

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ СВЕРКИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ФЛЮКСМЕТРОВ «ЭФ-4» И «ПОЛЕ-2».

Акбашев Р.Р.¹, Фирстов П.П.¹, Хомутов С.Ю.², Ефимов В.А.³

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, arr@emsd.ru

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, firsto@emsd.ru

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с.Паратунка, Камчатский край, khomutov@ikir.ru

³Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, vladefimov48@mail.ru

Введение

Электрическое поле атмосферы (ЭПА), является неотъемлемым геофизическим фактором в общей системе геофизических полей планеты Земля. С ним связано протекание многих природных явлений, как в толще атмосферы, так и непосредственно у поверхности Земли [9]. В некоторых случаях анализ вариаций ЭПА позволяет говорить о возможности возникновения лесных пожаров, землетрясений, эволюции тропических циклонов. Результаты исследования ЭПА необходимы для решения задач радиосвязи, поиска рудных месторождений, обнаружения очагов радиоактивности. Вместе с тем ЭПА связано с глобальной грозовой активностью, приливными эффектами, солнечной и сейсмической активностью. В последнее время в связи с появлением новых экспериментальных данных в пунктах наземного базирования, при спутниковых наблюдениях и баллонном зондировании резко возрос интерес к исследованию электрического поля атмосферы и моделям глобальной электрической цепи [4]. Это диктует необходимость создания современной приборной базы с цифровой регистрацией для мониторинга параметров ЭПА.

В работе рассмотрены результаты одновременных наблюдений за вариациями градиента потенциала (V') ЭПА полученные современным флюксметром «ЭФ-4» и флюксметром «Поле-2», разработанным в прошлом веке. Эксперимент проводился в обсерватории «Паратунка» (ПРТ) ИКИР ДВО РАН (Камчатка) с целью проверки идентичности метрологических характеристик сравниваемых приборов.

Сравнение технических характеристик флюксметров «ЭФ-4» и «Поле-2».

Электростатический флюксметр – прибор, предназначенный для измерения интенсивности медленно меняющихся во времени электрических полей, в частности V' ЭПА. В основе его работы лежит принцип действия электростатического генератора, который состоит в том, что в проводнике, находящемся в переменном электрическом поле, индуцируются заряды, причем величина тока, обусловленная их движением, пропорциональна величине и скорости изменения напряженности поля.

В течение последних 40 лет регистрация V' ЭПА на обсерваториях России осуществляется с помощью флюксметра «Поле-2», разработанного в ГГО им. А.И. Воейкова в 70^х годах прошлого века [2]. В настоящее время этот прибор не соответствует современным требованиям как по энергопотреблению и габаритам, так и по элементной базе. Вместе с тем флюксметр «ЭФ-4», разработанный на основе современной микроэлектроники с использованием цифровых технологий, может быть рассмотрен как замена устаревшего «Поле-2» [3,5]. Общий вид флюксметров «Поле-2» и «ЭФ-4» приведен на рисунке 1.

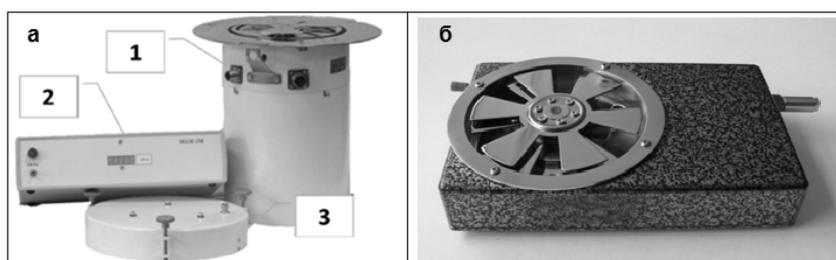


Рис. 1. Электростатический флюксметр «Поле-2» (а); электростатический флюксметр ЭФ-4 (б).

1 – выносной блок первичного преобразователя (датчик), 2 – вторичный блок питания и сопряжения, 3 – насадка на датчик для проведения контроля измерений.

