

**ОБ ИЗМЕРЕНИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В ОБСЕРВАТОРИИ «ПАРАТУНКА»****MEASUREMENT OF THE ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD
AT THE PARATUNKA OBSERVATORY****В.В. Денисенко** *Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Красноярск, Россия, denisen@icm.krasn.ru***С.Э. Смирнов** *Институт космических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, sergey@ikir.ru***V.V. Denisenko***Institute of Computational Modelling SB RAS,
Krasnoyarsk, Russia, denisen@icm.krasn.ru***S.E. Smirnov***Institute of Cosmophysical Research
and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Paratunka, Russia, sergey@ikir.ru*

Аннотация. Построена математическая модель квазистатического электрического поля в приземном слое воздуха в области установки датчика, учитывающая его конструкцию и размещение на лесной поляне. Расчеты проведены для условий геофизической обсерватории «Паратунка». Модель учитывает влияние на измерения электрического поля контуров поляны, высоты окружающего леса и изменения высоты снежного покрова в зимний период. Вычислены коэффициенты калибровки проводимых измерений, которые целесообразно использовать для устранения искажений атмосферного электрического поля, вносимых измерительной системой.

Ключевые слова: атмосфера, электрическое поле, измерение, математическая модель.

Abstract. A mathematical model of the quasi-static electric field in the surface air layer in the sensor installation area is constructed with regard to its design and placement in a forest glade. The calculations are performed for the conditions of the Paratunka Geophysical Observatory. The model takes into account the influence of the contours of the glade, the height of the surrounding forest, and changes in the height of the snow cover in winter on measurements of the electric field. We calculate the calibration coefficients for the measurements, which should be used to eliminate distortions of the atmospheric electric field introduced by the measuring system.

Keywords: atmosphere, electric field, measurement, mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение атмосферного электрического поля является сложным делом из-за того, что проводимость воздуха, и как следствие, токи в нем малы. Поэтому для измерения токов приходится создавать установки большого размера, чтобы собирать токи с большой площади [Анисимов и др., 2014]. Хотя напряженность атмосферного электрического поля составляет сотни, а иногда и тысячи вольт на метр, она не может быть измерена, например, с помощью обычных вольтметров. Вольтметры имеют большие внутренние сопротивления в сравнении с сопротивлениями в электрических цепях, чтобы не исказить измеряемые напряжения, но они недостаточно велики, чтобы не исказить электрические поля в воздухе.

Обычно используются электростатические флюксометры, которые часто называют датчиками типа «мельница» из-за их устройства [Имянитов, 1957]. После калибровки в лабораторных условиях датчики нуждаются в дополнительной калибровке, компенсирующей искажения поля, возникающие за счет измерительной системы и других предметов, находящихся вблизи датчика. При этом в работах по атмосферному электричеству этому уделяется недостаточное внимание. В настоящее время существует множество видов датчиков, а также множество спо-

собов их установки. Показания приборов существенно различаются в зависимости от того, на какой высоте от поверхности земли и на какой высоте над уровнем моря проводятся наблюдения. В сети GLOCAEM (GLObal) приведены данные измерений приземных электрических полей, выполненных в различных точках Земли. Разброс медианных значений напряженности поля составляет от 20 до 404 В/м [Nicoll et al., 2019]. Различия отчасти связаны с методами измерения. В данной работе количественно рассмотрены основные искажающие поле факторы и вычислены калибровочные коэффициенты, которые помогли бы устранить эти искажения.

Расчеты проведены для условий геофизической обсерватории «Паратунка». Обсерватория расположена на п-ве Камчатка недалеко от города Петропавловска-Камчатского, имеет координаты $\varphi=52^{\circ}58'21''$ N, $\lambda=158^{\circ}15'02''$ E, высота над уровнем моря составляет 76 м. В обсерватории используется датчик «Поле-2» типа электростатического флюксометра, разработанный в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург). Для приведения измеряемых значений электрического поля к уровню земли была разработана процедура редукиции поля, описанная в Руководящем документе [Шварц и др., 2002]. В поздних редакциях Руководящего документа [Соколенко и др., 2017] от этой процедуры отказа-

лись. Некоторые аргументы в пользу такого решения и его минусы представлены в данной статье.

В приземном слое атмосферного электрического поля действует так называемый электродный эффект [Куповых и др., 1998]. В теории электродного эффекта изучаются распределения по высоте положительных и отрицательных аэроионов и рассчитываются высотные профили проводимости воздуха и напряженности электрического поля. Наша модель основана на решении стационарной задачи электропроводности. При таком подходе электродный эффект может быть приближенно учтен только за счет задания высотного хода атмосферной проводимости на основе результатов известных моделей. Это позволяет абстрагироваться от рассмотрения высотного распределения ионов разных типов.

В настоящей работе рассмотрено влияние вышки, на которой установлен датчик, и леса, находящегося поблизости. Проведена также оценка роли электродного эффекта, который вызывает уменьшение проводимости воздуха вблизи земли.

1. ЗАДАЧА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Мы анализируем только квазистационарные измерения. Поэтому распределения электрических полей и токов в атмосфере можно найти, решая задачу электропроводности. При описании электрических процессов в атмосфере, характерное время протекания которых превышает 15 мин, применима квазистационарная модель [Molchanov, Hayakawa, 2008].

Основные уравнения для стационарной напряженности электрического поля \mathbf{E} и плотности тока \mathbf{j} — это закон Фарадея, закон сохранения заряда и закон Ома

$$\operatorname{rot}\mathbf{E}=0, \tag{1}$$

$$\operatorname{div}\mathbf{j}=0, \tag{2}$$

$$\mathbf{j}=\sigma\mathbf{E}. \tag{3}$$

Поскольку рассматриваем локальные явления и считаем проводимость постоянной, для определенности задаем характерное для приземного воздуха значение $\sigma=10^{-14}$ См/м. При постоянной проводимости из (2), (3) следует $\operatorname{div}\mathbf{E}=0$, что означает нулевую плотность заряда в проводнике. Это относится и к движущемуся проводнику, если не учитывать пренебрежимо малого динамо-поля. Поэтому время релаксации заряда в приземном слое воздуха для решаемых нами задач не имеет значения и упомянутого выше ограничения применимости квазистационарной модели (1)–(3) не возникает. Исключением является раздел 8, в котором при оценке роли электродного эффекта проводимость полагается зависящей от высоты.

В силу (1) может быть введен электрический потенциал V такой, что

$$\mathbf{E}=-\operatorname{grad}V. \tag{4}$$

Тогда система уравнений сводится к уравнению электропроводности

$$-\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} V)=0. \tag{5}$$

В силу (2) может быть введена векторная функция тока \mathbf{C} — такая, что

$$\mathbf{j}=\operatorname{rot}\mathbf{C}. \tag{6}$$

Ее мы будем использовать только при представлении результатов. Используются декартовы координаты x, y, z и соответствующие сферические r, ϑ, φ . Для аксиально симметричных токов с нулевой азимутальной компонентой эта векторная функция имеет только одну ненулевую φ -компоненту, которую обозначим C . Тогда ненулевые компоненты плотности тока

$$j_{\vartheta}=\frac{-1}{r}\frac{\partial(rC)}{\partial r}, j_r=\frac{1}{r\sin\vartheta}\frac{\partial(C\sin\vartheta)}{\partial\vartheta}. \tag{7}$$

Проводимость приземного воздуха намного меньше, чем проводимость почвы и морской воды. Поэтому поверхность Земли обычно рассматривается как идеальный проводник. Соответствующее граничное условие имеет вид

$$V|_G=0, \tag{8}$$

где G — граница рассматриваемой области атмосферы. В наших моделях она состоит из поверхности Земли и поверхностей тел, обладающих достаточно большой проводимостью (по сравнению с проводимостью воздуха), чтобы их можно было рассматривать как идеальные проводники.

Считаем, что в невозмущенной атмосфере существует однородное вертикальное электрическое поле. Соответствующее граничное условие имеет вид

$$V|_{r\rightarrow\infty}=E_0z. \tag{9}$$

Для определенности полагаем заданное поле имеющим напряженность $E_0=260$ В/м и направленным вертикально вниз. Такая напряженность поля хорошей погоды над сушей нами выбрана как среднее значение по данным [Pustovalov et al., 2022]. Вертикальность обусловлена горизонтальностью земной поверхности. Если задать иную величину E_0 , полученные ниже поля и токи изменятся пропорционально. При изменении проводимости σ пропорционально изменятся только токи. Поэтому все построенные ниже рисунки останутся в силе, изменятся только интервалы между эквипотенциалами и линиями тока.

2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ПОЛЯ НАД ПОЛУШАРИЕМ

Пусть над плоской поверхностью земли $z=0$ возвышается идеально проводящее полушарие с центром в начале координат и радиусом R . В силу осевой симметрии и постоянства проводимости задача (5), (8), (9) упрощается:

$$\frac{-1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial V}{\partial r}\right)-\frac{1}{r^2\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial\vartheta}\left(\sin\vartheta\frac{\partial V}{\partial\vartheta}\right)=0, \tag{10}$$

$$V|_{z=0, r>R}=0, \tag{11}$$

$$V|_{r=R}=0, \tag{12}$$

$$V|_{r=R_{\infty}}=E_0r\cos\vartheta. \tag{13}$$

Последнее граничное условие в отличие от асимптотического условия (9) поставлено на сфере некоторого радиуса R_{∞} . Это удобно для численного ре-

шения, поэтому здесь мы рассмотрим погрешность, вносимую конечностью R_∞ .

Получившаяся краевая задача Дирихле для уравнения Лапласа (10)–(13) имеет единственное решение. Несложно построить ее аналитическое решение

$$V = \frac{E_0 \cos \vartheta}{1 - \left(\frac{R}{R_\infty}\right)^2} \left(r - \frac{R^2}{r} \right). \quad (14)$$

Компоненты напряженности электрического поля E вычислим по формуле (4), $E_\varphi = 0$,

$$E_r = \frac{-E_0 \cos \vartheta}{1 - \left(\frac{R}{R_\infty}\right)^2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right), \quad (15)$$

$$E_\vartheta = \frac{E_0 \sin \vartheta}{1 - \left(\frac{R}{R_\infty}\right)^2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right). \quad (16)$$

Как видим, для того чтобы погрешность, вносимая конечностью R_∞ , стала менее 1 %, достаточно взять $R_\infty > 10R$.

При условии $R_\infty \gg R$ в силу (15), (16) электрическое поле над верхней точкой шара ($r=R$, $\vartheta=0$) вертикально, направлено вниз, а его напряженность вдвое превышает невозмущенную величину E_0 . Это означает, что, если бы мы могли измерять поле в точке на вершине, то получали бы удвоенное атмосферное поле. Можно сказать, что при таком измерении, согласно предложенной модели, следует использовать калибровочный коэффициент $K=0.5$, на который следует умножать показания сенсора, чтобы получать вертикальную компоненту напряженности электрического поля в приземном воздухе, не искаженного таким полушарием, т. е. при плоской поверхности земли.

Такое удвоение сохраняется при любом радиусе шара. В частности, оно происходит над любым бугорком такой формы. Формулы (15), (16) также говорят о том, что достаточно подняться над бугорком на десять его радиусов, чтобы вносимое им искажение электрического поля стало меньше 1 %.

3. МЕТОД РАСЧЕТА ИСКАЖЕННОГО ПОЛЯ

На рис. 1 показана вышка, используемая при измерении напряженности приземного электрического поля в Паратунке.

Собственно датчик, измеряющий вертикальную компоненту поля, расположен в центре верхней горизонтальной площадки, которая является кругом радиуса 219 см. При моделировании мы заменяем металлические сетки с ячейкой 9×9 см на сплошной проводник, что, по-видимому, можно компенсировать смещением этой поверхности на несколько сантиметров вглубь конструкции. Около датчика поверхность металла действительно сплошная. Чтобы ограничиться осесимметричной моделью, наклонные алюминиевые балки, поддерживающие верхнюю

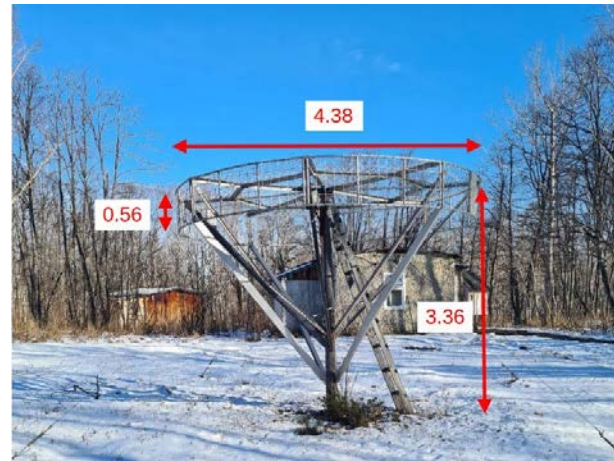


Рис. 1. Вышка, используемая при измерении напряженности приземного электрического поля в Паратунке, размеры в метрах

платформу, мы заменяем на круговой идеально проводящий конус, для которого они являются образующими. Возможность такого огрубления модели будет обоснована позже с помощью расчетов, которые покажут, что форма поверхности, лежащей ниже этой платформы, мало влияет на интересующее нас поле над ее центром.

Центральный столб вышки деревянный, диаметром 15 см. Проводимость дерева существенно зависит от влажности и составляет от 10^{-11} См/м при 20 % влажности до 10^{-6} См/м при 50 %. На Камчатке влажность воздуха всегда велика, и столб вкопан в землю, что дополнительно увеличивает влажность его нижней части, которая нас и интересует. Высота точек прикрепления балок всего 46 см. Даже при указанной минимальной влажности проводимость столба составляет $\Sigma = \pi R_w^2 \sigma_w / L = 1.8 \cdot 10^{-13}$ См при длине $L=1$ м. Здесь использованы приведенные выше радиус столба R_w и проводимость древесины σ_w . Такова же проводимость столба воздуха радиуса 3.4 м, большего в 32 раза. А при реально большей влажности столб можно считать идеальным проводником, что мы и делаем, распространяя на его поверхность условие (8). Получился единый проводник, на котором задан нулевой потенциал — земля и вся вышка.

Сформулированная краевая задача Дирихле для уравнения Лапласа имеет единственное решение. Мы его находим численно. Наш многосеточный вариационно-разностный метод для более общего случая задач с тензорной проводимостью изложен в монографии [Денисенко, 1995].

