УДК 551.594

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В АТМОСФЕРЕ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

© 2008 г. И.Н. Панчишкина[1], А.И. Петров[1], Г.Г. Петрова[1], Г.В. Куповых[2], Н.А. Петров[2], А.П. Кривошеев[3]

[1]Педагогический институт Южного федерального университета, 3440082, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 33, georgpu@rambler.ru
[2]Технологический институт Южного федерального университета, 347928, г. Таганрог, ГСП-17А, Некрасовский, 44,
[3]Южный федеральный университет, 344090, Ростов н/Д, ул. Мильчакова, 10

[1]Pedagogical Institute of Southern Federal University, 344042, Rostov-on-Don, B. Sadovaya St. 33, georgpu@rambler.ru
[2]Technological institute of Southern federal university, 347928, Taganrog, GSP-17A, Nekrasovskiy, 44,
[3]Southern Federal University 344090, Rostov-on-Don, Milchakov Str., 10

Представлен обзор экспериментальных исследований вертикальных атмосферно-электрических токов вблизи земной поверхности и из атмосферы на землю в Ростовской области. Анализ результатов показывает, что в приземном слое атмосферы наряду с током проводимости в «условиях хорошей погоды» существует заметный ток механического переноса. Выяснилось, что изменение тока проводимости с высотой приводит к образованию объемного заряда вблизи земли, а перенос и распределение этого заряда обусловлены током механического переноса, значения которого различаются в разных пунктах наблюдений и в значительной степени определяются метеорологическими условиями.

Ключевые слова: атмосфера, ток переноса, объемный заряд, стратификация.

The review of experimental research of vertical atmosphere electric currents near the ground surface and from atmosphere to the earth in the Rostov region is presented. It is found out that the vertical change of the conductivity current density leads to the space charge formation near the earth surface; transit and distribution of this charge are due to mechanical transfer current whose density is appreciably determined by meteorological conditions in the point of observations.

Keywords: atmosphere, carry currents, bulk charge, stratification.

Одной из фундаментальных проблем атмосферного электричества является проблема происхождения электрического поля Земли и причин устойчивости его вариаций. В суточных вариациях электрического поля, зарегистрированных на полярных станциях и над океанами, наблюдаются синхронные изменения, названные глобальной унитарной вариацией. Согласно классическим представлениям [1], существование электрического поля и его глобальных вариаций связано с действием грозовых генераторов, но данные последних исследований [2], полученные в результате мониторинга глобальной грозовой деятельности, показывают, что среднее количество молниевых разрядов, происходящих каждую секунду в атмосфере Земли, существенно ниже принятого в классической модели. Поэтому выяснение причин существования глобальной унитарной вариации электрического поля требует поиска дополнительных генераторов и детального изучения их роли в формировании электродинамического состояния атмосферы.

Для решения этой задачи необходимы как теоретические исследования электрической структуры атмосферы, так и экспериментальные исследования физики процессов в различных ее слоях, являющихся участками так называемой глобальной электрической цепи (ГЭЦ). На рис. 1 представлена эквивалентная электрическая схема ГЭЦ.

В настоящее время разработанные модели ГЭЦ и электрического состояния приземного слоя атмосферы дают определенное понимание электрических процессов, происходящих в атмосфере, но нуждаются в экспериментальном подтверждении теоретических результатов. В частности, следует точнее определить типы физических условий в атмосфере, когда может быть применима та или иная модель.

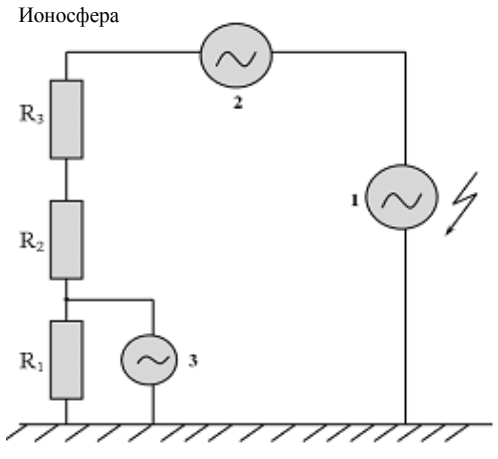


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема глобальной токовой цепи: 1 – грозовые генераторы; 2 – магнитосферно-ионосферные источники;3 – локальные генераторы; R_1, R_2, R_3 – сопротивление различных слоев атмосферы