На Камчатке изучение ЭПА началось с 1990 г., когда на обсерватории ПРТ был установлен флюксметр «Поле-2» с системой регистрации полученных данных аналогового типа [6]. В дальнейшем система для регистрации, хранения и обработки данных V' ЭПА была модернизирована и переведена на цифровые технологии [2,7]. Первая модель флюксметра «ЭФ-4» была установлена наблюдательном пункте «Карымшина» (КРМ) Камчатского филиала ГС РАН в марте 2008 г. За почти семилетний период эксплуатации флюксметр «ЭФ-4» зарекомендовал себя как очень надежный прибор. Сильные снегопады и ливни почти не влияли на режим работы прибора. Технические характеристики сравниваемых измерительных приборов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики флюксметров «Поле-2» и ЭФ-4

Параметры	«Поле-2»	ЭФ-4
Верхняя граница измеряемых напряжений электрического поля	1 канал $\pm 0.5 \text{ кВ/м}$ 40% 2 канал $\pm 5 \text{ кВ/м}$ $\pm 40\%$	$V' = \pm 2 \text{ кВ/м}$
Максимальное выходное постоянное напряжение датчика	$\pm 1 \text{ В}$	$\pm 5 \text{ В}$
Выходное сопротивление	75 Ом	2 кОм
Среднеквадратическая погрешность измерения	0.5%	5 мВ
Время выхода в номинальный режим	20 мин.	30 мин
Напряжение питания	220В, частота 50 Гц	10-14В DC
Потребляемая мощность	30Вт	3Вт
Температура воздуха	от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$	от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$
Влажность	до 100%	
Режим работы	непрерывный	
Вес	3кг	1 кг

Структурные схемы рассматриваемых приборов концептуально одинаковы, но имеются существенные отличия по способу измерения и построению электрической схемы. В «Поле-2» применена двухканальная дифференциальная схема измерений. Соответственно, имеется два, вложенных друг в друга, воспринимающих электрода, которые экранируются одним заземленным электродом (обтюратором). Казалось бы, что такая система имеет существенно меньшие погрешности измерений, так как синфазные помехи, к которым следует отнести наводки и нестабильности источников питания, имеют одинаковую интенсивность в каналах измерения, и поэтому могут быть подавлены. Однако основной вклад в погрешность измерений вносит контактная разность потенциалов между экранирующим электродом и «землей», которая в дифференциальной схеме измерений не устраняется. Действительно, при экспозиции одного воспринимающего электрода в измеряемом поле составляющая, обусловленная контактной разностью потенциалов, в соответствующем измерительном канале отсутствует, в то время как на другом воспринимающем электроде она генерируется в полной мере. Дифференциальная схема вычисляет разность сигналов, полученных в двух измерительных каналах, следовательно, на выходе схемы измерения помеха остается. Вместе с тем двойной комплект измерительных электродов позволяет повысить чувствительность прибора. Максимальный теоретический выигрыш в отношении сигнал/шум при этом равен 1,43, но если учесть, что собственные шумы измерительных каналов некоррелированы, то выигрыша может и не быть. При этом конструкция прибора усложняется. Так как между воспринимающими электродами должны быть зазоры, то в них могут возникать водяные (ледяные) перемычки, что приводит при измерениях к дополнительным погрешностям. В флюксметрах классической конструкции, к которой относится «ЭФ-4», такой проблемы нет, но и помеха, обусловленная контактной разностью потенциалов, также не устраняется.

В электростатических флюксметрах на точность измерений влияет нестабильность скорости вращения обтюратора. В «Поле-2» используется мощный двигатель переменного тока, число оборотов которого поддерживается на заданном уровне путем стабилизации напряжения питания. Однако этого недостаточно, так как механическая нагрузка на обтюратор (а, следовательно, и его число оборотов) меняются во времени. Высокое энергопотребление мощного двигателя требует сети переменного тока, а его непрерывная эксплуатация является причиной частых регламентных работ. В отличие от «Поле-2», в «ЭФ-4» используется прецизионный вентильный двигатель с напряжением питания +12 В, который потребляет в рабочем режиме не более 0,3А. Его скорость

вращения поддерживается на заданном уровне микропроцессорной системой, которая учитывает нагрузку на двигатель. При этом в качестве источника питания можно использовать аккумулятор, что позволяет работать прибору в автономном режиме в отсутствие сетевых помех.

Что касается различий в реализации электрических схем, то можно указать на разные схемы синхронных детекторов. В «Поле-2» это ключевая схема, требующая тщательной индивидуальной настройки, а в «ЭФ-4» применяется прецизионный (с лазерной подгонкой) перемножитель аналоговых сигналов с гарантированной точностью выполнения операции. Так как от точности работы синхронного детектора напрямую зависят погрешности измерений, это различие в схемах перемножителей является существенным фактором. В «Поле-2» синхронизация сигналов осуществляется регулируемым фазовращателем, однако это обстоятельство не является существенным преимуществом. Важна не точная синхронизация, а стабильность разности фаз между сигналами, подаваемых на синхронный детектор. При нестабильной скорости вращения обтюлятора фазовращатель вносит фазовую ошибку. В «ЭФ-4» подстройка разности фаз задается механическим путем и не зависит от скорости вращения двигателя.

Обработка информационного сигнала как в «Поле-2», так и в «ЭФ-4» осуществляется в аналоговом виде на основе операционных усилителей, для которых имеет место пороговый эффект, проявляющийся в зависимости фазового набега от уровня сигнала и который следует учитывать при калибровке. В «ЭФ-4» он сведен к минимуму. Пороговый эффект приводит к тому, что при измерении больших значений напряженности поля калибровочная характеристика приборов становится нелинейной. Поэтому рассматриваемые приборы нуждаются в тщательной калибровке в верхней части диапазона измерений, что в известной мере является проблемой.

Выявленные различия в построении приборов позволяют сделать вывод, что метрологические характеристики «ЭФ-4» не уступают характеристикам «Поле-2», при меньших габаритах, весе, и энергопотреблении, высокой надежности и стабильной погрешности измерений (см. табл. 1).

Проверка на обсерватории «Паратунка» идентичность работы электростатических флюксометров «ЭФ-4» и «Поле-2».

Флюксометр «Поле-2» установлен в 200-х м от административного здания обсерватории ПРТ на площадке радиусом 12 м, расчищенной от деревьев, на эквипотенциальной поверхности высотой 3 м (рис. 2а), выравнивающей силовые линии электрического поля параллельно поверхности Земли (рис. 2б) [10]. Выходной сигнал прибора оцифровывается с частотой 1 Гц 14-битным АЦП и записывается на жесткий диск персонального компьютера.

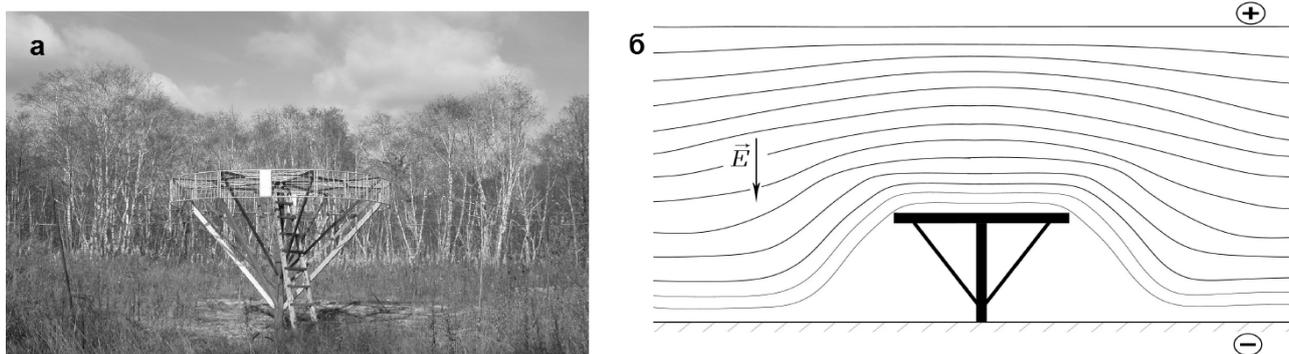


Рис. 2. Общий вид эквипотенциальной поверхности, где установлен флюксометр «Поле-2» на обсерватории ПРТ (а), схема линий напряженности ЭПА над эквипотенциальной поверхностью (б).

