

## Проявления электромагнитных явлений в атмосферных процессах

С.Н. Артеха, А.В. Белян, Н.С. Ерохин

*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия  
E-mail: Sergey.Arteha@gmail.com*

Данные космических и наземных наблюдений свидетельствуют о наличии четко выраженных асимметрий тайфуногенеза. Систематизированные данные демонстрируют важную роль электромагнитных явлений во многих атмосферных процессах (грозах, торнадо, тропических циклонах – тайфунах, ураганах). Многослойная заряженная облачная система часто представляет собой некоторую динамически равновесную структуру. В работе выполнены численные оценки действующих сил и механизмов в атмосферных плазмо-подобных подсистемах и доказана необходимость учета влияния электромагнитных сил на формирование, поддержание структуры и характеристики их движения.

**Ключевые слова:** тропические циклоны, тайфуногенез, торнадо, многослойные заряженные облачные системы, электрические явления в атмосфере.

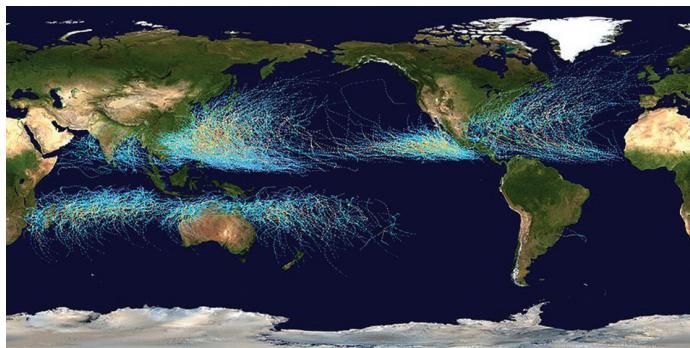
### Введение

Электрическая активность фиксируется во время гроз, при прохождении торнадо, в области глаза тайфуна и полос дождя (Black and Hallet, 1999; Vonnegut, 1960; Ziegler and MacGorman, 1994; Winn et al., 2000; Williams, 1989; Marshall, Rust, 1995; Byrne et al., 1989). Систематическим исследованием тропических циклонов (ТЦ) и торнадо занимаются более 170 лет (Hare, 1837; Хайн, Сутырин, 1983; Шарков, 1997), но, несмотря на видимый прогресс, еще далеко до создания исчерпывающей алгоритмической теории (Добрышман, 1994; Артеха и др., 2003). Гидродинамические теории (конвекция + сила Кориолиса) пока не дают ответ на ряд ключевых вопросов, касающихся механизмов зарождения и интенсификации ТЦ, поддержания их стационарной фазы, наличия географической, временной и частотной асимметрий. Основная цель работы – систематизировать опытные данные и провести оценку влияния электромагнитных сил.

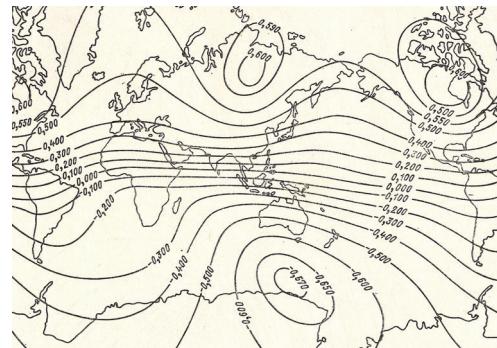
### Некоторые ключевые наблюдательные данные

Начнем с географической асимметрии тайфуногенеза (Хайн, Сутырин, 1983; Добрышман, 1994). В северном полушарии зарождается от 1,5 до 4 раз больше ТЦ (в среднем в 2 раза), чем в южном. В восточном полушарии число возникающих ТЦ в два раза больше аналогичного числа в западном полушарии. На севере ТЦ наблюдаются и выше  $35^{\circ}$  с. ш., а на юге – нет. Также удивительно для осесимметричной Земли полное отсутствие ТЦ вблизи Южной Америки и в южном полушарии вблизи Африки со стороны Атлантики. Тихоокеанские ТЦ в среднем более крупные, атлантические – меньших размеров, но с большей скоростью вращения (Байбаков, Мартынов, 1986; Merrill, 1984).

В работе (Шарков и др., 2012) обнаружен критический необходимый параметр – пороговое значение содержания водяного пара для возможности формирования ТЦ со временем жизни больше суток. Сравнивая *рис. 1* и *рис. 2*, можно заметить, что область зарождения ТЦ находится не просто в «гидродинамических полосах» (между  $30^{\circ}$  с. ш. и  $30^{\circ}$  ю. ш., исключая  $\pm 5^{\circ}$ ), а на пересечении этих полос и «геомагнитных зон» (с вертикальной составляющей геомагнитного поля  $|B_z| \geq 2 \times 10^{-5}$  Тл). Возможно, это и есть фактор, нарушающий симметрию Земли в атмосферных явлениях.



*Рис. 1. Траектории тропических циклонов*



*Рис. 2. Вертикальная составляющая геомагнитного поля*

Многие ТЦ возникают в самой середине зоны пассатов с совершенно однородной воздушной массой (т.е. большой начальный импульс и температурные контрасты в зоне конвергенции ни при чем). Неверным является утверждение о единственном механизме трансформации движений в вихревое через контакт с океаном: часто ТЦ даже при выходе на сушу существуют длительное время, да и значительная их часть гибнет над океаном; над ТЦ наблюдается антициклон; хобот смерча (как и ТЦ) опускается сверху. Казалось бы, существующие достаточно объемные начальные закрутки в обоих направлениях должны «подхватываться гидродинамическим механизмом», и в обоих полушариях временами могли бы наблюдаться ТЦ, врачающиеся в обоих направлениях (силы Кориолиса недостаточно для блокирования начала интенсификации). А это не так: направление вращения ТЦ фиксировано. Значит, существует дополнительный механизм, помогающий поддерживать чёткую структуру этого явления (Артекса, Ерохин, 2005). Наибольшая тангенциальная скорость в ТЦ наблюдается на определенной высоте, а выше включается механизм, приводящий к антициклоническому вращению. Струи оттоков сверху ТЦ не осесимметричны и их направление не является случайной функцией. Возможно, большое влияние на эти струи оказывают заряженные частицы. Ось циклона или антициклона средних широт, как правило, не вертикальна, а сильно наклонена к поверхности Земли. Напомним, что магнитное поле Земли также наклонено к поверхности, а заряженная область стремится иметь ось вращения по магнитному полю. В реальности наклон оси, прецессию и движение системы определяют и гидродинамическая вращающаяся подсистема, связанная внизу с земной поверхностью, а наверху с соответствующим потоком, и вращающаяся заряженная подсистема, стремящаяся двигаться по ЭМГД-законам в самосогласованных полях. В ТЦ присутствуют сразу две противоположно заряженные области, и ось оказывается практически

вертикальной, что может быть связано с электрическими силами, располагающими противоположно заряженные области друг под другом и симметризующими систему.

Если электромагнитные силы важны, то должна проявляться корреляция между появлением заряженных частиц в атмосфере и зарождением тропических депрессий. Наблюдается взаимодействие ТЦ с открытыми системами: стратосферой, ионосферой и космосом (Sorokin et al., 2001; Rycroft et al., 2000; Tinsley, 2000; Stozhkov, 2003; Rodgers et al., 1990; Stout and Rodgers, 1992; Нерушев и др., 1997; Kazimirovsky et al., 2003). Количество штормов и молний коррелирует с числом солнечных пятен, с геомагнитным индексом и потоком радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см, с нейтронным потоком, с потоком космических лучей. Солнечный ветер модулирует вертикальный ток и влияет на микрофизику облаков. Возмущения геофизических полей можно использовать в диагностических и прогностических целях.

### Оценка сил и движений

Для ТЦ характерна следующая структура: вблизи земной поверхности в центре существует малая область положительного заряда, на высоте 4–8 км находится большая область отрицательного заряда, а на высоте 10–16 км располагается область положительного заряда. Такая трехполюсная структура ТЦ наблюдается для очень интенсивных ТЦ. Часто количество заряженных областей по высоте оказывается больше трех. При этом чем больше заряженных областей, тем, например, вертикальная скорость ветра оказывается меньше. По-видимому, по мере развития ТЦ соответствующие заряженные области объединяются. В области гроз наблюдаются также многослойные электрические структуры облачности (Marshall, Rust, 1995; Byrne et al., 1989). Для ТЦ частота молниевых ударов весьма переменна ( $1 \div 700$ )/час. Эта величина кажется большой, но при учете объема ТЦ она мала. Возможно, электрическая структура ТЦ более регулярна, чем в случае гроз умеренных широт, так как принимает участие в поддержании стационарной фазы ТЦ. Частота молниевых вспышек может рассматриваться как индикатор генезиса ураганов (Leary, Ritchie, 2009; Price et al., 2009). Прояснить ряд вопросов могут помочь данные, получаемые как наземными, так и удаленными средствами, в том числе космическими, например, со спутников «Чибис-М» (ИКИ РАН) и «Метеор-М» (ФГУП «НПП ВНИИЭМ»).

Вначале оценим плотность электрических сил, связанную с избытком заряда одного знака:  $\mathbf{f}_q \sim n_q \mathbf{E}$ . Эта величина для заряженных областей ТЦ находится в пределах от  $10^{-4}$  кг  $m^{-2}c^{-2}$  до  $10^4$  кг  $m^{-2}c^{-2}$ , при среднем значении  $(10^{-3} \div 10^{-2})$  кг  $m^{-2}c^{-2}$ . Сравним ее с плотностью силы, удерживающей заряженные облака:  $\mathbf{f}_c = (\epsilon - 1)\epsilon_0 \text{grad } \mathbf{E}^2 / 2$ . Эта величина находится в пределах от  $10^{-7}$  кг  $m^{-2}c^{-2}$  до  $6 \times 10^{-4}$  кг  $m^{-2}c^{-2}$  (в среднем  $10^{-4}$  кг  $m^{-2}c^{-2}$ ), что меньше плотности сил, расталкивающих заряженные облака. Для того чтобы объяснить при таком соотношении сил само существование заряженных облаковых систем, приходится предположить некоторую упорядоченность заряженных частиц в облаках. Общее число заряженных частиц на порядки превышает то число заряженных частиц, которое дает наблюдаемый избыток заряда одного знака. В результате заряженные частицы разных знаков

в среднем чередуются друг с другом, образуя некоторое подобие «кристалла», удерживающего как целое пондеромоторными силами. Разумеется, такой воздушно-капельно-ледяной «кристалл» является динамическим, находящимся лишь в статистическом равновесии. Стоит принять во внимание, что нужно подставлять не среднюю величину градиента квадрата поля, а локальные величины (тогда существование заряженного облака понятно). При избытке сил притяжения увеличивается конденсация, капельки увеличиваются в размерах и выпадают в виде осадков. Так восстанавливается равновесие (например, в области наибольшего изменения электрического поля).

Оценим теперь, какова была бы скорость установившегося радиального течения при балансе силы трения и радиальной электрической силы с плотностью  $f$ . При высоте плоского слоя  $h$  для максимальной скорости течения имеем (Ландау, Лифшиц, 1988):

$$v_{\max} = -\frac{h^2 f}{12\eta},$$

где динамическая вязкость воздуха  $\eta = 1,8 \times 10^{-5}$  Па·с. Подставляя характерные для ТЦ величины, получим для километрового слоя огромное значение 5 км/с. Рассмотрим тогда движение в воздухе отдельной заряженной частишки. В этом случае установившееся движение имеет скорость  $v = N_e E / (6\pi a\eta)$ , где  $N_e$  – заряд частички,  $a$  – её радиус. При напряжённости поля  $3 \times 10^5$  В м<sup>-1</sup> заряженные частицы с  $N_e = 20$  нКл и радиусом от 1,5 мм до 0,01 мм приобретали бы скорости от 20 м/с до 20 км/с. Если же взять микронный кристаллик, заряженный 1000 зарядами электрона, то приобретаемая скорость была бы всего 15 см/с относительно среды (с собственной скоростью потока). Для установления скорости потока самой среды необходимо просуммировать влияние всех заряженных частиц слоя на среду. Схематично это делается так. Для компонент скоростей обтекания шарика радиуса  $R$  в дальней зоне ( $r >> R$ ) имеем (Ландау, Лифшиц, 1988):

$$v_r = u \cos \theta + \frac{3uR^2}{2 \operatorname{Re} r^2} \left\{ 1 - \left[ 1 + \frac{\operatorname{Re} r}{2R} (1 + \cos \theta) \right] \exp \left[ \operatorname{Re} r (1 - \cos \theta) / (2R) \right] \right\},$$

$$v_\theta = -u \sin \theta + \frac{3uR}{4r} \sin \theta \exp \left[ \operatorname{Re} r (1 - \cos \theta) / (2R) \right],$$

где  $u$  – скорость потока (вдоль оси  $Z$ ),  $\operatorname{Re}$  – число Рейнольдса. Переходим в декартовую систему (движение по оси  $Z$ ) для выбранной частицы, суммируем по координатам всех остальных частиц и получаем поправку – коэффициент к скорости. Учитывая, что каждая частица влияет на «фоновую базовую скорость» для всех остальных частиц, опять получаем скорости, на порядок превышающие наблюдаемые. Единственная возможность получить разумные величины состоит в следующем. В реальности (на высоте 6 км) существует огромное количество не только частиц, заряженных отрицательно, но и нейтральных частиц и частиц заряженных положительно. Нейтральные частицы движутся примерно со средней скоростью потока. Положительные частицы, число которых близко к числу отрицательных частиц, начинают двигаться под действием электрического поля несколько быстрее потока, а отрицательные частицы начинают двигаться в противоположную сторону и несколько

отстают. Каждой из этих частиц набрать существенную скорость относительно потока мешают (кроме сопротивления среды) столкновения с нейтральными частицами и частицами противоположного знака, в результате которых частицы «отбрасываются на стартовые позиции». Можно схематически изобразить элементарную модель движения такого «элемента кристалла» – модель трех частиц в среде (рис. 3).

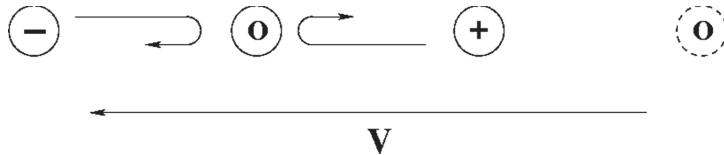


Рис. 3. Модель трех частиц

В изображенных положениях частицы проводят наибольшее время, так как относительная скорость в них близка к нулю (в моменты же столкновения относительные скорости максимальны и такие проскаакиваются быстро). По сути, это есть механизм, переводящий избыточную работу электрических сил в тепловую энергию и приводящий к реально наблюдаемым скоростям радиального движения. При численных расчетах микродвижения не могут быть учтены в принципе, поэтому на мезомасштабах в качестве эффективной величины плотности электрической силы в центральной части вблизи высот 6 км и 12 км надо брать величины порядка  $\pm 2 \times 10^{-9}$  кг м<sup>-2</sup>с<sup>-2</sup> или меньше.

Рассмотрим вертикальное движение. На движение отдельных частиц влияют сила тяжести, электрическая сила и сила аэrodинамического сопротивления. Оценим вначале баланс гравитационной и электрической сил для частиц радиуса  $r$ , обладающих зарядом  $q$ . Взяв  $r = 0,1$  мм,  $q = 10^{-11}$  Кл в поле с напряжённостью  $E = 5 \times 10^4$  В м<sup>-1</sup> (близко к средним в заряженных областях ТЦ), для жидкой капли имеем  $k \equiv mg / (qE) \approx 8,2 \times 10^{-2}$ , т.е. влияние электрических сил превосходит для этих частичек влияние силы тяжести. При уменьшении размера жидкой капли до  $r = 10$  мкм, взяв заряд  $q = 10^{-13}$  Кл, в поле  $E = 5 \times 10^2$  В м<sup>-1</sup> получаем  $k = 4,3 \times 10^{-4}$ . Рассмотрим теперь баланс силы тяжести и силы аэrodинамического сопротивления. В восходящих потоках воздуха незаряженные капли влаги могут удерживаться на верхних уровнях за счёт силы аэrodинамического сопротивления  $F_R = \pi r^2 C_R \rho_a v_z^2 / 2$ , где  $C_R$  – аэrodинамический коэффициент,  $\rho_a$  – плотность воздуха. Требуемая для этого вертикальная скорость восходящего потока  $v_z = (8r\rho_w g / (3\rho_a C_R))^{1/2}$ . Отсюда для капель с радиусом  $r = 0,5$  мм на высоте  $z = 5$  км при  $T = -17^\circ\text{C}$  и  $\rho_a = 0,74$  кг м<sup>-3</sup>, получаем  $C_R = 0,8$  и  $v_z = 4,7$  м с<sup>-1</sup>; при радиусе капель  $r = 0,25$  мм имеем  $C_R = 1,4$  и скорости  $v_z = 2,5$  м с<sup>-1</sup> – такие скорости вполне характерны для ТЦ. В отношении баланса всех трёх сил надо сказать следующее. Напряжённость электрического поля достигает экстремальных значений только вблизи стены глаза ТЦ, в полосах дождя и вблизи отрицательно заряженной области ТЦ. Именно здесь электрическая сила играет существенную роль (в то время как для остальных частей ТЦ основную роль в балансе сил играют сила тяжести и сила аэrodинамического сопротивления). Например, электрическая сила существенно благоприятствует образованию обширной отрицательно заряженной области ТЦ на высоте около 6 км, так как помогает

частичкам левитировать (совместно с силой аэродинамического сопротивления противодействует силе тяжести).

Рассмотрим азимутальное движение. Качественная модель – модель плазмы в магнитном поле и L-H переход – самопроизвольное возникновение вращения плазмы за счёт  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейфа заряженных частиц (в ТЦ мы имеем радиальное электрическое поле и вертикальную компоненту магнитного поля). Данный механизм работает и при наличии в газе некоторой доли свободных зарядов. В моменты столкновений происходит передача импульса от заряженных частиц во вращательное движение газа как целого. Все направления вращения (для самого ТЦ и для антициклона над ТЦ) согласуются с наблюдениями. Если оценить магнитную силу  $\mathbf{f}_m = n \cdot [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$  по средней концентрации избытка заряда в ТЦ, то получилась бы малая величина  $\sim 2 \times 10^{-16}$  кг м<sup>-2</sup>с<sup>-2</sup>, но если избыток заряда в плазмоподобных подсистемах составляет десятимиллионную часть от полного количества заряженных частиц (что вполне возможно), то такая сила уже способна вызвать наблюдаемое макроскопическое движение. Для частицы внутри заряженной области на расстоянии  $r$  до оси ТЦ уравнения бессилового движения:

$$\begin{aligned} eE_r(r, z) - mV_{in}(V_r - \overline{V_r(r, z)}) + eV_\phi B + mV_\phi^2 / r &= 0, \\ -mV_{in}(V_\phi - \overline{\Omega(r)r}) - eV_r B - \frac{mV_r V_\phi}{r} &= 0, \end{aligned}$$

