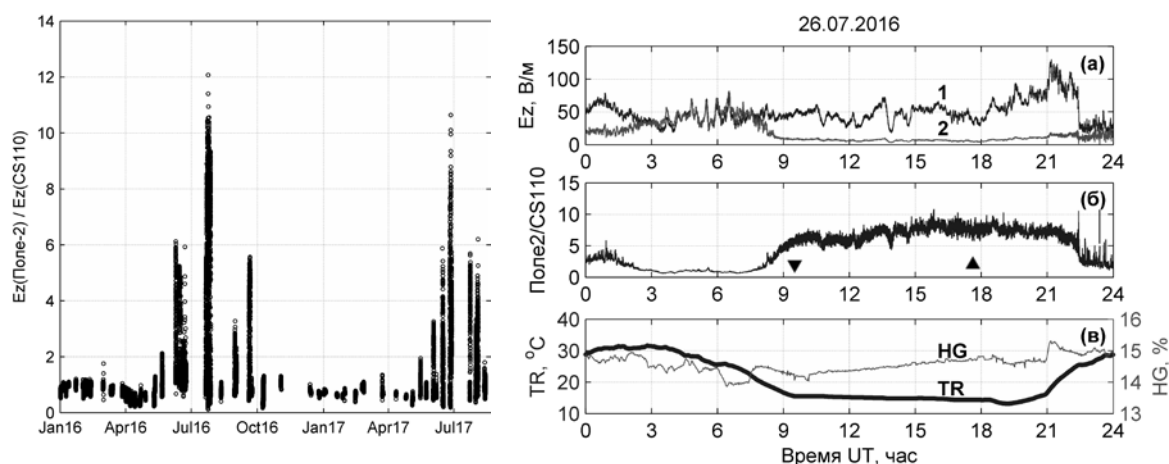


Рис. 3. Эффект сезонной нестабильности чувствительности электрометра CS110. На правой панели показано отношение E_z , зарегистрированного с помощью ФМ "Поле-2", к $E_z(\text{CS110})$. На левой панели: (а) 5-минутные значения E_z двух электрометров (1 — "Поле-2", 2 — CS110); (б) отношение $E_z(\text{Поле-2})/E_z(\text{CS110})$, символами ∇ и Δ показаны моменты заката и восхода Солнца в рассматриваемые сутки; (в) — минутные значения температуры (TR) и относительной влажности (HG), зарегистрированной датчиками внутри датчика CS110.

На рис. 4 показаны записи ФМ "Поле-2" и CS110 06.01.2017 г. во время незначительного снегопада, который проявился в виде трёх сильных аномалий, две из которых (в 08 и 12UT) представлены на рис. 4. Наблюдается почти полное совпадение записей двух электрометров в 12UT, при значительном амплитудном различии в 08UT. Возможной причиной этого м. б. пониженная чувствительность CS110 в 08UT.

Заключение

Выше были рассмотрены измерения E_z , выполненные на ГФО "Паратунка" в 2016-2017 гг. с помощью флюксометров "Поле-2" и CS110. Преимущественно анализировался единственный эффект, обнаруженный в результатах CS110, - сезонная нестабильность его чувствительности. Представлены некоторые возможные источники этого эффекта, однако решение проблемы не найдено и является задачей будущих работ.

Рассматриваемый вопрос в значительной степени является узкотехническим. Однако он затрагивает очень важный методический аспект, непосредственно касающийся научных исследований: надёжности (достоверности) используемых данных. В данном случае, при отсутствии

измерений с помощью ФМ "Поле-2" и/или при отсутствии долговременных измерений при постоянных условиях, полученные с помощью CS110 ряды рассматривались бы как достоверные, а обсуждаемый эффект сезонной нестабильности чувствительности мог бы быть интерпретирован как естественные вариации электрического поля. Подобная ситуация не уникальна и не связана исключительно с CS110 — например, иногда у ФМ "Поле-2" между калибровками, предусмотренными регламентом, существенно менялись инструментальные параметры, однако идентифицировать полученные при этом результаты измерений как недостоверные было практически невозможно.

Таким образом, в условиях сильной зависимости наблюдения АЭП от локальных эффектов, единственной возможностью контроля получаемых результатов являются параллельные независимые измерения двумя приборами, предпочтительнее, работающих на разных методических принципах.

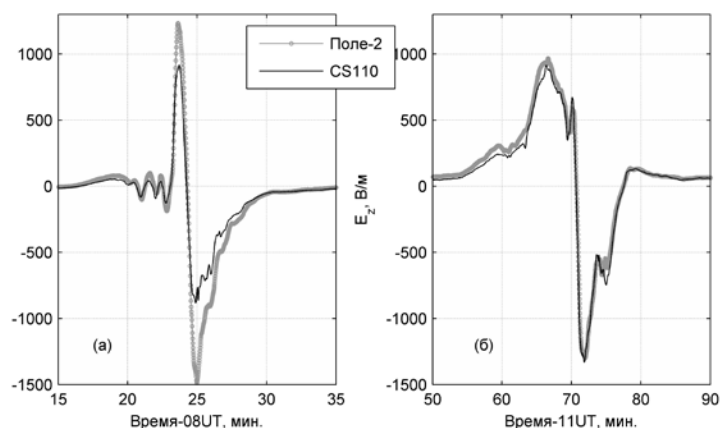


Рис. 4. Эффект нестабильной чувствительности электрометров "Поле-2" и CS110 во время снегопада 06.01.2017 г.

Благодарности

Автор благодарит сотрудников ГФО "Паратунка" С.В. Бутина и И.Ю. Бабаханова за техническое обеспечение мониторинга АЭП. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 14-11-00194.

Список литературы

1. Датчик напряженности электрического поля "Поле-2". Техническое описание и инструкция по эксплуатации // Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова. Ленинград, 1991. - 35 с.
2. Чернева Н.В., Фирстов П.П. Влияние метеорологических факторов на электрические параметры нижней атмосферы // Метеорология и гидрология. 2013. №3. С.56-65.
3. Bennett A.J., Harrison R.G. Atmospheric electricity in different weather conditions // Weather. 2007. Vol.62, №10. P.277-283.
4. Buzevich A.V., Smirnov S.E. Specialized Hardware-Software Complex of Geophysical Observatory "Paratunka" // 23 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics. Sapporo, Japan. 2003. P. B81.
5. CS110 Electric Field Meter. Instruction Manual. Revision: 4/12. - Campbell Scientific, Inc., 2005-2012. 40 pp.
6. Khomutov S., Smirnov S., Butin S., Babakhanov I. First results of atmospheric electricity measurements by CS110 electric field meter at Paratunka observatory, Kamchatka // E3S Web Conf. 2016. Vol.11, №8. (DOI: 10.1051/e3sconf/20161100008) - VII International Conference "Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors".