

94. Дорман Л И, Мирошниченко Л И *Солнечные космические лучи* (М.: Физматгиз, 1968) [Dorman L I, Miroshnichenko L I *Solar Cosmic Rays* (Washington, DC: NASA, 1976)]
95. Miroshnichenko L I *Solar Cosmic Rays* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001)
96. Dorman L, Zukerman I *Adv. Space Res.* **31** 925 (2003)
97. Dorman L I, in *Proc. of the 29th Intern. Cosmic Ray Conf., Pune, India, August 3–10, 2005* Vol. 1 (Eds B S Acharya et al.) (Mumbai: Tata Inst. of Fundamental Res., 2005) p. 281
98. Dorman L I "Using cosmic rays for monitoring and forecasting dangerous solar flare events", in *Neutrinos and Explosive Events in the Universe* (Eds M M Shapiro, T Stanev, J P Wefel) (Dordrecht: Springer, 2005) p. 131
99. Dorman L I, in *Proc. of the 17th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Sanefjord, Norway, 2005* (Ed. B Warmbein) (Noordwijk: ESA Publ. Division, 2005) p. 219
100. Dorman L I et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1478 (2004)
101. Dorman L I, in *Proc. of the 30th Intern. Cosmic Ray Conf., Merida, Mexico, July 3–11* Vol. 1 (Eds R Caballero et al.) (Mexico City: Univ. Nacional Autónoma de México, 2008) p. 175
102. Dorman L I et al., in *Proc. of the 28th Intern. Cosmic Ray Conf., Tsukuba, Japan, July 31–August 7* Vol. 6 (Eds T Kajita et al.) (2003) p. 3553

PACS numbers: 92.60.Pw, 93.85.Jk, 94.20.Ss  
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005h.0527

## Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи

Е.А. Мареев

### 1. Введение

Атмосфера — это наиболее подвижная и уязвимая из оболочек Земли, формирующих среду обитания человека, поэтому физика атмосферных процессов привлекает всё возрастающее внимание в связи с проблемами экологии, прогноза погоды (в том числе, космической), изучения климата. Вместе с тем атмосфера Земли представляет собой замечательный объект физико-математических исследований в области гидродинамики и теории турбулентности, теории динамических систем, оптики, физики космических лучей, атмосферного электричества [1–7]. Исследование атмосферного электричества, являясь одним из фундаментальных направлений атмосферной физики, в последнее время привлекает особое внимание в связи с появлением новых экспериментальных данных, полученных с помощью наземных и спутниковых наблюдений, баллонного зондирования, измерений на борту самолётов, экспериментов по иницированию грозового разряда (triggering lightning), лабораторного моделирования [7–9].

Новый импульс развитию представлений о грозовом электричестве дали наблюдения оптических явлений в верхней атмосфере, коррелирующих с грозовой активностью, — спрайтов (sprites), эльфов (elves) и джетов (jets) [8]. Отдельные проблемы физики грозового электричества обсуждались, в частности, в обзорах, опубликованных в *УФН* [10, 11]. Последние экспериментальные и

теоретические работы привели к более глубокому пониманию физических процессов и в классической области исследования атмосферного электричества — изучении глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Поэтому вполне закономерно появление ряда новых обзоров, посвящённых ГЭЦ, в ведущих зарубежных и отечественных журналах [12–15], хотя ни один из них не даёт целостной картины экспериментальных и теоретических достижений в данной области. В настоящем кратком сообщении, по сути, изложен развёрнутый план такого обзора.

### 2. Концепция глобальной электрической цепи. Наблюдения глобальной электрической цепи и её вариаций

Глобальная электрическая цепь — распределённый токовый контур, образованный высокопроводящими слоями верхнего слоя океана и земной коры и атмосферой, проводимость которой ничтожно мала в пограничном слое, но резко (экспоненциально) возрастает с увеличением высоты (рис. 1).

Согласно концепции Вильсона, сформулированной 90 лет назад [16], основными источниками электродвижущей силы (э.д.с.), поддерживающей потенциал ионосферы, служат облака, обладающие электрической структурой (прежде всего, кучево-дождевые и слоисто-дождевые), а зонами возвратных токов — области хорошей погоды (рис. 2). Как известно, фундаментальное экспериментальное подтверждение концепция Вильсона получила уже в конце 20-х годов XX в. при сравнении суточной вариации атмосферного электрического поля над океанами, измеренной в условиях хорошей погоды (так называемая кривая Карнеги (рис. 3)), с суточной вариацией количества грозовых событий на земном шаре [17]. Оказалось, что обе кривые имеют максимум при значении времени около 19–20 ч UT и минимум при значении около 4 ч UT, поэтому суточную вариацию атмосферного электрического поля и тока стали называть унитарной (см. широко известный раздел "Электричество атмосферы" в 5-м томе *Фейнмановских лекций по физике* [18]). Многочисленные последующие наземные измерения электрического поля и тока показали, однако, что при наблюдениях над сушей вблизи поверхности Земли целый ряд факторов затрудняет выделение унитарной

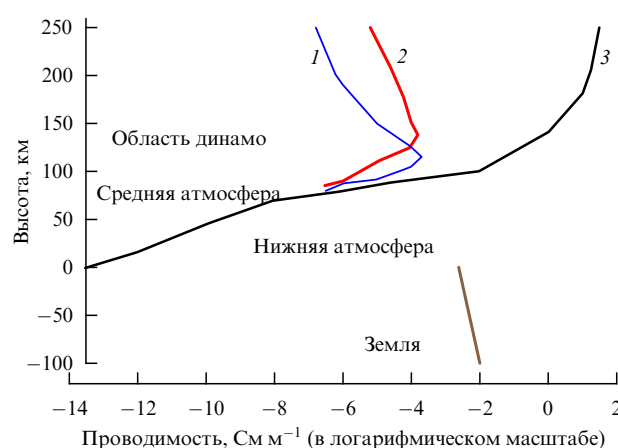
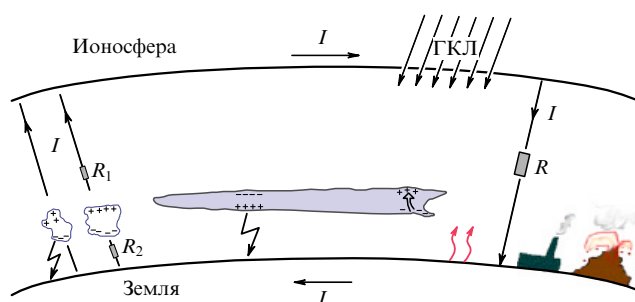
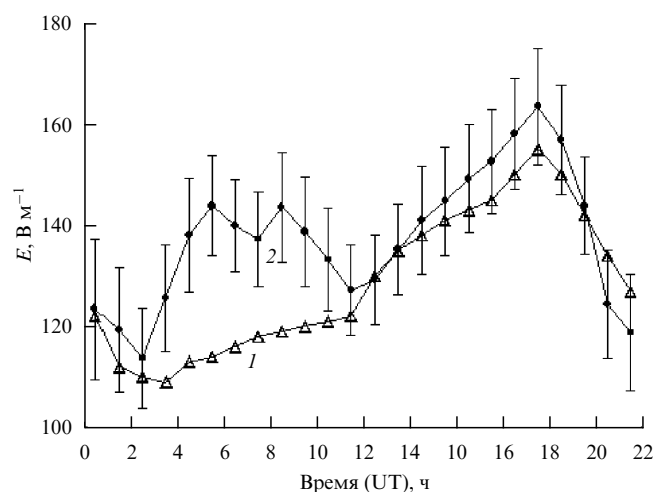


Рис. 1. Типичные профили поперечной (1 — холловской, 2 — педерсоновской) и продольной (3) проводимости ГЭЦ [13].