Особое место занимает изучение электричества приземного слоя атмосферы, где традиционно проводятся регулярные атмосферно-электрические наблюдения. Электродинамическая структура приземного слоя определяется действием электродного эффекта в атмосфере [3]. Кроме того, в этом слое электрические характеристики тесно связаны с метеорологическими факторами, которые в свою очередь определяются географическим расположением пункта наблюдений, орографией местности и свойствами подстилающей поверхности. Накопленные к настоящему моменту результаты наблюдений свидетельствуют о значительной изменчивости характеристик атмосферного электричества вблизи поверхности земли.

Атмосферно-электрические характеристики

Основными характеристиками, определяющими электрическое состояние атмосферы на каждом ее участке, является электропроводность атмосферы λ, напряжённость электрического поля $\boldsymbol{E}$, плотность электрического тока $\boldsymbol{j}_\lambda$. Электропроводность атмосферы формируется под влиянием радиоактивного излучения поверхности Земли, радиоактивных примесей, содержащихся в воздухе, и космического излучения. В ионизированной атмосфере под действием электрического поля возникает ток проводимости, плотность которого $\boldsymbol{j}_\lambda$ определяется в каждой точке по закону Ома: $\boldsymbol{j}_\lambda = \lambda \boldsymbol{E} = (\lambda_+ + \lambda_-)\boldsymbol{E}$.

На земную поверхность током проводимости могут переноситься ионы одной полярности: положительные $(\boldsymbol{j}_\lambda = \lambda_+ \boldsymbol{E})$, если напряженность электрического поля направлена к земле, или отрицательные $(\boldsymbol{j}_\lambda = \lambda_- \boldsymbol{E})$ при направлении поля от земли.

В атмосферном электричестве выделяют условия «хорошей погоды», которые предполагают отсутствие гроз, осадков, метелей, туманов, ограничение скорости ветра, баллов облачности, а также амплитуды и частоты колебаний напряженности электрического поля. Это должно соответствовать отсутствию локальных генераторов электрического поля, когда электрическое состояние атмосферы определяется действием глобальных генераторов, т.е. формируется квазистационарное электрическое состояние атмосферы [3–5]. В этих условиях ток проводимости не изменяется с высотой, и на поверхность земли ионы попадают только под действием электрического поля. Но при измерениях в условиях «хорошей погоды» вблизи земной поверхности было обнаружено, что $\lambda \boldsymbol{E}$ изменяется с высотой [3, 6, 7], а значит, в исследуемой области имеет место ток, который является током механического переноса [6].

Ток механического переноса состоит из двух компонент: конвективной и диффузионной. Плотность тока конвекции в атмосфере $\boldsymbol{j}_k$ создается конвективными перемещениями объемного заряда ρ с вертикальной скоростью $\boldsymbol{v}$ [6]: $\boldsymbol{j}_k = \rho \cdot \boldsymbol{v}$, а плотность тока диффузии $\boldsymbol{j}_\partial$ возникает при наличии неравномерно распределенного по высоте объемного заряда [6]:

$$\boldsymbol{j}_\partial = -D_T \frac{\partial \rho}{\partial z} \boldsymbol{k},$$

где D_T – коэффициент турбулентной диффузии; $\frac{\partial \rho}{\partial z}\boldsymbol{k}$ – вертикальная составляющая градиента объемного заряда. Следовательно, выражение для плотности тока механического переноса можно записать в виде $\boldsymbol{j}_{i\ddot{i}} = \boldsymbol{j}_{\grave{a}} + \boldsymbol{j}_{\hat{e}} = -D_T \frac{\partial \rho}{\partial z}\boldsymbol{k} + \rho \cdot \boldsymbol{v}$.

