

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ХОЛОДНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ

О.Н. Воцан, А.А. Спивак

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

Приведены результаты анализа совместных вариаций электрического поля и метеопараметров атмосферы при прохождении холодных атмосферных фронтов по данным Геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» и Центра геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН за период наблюдений с 2010 по 2016 гг. Получена эмпирическая зависимость между амплитудой вариаций напряженности электрического поля, изменением и скоростью изменения температуры в результате прохождения атмосферного фронта в отсутствие сильной облачности и грозových явлений. Разработана эмпирическая модель рядов в приземном слое атмосферы в результате интенсификации движения воздушных масс в переходной зоне атмосферного фронта.

Введение

Электрическое поле Земли E представляет собой, пожалуй, наиболее интересный объект исследований. Особую роль играет электрическое поле в приповерхностной зоне Земли (приповерхностный слой атмосферы и прилегающие к поверхности участки земной коры), где формируются условия среды обитания и осуществляется практически вся деятельность человека. Амплитуда и вариации электрического поля, не совпадающие с теми, которые можно рассматривать как естественно-природные и под влиянием которых формировался организм человека, могут существенно влиять на электрохимические процессы, протекающие на клеточном уровне [Колесник и др., 2009; Экология, 2008].

Как правило, исследования электрического поля Земли выполнялись с целью определения его глобальных характеристик, для чего было введено понятие так называемой «хорошей погоды», когда действием локальных факторов в виде местных источников и стоков электрических зарядов можно пренебречь [Семенов, 1982; Izraelsson et al, 1978]. Считается, что в этом случае регистрируется невозмущенная величина E (главное электрическое поле). Вместе с тем, следует отметить, что характеристика конкретного района определяется суперпозицией влияния глобальных и локальных факторов. Роль локальных факторов представляется весьма важной. Их действие способно при определенных условиях значительно изменить характеристики электрического поля в конкретном месте [Чалмерс, 1974; Шулейкин, 2006]. По этой причине особый интерес вызывает изучение возмущенной составляющей, амплитуда которой может на несколько порядков превосходить фоновые значения [Кузнецов, 2011; Dolezalek, 1972]. Такого рода исследования предостав-

ляют возможность устанавливать не только механизмы массо- и энергообменных процессов, связанных, в частности, с преобразованием энергии между физическими полями разной природы, но, что особенно важно, условия среды обитания живых организмов, включая человека. Помимо этого исследования локальных вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы, в том числе и достаточно слабых, важны для обеспечения надежной радиосвязи, безопасности авиасообщений, а также при разработке поисковых признаков активных тектонических структур (в частности, разломных зон), рудных залежей и скоплений углеводородов, оценке степени неоднородности земной коры и ее обводнённости (в том числе обнаружения подземных неоднородностей и таликов), напряженного состояния, температурного режима глубокозалегающих пород, геодинамического и гидродинамического режима земной коры и т.д. [Спичак, Захарова, 2008; Шулейкин, 2006; Шулейкин и др., 2015]. Пространственное распределение потенциала электрического поля содержит информацию о строении Земли, электродинамических процессах, протекающих в ее недрах, а также в приземной атмосфере, ионосфере, магнитосфере, ближайшем к Земле космическом пространстве и даже на Солнце [Имянитов, Чубарина, 1965; Noppel et al., 1986].

Инструментальные наблюдения показывают, что электрическое поле Земли не постоянно и испытывает вариации разной периодичности и амплитуды. Нас заинтересовал вопрос о влиянии метеорологических явлений и процессов на напряженность электрического поля в слое атмосферы, непосредственно прилегающем к земной поверхности. В настоящей работе выполнены исследования, связанные с установлением возможных связей между амплитудой вариаций электрического поля у земной поверхности и параметрами, характеризующими возмущение атмосферы в периоды прохождения холодных атмосферных фронтов.

Исходные данные

В качестве исходных данных использовались ряды синхронных инструментальных наблюдений за метеопараметрами и напряженностью электрического поля в условиях ГФО «Михнево» ИДГ РАН (54.9595°N; 37.7664°E) и Центра геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН (55.7052°N; 37.5707°E) (в дальнейшем соответственно ГФО МНВ и ЦГМ) в период с 2010 по 2016 гг. [Адушкин и др., 2016; Спивак и др., 2016].