Е.А. Мареев. Институт прикладной физики РАН,  
Нижний Новгород, РФ  
E-mail: mareev@appl.sci-nnov.ru



**Рис. 2.** Схематическое изображение ГЭЦ. Сопротивление  $R \approx 230$  Ом, суммарный ток зарядки  $I \approx 10^3$  А. Отдельно изображены мезомасштабные конвективные системы с горизонтальным масштабом 150–200 км. Типичные значения сопротивления областей над облаком и под облаком  $R_1 \approx 10^4$  Ом и  $R_2 \approx 10^5$  Ом. ГКЛ — галактические космические лучи.



**Рис. 3.** Унитарная вариация напряжённости атмосферного электрического поля (1 — кривая Карнеги) и средние значения напряжённости поля по наблюдениям обсерватории "Борок" за июнь, август 1999 г. (кривая 2). Вертикальными отрезками показаны среднеквадратичные отклонения среднечасовых значений величины поля [14].

вариации: радиоактивность, повышенное содержание аэрозольных частиц в пограничном слое, их зарядка и перенос (что ведёт к возмущениям проводимости и плотности электрического заряда), так называемый электродный эффект [14, 19, 20]. На рисунке 3, например, рядом с кривой Карнеги приведена суточная вариация электрического поля, построенная за 28 дней наземных наблюдений в условиях хорошей погоды в июне и августе 1999 г. для среднеширотной геофизической обсерватории (ГО) "Борок" [14]. Виден хорошо выраженный максимум в утренние часы, обусловленный развитием интенсивной конвекции. Результаты недавних экспериментов показывают, что уже на начальной стадии поступления энергии от нагретой подстилающей поверхности в атмосферу в процессе конвекции часть её преобразуется в электрическую энергию, что проявляется в формировании аэро-электрических структур разного масштаба [21, 22]. В условиях хорошей погоды энергия отдельных структур может составлять от нескольких единиц до нескольких сотен джоулей [23]. В условиях тумана электрическая энергия, аккумулируемая интенсивными структурами, и

их вклад в возмущения поля могут быть существенно большими. Например, во время экспериментов в ГО "Борок" в июле 2002 г. наблюдались возмущения поля с горизонтальным масштабом  $L \approx 10$  км, высотой  $h \approx 200$  м и энергией  $W \approx 3 \times 10^4$  Дж [24]. Теоретический анализ роли конвективных генераторов в глобальной цепи, учитывающий динамику развития конвекции, в настоящее время далёк от завершения [25, 26]. Следует подчеркнуть, что при корректном рассмотрении конвективных генераторов величина тока, дающего вклад в поддержание ионосферного потенциала, должна зависеть от величины этого потенциала, что является отличительной особенностью данного генератора. На важность учёта локальных эффектов при наземных измерениях указывает также уточнённый анализ сезонного хода унитарной вариации, в соответствии с которым максимум приходится на лето Северного полушария [27, 28].

В последнее время особое внимание уделялось измерениям электрического поля в высоких широтах, в первую очередь в Антарктиде [29–31], где велико число безоблачных дней, а пограничный слой более устойчив из-за низкой температуры, хотя возникают дополнительные сложности, обусловленные геофизическими эффектами. С учётом влияния магнитосферных источников и соответствующего усреднения данных удалось выявить унитарную вариацию на Южном полюсе и на станции "Восток" [30, 31]. Таким образом, несмотря на сложность наземных измерений, учёт локальных и региональных эффектов позволяет обнаружить проявления глобальной вариации ионосферного потенциала. Но наиболее прямым путём измерения этой величины является измерение вертикального профиля напряжённости электрического поля в атмосфере [12, 28, 32].

В настоящее время основными экспериментальными фактами, подтверждающими существование глобальной цепи, наряду с унитарной вариацией, можно считать:

1) постоянство плотности тока с высотой вплоть до высот в несколько десятков километров (см., например, [33], где приведены данные, показывающие, что на высотах, меньших 31 км, плотности тока положительных  $j_+$  и отрицательных  $j_-$  носителей остаются постоянными, в данном случае  $j_+ \approx j_- \approx 2,5$  пА м<sup>-2</sup>);

2) близкие значения разности потенциалов Земля — ионосфера, измеренной одновременно в точках, разнесённых на глобальные расстояния (Darwin, Австралия — 220 кВ, Weston, США — 235 кВ) [32].

Заметим, что при баллонных измерениях поля внутри грозных облаков, несмотря на большие значения поля и его вариаций, разность потенциалов между Землёй и верхней частью атмосферы также близка к значениям ионосферного потенциала [34] (см., например, рис. 5 в разделе 3).

Важнейшим экспериментальным достижением в области атмосферного электричества в последние годы можно считать непрерывные (начиная с 1995 г.) космические наблюдения числа молниевых вспышек с борта спутников NASA "Microlab-1" (инструмент — детектор OTD (Optical Transient Detector), 1995–2000 гг.) и TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) (инструмент — LIS (Lightning Image Sensor), запущен в 1997 г.) [35–37]. Анализ этих наблюдений позволил, в частности, понять ряд вопросов, связанных с унитарной вариацией, и прежде всего — дать количественную оценку относительного вклада в глобальную цепь различных областей

максимальной грозовой активности: африканской (бассейн реки Конго), южноамериканской (бассейн Амазонки) и находящейся в Юго-Восточной Азии [38, 39], а также выявить интенсивные центры молниевой активности в более высоких широтах. Результаты исследований подтвердили, что молниевая активность африканского очага превалирует, но его вклад в унитарную вариацию не является максимальным, что связано с определяющей ролью квазистационарных токов, обусловленных как грозowymi, так и слоисто-дождевыми облаками (в том числе, не сопровождающимися грозой, но обладающими развитой электрической структурой). Тем не менее фундаментальная проблема баланса токов грозowych и слоисто-дождевых облаков и ГЭЦ в целом остаётся недостаточно изученной, и здесь необходимы дополнительные наземные, баллонные и самолётные измерения [40, 41].