4. РАСЧЕТ ПОЛЯ, ИСКАЖЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ВЫШКОЙ

Результат численного решения сформулированной в предыдущем параграфе задачи показан на рис. 2 в виде вертикального разреза, проведенного через ось симметрии. Показана только часть расчетной области, в которой искажения поля и токов заметны. Построены эквипотенциали с шагом 100 В (жирные кривые), и линии тока (тонкие кривые), которые являются сечениями трубок, ток в которых равен току 10 пА, умноженному на 1, 2, 3, ... Иными словами,

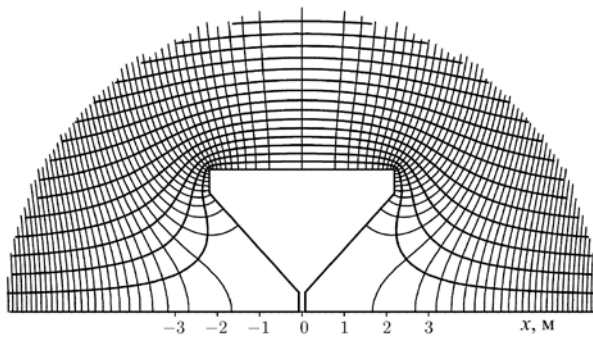


Рис. 2. Распределение электрического поля и токов в вертикальном разрезе, проведенном через ось симметрии измерительной вышки. Жирные кривые — эквипотенциали с шагом 100 В, тонкие кривые — линии тока — сечения трубок, ток в которых равен току 10 пА, умноженному на 1, 2, 3, ...

это линии уровня функции тока C (7) с шагом 10 пА. При хорошей погоде (при заданной плотности тока 2.6 пА/м^2) ток 10 пА течет по столбу воздуха радиусом 1.1 м. На рис. 2 это хорошо видно: таков радиус первой трубки тока.

Хотя токи нас интересуют в меньшей мере, отметим, что на верхнюю поверхность вышки собирается ток 109 пА, а на всю вышку — 218 пА, что соответственно в 2.8 и 5.6 раз больше, чем ток 39 пА, который течет по такому же столбу воздуха в отсутствие вышки.

Основным искомым параметром является напряженность электрического поля над центром верхней площадки вышки, где установлен датчик. Получаем 531 В/м , что в 2.04 раз больше, чем заданное поле в свободной атмосфере. Как видим, усиление поля за счет конкретной конструкции получилось близким к удвоению, полученному в параграфе 2 для сферической вышки.

Чтобы обосновать возможность замены совокупности поддерживающих платформу балок на сплошной идеально проводящий конус, были проведены расчеты для вышки с уменьшением радиуса этого конуса ниже платформы в виде горизонтального уступа на 0.5 м. Такое изменение формы соответствует возможности для поля проникать ближе к центральному столбу мимо балок. Поле над центром вышки возросло всего на 0.5 %, т. е. пренебрежимо мало. При этом ток из атмосферы на всю вышку уменьшился более значительно, на 3 %, в основном за счет поверхности ниже платформы. Это говорит о естественной необходимости более аккуратного моделирования при заинтересованности в распределении полей и токов около нижней части вышки.

5. ПОЛЕ НА ПОЛЯНЕ В ЛЕСУ

Рассмотрим круглую поляну радиусом $R=14 \text{ м}$ в лесу из деревьев высотой $H=9 \text{ м}$. Лес будем рассматривать как сплошной проводящий конус, поскольку проводимость сырого дерева на много порядков больше проводимости воздуха, поэтому ток свободно уходит по веткам в землю. На границе леса сделаем закругление границы этого проводника радиусом 2 м. Это соответствует закруглению кроны и позволяет избежать не имеющей смысла особен-

ности в решении около угла, который образовался бы при представлении границ лесного массива вертикальной и горизонтальной поверхностями. Таким образом, имеем горизонтальный проводящий слой с ямой, соответствующей поляне. Граница изображающего лес слоя и земля поляны образуют единый идеальный проводник, на котором задан нулевой потенциал. Поле в свободной атмосфере задаем с помощью граничного условия (9). Получившуюся краевую задачу Дирихле для уравнения Лапласа, как и в предыдущем параграфе, решаем численно.

Результат численного решения этой задачи показан на рис. 3 в виде вертикального разреза, проведенного через ось симметрии. Показана только часть расчетной области, в которой искажения поля и токов заметны. Построены эквипотенциали с шагом 200 В (жирные кривые), и линии тока (тонкие кривые), которые являются сечениями трубок тока, ток в которых равен току 200 пА, умноженному на 1, 2, 3, ... Иными словами, это линии уровня функции тока C (7) с шагом 200 пА. При хорошей погоде (при взятой плотности тока 2.6 пА/м^2) ток силой 200 пА течет по столбу воздуха радиусом 5 м. На рис. 3 это хорошо видно: радиус первой трубки тока на большой высоте составляет именно 5 м.

Естественно, поле плохо проникает в яму. У земли в центре поляны поле ослаблено в 2.8 раз по сравнению с полем, заданным над лесом. Можно сказать, что при таком измерении следует использовать калибровочный коэффициент $K=2.8$.

Таким образом, в разделах 4, 5 получены два основных результата.

Согласно данной модели, следовало бы уменьшать вдвое показания откалиброванного в идеальных лабораторных условиях датчика, установленного на измерительной вышке в Паратунке, если бы поблизости не было леса.

Судя по результатам нашего моделирования, следовало бы увеличивать в 2.8 раз показания датчика, установленного в Паратунке, если бы он был установлен на земле в центре лесной поляны.

Можно было бы предположить, что для устранения искажений, вносимых обоими эффектами, следует умножить показания датчика на $2.8/2.04=1.37$. Однако поляна имеет размеры, сравнимые с размером измерительной вышки, поэтому нет оснований считать эти два эффекта независимыми. В следующем разделе описаны расчеты для геометрически более сложной задачи, моделирующей вышку на поляне.

6. ВЫШКА НА ПОЛЯНЕ

На рис. 4 показана вышка, используемая при измерении напряженности приземного электрического поля в Паратунке. В отличие от рис. 1 фото сделано с квадрокоптера и показывает большую область.

Как видим, поляна не является кругом с центром на оси вышки, поэтому поле не имеет осевой симметрии и задачу электропроводности (5), (8), (9) следует решать в трехмерной постановке. Наш вариационно-разностный многосеточный метод численного решения изложен в статье [Денисенко, Помозов, 2010].

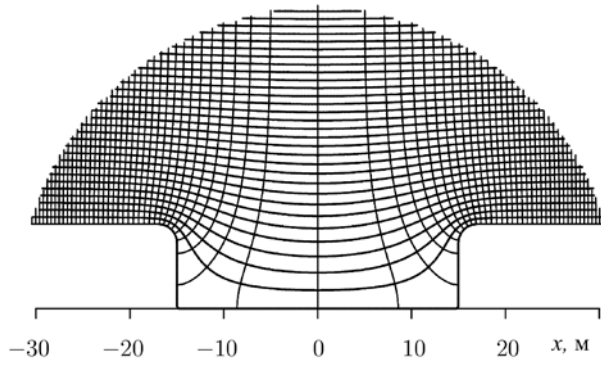


Рис. 3. Распределение электрического поля и токов в вертикальном разрезе, проведенном через ось симметрии поляны. Жирные кривые — эквипотенциали с шагом 200 В, тонкие кривые — линии тока — сечения трубок, сила тока в которых равна току 200 пА, умноженному на 1, 2, 3, ...



Рис. 4. Вышка, используемая при измерении напряженности приземного электрического поля в Паратунке, фото сделано с квадрокоптера, размеры в метрах

Хорошими проводниками, примыкающими к земле, наряду с вышкой, мы считаем деревья, кусты, домик и снег. О хорошей проводимости сырого дерева мы уже говорили, она позволяет весь объем, заполненный ветками, считать идеальным проводником. Характерная проводимость снега по данным [Тентюков и др., 2022] составляет $10^{-3} - 10^{-2}$ См/м, т. е. больше чем на 10 порядков превышает проводимость воздуха. Рассматриваем лес как сплошной идеально проводящий слой высотой 9 м с закруглениями около границ, которые показаны на следующих рисунках: кусты — как слой высотой 2 м, на больших расстояниях везде лес, домик 6×6 м с плоской крышей, высота 3 м. Рассматриваем разные варианты с высотой снежного покрова от 0 до 2.5 м.

Результаты численного решения задачи электропроводности (5), (8), (9) в отсутствие снега показаны на рис. 5. Показана только часть расчетной области, где заметно возмущение поля. Построены эквипотенциали с шагом 100 В на вертикальной плоскости, проведенной через ось симметрии измерительной вышки в направлении минимального размера поляны.

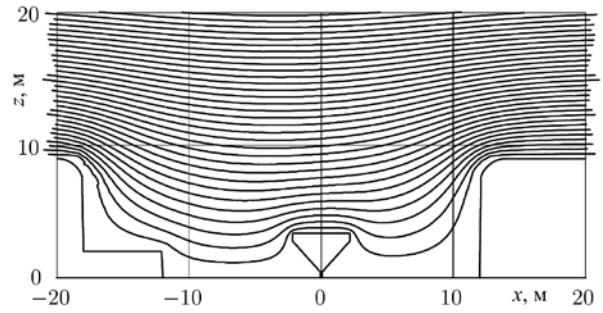


Рис. 5. Распределение электрического поля в вертикальном разрезе, проведенном через ось симметрии измерительной вышки, в отсутствие снега. Эквипотенциали построены с шагом 100 В. Нижняя эквипотенциаль $V=0$ соответствует границе воздуха