Регистрация метеопараметров атмосферы (температура, давление, влажность воздуха, скорость ветра, мощность солнечного излучения) выполнялась с помощью автоматизированной цифровой метеостанции Davis Vantage Pro 2. Регистрация вертикальной компоненты напряженности электрического поля, $E_z(t)$, проводилась с помощью электростатического флюксметра ИНЭП, технические характеристики которого обеспечивают проведение измерений в частотном диапазоне от 0 до 20 Гц с амплитудой от 1 В/м до 5000–10000 В/м в зависимости от конкретного исполнения и параметров настройки. На выходе прибора напряжение изменяется в пределах ± 10 В, что соответствует входным характеристикам большинства аналого-цифровых преобразователей. Прибор можно использовать для измерений практически в любых метеорологических условиях. Однако под влиянием воздействия таких явлений, как дождь, град или снег (например, из-за попадания снега между измерительными пластинами и вращающимся экраном, а также обледенения пластин) будут возникать вынужденные перерывы в работе прибора.

Результаты регистрации в виде привязанных ко времени цифровых рядов накапливаются на жестких носителях и выкладываются на сайте ИДГ РАН в графическом (<http://idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/>), а также в цифровом (<http://idg-comp.chph.ras.ru/~mikhnevo/data/>) виде.

Основные характеристики холодных атмосферных фронтов

В метеорологии под атмосферным фронтом (АФ) понимается узкая переходная область, разделяющая между собой воздушные массы, характеризующиеся разными термодинамическими состояниями [Зилитинкевич, 2013]. АФ характеризуются пространственными размерами и величиной изменения температуры, давления и других характеристик атмосферы при смене воздушных масс с разной термодинамикой. В частности, когда относительно теплые воздушные массы заменяются в точке наблюдений более холодными, формируется так называемый холодный атмосферный фронт. При прохождении холодного фронта через точку наблюдения регистрируется достаточно резкое падение температуры воздуха и, как правило, увеличение атмосферного давления. Одновременно с этим такой фронт определяет повышенные градиенты температуры, изменение влажности воздуха, а также по-

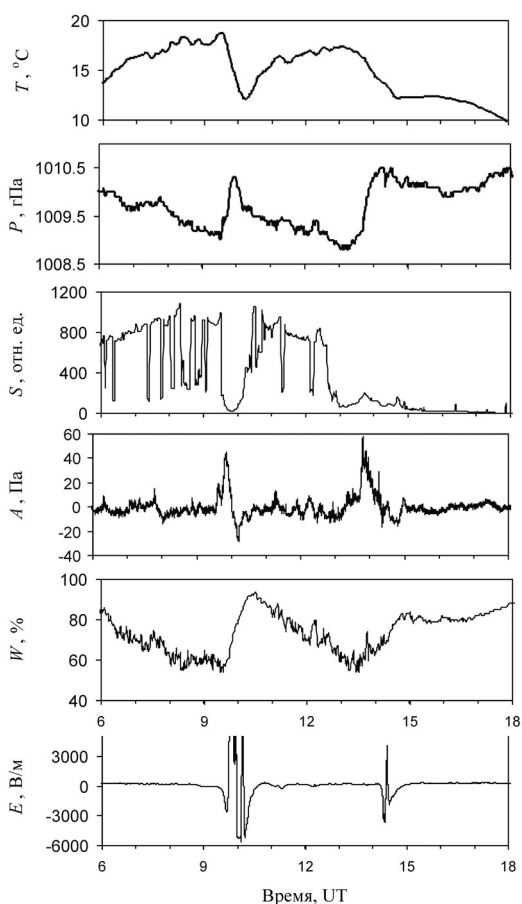


Рис. 1. Пример синхронных вариаций геофизических полей и метеорологических параметров атмосферы на ГФО МНУ 25.06.2014 г. в период прохождения двух холодных атмосферных фронтов в ~9:30 и ~13:30 UT (T и P – температура и атмосферное давление, S – интенсивность солнечного излучения, W – влажность воздуха, A – пульсации давления, E – вариация вертикальной компоненты напряженности электрического поля)