Отметим, что важный (хотя и эпизодический) вклад в глобальную цепь могут давать также генераторы, обусловленные зарядкой частиц в дисперсных многофазных пылевых и аэрозольных потоках [42]. При этом может быть существенной роль разных подвижностей ионов и ионных кластеров [43], в том числе связанных с сейсмической активностью [44].

Хорошо известно, что наряду с генераторами, находящимися в нижней части атмосферы, существенный вклад в распределение потенциала и тока ГЭЦ дают ионосферные и магнитосферные генераторы [14, 45]. В полярной шапке разность потенциалов "утро–вечер" величиной 40–100 кВ (суммарный ток порядка  $10^6$  А) генерируется магнитосферным динамо, представляющим собой магнитогидродинамический (МГД) генератор, трансформирующий кинетическую энергию солнечного ветра в электрическую энергию. В условиях низкой геомагнитной активности при горизонтальных масштабах источника порядка 500 км вклад электрических полей магнитосферной конвекции может обусловить около 20 % вариации приземного электрического поля высоких широт [45], тогда как в условиях магнитных бурь возмущения поля и широтные масштабы влияния этого генератора существенно возрастают. Вариации электрического поля, обусловленные динамо-действием приливных волн в Е-области ионосферы, составляют 5 % от среднего значения напряжённости поля средних широт (разность потенциалов на высотах ионосферы 5–15 кВ, суммарный ток порядка  $10^5$  А).

В работах [46–49] было обращено внимание на существование ещё одного потенциально важного источника атмосферного электричества — планетарного электрического генератора, обусловленного нетвердотельным характером вращения плазменной оболочки планеты. Выходное напряжение планетарного генератора, порядка э.д.с. униполярной индукции  $U = M\omega_0/cR$  (где  $M$  — магнитный момент планеты,  $\omega_0$  и  $R$  — её угловая скорость и радиус), приложено к атмосферному промежутку как к участку глобального электрического контура с наибольшим сопротивлением.

В модели, построенной авторами работ [47, 48], рассмотрены два режима работы планетарного генератора: 1) режим "холостого хода", отвечающий случаю планеты с "хорошей" погодой, при котором в атмосфере отсутствуют токи другой природы; 2) режим работы, включающий в себя распределённую э.д.с. униполярной индукции и грозowe источники стороннего тока. Получены разумные характеристики параметров ГЭЦ. Для

экспериментального исследования роли планетарного генератора в глобальной цепи необходимы одновременные измерения ионосферного потенциала и тока атмосферы на средних широтах и на экваторе.

В связи с важной ролью источников, расположенных в верхней атмосфере, в понятие глобальной электрической цепи иногда включают ионосферные и магнитосферные токовые системы [44, 50].

Отметим, что в последние годы складывается традиция рассматривать, наряду с классической квазистационарной токовой цепью, именуемой в англоязычной литературе "Direct Current (DC) circuit", сопутствующую ей цепь — "Alternating Current (AC) circuit", представляющую собой резонатор Земля–ионосфера [15]. Анализ соответствующих глобальных электромагнитных резонансов (так называемых шумановских резонансов) даёт богатую информацию об источниках молниевой активности на земном шаре [15, 51, 52].

В последнее время более полным стало понимание роли космических лучей в глобальной цепи и особенно в грозowych облаках, хотя здесь также остаётся ряд нерешённых проблем, связанных, в частности, с инициацией разрядов и генерацией энергичных частиц и квантов рентгеновского и гамма-излучения в грозowych условиях [10, 52–54].

Следует отметить, что указываемые рядом авторов "вызовы концепции ГЭЦ" [50, 53] связаны, скорее, со слишком узким пониманием классической концепции ГЭЦ, в частности, часто трактуемой как модель "шарового конденсатора" [55]. Определение ГЭЦ как распределённого токового контура и детальный учёт различных генераторов (как электрогидродинамических, так и магнитогидродинамических) позволяет рассматривать концепцию ГЭЦ как сложившуюся самосогласованную теорию, хотя и нуждающуюся в дальнейшем развитии.

### 3. Моделирование глобальной электрической цепи. Генераторы и их модели. Молниевые разряды

К середине 80-х годов XX в. сформировались основы модельного описания ГЭЦ в рамках стационарного приближения. Наиболее общая стационарная модель была предложена Робблом и Хейсом [45, 56]. Авторы данной модели рассматривали в качестве источников точечные дипольные источники тока на фоне заданного высотного и широтного профиля проводимости.

Теоретической основой описания ГЭЦ является рассмотрение полей и токов отдельных стационарных источников в плоской геометрии [57–59]. Это рассмотрение замечательно, в частности, тем, что оно иллюстрирует необходимость формирования ГЭЦ "с участием ионосферы". В самом деле, если рассмотреть точечный источник тока в среде с экспоненциально возрастающей проводимостью, то можно легко найти аналитическое выражение для потенциала (функцию Грина):

$$\varphi(R, z) = \frac{I}{4\pi\sigma_0} \exp\left(-\frac{z+h}{2H}\right) \frac{\exp[-r/(2H)]}{r},$$

$$r = [R^2 + (z-h)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\sigma = \sigma_0 \exp(z/H)$ ,  $h$  — координата точки источника,  $z$  и  $R$  — координаты точки наблюдения по вертикали и

горизонтали. При наличии идеально проводящей нижней границы при  $z = 0$  суммарный потенциал находится сложением (1) с потенциалом точечного тока  $-I \exp[-h/(2H)]$ , помещённого в точку  $z = -h$  [59]. Вычислив поле  $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$  при  $z > h$  и проинтегрировав  $j_z = E_z$  по поперечным координатам, отсюда легко найти ток, текущий вверх (к верхним слоям атмосферы):  $I_0 = I[1 - \exp(-h/H)]$ . Последнее выражение показывает: во-первых, экспоненциальное возрастание проводимости с необходимостью приводит к тому, что часть тока в окрестности облака течёт в ионосферу, и, во-вторых, доля тока, текущего в ионосферу (по сравнению с той частью, которая замыкается на Землю в окрестности облака), резко возрастает с увеличением высоты облака над Землёй. Для распределённых источников тока с малым поперечным масштабом картина качественно не меняется (рис. 4).

Модель Роббла – Хейса с разрешением  $5^\circ$  по широте и долготе позволила получить распределения потенциала в атмосфере при некоторых модельных предположениях о среднем распределении точечных источников в главных грозовых очагах. В дальнейшем были развиты модели, учитывающие нестационарные точечные источники, распределённые источники тока с малым поперечным масштабом, возмущения проводимости [60–63], однако эти эффекты не были включены в модель ГЭЦ.

По мере накопления экспериментальных данных, касающихся стационарных электрических источников в атмосфере, стала очевидной необходимость учёта в рамках моделей ряда новых фактов, установленных в ходе сравнительно недавних экспериментальных кампаний. Прежде всего, баллонные измерения электрической структуры развитых грозовых облаков показали наличие в них сложной многослойной (с числом слоёв, достигающим до восьми) электрической структуры, причём области с различным темпом конвекции могли обладать различным электрическим строением [63]. Кроме того, прямые измерения электрической структуры крупномасштабных грозовых конгломератов — мезомасштабных конвективных систем (ММКС) — показали существование единой квазистационарной слоистой электрической структуры в областях стратификации, поперечный масштаб которых составляет несколько сотен километров. Развитый в работе [34] подход позволил учесть при моделировании обе указанные выше особенности грозовых генераторов.

В случае распределённых стационарных электрических источников система уравнений Максвелла сводится

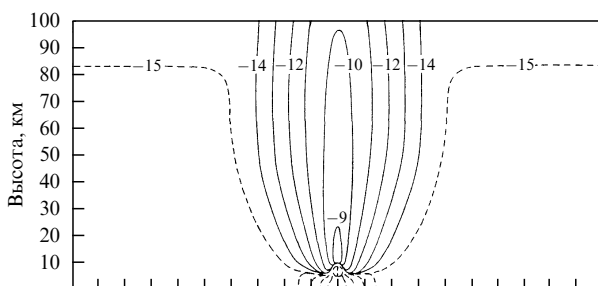


Рис. 4. Изолинии вертикальной компоненты плотности тока в окрестности источника над проводящей поверхностью [59]. Числа на кривых соответствуют значениям  $\log_{10}(j_z [\text{А м}^{-2}])$ . Центры зарядов  $\pm 50$  Кл находятся на высотах 5 и 10 км.

к уравнениям токостатики, решение которых при определённых условиях можно найти аналитически. Согласно подходу, изложенному в работе [34], для моделирования крупномасштабной электрической структуры облака достаточно задать высотный профиль проводимости и построить распределение вертикальных сторонних токов, обеспечивающее наблюдаемый высотный профиль электрического поля. Другими словами, необходимо решить обратную задачу токостатики, восстановив источник по известному измеренному распределению электрического поля, после чего из решения прямой задачи можно найти плотность тока и электрическое поле как внутри облака, так и в его окрестности. В соответствии с наблюдениями сложную высотную электрическую структуру конвективной системы удобно представить в виде набора горизонтальных слоёв вертикального стороннего тока:

$$\mathbf{j}_{\text{ex}}(\mathbf{r}, z) = \begin{cases} 0, & z < z_- \text{ , } z > z_+; \\ j_{\text{ex}}(\mathbf{r}) \mathbf{z}_0, & z_- < z < z_+, \end{cases} \quad (2)$$

где  $z_-$  и  $z_+$  — нижняя и верхняя границы слоя,  $j_{\text{ex}}(\mathbf{r})$  — распределение амплитуды стороннего тока в горизонтальной плоскости,  $\mathbf{z}_0$  — орт вертикальной оси. В простом случае распределение проводимости имеет вид

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_1, & z \leq 0; \\ \sigma_0 \exp\left(\frac{z}{H}\right), & z > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_0 \approx 5 \times 10^{-14}$  См м $^{-1}$  — удельная электрическая проводимость атмосферы у земной поверхности,  $\sigma_1 \approx 10^{-3}$  См м $^{-1}$  — удельная проводимость Земли,  $H \approx 6 \times 10^3$  м — приведённая высота проводимости атмосферы. Профиль (3) неплохо соответствует распределению проводимости в областях хорошей погоды при высотах менее порядка 70 км. В соответствии с приближением токостатики электрическое поле считается потенциальным:  $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$ , и плотность тока проводимости имеет вид  $\mathbf{j} = -\sigma\nabla\varphi$ . В этом случае условие непрерывности полного тока даёт следующее уравнение для электрического потенциала:

$$\text{div}[-\sigma\nabla\varphi + \mathbf{j}_{\text{ex}}(\mathbf{r}, z)] = 0. \quad (4)$$

Граничные условия для уравнения (4) следуют из непрерывности потенциала и вертикальной компоненты плотности полного тока на границах сред и слоя, а также из невозмущённости потенциала  $\varphi$  на больших расстояниях от источника:  $\varphi(r \rightarrow \infty, z) = 0$ ,  $\varphi(r, z \rightarrow \infty) = 0$ . Важно отметить, что использование в качестве элемента электрической структуры плоского слоя стороннего тока оправдано и для гроз со сравнительно небольшими поперечными масштабами, и для протяжённой области стратификации мезомасштабных конвективных систем, электрическая структура которой, как показывают прямые измерения, мало различается в разных точках области и на разных этапах эволюции системы.

Примеры расчётов, проведённых в соответствии с изложенным подходом, можно найти в работах [34, 64, 65]. Результаты этих расчётов проиллюстрированы также на рис. 5, 6. Построенная модель позволила рассчитать электрические поля и токи в окрестности ММКС и оценить полный ток, текущий к ионосфере. Результаты расчётов показали, что вклад ММКС в глобальную

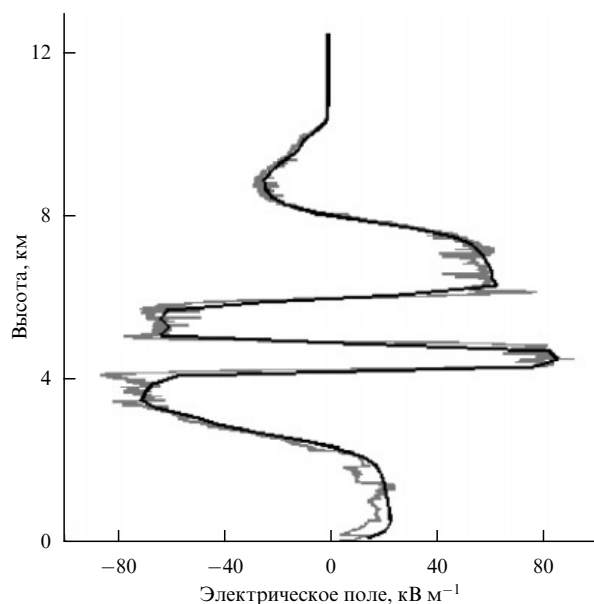


Рис. 5. Высотный профиль электрического поля (светлая кривая), полученный в результате баллонных измерений 24 мая 1991 г. в стратифицированной области ММКС типа А над Оклахомой (США), и модельное распределение электрического поля (тёмная кривая) [65].

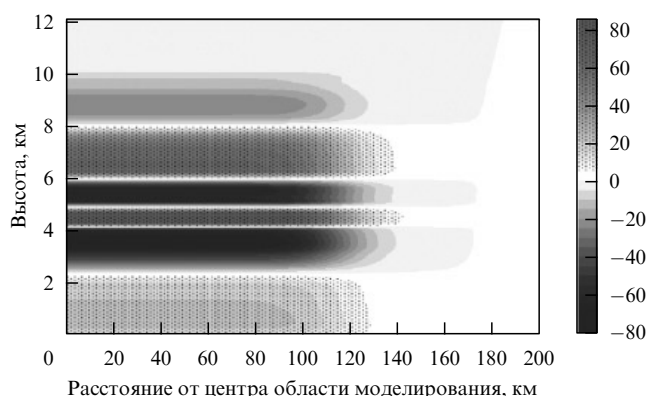


Рис. 6. Распределение вертикальной компоненты электрического поля, формируемое стратифицированной областью мезомасштабных конвективных систем [65].

электрическую цепь может существенно превосходить вклад одиночных гроз. Важным выводом явилось то, что, несмотря на значительное возмущение электрического потенциала в области конвекции, достигающее нескольких сотен мегавольт, основной вклад в полный вертикальный ток и структура полей и токов в окрестности ММКС определяются областью стратификации (для рассмотренной модели ММКС типа В, например, полный вертикальный ток от области стратификации составляет  $-25$  А, тогда как вклад области конвекции не превышает  $0,5$  А). В зависимости от количества, поперечного размера, положения и амплитуды слоёв стороннего тока полный вклад ММКС в глобальную цепь может быть как "положительным", так и "отрицательным" в случае, когда система является стоком в глобальной цепи. Это обстоятельство заставляет уделить первостепенное внимание в дальнейших исследованиях ГЭЦ статистике и особенностям эволюции ММКС.

Изложенный подход к моделированию источников позволил также получить аналитические выражения для энергии облака и среднего темпа её диссипации в атмосфере с экспоненциальным профилем проводимости [66]. Считалось, что сторонний ток обладает плавным поперечным распределением:  $j_{ex} = j_0 \exp(-r^2/a^2)$ , и течёт в слое между уровнями  $z_-$  и  $z_+$ , соответствующими нижнему и верхнему уровням локализации электрических зарядов. Достаточно простые выражения получаются, когда поперечный масштаб облака  $a$  мал или, наоборот, велик по сравнению с масштабом изменения профиля проводимости  $H$ . Полученные в [66] выражения позволяют исследовать зависимость энергетических характеристик источников от параметров  $a$ ,  $H$ ,  $\sigma_0$ ,  $z_-$ ,  $z_+$ , сравнить вклад различных областей облака, оценить роль горизонтальной компоненты поля в энергетическом балансе цепи. Они дают разумные значения для энергии и темпа её диссипации при значениях плотности тока, поддерживающего распределение зарядов в облаке, порядка  $1 - 10$  нА м $^{-2}$ .

Важнейшим направлением дальнейшего развития моделирования ГЭЦ является учёт нестационарных процессов [67–69]. В частности, остаётся малоисследованным вопрос о вкладе в ГЭЦ молний и переходных токов, текущих после молниевых вспышек. Обычно подразумевается, что электрический заряд, перенесённый с облака на Землю молниевой вспышкой, быстро перераспределяется по поверхности Земли и, следовательно, даёт непосредственный вклад в полный заряд Земли и в эффективный ток зарядки (или разрядки, в зависимости от полярности вспышки) ГЭЦ. Однако известно, что после этого быстрого процесса (длительность типичной отрицательной вспышки — не более нескольких сотен миллисекунд) начинается медленная переходная стадия, вызванная перераспределением заряда в окружающей атмосфере. Переходная стадия (длительностью до нескольких десятков и сотен секунд) приводит к частичной нейтрализации заряда, перенесённого на Землю, и переносу заряда в ионосферу. Заряды, перенесённые на Землю и ионосферу после переходной стадии, и представляют собой полный вклад молниевой вспышки в ГЭЦ.

В работе [67] была исследована динамика переходных токов. Установлено, что и вспышки облако–Земля, и внутриоблачные вспышки, наряду с быстрыми, генерируют значительные по величине переходные токи. Вспышки облако–Земля "нормальной полярности" (т.е. переносящие отрицательный заряд на Землю) заряжают глобальную цепь, тогда как внутриоблачные вспышки "нормальной полярности" приводят к её релаксации. Эффективность вспышек типа облако–Земля (т.е. соотношение суммарного заряда, перенесённого в ионосферу и на Землю) существенно зависит от высоты расположения заряда в проводящей атмосфере, изменяясь от 15 % до 90 % в интервале высот от 1 км до 14 км над Землёй в модели с экспоненциальной проводимостью. Эффективность внутриоблачных вспышек в среднем значительно меньше, чем вспышек облако–Земля, однако их средние вклады в ток ГЭЦ могут быть сравнимыми, поскольку число внутриоблачных вспышек существенно превосходит число вспышек облако–Земля. Проведённые оценки глобального баланса переходных токов показали, что в период интенсивной молниевой активности вклад переходных токов, обусловленных молниевыми вспышками,

может быть порядка квазистационарного тока. Однако в глобальном токовом балансе вклад переходных токов, скорее всего, не превышает 20 %.

В последние годы были предложены модели, учитывающие влияние на ГЭЦ анизотропии проводимости на больших высотах, особенности крупномасштабного распределения атмосферной проводимости, нестационарные эффекты [68–72]. Новый импульс развитию нестационарных моделей, в том числе "электротехнических" [73], дали открытие и активное изучение разрядов в средней атмосфере, коррелирующих с грозовой активностью в тропосфере.

Общим направлением моделирования ГЭЦ является развитие самосогласованных моделей, способных учитывать и нестационарные эффекты, и неоднородность распределения проводимости, в том числе, связанную с возмущениями потоков космических лучей, выпадениями энергичных частиц, выбросами аэрозольных частиц (например, при извержениях вулканов) и радиоактивности. Представляется важным для теории ГЭЦ и развитие проблемы электрического динамо применительно к различным слоям атмосферы, включая среднюю атмосферу [74]. В перспективе представляется очень важным создать комбинированные модели, учитывающие самосогласованным образом гидродинамику и электродинамику верхних слоёв атмосферы [75] с общей циркуляцией атмосферы и океана [76]. Построение такой модели ГЭЦ ещё впереди.

#### 4. Глобальная электрическая цепь как открытая диссипативная система

Основная часть потока энергии, поддерживающего глобальную электрическую цепь, поступает в виде энергии излучения Солнца ( $1,37 \times 10^3$  Вт  $\text{м}^{-2}$ ), которая служит источником лабильной (складывающейся из внутренней  $\sim 8,6 \times 10^{23}$  Дж и потенциальной  $\sim 3,6 \times 10^{23}$  Дж) энергии, кинетической энергии атмосферы (от  $6 \times 10^{20}$  Дж до  $9 \times 10^{20}$  Дж в зависимости от сезона) и энергии электрического поля. Особое значение для динамики накопления и диссипации энергии электрического поля в атмосфере имеют процессы фазового превращения воды, так как именно поступление скрытой теплоты конденсации водяного пара в атмосферу (составляющей по величине примерно одну четверть потока солнечной энергии) обеспечивает поддержание интенсивных восходящих потоков и образование гидрометеоров, играющих ключевую роль в электризации облаков. Соответствующие "пирамиды" накопления электрической энергии и её диссипации в атмосфере представлены в [14].

До настоящего времени лишь в немногих работах обсуждался вопрос о динамике накопления и диссипации электрической энергии в грозовом облаке. В работе [77] на основании результатов измерений поля *in situ* были получены следующие значения энергии:  $5 \times 10^{11}$  Дж и  $2 \times 10^{12}$  Дж для двух мезомасштабных конвективных систем и  $2 \times 10^{11}$  Дж для мощного грозового облака с наковальней. Этого достаточно для генерации нескольких сотен/тысяч обычных вспышек молнии и только 10–100 энергичных положительных вспышек облако–Земля.

Вышеприведённые оценки подтверждаются результатами модельных расчётов авторов работы [34]; развитая ими трёхмерная модель распределения поля и тока в

окрестности мезомасштабных конвективных систем даёт величину порядка  $10^{11}$  Дж для суммарной энергии, аккумулируемой в системе с масштабом 200 км, причём для омических потерь в такой системе получается величина  $3 \times 10^9$  Вт. Таким образом, электрическая энергия, аккумулирующаяся внутри грозового облака, составляет около  $10^{10} - 10^{11}$  Дж, а для мощных облаков может превышать  $10^{12}$  Дж. Так как средний ток хорошей погоды равен 2 пА, а средний вертикальный ток грозового облака, заряжающий контур глобальной цепи, оценивается обычно в 1–2 А, среднее число гроз на планете можно принять равным  $10^3$ . Аккумулированная в них средняя энергия может быть оценена как  $3 \times 10^{13}$  Дж.

Как показывают наблюдения сфериков [15], обычно регистрируется до 10 мощных сфериков (так называемых Q-bursts) в 1 с, откуда следует, что в среднем на земном шаре одновременно гремит несколько десятков мощных гроз, что в сумме даёт  $5 \times 10^{13}$  Дж. Следует подчеркнуть, что квазистационарные токи части мощных грозовых облаков и ММКС разряжают цепь [34], хотя они, безусловно, дают существенный вклад в суммарную электрическую энергию атмосферы.

Дополнительный вклад в суммарную электрическую энергию вносят слоисто-дождевые облака. Как показали расчёты, средняя энергия, диссипируемая в окрестности грозового облака из-за токов проводимости, составляет порядка  $3 \times 10^8$  Вт, а для мощных облаков может достигать  $3 \times 10^9$  Вт, что даёт в сумме по земному шару  $3 \times 10^{11}$  Вт. Часть энергии также диссипируется молниевыми вспышками и спрайтами. При энергии вспышки  $2 \times 10^9$  Дж и средней частоте молниевых вспышек  $50 \text{ с}^{-1}$  [35] получаем в среднем по земному шару мощность диссипации  $10^{11}$  Вт. Для среднего значения суммарной электрической энергии, диссипируемой в единицу времени, получается  $4 \times 10^{11}$  Вт.

Для сравнения укажем, что оценка электростатической энергии, сосредоточенной в "глобальном конденсаторе", даёт  $W = j_0^2 R_E^2 H / (2\sigma_0^2) \approx 4,4 \times 10^{18}$  эрг  $= 4,4 \times 10^{11}$  Дж, где  $R_E$  — радиус Земли, при  $H \approx 6$  км,  $\sigma_0 \approx 10^{-14}$  См  $\text{м}^{-1}$  и амплитуде атмосферного тока  $j_0 \approx 2 \times 10^{-12}$  А  $\text{м}^{-2}$ . Для скорости диссипации энергии вследствие омических потерь получается  $P = 4\pi\sigma_0 W \approx 5 \times 10^8$  Вт.

Таким образом, электрическая энергия, генерируемая грозовыми облаками, а также мощными слоисто-дождевыми облаками, составляет в среднем  $3 \times 10^{13} - 10^{14}$  Дж, что на два-три порядка превышает энергию, сосредоточенную в глобальном сферическом конденсаторе Земля–ионосфера. Средняя скорость диссипации электрической энергии токами проводимости и молниевыми вспышками составляет  $3 \times 10^{11} - 3 \times 10^{12}$  Вт; это соответствует времени жизни электрической энергии порядка 100 с [66]. Проведённые оценки характеризуют глобальную цепь как наиболее динамичную из существующих геофизических систем с достаточно высоким запасом энергии.

#### 5. Глобальная электрическая цепь в климатической системе Земли и других планет Солнечной системы

Изучение климатологии ГЭЦ началось после работ Вильямса, обратившего внимание на возможную зависимость молниевой активности (и соответственно состояния DC- и AC-глобальной цепи) от средней температуры [80]. Обсуждение экспериментальных ре-



зультатов, связанных с эволюцией ионосферного потенциала в течение XX в., можно найти в работах [12, 15, 19]. К настоящему времени надёжных и планомерных измерений этой величины недостаточно для того, чтобы можно было говорить о статистически значимых изменениях за несколько десятков лет, хотя в период с 1960-го года по 1967-й год наблюдалось значимое увеличение ионосферного потенциала, связанное, очевидно, с испытаниями ядерного оружия в атмосфере [12]. Недостаточно ясным является и понимание роли генераторов и областей диссипации в ГЭЦ в процессе её эволюции, а также эффектов влияния "космической погоды" [19].

Следует подчеркнуть, что среди природных систем, подверженных влиянию климатических изменений, ГЭЦ занимает уникальное место. Во-первых, как уже отмечалось, благодаря особому характеру распределения проводимости по высоте глобальная цепь на масштабе планеты естественным образом усредняет разность потенциалов между Землёй и ионосферой, определяя таким образом глобальный индекс — ионосферный потенциал, величина которого зависит от уровня глобальной грозовой активности [15]. Во-вторых, грозовые облака представляют собой экстремальное погодное явление, сопровождающееся разрушительными ливнями, шквалами, градом, — естественно, что изучение климатических трендов экстремальных явлений вызывает особый интерес [78, 79]. В-третьих, существует ряд физических механизмов возможного влияния самих электрических явлений на климат (см., например, [81, 82]). Поэтому необходимо исследовать как сами эти механизмы, так и обратные связи между атмосферными электрическими явлениями и изменениями состояния климатической системы.

В последнее время одним из важнейших инструментов изучения климата и его изменений стали физико-математические модели высокого разрешения [76]. Учёт атмосферных электрических явлений в климатических моделях связан, однако, с рядом проблем, важнейшей из которых является необходимость параметризации количества и интенсивности грозовых облаков и молниевых вспышек в зависимости от основных физических характеристик конвективной облачности. Дело в том, что шаг по пространству в моделях циркуляции атмосферы и океана даже для моделей с наиболее высоким разрешением велик по сравнению с масштабами процессов конвекции, ответственных за образование грозовых облаков [83]. Сейчас, в частности, широко обсуждаются проблемы параметризации грозовых разрядов как источника оксидов азота в атмосфере, приводящих к возмущениям состава атмосферы (в том числе, озона и гидроксильного радикала) и нарушению радиационного баланса [84]. Проведены, в частности, численные эксперименты с использованием химико-климатической модели высокого пространственного разрешения [85] и среднеклиматических параметризаций грозовой активности для изучения влияния гроз на состав и радиационный баланс атмосферы и обратного влияния климатических изменений на частоту и интенсивность грозовых явлений [86]. Дальнейшее развитие физических параметризаций даст возможность учесть в климатических моделях обратные связи между изменением содержания оксидов азота и последующим изменением концентраций озона и других атмосферных газов, способным повлиять на метеорологические условия и, следовательно,

но, на скорость образования оксидов азота в молниевых разрядах и состоянии ГЭЦ.

В значительной мере интерес к электрическим явлениям в планетных атмосферах, связанный с исследованием возможной роли атмосферного электричества в климатических процессах, формировании биосфер, взаимосвязи "планетарной" и "космической" погоды, стимулируется также новыми данными, полученными с помощью межпланетных космических аппаратов (в том числе "Cassini", "Mars Express", "Venus Express") [9]. Краткий анализ особенностей ГЭЦ для атмосфер других планет Солнечной системы можно найти в [87].

## 6. Заключение

В последнее время получен ряд новых результатов, которые привели к более глубокому пониманию физических процессов в глобальной электрической цепи.

1. Предложено и обосновано новое описание глобальной атмосферной электрической цепи, опирающееся на результаты анализа энергетических характеристик квазистационарного поля областей грозы и хорошей погоды. Выполненные оценки характеризуют глобальную цепь как наиболее динамичную из существующих геофизических систем с достаточно высоким уровнем энергии. Дальнейшее развитие исследований энергетических характеристик глобальной цепи должно быть связано с более детальным изучением и моделированием источников, с развитием газодинамических моделей молнии, мониторингом грозовой и молниевой активности.

2. Исследована динамика переходных токов, текущих после молниевых вспышек, и вклад этих токов в глобальную электрическую цепь.

3. Разработан ряд новых моделей (в основном численных), позволяющих описывать нестационарные и электромагнитные процессы в глобальной электрической цепи как в плоской, так и в сферической геометрии, а также развиты модели стационарных глобальных токовых систем. Можно надеяться, что в ближайшее время нестационарные модели глобальной цепи будут доведены до уровня, позволяющего описывать крупномасштабные геофизические возмущения и долгосрочную эволюцию системы, а также продвинутся в понимании особенностей атмосферного электричества для других планет Солнечной системы. Особый интерес представляют изучение климатологии грозы и молнии, а также моделирование глобальной атмосферной электрической цепи в различных сценариях развития климата.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-05-13600-офи\_ц, Программы Президиума РАН № 4 и Программы ОФН РАН № 11.

## Список литературы

1. Houghton J *The Physics of Atmospheres* 3rd ed. (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002)
2. Дымников В П *Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов* (М.: ИВМ РАН, 2007)
3. Visconti G *Fundamentals of Physics and Chemistry of the Atmosphere* (Berlin: Springer-Verlag, 2001)
4. Голицын Г С *Динамика природных явлений, климат, планетные атмосферы, конвекция, волновые и случайные процессы* (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004)
5. Lorenz E N *J. Atmos. Sci.* **63** 2056 (2006)

6. Онищенко О Г, Похотелов О А, Астафьева Н М *УФН* **178** 605 (2008) [Onishchenko O G, Pokhotelov O A, Astaf'eva N M *Phys. Usp.* **51** 577 (2008)]
7. Rakov V A, Uman M A *Lightning: Physics and Effects* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003)
8. Fullekrug M, Mareev E A, Rycroft M J (Eds) *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges* (Dordrecht: Springer, 2006)
9. Leblanc F et al. (Eds) *Planetary Atmospheric Electricity* (New York: Springer, 2008)
10. Гуревич А В, Зыбин К П *УФН* **171** 1177 (2001) [Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Usp.* **44** 1119 (2001)]
11. Базелян Э М, Райзер Ю П *УФН* **170** 753 (2000) [Bazelyan E M, Raizer Yu P *Phys. Usp.* **43** 701 (2000)]
12. Markson R *Bull. Am. Met. Soc.* **88** 223 (2007)
13. Rycroft M et al. *Space Sci. Rev.* **137** 83 (2008)
14. Анисимов С В, Мареев Е А *Физика Земли* (10) 8 (2008) [Anisimov S V, Mareev E A *Izv., Phys. Solid Earth* **44** 760 (2008)]
15. Williams E R *Atmos. Res.* **91** 140 (2009)
16. Wilson C T R *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **221** 73 (1921)
17. Whipple F J W *Quart. J. R. Met. Soc.* **55** 351 (1929)
18. Feynman R R, Leighton R B, Sands M *The Feynman Lectures on Physics* Vol. 2 (Reading, Mass.: Addison-Wesley Publ. Co., 1964) [Фейнман Р, Лейтон Р, Сэндс М *Фейнмановские лекции по физике* Т. 5 (М.: Мир, 1977) с. 174–198]
19. Harrison R G *Surv. Geophys.* **25** 441 (2004)
20. Mareev E A *Space Sci. Rev.* **137** 373 (2008)
21. Anisimov S V, Mareev E A, Bakastov S S *J. Geophys. Res.* **104** (D12) 14359 (1999)
22. Anisimov S V, Mareev E A, Shikhova N M, Dmitriev E M *Geophys. Res. Lett.* **29** (24) 70-1 (2002)
23. Anisimov S V et al. *Atmos. Res.* **76** 16 (2005)
24. Mareev E A, Anisimov S V, in *Proc. 12th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Versailles, France, 2003*, p. 797
25. Willett J C *J. Geophys. Res.* **88** 8453 (1983)
26. Morozov V N *Nonlinear Proc. Geophys.* **13** 243 (2006)
27. Adelman E J, Williams E R *J. Geophys. Res.* **101** (D23) 29679 (1996)
28. Mühleisen R, in *Electrical Processes in Atmosphere: Proc. XV Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, 1974*, p. 467
29. Frank-Kamenetsky A V et al. *J. Geophys. Res.* **106** (A1) 179 (2001)
30. Burns G B et al. *J. Geophys. Res.* **110** (D10) D10106 (2005)
31. Reddell B D et al. *J. Geophys. Res.* **109** (A9) A09308 (2004)
32. Markson R, Ruhnke L H, Williams E R *Atmos. Res.* **51** 315 (1999)
33. Gringel W, Rosen J M, Hofmann D J, in *The Earth's Electrical Environment* (Eds E P Krider, R G Roble) (Washington, DC: Natl. Acad. Press, 1986) p. 166
34. Davydenko S S et al. *J. Geophys. Res.* **109** D11103 (2004)
35. Christian H J et al. *J. Geophys. Res.* **108** (D1) 4005 (2003)
36. Mach D M et al. *J. Geophys. Res.* **112** D09210 (2007)
37. Bailey J C et al., in *Proc. of the 13th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Beijing, China, 2007* Vol. 2 p. 657
38. Williams E R, Heckman S J *J. Geophys. Res.* **98** (D3) 5221 (1993)
39. Williams E R, Satori G J *Atmos. Solar-Terr. Phys.* **66** 1213 (2004)
40. Mach D M et al. *J. Geophys. Res.* **114** D10204 (2009)
41. Thomas J N, Holzworth R H, McCarthy M P *Atmos. Res.* **91** 153 (2009)
42. Мареев Е А, в сб. *Нелинейные волны-2008* (Отв. ред. А В Гапонов-Грехов, В И Некоркин) (Н. Новгород: ИПФ РАН, 2009) с. 143
43. Смирнов В В *Ионизация в тропосфере* (СПб.: Гидрометеиздат, 1992)
44. Пулинец С А и др. *УФН* **168** 582 (1998) [Pulinets S A et al. *Phys. Usp.* **41** 515 (1998)]
45. Roble R G, Tzur I, in *The Earth's Electrical Environment* (Eds E P Krider, R G Roble) (Washington, DC: Natl. Acad. Press, 1986) p. 206
46. Беспалов П А, Чугунов Ю В *ДАН* **337** 467 (1994) [Bespalov P A, Chugunov Yu V *Dokl. Phys.* **39** 553 (1994)]
47. Bespalov P A, Chugunov Yu V, Davydenko S S *J. Atmos. Terr. Phys.* **58** 605 (1996)
48. Беспалов П А, Чугунов Ю В *Изв. вузов. Радиофизика* **40** 138 (1997) [Bespalov P A, Chugunov Yu V *Radiophys. Quantum Electron.* **40** 87 (1997)]
49. Солдаткин А О, Чугунов Ю В *Физ. плазмы* **29** 72 (2003) [Soldatkin A O, Chugunov Yu V *Plasma Phys. Rep.* **29** 65 (2003)]
50. Bering E A (III), Few A A, Benbrook J R *Phys. Today* **51** (10) 24 (1998)]
51. Nickolaenko A P, Hayakawa M, Sekiguchi M *Geophys. Res. Lett.* **33** L06823 (2006)
52. Rycroft M J, Israelsson S, Price C *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **62** 1563 (2000)
53. Harrison G *Geophys. Res. Lett.* **29** (14) 1660 (2002)
54. Гуревич А В и др. *УФН* **179** 779 (2009) [Gurevich A V et al. *Phys. Usp.* **52** 735 (2009)]
55. Имянитов И М, Шифрин К С *УФН* **76** 593 (1962) [Imyanitov I M, Shifrin K S *Sov. Phys. Usp.* **5** 292 (1962)]
56. Hays P B, Roble R G *J. Geophys. Res.* **84** 3291 (1979)
57. Holzer R E, Saxon D S *J. Geophys. Res.* **57** 207 (1952)
58. Willett J C *J. Geophys. Res.* **84** 4999 (1979)
59. Volland H, in *CRC Handbook on Atmospherics* Vol. 1 (Ed. H Volland) (Boca Raton, FL: CRC Press, 1995) p. 65
60. Tzur I, Roble R G *J. Geophys. Res.* **90** 5989 (1985)
61. Driscoll K T, Blakeslee R J, Koshak W J *J. Geophys. Res.* **99** (D5) 10653 (1994)
62. Stansbery E K, Few A A, Geis P B *J. Geophys. Res.* **98** (D9) 16591 (1993)
63. Stolzenburg M et al. *J. Geophys. Res.* **103** (D12) 14059 (1998)
64. Davydenko S S, Marshall T C, Stolzenburg M *Atmos. Res.* **91** 165 (2009)
65. Давыденко С С, Сергеев А С, Мареев Е А, в сб. *Труд. VI Росс. конф. по атмосферному электричеству, Н. Новгород, 1–7 октября 2007 г.*, с. 11
66. Mareev E A, Anisimov S V *Atmos. Res.* **91** 161 (2009)
67. Mareev E A et al. *Geophys. Res. Lett.* **35** L15810 (2008)
68. Kartalev M D et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **68** 457 (2006)
69. Dumin Yu V *Adv. Space Res.* **30** 2209 (2002)
70. Tinsley B A, Zhou L J *J. Geophys. Res.* **111** D16205 (2006)
71. Плоткин В В *Геомагнетизм и астрономия* **44** 624 (2004) [Plotkin V V *Geomagn. Aeron.* **44** 624 (2004)]
72. Ma Z, Croskey C L, Hale L C *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **60** 845 (1998)
73. Rycroft M J et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **69** 2485 (2007)
74. Мареев Е А, Трахтенгерц В Ю *Изв. вузов. Радиофизика* **39** 797 (1996) [Mareev E A, Trakhtengerts V Yu *Radiophys. Quantum Electron.* **39** 527 (1996)]
75. Namgaladze A A et al. *J. Atmos. Terr. Phys.* **53** 1113 (1991)
76. Дымников В П, Лыкосов В Н, Володин Е М *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана* **42** 618 (2006) [Dymnikov V P, Lykosov V N, Volodin E M *Izv., Atmos. Ocean. Phys.* **42** 568 (2006)]
77. Marshall T C, Stolzenburg M *J. Geophys. Res.* **107** (D7) 4052 (2002)
78. Zipser E J et al. *Bull. Am. Met. Soc.* **87** 1057 (2006)
79. Price C *Atmos. Res.* **91** 479 (2009)
80. Williams E R *Mon. Weather Rev.* **122** 1917 (1994)
81. Mareev E A, in *Topical Problems of Nonlinear Wave Physics, NWP-2008: Intern. Symp., Nizhny Novgorod, 20–26 July, 2008*, p. 65
82. Futyan J M, Del Genio A D *Geophys. Res. Lett.* **34** L15705 (2007)
83. Arakawa A *J. Climate* **17** 2493 (2004)
84. Schumann U, Huntrieser H *Atmos. Chem. Phys.* **7** 3823 (2007)
85. Галин В Я, Смышляев С П, Володин Е М *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана* **43** 437 (2007) [Galin V Ya, Smyshlyaev S P, Volodin E M *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **43** 399 (2007)]
86. Смышляев С П, Мареев Е А, Галин В Я *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана* **46** (3) (2010) [Smyshlyaev S P, Mareev E A, Galin V Ya *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **46** (3) (2010)]
87. Aplin K L *Surv. Geophys.* **27** 63 (2006)