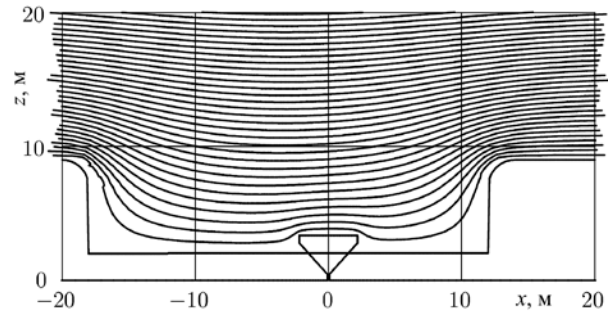


Рис. 6. То же, что рис. 5, при высоте снежного покрова $S=2$ м

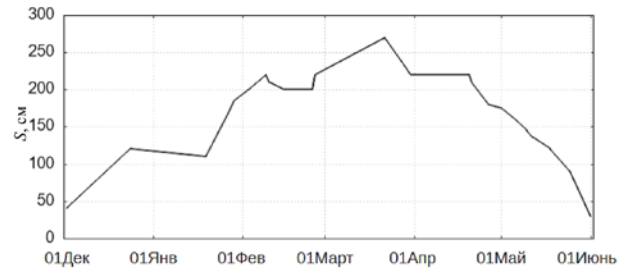


Рис. 7. Изменение высоты снежного покрова в обсерватории «Паратунка» зимой 2008–2009 гг.

Справа виден лес, слева — кусты и лес, которые, наряду с землей и вышкой, образуют идеально проводящую границу воздуха с нулевым значением потенциала $V=0$. Аналогичный рис. 6 построен при высоте снежного покрова $S=2$ м.

На рис. 7 показано типичное сезонное изменение высоты снежного покрова в обсерватории «Паратунка». Были проведены расчеты при высоте снежного покрова от 0 до 2.5 м с шагом 0.5 м и найдены значения калибровочных коэффициентов K , на которые следует умножить показания сенсора, чтобы получить вертикальную компоненту напряженности электрического поля в приземном воздухе, не искаженного поляной и вышкой, т. е. при плоской поверхности земли. Результаты оказались близкими к квадратичной зависимости

$$K = 1.07 + 0.11 S - 0.01 S^2, \quad (17)$$

высота снежного покрова S указывается в метрах. Калибровочный коэффициент K возрастает от 1.07 до 1.25 с накоплением снега от 0 до 2.5 м.

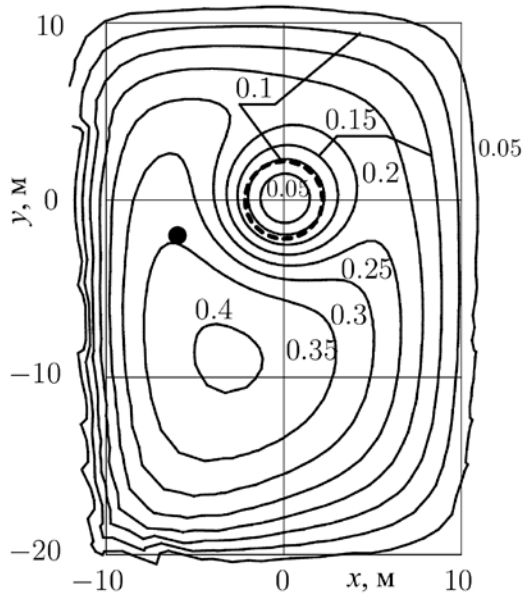


Рис. 8. Отношение вертикальной компоненты напряженности электрического поля около поверхности земли к полю в невозмущенной атмосфере, $-E_z(x, y, 0)/E_0$. Штриховая окружность — проекция измерительной платформы. Кружок — точка дополнительных калибровочных измерений (–6 м, –2 м)

7. ПОЛЕ ОКОЛО ЗЕМЛИ НА ПОЛЯНЕ

На рис. 8 показано распределение вертикальной компоненты напряженности электрического поля около поверхности земли, отнесенное к полю в невозмущенной атмосфере, $-E_z(x, y, 0)/E_0$. Штриховая окружность — проекция измерительной платформы. Ось X представлена на рис. 5 и 8, что позволяет сопоставить распределения поля в вертикальной ($y=0$ на рис. 5) и горизонтальной ($z=0$ на рис. 8) плоскостях, проходящих через эту ось.

Во время дополнительных калибровочных измерений в точке (–6 м, –2 м), лежащей около линии уровня 0.35 (см. рис. 8), напряженность поля была равна $0.34E_1$, где E_1 — напряженность, измеренная основным сенсором. Полученное в расчетах значение $0.35E_0$ с учетом (17) соответствует $0.38E_1$, т. е. удивительно точно совпадает с натурным измерением.

Следует оговориться, что, хотя расчеты проведены с точностью выше 1 %, исходные данные (верхние и боковые границы леса и кустарника) определены не слишком точно. Например, если высоту деревьев считать равной 10, а не 9 м, в отсутствие снега получается $K=1.3$ вместо $K=1.07$ из (17).