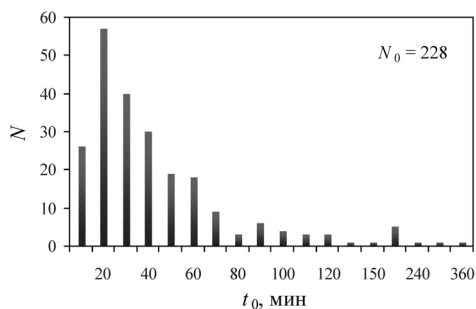


Рис. 2. Гистограмма распределения холодных атмосферных фронтов на ГФО МНУ за период 2010–2016 гг. по времени изменения температуры в переходной области

вышение скорости ветра (рис. 1). Изменение температуры воздуха при прохождении холодного атмосферного фронта может достигать 10–15 градусов, понижение атмосферного давления 200–500 Па.

Такие сильные за достаточно небольшой промежуток времени изменения в метеословиях (длительность прохождения переходной зоны t_0 изменяется в промежутке от нескольких минут до нескольких десятков минут (рис. 2)) и вызванные процессы перемещения воздушных масс, как правило, сказываются на вариациях электрического поля. Основной причиной таких вариаций является нарушение установившегося распределения объемных электрических зарядов в приземном слое атмосферы за счет турбулизации воздушных течений, что приводит к формированию аэроэлектрических структур, вброса электрических зарядов в приповерхностный слой атмосферы в результате подъема и перемешивания пылевых частиц и аэрозолей, нарушения вертикального распределения концентрации тяжелого радона, изменения влажности воздуха и т.д. [Анисимов, Мареев, 2000; Шулейкин, 2006].

Особо следует отметить, что холодный атмосферный фронт вызывает не только изменение термодинамических характеристик воздушных масс в пункте регистрации. Продвижение холодного атмосферного фронта вызывает также процессы, связанные с конденсацией водяных паров в зафронтной области и как следствие – формирование облачности, которое происходит с некоторой задержкой относительно переднего края фронта, что это связано с необходимостью накопления критической массы увлажненного воздуха.

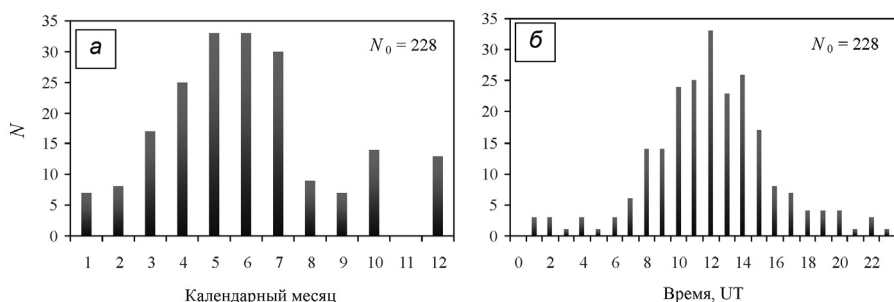


Рис. 3. Распределение холодных фронтов по месяцам (а) и по времени суток (б). Данные за период с 2010 по 2016 гг.

В течение года наблюдается достаточно большое количество холодных атмосферных фронтов и в основном в летний период. В качестве примера на рис. 3 приведена гистограмма распределения холодных фронтов по месяцам года (а) и по времени суток (б) для условий ГФО МНВ. Следует отметить, что холодные атмосферные фронты наблюдаются чаще в летний период с 10:00 до 15:00 UT.

Результаты анализа вариаций атмосферного давления

С целью получения количественных оценок влияния собственно холодного АФ на вариации электрического поля в приземном слое атмосферы в настоящей работе рассматривались АФ, не сопровождающиеся плотной кучевой облачностью и грозовыми явлениями. Выбровка указанных условий осуществлялась с учетом регистрации мощности солнечного излучения, влажности воздуха и наличия мол-

ниевых разрядов [Имянитов и др., 1971]. За период 2010–2016 гг. на ГФО МНУ и ЦГМ установлено в общей сложности 378 событий, характеризующихся очевидной синхронностью вариаций метеопараметров и электрического поля.