Для сверки флюксометр «ЭФ-4» устанавливался на той же площадке и работал с 21.12.2014 г. по 15.12.2015 г. На рисунке 3 показаны графики записей вариаций напряженности измеряемого поля, без учёта коэффициентов для получения истинных значений V' ЭПА, для двух суток в условиях хорошей погоды. Кривые исходных сигналов для обоих флюксометров близки. На рис. 3 приведена относительная ошибка ($\delta\% = \frac{U_{\text{э}} - U_n}{U_n} \cdot 100$) значений «ЭФ-4» к «Поле-2», которая в среднем за двое суток составила 7,6%.

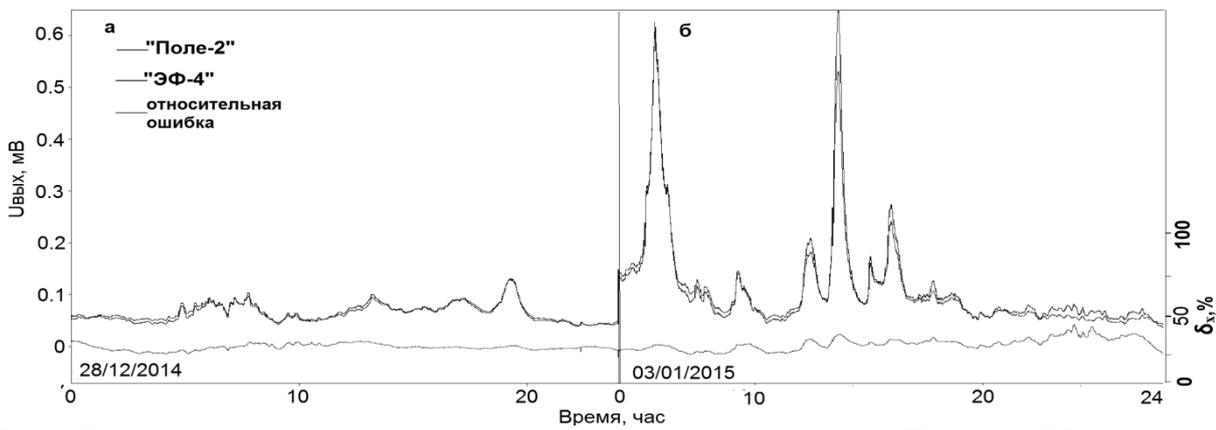


Рис. 3. Суточные вариации, записанные электростатическими флюксметрами «Поле-2» и «ЭФ-4»: а-28.12.2014 г., б – 03.01.2015 г. время по UT.

Для получения истинных значений V' ЭПА, необходимо знать зависимость $V'=f(U)$, параметры которой оцениваются при калибровке приборов. В комплекте флюксметра «Поле-2» предусмотрена специальная калибровочная насадка (рис. 1а) с помощью которой был прокалиброван чувствительный канал испытуемого прибора (рис. 4а).