8. ЭЛЕКТРОДНЫЙ ЭФФЕКТ

Использованное в предыдущих разделах постоянное значение атмосферной проводимости в реальности существенно искажается электродным эффектом [Морозов, 2011]. Суть эффекта в том, что ионы, переносящие электрический ток, образуются в атмосфере — значит, при направленном вниз токе вблизи земли почти нет отрицательных ионов, кото-

рые движутся вверх. Соответственно примерно вдвое уменьшается проводимость у поверхности. В покоящейся атмосфере обедненный слой имеет метровый масштаб. При наличии ветра за счет турбулентности этот слой утолщается на порядок. В статье [Куповых и др., 1998] рис. 2.7 показывает типичный высотный ход вертикальной компоненты напряженности электрического поля E_z . Его можно приближенно аппроксимировать формулами

$$\begin{aligned} -E_z(z) &= 120 - 20((z - 20)/20)^2, \quad z < 40, \\ -E_z(z) &= 50 + 50 \exp(-(z - 40)/25), \quad z > 40, \end{aligned} \quad (18)$$

где z — высота в метрах, E_z — в В/м.

При постоянстве плотности тока проводимость пропорциональна $1/E_z(z)$. Полагая проводимость выше электродного слоя, равной 10^{-14} См/м, строим $\sigma = (-50/E_z(z)) \cdot 10^{-14}$ См/м. Для удобства сравнения с результатами предыдущих разделов мы увеличиваем напряженность поля (18) высоко над землей до $E_0=260$ В/м (вместо 50 В/м в этих формулах) и полагаем плотность тока равной 2.6 пА/м² (вместо 4 пА/м² на том же рис. 2.7 в [Куповых и др., 1998]). Здесь следует напомнить, что напряженность поля хорошей погоды над сушей 260 В/м выбрана нами как среднее значение по данным [Pustovalov et al., 2022] в предположении, что результаты тех измерений откалиброваны для представления поля вне электродного слоя. То же следует сказать об обычно используемых данных Карнеги [Harrison, 2013], в соответствии с которыми среднее поле хорошей погоды над океаном составляет 130 В/м. Мы уже оговорились в конце раздела 2 относительно простоты изменения наших результатов при изменении этих входных параметров модели.

Не представляется возможным аккуратно рассчитать распределение проводимости в турбулентном электродном слое для конкретной поляны с измерительной вышкой, учитывая сложные процессы ионизации и рекомбинации, переноса и трансформации ионов. Даже рассчитать само турбулентное течение воздуха проблематично. Более того, характерное время процесса при турбулентном течении в масштабе поляны становится меньше минуты, что делает неприменимым квазистационарное приближение (1)–(3). Поэтому в настоящем разделе мы проводим расчеты только для оценки масштаба явления, полагая, что модель электропроводности (1)–(3) применима с эффективной турбулентной проводимостью, высотное распределение которой мы только что построили. При этом мы отсчитываем высоту турбулентного электродного слоя от верхней границы лесного массива, а ниже до земли на поляне продолжаем постоянным значением. Это упрощение соответствует следующему естественному предположению: в воздухе над поляной уровень турбулентности примерно такой, как в слое воздуха, находящемся выше. Тогда концентрации ионов, а значит, и проводимость примерно такие же, как в прилегающем слое толщиной десятки метров. Если турбулентность мала, область электродного эффекта уменьшается до слоя толщиной порядка метра, прилегаю-

щего к земле, деревьям и вышке. Анализируя рис. 5, 6, можно предположить, что такой слой можно рассмотреть локально и получить удвоение напряженности электрического поля вблизи датчика. Мы этот вариант детально не рассматриваем, поскольку, во-первых, расчет проводимости в таком слое сложен и, во-вторых, результат существенно меняется в зависимости от ветра и уровня турбулентности.

В рассматриваемой грубой модели турбулентного электродного эффекта мы, тем не менее, воспроизводим основную характеристику этого эффекта: проводимость у поверхности уменьшается примерно вдвое.

Результаты решения такой задачи ниже 10 м с точностью до толщины линий не отличаются от распределения потенциала, показанного на рис. 5, если вдвое увеличить интервал между эквипотенциалами. Таким образом, результатом турбулентного электродного эффекта является примерное удвоение напряженности поля при сохранении его пространственного распределения на масштабе поляны и вышки. Это не удивительно, поскольку в выбранной модели проводимость уменьшается вдвое с точностью 20 % ниже 60 м.

Напряженность электрического поля, которая будет в этом случае измерена, составляет 465 В/м, т. е. 1.82 от поля выше электродного слоя ($E_0=260$ В/м) вместо $0.93E_0$ (см. рис. 5). Это означает калибровочный коэффициент $K=0.55$, тогда как в разделе 6 без учета электродного эффекта было получено $K=1.07$ (17) также в отсутствие снега. Таким образом, измеряемое поле из-за электродного эффекта примерно удваивается.