Анализ результатов регистрации показал, что прохождение холодного АФ всегда сопровождается вариациями электрического поля, но при этом не каждый раз наблюдаются вариации атмосферного давления. В связи с этим в качестве основного параметра, характеризующего интенсивность (мощность) холодного АФ, была выбрана амплитуда изменения температуры воздуха T_D в переходной области.

Прямое сопоставление амплитуды вариации E электрического поля и T_D не привело к ожидаемой функциональной зависимости $E(T_D)$, что демонстрирует рис. 4.

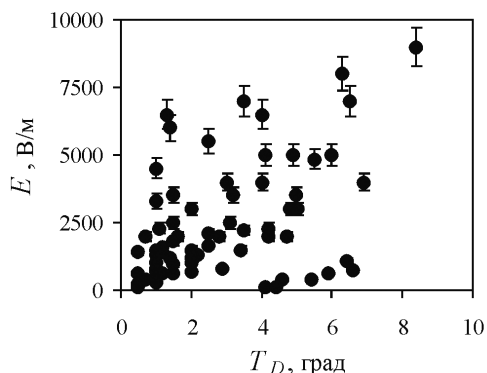


Рис. 4. Результат сопоставления E и T_D

пада температуры при анализе следует учитывать и другие параметры, характеризующие холодный АФ. В качестве основного из таких параметров в настоящей работе выбрано время t_0 , за которое происходит перепад температуры T_D . Действительно, представляется естественным, что скорость изменения температуры также, как и параметр T_D характеризует интенсивность процессов, протекающих в переходной зоне фронта. В соответствии с данными рис. 2 основное количество событий наблюдается с t_0 в промежутке от 0 до 60 мин.

По этой причине далее анализировались по отдельности данные с $t_0 \in (0-15)$ мин, $t_0 \in (15-25)$ мин, $t_0 \in (25-35)$ мин, $t_0 \in (35-45)$ мин и $t_0 \in (45-55)$ мин. Некоторые результаты представлены на рис. 5, из которого видно, что, несмотря на значительный разброс данных, можно считать, что при разделении данных с разными значениями t_0 отчетливо наблюдается тенденция к формированию зависимости $E(T_D)$ (погрешность определения E не превышает 8%). Более того, зависимость $E(T_D)$ допустимо описывать формулой:

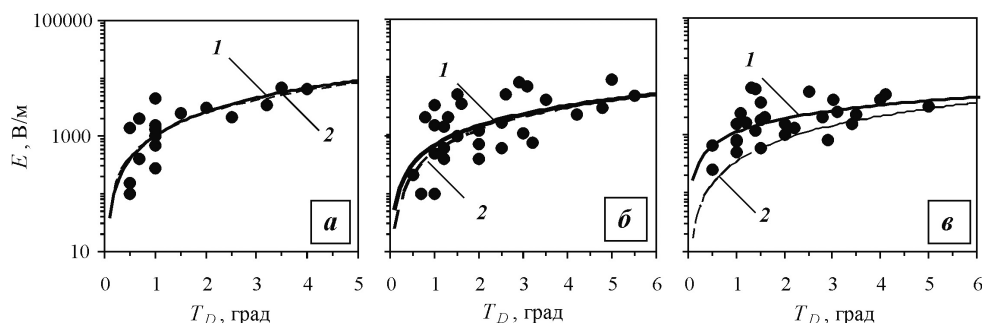


Рис. 5. Зависимость $E(T_D)$ для разных интервалов значений t_0 : а – $t_0 \in (0-15)$ мин; б – $t_0 \in (15-25)$ мин; в – $t_0 \in (25-35)$ мин. Линия тренда обозначена сплошной линией (1), пунктир – результаты расчета по модели (2)

$$E = AT_D^\alpha \quad (1)$$

где значение коэффициента A определяется величиной t_0 , а степень $\alpha \sim 1.3$.

Для определения зависимости коэффициента A в формуле (1) от t_0 следует выполнить анализ зависимости $E(t_0)$ при разных значениях T_D . Результаты такого анализа приведены на рис. 6, из которого видно, что зависимость $E(t_0)$ допустимо представить в виде степенного соотношения:

$$E = Bt_0^a, \quad (2)$$

где B – коэффициент, зависящий от величины T_D .