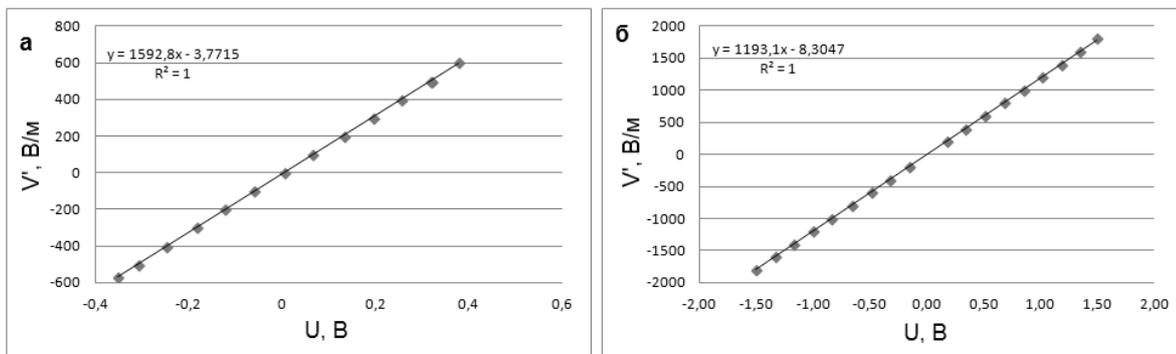


Рис. 4. Калибровочная кривая: а – для флюксметра «Поле-2»; б - для ЭФ-4.

Для калибровки «ЭФ-4» был изготовлен специальный калибровочный стенд, представляющий собой плоский конденсатор с обкладками из фольгированного текстолита размером 70*70 см. Флюксметр «ЭФ-4» размещался в стенде так, чтобы его обтюратор находился в плоскости нижней пластины конденсатора по её центру. Нижняя обкладка вместе с прибором заземлялись а между пластинами подавалось напряжение от источника постоянного тока. При известных геометрических параметрах конденсатора рассчитывалась напряженность электрического поля в конденсаторе и строилась калибровочная кривая $V' = f(U_{\text{вых}})$ для «ЭФ-4» (рисунок 4б). Отметим, что для калибровочных зависимостей степень достоверности (R^2) равна 1 (рис.4), что указывает на высокую линейность характеристики и стабильность приборов.

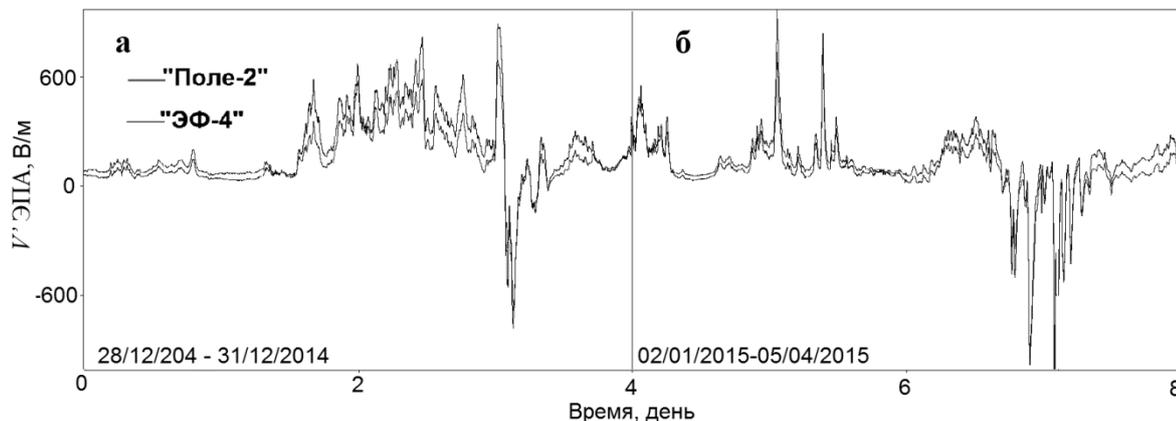


Рис.5. записи V' ЭПА флюксметрами «Поле-2» и «ЭФ-4» за периоды: а – 28.12.2014 г. – 31.12.2014 г., б – 02.01.2015 г. – 05.01.2015 г.