Плотность тока механического переноса на границе атмосфера – земля $\boldsymbol{i}_{i\ddot{i}}$ аналитически не определяется, его величина будет зависеть от физических условий в приземном слое.

Таким образом, для полного тока в атмосфере имеем

$$\boldsymbol{j} = \lambda \boldsymbol{E} + \boldsymbol{j}_{i\ddot{i}}, \qquad (1)$$

а из атмосферы на земную поверхность: $\boldsymbol{i} = \boldsymbol{i}_\lambda + \boldsymbol{i}_{i\ddot{i}}$.

Наличие тока механического переноса в нижней атмосфере означает, что закон Ома в рассматриваемом слое нарушается. Степень отклонения от закона Ома оценивается при помощи критерия Долезалека [8]:

$$\Omega = \frac{\boldsymbol{i}}{\boldsymbol{E} \cdot \lambda},$$

где $\boldsymbol{i}$ – непосредственно измеренная плотность полного вертикального тока на землю; $\boldsymbol{E}$ – напряженность электрического поля у поверхности земли; $\lambda = (\lambda_+ + \lambda_-)$ – удельная электропроводность атмосферы.

Если критерий Ω близок к 1, то закон Ома применим, и по значениям напряженности электрического поля и электропроводности можно косвенно определить плотность тока в атмосфере. Измерения Долезалека [8] показали, что Ω в зависимости от различных факторов может существенно отличаться от 1, его среднесуточные значения колеблются от 0,25 до 4, а для некоторых станций Ω имеет характерный суточный ход. Сложность предлагаемого метода состоит в том, что необходимо измерение всех трех основных атмосферно-электрических параметров.

Этих сложностей можно избежать при одновременной регистрации плотности полного тока и плотности тока механического переноса [9], тогда, рассчитывая ток проводимости как их разность, получим следующее выражение для критерия Долезалека:

$$\Omega = \frac{\boldsymbol{i}}{\boldsymbol{i}_\lambda} = \frac{\boldsymbol{i}}{(\boldsymbol{i} - \boldsymbol{i}_{i\ddot{i}})}.$$

Для отбора периодов, когда действие локальных генераторов электрического поля незначительно, в работах [10, 11] рекомендуется метод, основанный на измерении объемного заряда при помощи клетки Фарадея, сопровождаемый метеорологическими наблюдениями и измерениями метеопараметров, необходимых для подсчета числа Ричардсона. По результатам эксперимента исключаются те серии измерений, при которых отмечаются традиционные метеорологические нарушения, а также предлагается ограничение числа Ричардсона в пределах – 0,05 < *Ri* < 0,05, при которых можно считать атмосферу нейтрально устойчивой.

Другой метод выделения «условий хорошей погоды» [11] заключается в следующем: в те периоды, когда локальная составляющая генератора электрического поля значительно превышает глобальную компоненту, общая изменчивость плотности тока может быть использована как оценка локальных изменений. Рекомендуется регистрировать ежесекундные значения плотности тока на проволочную антенну длиной 1 км и оценивать стандартное отклонение для каждых 600 секундных интервалов серий измерений. Наблюдения можно считать соответствующими «условиям хорошей погоды», если стандартное отклонение меньше некоторого выбранного значения S_0, но необходимо определить критический уровень этого параметра. Предлагаемый интервал, в котором может находиться подходящее значение критического уровня, – 0,1–1,0 пА/м^2. Очевидно, каждый из описанных методов имеет свои преимущества и недостатки, применение одного метода не исключает использование другого.

Измерительный комплекс

Многолетние экспедиционные измерения атмосферно-электрических и метеорологических характеристик в Ростовской области позволяют охарактеризовать физические условия в пунктах наблюдений. Один и тот же измерительный комплекс воспроизводился в различных пунктах наблюдений. Комплекс включал в себя следующие позиции.

1. Измерения плотности полного вертикального тока $\boldsymbol{i}$ и плотности тока механического переноса $\boldsymbol{i_{ïï}}$ из атмосферы на землю проводились *методом пластины*. Над пластиной для измерения $\boldsymbol{i_{ïï}}$ на высоте 20 см устанавливалась медная заземленная сетка с ячейками 4 × 4 см^2 размером 1 × 1 м^2. Опыты показали [9], что такая сетка, не влияя заметно на турбулентный обмен, отсекает электрическое поле атмосферы, вследствие чего атмосферный ток проводимости под такой экран не проникает, а ток переноса осуществляется свободно. Таким образом, эти две установки позволяли измерять непосредственно плотность полного тока из атмосферы на землю $\boldsymbol{i} = \boldsymbol{i}_\lambda + \boldsymbol{i}_{ïï}$ и плотность тока механического переноса из атмосферы на землю $\boldsymbol{i}_{ïï}$. Плотность тока проводимости на земную поверхность тогда можно подсчитать как $\boldsymbol{i}_\lambda = \boldsymbol{i} + \boldsymbol{i}_{ïï}$.

2. Измерения полярных проводимостей воздуха $\lambda_\pm$ непосредственно над земной поверхностью проводились *методом аспирационного конденсатора* с наружным диаметром 60 мм.

3. Измерения напряженности $\boldsymbol{E}$ электрического поля атмосферы на уровне земли проводились с помощью *электростатического флюксметра*.

4. *Методом радиоактивного коллектора* измерялись потенциалы φ электрического поля на высотах 1, 2 и 3 м.

5. Метеорологическая информация. Измерялись температуры (0,15; 0,5; 2 м) и скорости ветра (0,5; 2; 5 мв), что позволяло подсчитывать значения коэффициента турбулентного обмена D_T. Отмечалась облачность и факторы, помутняющие атмосферу; во время грозы и осадков измерения прекращались.

Измерения велись круглосуточно в течение 10–15 дней; для анализа использованы среднечасовые значения величин [12, 13].

По данным измерений рассчитывались следующие величины:

– плотность тока проводимости вблизи земной поверхности: $\lambda_+\boldsymbol{Å}$ при нормальном поле, $\lambda_\boldsymbol{Å}$ – при обратном;

– градиенты потенциала φ', плотность объемного заряда ρ и градиент этого заряда $\frac{\partial \rho}{\partial z}$.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Для анализа выбраны ряды среднечасовых значений плотности тока проводимости и плотности тока механического переноса из атмосферы на землю, плотность тока проводимости в атмосфере вблизи земной поверхности, рассчитанная по одновременным измерениям напряженности электрического поля и электропроводности воздуха.

В табл. 1 приводятся средние за период измерений значения плотности тока механического переноса и критерия Долезалека для двух пунктов Ростовской области и одного пункта на берегу оз. Байкал.

Данные о часовых сериях измерений с нормальным направлением электрического поля и среднечасовыми значениями напряженности не более 500 В/м представлены в табл. 2. Из них отобраны те, которые по метеорологическим параметрам можно отнести к «условиям хорошей погоды» (третья строка таблицы); выбраны часы, когда атмосферу можно считать нейтрально устойчивой (–0,05 < *Ri* < 0,05), а также серии измерений, когда критерий Долезалека был близок к 1 (0,90<Ω<1,10 или 0,95<Ω<1,05).

Таблица 1

Средние за период измерений значения плотности вертикальных электротоков и критерия Долезалека

Величина	Байкал	Михайловка	Первомайское
$i_{мп}$, пА/м^2	0,52	–0,59	–0,43
Стандартное отклонение	0,27	0,81	0,73
i_λ, пА/м^2	1,04	2,70	0,87
Стандартное отклонение	0,53	1,00	0,98
Ω	1,63	0,82	0,35
Стандартное отклонение	0,74	0,48	1,20

Для оценки действия локального генератора выбран условный интервал –0,10 < $\boldsymbol{i_{ïï}}$ < 0,10 пА/м^2, когда можно считать ток механического переноса малым по сравнению с током проводимости: в среднем для всех пунктов наблюдений в этих случаях $\boldsymbol{i_{ïï}}$ не превышает 10 % от тока проводимости. По данным

эксперимента в Ростовской области такие значения i_{ii} наблюдались менее чем в четвертой части всех часовых серий измерений, а на Байкале значения i_{ii} попадали в этот интервал крайне редко.

Таблица 2

Сравнение критериев «условий хорошей погоды»

Условия измерений	Байкал		Михайловка		Первомайское	
	Число часовых серий	%	Число часовых серий	%	Число часовых серий	%
E>0	160	100	862	100	125	100
«Хорошая погода»	93	58	675	78	27	22
–0,05<Ri<0.05	98	61	224	26	71	57
0,90<Ω<1,10	7	4	339	39	18	14
0,95<Ω<1,05	3	2	193	22	17	14
–0,10< $i_{мп}$ <0,10	2	1	187	22	36	29

Из данных табл. 2 видно, что в большинстве случаев, даже при отсутствии нарушающих метеоусловия факторов, действием локального генератора пренебрегать нельзя. Поля метеорологических параметров, в значительной степени определяя физическое состояние слоя, прилежащего к земной поверхности, влияют на процессы генерации и переноса объемного заряда. Чтобы сгруппировать однородные совокупности данных измерений плотности тока механического переноса, необходимо рассмотреть термодинамические условия. В результате анализа эмпирических распределений метеопараметров для пунктов Ростовской области можно выделить три группы:

1) *неустойчивая стратификация*, наблюдается в дневное время, характеризуется интенсивной турбулентностью и наличием восходящих потоков воздуха;

2) *безразличная стратификация*, когда отмечается слабая турбулентность и слабые вертикальные потоки;

3) *устойчивая стратификация*, характерна для тихих ночей, вертикальные пульсации воздуха отсутствуют или слабы.

Устойчивая стратификация наблюдалась обычно в ночные часы с малой скоростью ветра и инверсным распределением температуры, а неустойчивая – днем, когда отмечались отрицательные градиенты температуры, при скорости ветра более 1 м/с. Для часовых серий измерений, объединенных под условным названием «ветреные холодные ночи», характерна безразличная стратификация.

Измерительная площадка вблизи оз. Байкал существенно отличается по физическим условиям от пунктов наблюдений в Ростовской области. На Байкале бризовая циркуляция, поэтому скорость ветра ночью в среднем мало отличалась от скорости ветра днем, лишь на короткое время утром и вечером ветер стихает. Температура воздуха мало изменялась по высоте в течение суток.

От физических условий в пункте наблюдений зависит интенсивность обмена зарядами между атмосферой и землей, что подтверждает результат анализа статистической структуры вариаций вертикальных атмосферно-электрических токов из атмосферы на землю [14]. Для пунктов на территории Ростовской области экспериментальные вариационные кривые, построенные по измерениям плотности тока проводимости (рис. 2а, 2б), и плотности тока механического переноса (рис. 3а, 3б), обнаруживают существенные отличия от теоретических кривых, соответствующих нормальному распределению каждой из величин.

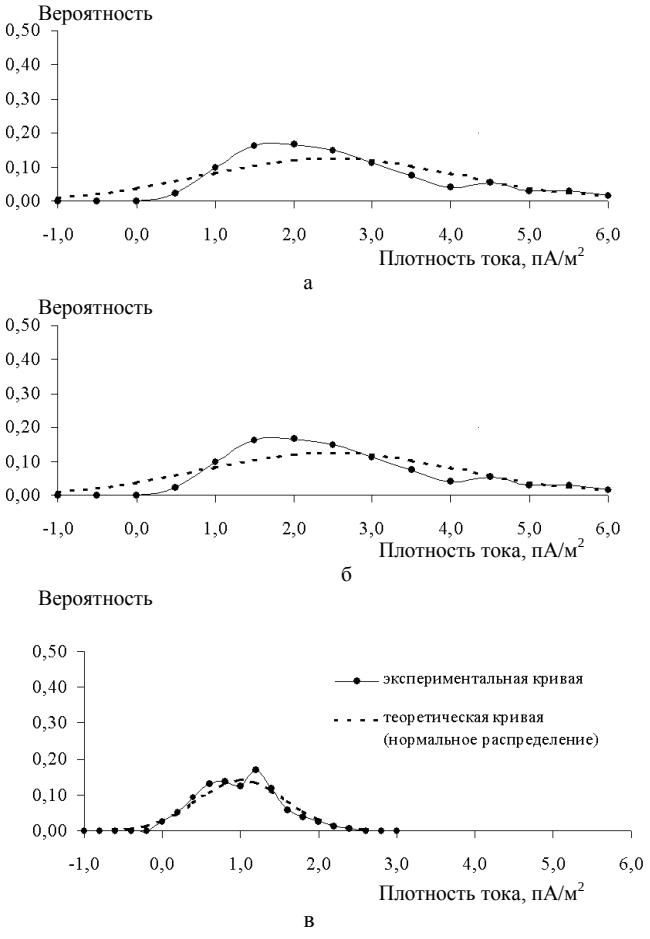


Рис. 2. Плотность тока проводимости: эмпирические и вычисленные по нормальному закону кривые распределения: а – Михайловка, Ростовская область, 1995–1998 (864 часовые серии); б – окраина г. Ростова-на-Дону, 1987 (175 часовых серий); в – Байкал, 1991 (169 часовых серий)

Наличие асимметрии и эксцесса может указывать на неоднородность выборки, обусловленную влиянием факторов, формирующих процессы переноса заряда вблизи земной поверхности.

Отклонение от нормального распределения экспериментальной кривой плотности тока проводимости можно объяснить значительными изменениями электропроводности воздуха под влиянием высокой радиоактивности, с одной стороны, аэрозольного загрязнения – с другой. Очевидно, что неоднородность

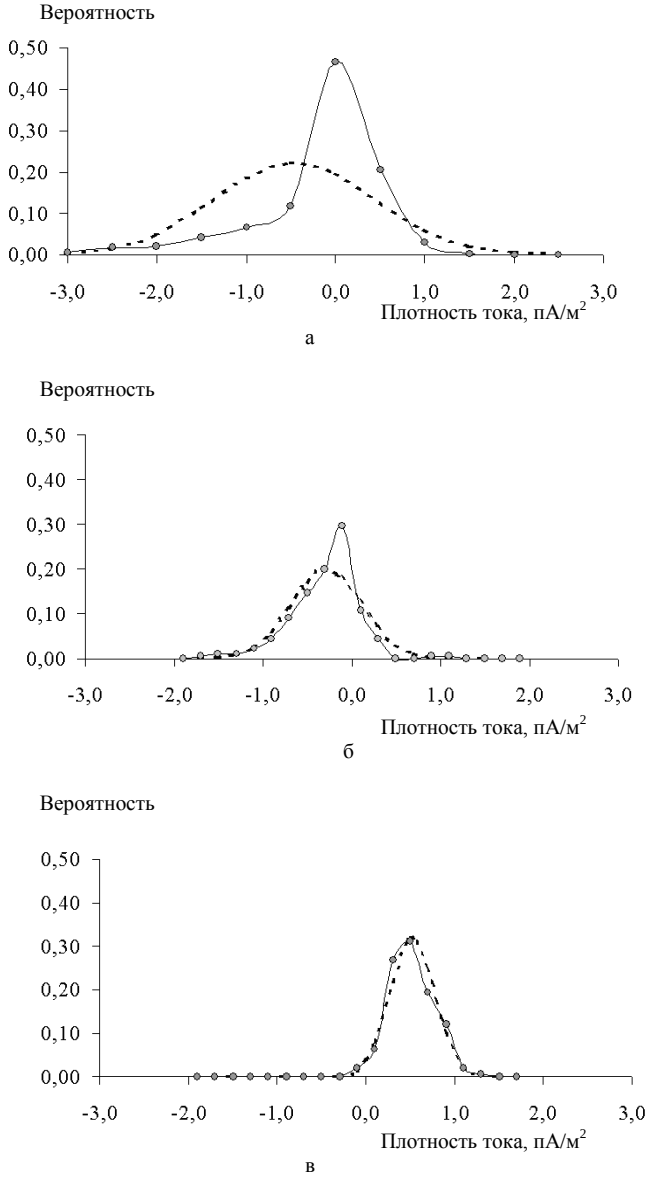


Рис. 3. Плотность тока механического переноса: эмпирические и вычисленные по нормальному закону кривые распределения: а – Михайловка, Ростовская область, 1995–1998 (864 часовые серии); б – окраина г. Ростова-на-Дону, 1987 (175 часовых серий); в – Байкал, 1991 (169 часовых серий)

выборки плотности тока механического переноса на территории Ростовской области связана с тем, что в данном районе условия перемешивания в атмосфере сильно изменяются ото дня к ночи. Вследствие того, что обмен зарядами между атмосферой и землей, осуществляемый посредством тока механического переноса, имеет различный механизм в случае турбулентной атмосферы и при отсутствии турбулентного перемешивания, при анализе экспериментального материала каждый из этих случаев необходимо рассматривать отдельно.

Условия формирования токового режима в районе оз. Байкал существенно отличаются от условий в пунктах наблюдений Ростовской области: атмосфера чистая, наличие близких грунтовых вод обусловливает слабое поступление радиоактивных эманаций с почвенным газом в атмосферу, интенсивность перемешивания нижнего слоя атмосферы мало изменяется в течение суток. Поэтому эмпирические распределения плотности тока проводимости (рис. 2в) и плотности тока механического переноса (рис. 3в) из атмосферы на землю, построенные по данным байкальской экспедиции, близки к нормальным.

Наличие тока механического переноса и его вариаций связано с накоплением и неравномерным распределением объемного заряда в атмосфере. Согласно уравнению непрерывности тока изменение объемного заряда со временем происходит в том случае, если дивергенция тока отлична от нуля:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\, \boldsymbol{j} = 0 .$$

Если характерный временной масштаб T рассматриваемых процессов больше времени релаксации атмосферы ($T >> \varepsilon_0/\lambda$), то током смещения $\varepsilon_0 \partial E / \partial t$ можно пренебречь. Тогда электрическое состояние атмосферы можно считать квазистационарным [3]: $div\, \boldsymbol{j} = 0$, или, учитывая (1), $div \lambda \boldsymbol{E} + div\, \boldsymbol{j}_{ii} = 0$.

Очевидно, что изменение тока проводимости по высоте (для одномерной задачи) свидетельствует о существовании механического переноса объемного заряда в рассматриваемом слое.

Обсуждение результатов

При исследовании профилей тока проводимости вблизи поверхности земли было обнаружено, что имеется связь между объемным зарядом, образующимся вблизи земной поверхности в результате дивергенции тока проводимости, и плотностью тока механического переноса из атмосферы на землю.

Получены уравнения линий регрессии плотности тока механического переноса $\boldsymbol{i}_{ii}$ из атмосферы на землю по $\Delta \boldsymbol{i}_{\lambda}$ – разности плотности тока проводимости $\lambda \boldsymbol{E}$ в атмосфере на уровне 0,05 м и плотности тока проводимости $\boldsymbol{i}_{\lambda}$ на земную поверхность. Связь между этими величинами описывается линейными уравнениями $\boldsymbol{i}_{ii} = a \cdot \Delta \boldsymbol{i}_{\lambda} + b$, параметры уравнений a и b для различных метеоусловий приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Параметры уравнений регрессии

Место наблюдения	День		Ночь		Тихие часы	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
Байкал	0,05	0,46	0,01	0,48	0,60	0,12

Таблица 4

Параметры уравнений регрессии

Место наблюдения	День		Ночь		Тихая ночь		Ветреная ночь		Ветреная холодная ночь	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Михайловка	0,52	0,17	0,12	–0,06	0,10	–0,06	0,45	0,26	–0,005	–0,08
Первомайское	0,17	–0,32	0,58	–0,64	0,70	–0,61	0,23	–0,20	–0,002	0,08

Установлено, что для байкальских наблюдений зависимость i_{ii} от Δi_{λ} днем и ночью практически отсутствует (табл. 3). Как уже отмечалось, что в районе оз. Бай-кал в связи с бризовой циркуляцией ветрено и днем, и ночью, а градиенты температур малы. Эти условия характерны для безразличной стратификации атмосферы. В утренние и вечерние часы, в период смены направления ветра, наблюдалась устойчивая стратификация. В это время обнаруживается линейная зависимость i_{ii} от Δi_{λ}, близкая к прямой пропорциональности.