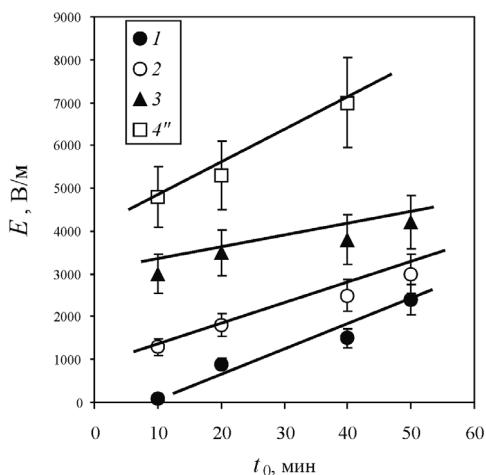


Рис. 6. Зависимость $E(t_0)$ при разных значениях T_D (град.): 1 – 0.5; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3

Эмпирическая модель вариаций электрического поля в приземной атмосфере при прохождении холодных атмосферных фронтов

Будем рассматривать задачу в следующих предположениях:

1. Основными параметрами, характеризующими интенсивность процессов, связанных с прохождением холодного атмосферного фронта, являются перепад температуры воздуха на фронте T_D и время t_0 , за которое этот перепад происходит.

2. Облачность в области, охваченной фронтом, отсутствует (рассматриваются короткие времена после прохождения переднего участка холодного атмосферного фронта до формирования облачности).

3. Отсутствуют сильные изменения влажности воздуха, что позволяет не учитывать процессы, связанные с конденсацией в атмосфере.

4. Основной причиной, вызывающей изменение пространственного распределения и, как следствие, характерного масштаба объемного электрического заряда у земной поверхности при прохождении холодного атмосферного фронта, является нарушение пространственного распределения объемных электрических зарядов в результате движения воздушных масс (наведенная турбулентность, в частности, термотурбулентность воздушных потоков вследствие увеличения скорости ветра).

Основываясь на данных инструментальных наблюдений, запишем выражение для прироста скорости ветра ΔV при прохождении атмосферного фронта в виде:

$$\Delta V(T_D, t_0) = \frac{T_D^{\alpha_1}}{t_0^{m_1}}, \quad (3)$$

где T_D – перепад температуры на холодном атмосферном фронте, произошедший за время t_0 ; степени α_1 и m_1 положительны.

При сделанных предположениях естественно предполагать, что степень возмущения воздушных масс с высотой определяется скоростью воздушных потоков в атмосферном пограничном слое, то есть скоростью ветра у земной поверхности [Белоцерковский и др., 2013; Зилитинкевич, 2013]. Степень возмущения очевидно определяется максимальным размером вихревой ячейки R , величину которой

в случае отсутствия турбулентных проявлений в атмосфере в начальный момент времени $t = 0$ запишем в виде:

$$R \sim \frac{\Delta V^{a_2}}{t_0^{m_2}} \quad (4)$$

Примем, что изменение масштаба возмущенной области ΔM , который определяет величину вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы, пропорционален размеру R . В этом случае

$$\Delta M \sim R^{a_3}. \quad (5)$$

Таким образом, рассматривая задачу в первом приближении, можно записать с учетом (1)–(5):

$$E_Z \sim \Delta M^{a_4} \sim R^{a_3 a_4} \sim \frac{\Delta V^{a_2 a_3 a_4}}{t^{m_1}} \sim \frac{T_D^{a_1 a_2 a_3 a_4}}{t_0^{a_3 a_4 (m_1 a_2 + m_2)}},$$

или, объединяя степени:

$$E_Z = A \frac{T_D^\alpha}{t_0^m} \quad (6)$$

где A – некоторая константа, $\alpha = a_1 a_2 a_3 a_4 > 0$ и $m = a_3 a_4 (m_1 a_2 + m_2) > 0$.