Мы не приводим аналог рис. 8, поскольку он фактически тоже демонстрирует только удвоение поля по сравнению с полем в свободной атмосфере с точностью до нескольких процентов. Это означает, что в нашей модели отношение данных двух сенсоров, на вершине измерительной вышки и в точке на земле, указанной на рис. 8, с высокой точностью воспроизводится как при наличии турбулентного электродного эффекта, так и без него. К сожалению, это означает невозможность обоснованного заключения о напряженности крупномасштабного поля на высотах более сотни метров вне электродного слоя по показаниям такой пары сенсоров, установленных на измерительной вышке и на земле, а именно, это поле представляет интерес при рассмотрении глобальной электрической цепи (ГЭЦ). По-видимому, необходимы одновременные калибровочные измерения на больших высотах, которые налажены лишь в некоторых геофизических обсерваториях, например баллонные измерения в Борке [Анисимов и др., 2023]. Следует отметить, что приведенные в указанной статье высотные профили напряженности поля, полученные с помощью баллонных измерений, существенно сложнее, чем в упрощенных моделях, на основе которых мы построили высотные профили проводимости.

По-видимому, именно эти сложности привели к тому, что в последней версии Руководящего документа по наблюдению за атмосферным электричеством [Соколенко и др., 2017] предлагается представлять непосредственно данные сенсора. Тем са-

мым калибровка измерительной системы перекладывается с обсерваторий на этап использования этих данных в моделировании ГЭЦ, что вряд ли возможно без знания конкретных условий измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом является формула (17) для калибровочного коэффициента K . Расчеты электрического поля проведены с высокой точностью, но исходные данные, описывающие верхние границы леса и кустарника, определены не слишком точно. Близость K к единице не является тривиальным результатом, поскольку в отдельности вышка дает $K \approx 0.5$, а рассмотренная в разделе 5 круглая поляна в отдельности дает $K \approx 2.8$. Целесообразно при обработке зимних измерений учитывать формулу (17) для получения поправки до 20 % за счет снега.

Результатом турбулентного электродного эффекта при использованной упрощенной модели эффективной проводимости является примерное удвоение модельной напряженности поля при сохранении его пространственного распределения на масштабе поляны и вышки. Построение количественной модели этого эффекта для конкретных условий измерения электрического поля не представляется возможным.

Математическая часть работы поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2025-1606). Экспериментальная часть работы проводилась в рамках реализации государственного задания ИКИР ДВО РАН 124012300245-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Шихова Н.М. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу. *Известия вузов. Радиофизика*. 2014, т. 56, № 11-12, с. 787–802. <https://doi.org/10.1007/s11141-014-9475-z>.
- Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Галиченко С.В. и др. Электричество невозмущенного атмосферного пограничного слоя средних широт. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023, т. 59, № 5, с. 595–611. <https://doi.org/10.31857/S0002351523050024>.
- Денисенко В.В. *Энергетические методы для эллиптических уравнений с несимметричными коэффициентами*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995, 204 с.
- Денисенко В.В., Помозов Е.В. Расчет глобальных электрических полей в земной атмосфере. *Вычислительные технологии*. 2010, т. 15, № 5, с. 34–50.
- Имянитов И.М. *Приборы и методы для изучения электричества атмосферы*. М.: Гостехиздат, 1957, 483 с.
- Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. *Теория электродного эффекта в атмосфере*. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998, 122 с.
- Морозов В.Н. *Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ*. Санкт-Петербург: РГТУ, 2011, 253 с.
- Соколенко Л.Г., Попов И.Б., Зайнетдинов Б.Г. Руководящий документ 52.04.168-2017: *Наблюдения за атмосферным электричеством с использованием автоматизированных средств измерений*. Санкт-Петербург: Гидрометеозидат, 2017, 40 с.

- Тентюков М.П., Игнатьев Г.В., Соболев И.С., Гаврилов Р.Ю. Физические свойства снежного покрова и механизм формирования геохимических барьеров в снежной толще. *Вестник геонаук*. 2022, т. 5, № 5(329), с. 26–37. <https://doi.org/10.19110/geov.2022.5.4>.
- Шварц Я.М., Соколенко Л.Г., Вычегжанина М.Е. и др. *Руководящий документ РД 52.04.168-2001: Методические указания. Наблюдения за электрическим полем*. С.-Петербург: Гидрометеоздат, 2002, 58 с.
- Harrison R.G. The Carnegie Curve. *Surveys Geophys.* 2013, vol. 34, pp. 209–232. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9210-2>.
- Molchanov O., Hayakawa M. *Seismo-Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results*. Tokyo: Terrapub, 2008. 189 p.
- Nicoll K.A., Harrison R.G., Barta V., et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 184, pp. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.003>.
- Pustovalov K., Nagorskiy P., Oglezneva M., Smirnov S. The electric field of the undisturbed atmosphere in the South of Western Siberia: A case study on Tomsk. *Atmosphere*. 2022, vol. 13, pp. 614–633. <https://doi.org/10.3390/atmos13040614>.

Как цитировать эту статью:

Денисенко В.В., Смирнов С.Э. Об измерении атмосферного электрического поля в обсерватории «Паратунка». *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 2, с. 76–83. <https://doi.org/10.12737/szf-122202608>.