Пересчитанные кривые в абсолютные значения V' ЭПА для обоих флюксометров за период 28.12.2014 г. – 31.12.2014 г. и за 02.01.2015 г. – 05.01.2015 г. приведены на рис. 5а,б, из которых следует, что динамика вариаций V' ЭПА в показаниях обоих приборов достаточно близка, но абсолютные значения имеют относительные отклонения до 20%. По-видимому, это связано с различием мест установки приборов. «Поле-2» был установлен в центре эквипотенциальной площадки (рис. 2), тогда как «ЭФ-4» – ближе к краю этой площадки. Кроме того эквипотенциальная поверхность создает локальное сжатие силовых линий ЭПА (рис. 2а), поэтому даже незначительное возвышение обтюлятора над ней вызывает изменения в показаниях прибора. В этом плане установка сравниваемых приборов была различна: обтюратор «Поле-2» был установлен заподлицо с эквипотенциальной поверхностью, в то время как «ЭФ-4» возвышался над ней на величину своей высоты.

Заключение

Синхронные параллельные измерения на одной эквипотенциальной поверхности V' ЭПА флюксометрами «Поле-2» и «ЭФ-4» на обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН (Камчатка) показали хорошую идентичность работы обоих приборов, совпадение результатов на уровне единиц процента.

Электростатический флюксметр «Поле-2» это надежный и эффективный прибор, сыгравший огромную роль в изучении ЭПА в РФ, но который на сегодняшний день технически и морально устарел. В свою очередь ЭФ-4 имеет современную элементную базу, малые габариты, надежный двигатель с питанием 12 В, с возможностью регистрации обтюратором «вниз». Разработанный на современной элементной базе с большим ресурсом работы и экономичным двигателем флюксметр ЭФ-4, предоставляет новые возможности для наблюдений за V' ЭПА как на обсерваториях, так и в полевых условиях. Возможность использования ЭФ-4 в длительном автономном режиме, позволяет проводить натурные наблюдения за V' ЭПА вблизи действующих вулканов вдалеке от населенных пунктов. Так в пункте «Козыревск» Камчатского филиала ГС РАН в непрерывном режиме с декабря 2013 г. эффективно работает флюксметр «ЭФ-4». Этим прибором был зарегистрирован отклик в ЭПА от пеплового шлейфа, образовавшегося в результате сильного взрывного извержения вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. [8].

Авторы благодарят сотрудников обсерватории "Паратунка" ИКИР ДВО РАН С.В. Бутина и И.Ю.Бабаханова за помощь в проведении совместных экспериментов.

Список литературы

1. Бузевич А.В., Смирнов С.Э., Филимонов В.И., Фирстов П.П. Специализированный аппаратно-программный комплекс сбора и обработки геофизической информации обсерватории «Паратунка» // Тез. докл. Межд. совещ. 18-21 августа 1998 г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 1998. С.36-39.
2. Гордюк В.П. Исследование принципов построения приборов для измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы // Тр. ГГО. 1981. Вып. АЭ. № 442. С. 96-102.
3. Ефимов В.А., Орешкин Д.М., Фирстов П.П., Акбашев Р.Р. Применение электростатического флюксметра ЭФ-4 для исследований геодинамических процессов // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 4. с.35-46.
4. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527- 533.
5. Патент РФ № 104729. Электростатический флюксметр. Авторы В.А. Ефимов, П.А.Полушин, Л.В. Грунская. Оп. 20.05.2011., Бюл. №14.
6. Руленко О.П., Иванов А.В., Шумейко А.В. Краткосрочный атмосферно - электрический предвестник Камчатского землетрясения 6.03.1992, $M=6.1$ // Докл. РАН. 1992. Т. 326. № 6. С. 980-982.
7. Смирнов С.Э. Специализированный программно-аппаратный комплекс геофизической обсерватории «Паратунка» / Сборник докладов школы-семинара «Метрологические основы магнитных наблюдений Сибири и Дальнего Востока». ИКИР ДВО РАН. 2003. С. 8-11.
8. Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Holzworth R.H., Чернева Н.В., Шевцов Б.М. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. // ФАО. 2015. (в печати).
9. Чалмерс Дж.А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
10. Smirnov S. E. and Marapulets Y. V.. Influence of a single lightning discharge on the intensity of an air