На рис. 5 приведены Зависимости $E(T_D)$ для разных значений t_0 , вычисленные с использованием соотношения (6), приведены на рис. 5 в виде штриховой линии (расчеты выполнялись при следующих значениях параметров: $A \approx 10^3$, $\alpha \approx 1.3$ и $m \approx 1$). Хорошо видно, что расчеты с использованием предложенной простейшей модели процесса с учетом разброса экспериментальных данных в целом описывает ход $E(T_D)$ при временах $t_0 < 30$ мин. Заметное занижение расчетных данных относительно результатов регистрации при $t_0 = 30$ мин можно объяснить тем, что в эти времена начинает формироваться плотная облачность. Электризация облаков, которая не учитывается в предложенной феноменологической модели, существенно повышает напряженность электрического поля в слое атмосферы, расположенном между облаками и земной поверхностью.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Полученные данные свидетельствуют о том, что вариации напряженности электрического поля земли в приземном слое атмосферы зависят, в частности, от возмущающего воздействия холодного атмосферного фронта.

2. В зоне холодного атмосферного фронта и непосредственно за ним наблюдаются вариации электрического поля. При этом для относительно резких атмосферных фронтов с характерными значениями t_0 примерно до 25–30 мин и при отсутствии грозовой активности в качестве основного фактора при описании возмущения электрического поля допустимо рассматривать скорость переноса воздушных масс. Для менее резких атмосферных фронтов ($t_0 = 30$ мин и более), когда толщина холодных воздушных масс уже значительна и важны процессы, связанные с конденсацией (формирование облачности), задача определения связи $E(T, t_0)$ сильно усложняется.

В этом случае необходимо учитывать процессы конденсации и главное – процессы, связанные с формированием облаков и разделением в них электрических зарядов.

3. Выполненные в первом приближении оценки влияния холодного АФ на вариации электрического поля в рамках предложенной эмпирической модели в целом описывают ход зависимости $E(T_D)$, что позволяет рассматривать модель как пригодную для практических оценок.

Дальнейшее продолжение исследований должно быть связано с учетом влияния других параметров холодного атмосферного фронта (например, вариаций влажности воздуха) на вариации электрического поля. Это позволит получить более точные соотношения между параметрами, характеризующими холодный атмосферный фронт и вариациями электрического поля (разброс экспериментальных данных может быть значительно уменьшен).

Исследования выполнены при поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН IV.8 (проект № 0146-2015-0011).

Литература

Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора-атмосфера // Физика Земли. 2006. № 7. С. 34–51.

Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. «Михнево»: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–119.

Анисимов С.В., Мареев Е.А. Аэроэлектрические структуры в атмосфере // Доклады академии наук. 2000. Т. 371. № 1. С. 101–104.

Белоцерковский О.М., Андрущенко В.А., Шевелев Ю.М. Динамика вихреобразных течений в атмосфере, обусловленных природными факторами. М. : Изд. центр «Полет Джанотана», 2013. – 432 с.

Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 252 с.

Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1965. – 240 с.

Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.И. Электричество облаков. Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 94 с.

Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В. Электромагнитная экология. Томск: ТМЛ-пресс, 2009. – 336 с.

Кузнецов В.В. Физика Земли. Учебник-монография. Новосибирск : 2011. – 840 с.

Семенов К.А. Хорошая погода и элементы атмосферного электричества // Труды ГГО. Вып. 455. Л. : Гидрометеиздат, 1982. С. 112–113.

Спивак А.А., Д.Н. Локтев, Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев, В.А. Харламов. Геофизические поля мегаполиса // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 2. С. 39–54.

Спичак В.В., Захарова О.К. Косвенная оценка температуры в геотермальной зоне по электромагнитным данным // Геофизика. 2008. № 4. С. 55–62.

Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л. : Гидрометеиздат, 1974, – 420 с.

Шулейкин В.Н. Атмосферное электричество и физика Земли. М. : Институт проблем нефти и газа. 2006. – 159 с.

Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. СПб. : РГГМУ, 2015. – 206 с.

Экология человека в изменяющемся мире / Колл. авторов. Изд 2-е, доп. Екатеринбург : УрО РАН, 2008. – 570 с.

Dolezalek H. Discussion of fundamental problem of atmospheric electricity. PAGEOPH. 1972. Vol. 100. P. 8–43.

Izraelsson S. On the conception – fair weather condition in atmospheric electricity // Pure Appl. Geophys. 1978. Vol. 116. P. 149–158.

Hoppel W.A., Anerson R.V., Willet J.C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer // The Earth's electrical environment. Krider E.P. and Roble R.G., Eds. – Washington: Natl. Acad. Press. 1986. P. 149–165.