При рассмотрении эмпирических рядов регрессии для пунктов Ростовской области (табл. 4) обнаружено, что между i_{ii} и Δi_{λ} имеется связь и в дневное, и в ночное время. Оказалось, что в районе с. Михайловки линии регрессии, полученные как для дневных, так и для ночных условий, близки к прямой пропорциональности. Это позволяет предположить, что процесс накопления объемного заряда вблизи поверхности земли в результате дивергенции тока проводимости является определяющим в создании тока механического переноса на землю. Ведь при нулевой дивергенции плотность тока механического переноса i_{ii} близка к нулю: ток механического переноса отсутствует. В районе с. Первомайское зависимость i_{ii} от Δi_{λ} линейная. Здесь при значениях разности $\lambda\text{Å} - i_{\lambda}$, близких к нулю, наблюдается заметный ток механического переноса, что указывает на наличие других процессов, влияющих на механический перенос зарядов из атмосферы на земную поверхность.

Обращает на себя внимание тот факт, что ветреными холодными ночами в обоих пунктах Ростовской области, когда не наблюдается заметных градиентов температуры, механический перенос зарядов из атмосферы на землю значительно слабее, чем в другие периоды, и не зависит от интенсивности процессов накопления объемного заряда в результате дивергенции тока проводимости.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что механизм формирования объемного заряда вблизи земной поверхности связан с дивергенцией тока проводимости в приземном слое атмосферы, а перенос и распределение этого заряда обусловлены током механического переноса, значения которого различаются в разных пунктах наблюдений и в значительной степени определяются метеорологическими условиями.

Литература

1. *Wilson C.T.R.* Investigations on lightning discharges and on electric field of thunderstorms // Phil. Traus. Roy. Soc. London, 1925. Ser. 221, 73.
2. *Анисимов С.В.* Концепция Глобальной электрической цепи: состояние проблемы // Тр. V Рос. конф. по атмосф. электричеству. Владимир, 2003. С. 21–27.
3. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог, 1998.
4. *Семенов К.А.* Хорошая погода и элементы атмосферного электричества // Тр. ГГО. 1982. Вып. 455. С. 112–119.
5. *Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество. Л., 1974.
6. *Имянитов И.М., Шифрин К.С.* Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физ. наук. 1962. Т. 76. Вып. 4. С. 593 – 642.
7. *Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н.* Экспериментальные исследования тока механического переноса // Тр. НИЦ ДЗА (Филиал ГГО). 2006. Вып. 7. С. 176–181.
8. *Dolezalek H.* Zur Berechnung des luftelektrischen Strom-kreises 111. Kontrolle des Ohmschen Gesetzes durch Messung // Geophys. Pur. Appl. 1960. Vol. 46. P. 125–144.
9. *Изергин А.М.* Исследование экранирующих свойств сетки // Уч. записки КГПИ. 1958. № 15. С. 45–56.
10. *Israelsson S.* On the conception «Fair weather condition» in atmospheric electricity // Pure Appl. Geophys. 1978. Vol. 116. P. 149–158.
11. *Knudsen E., Israelsson S.* Recommendations For Conditions When Recording Atmospheric Electrical Parameters Related to the Global Circuit // ESNIB. 1999. № 2. P. 30–33.
12. *Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Петров Н.А.* Вертикальный электрический ток в атмосфере и на границе атмосфера – земля // Тр. V Рос. конф. по атмосферному электричеству. Владимир, 2003. С. 121–124.
13. *Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N.* Variations of vertical «atmosphere-earth» current components

and its probable interpretation // Proc. 10th Int. Conf. Atm. Electricity. Osaka, 1996. P. 548–551.

14. *Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N.* Statistic structure variations of vertical «atmosphere-earth» currents // Proc.12th Int. Conf. Atm. Electricity. Versailles, 1996.

Поступила в редакцию ***29 января 2008 г.***