здесь средние скорости и частота вращения нейтрального газа выделены чертой сверху,  $v_{in}$  – частота столкновений с нейтралами. В итоге для азимутальной скорости имеем:

$$V_\phi \left( mv + \frac{eE_r}{vr} + \frac{m\overline{V_r}}{r} + \frac{eB\omega_H}{v} \right) + V_\phi^2 \frac{2m\omega_H}{vr} + V_\phi^3 \frac{m}{vr^2} = mv\Omega r - eE_r \frac{\omega_H}{v} - m\omega_H \overline{V_r}.$$

Азимутальная сила, действующая со стороны заряженной частицы на газ:

$$F_{\phi i} = m_i v_{in} (V_\phi - \overline{\Omega(r)r}).$$

Умножая на концентрацию ионов и на радиус, суммируя по всем сортам ионов и интегрируя по всему объему заряженной подсистемы, получаем момент сил:

$$M = \int_V r(V_\phi - \overline{\Omega(r)r}) \sum_i v_{in} m_i n_i(r, z) dV.$$

Вследствие сложной микрофизики процесса точные оценки затруднены. Возьмём для примера облачный слой толщины 2 км и радиуса 100 км и ионы с массой порядка кислородной.  $\omega_H \sim 10^2$  с<sup>-1</sup>,  $v_{in} \sim 4 \times 10^9$  с<sup>-1</sup>,  $m \sim 6 \times 10^{-26}$  кг,  $\Omega r \sim 50$  м с<sup>-1</sup>,  $V_r \sim 10$  м с<sup>-1</sup>,  $E_r \sim -(10^4 - 10^5)$  В м<sup>-1</sup>. Взяв  $n_i \sim 5 \times 10^{12}$  м<sup>-3</sup> (оценка по нескомпенсированному заряду) для момента сил при электромагнитной подкрутке получим  $M \sim 4 \times 10^8$  кг м<sup>-2</sup>с<sup>-2</sup>. В формуле (Ландау, Лифшиц, 1988) для момента силы трения газа на поверхность  $M \sim 0,97 R^4 \rho \sqrt{v \Omega^3}$  делаем замену  $\Omega^3 R^3 \rightarrow V_\phi^3$  и в итоге получаем следующую оценку:  $M \sim 10^{11}$  кг м<sup>-2</sup>с<sup>-2</sup>. Если же полное число зарядов хотя бы на два порядка больше, чем число нескомпенсированных зарядов, то момент будет превышать момент силы трения:  $M \sim 5 \times 10^{11}$  кг м<sup>-2</sup>с<sup>-2</sup>, т.е. вклад электромагнитных сил

в поддержание вращения заряженных областей составляет десятки процентов. Численное описание режима насыщения требует учета перераспределения давления, вызванного этими силами.

По-видимому, еще одним необходимым условием (ко всем обнаруженным ранее гидро- и термодинамическим условиям) возникновения ТЦ является накопление в некоторой области атмосферы достаточного количества свободных зарядов. Разумеется, главным энергетическим источником атмосферных процессов являются поля водяного пара, и ТЦ являются эффективным каналом перекачки энергии скрытой теплоты путем захвата области водяного пара повышенной концентрации (Шарков и др., 2011). Но ионы дополнительно выступают центрами конденсации, где выделяется скрытая теплота парообразования. Это один из спусковых механизмов для преобразования огромных запасов тепловой энергии в энергию движения. Возникает подток среды вверх и подобие «воронки в ванне», которая раскручивается по мере приближения воздушных масс к оси за счёт сохранения момента импульса. Сложность предсказания движения ТЦ состоит в том, что кроме массы нейтрального газа, подчиняющегося уравнениям гидродинамики, в тайфуне присутствует заряженная подсистема, подчиняющаяся законам ЭМГД. Видимо поэтому часто возникают петли и другие непредсказуемые типы движения ТЦ, и классический параболический вид траектории наблюдается только у 47% ТЦ.

## Заключение

Таким образом, ключевые наблюдательные факты свидетельствуют о существенной роли электромагнитных явлений во многих атмосферных процессах. Многослойная заряженная облачная система представляет собой некоторый аналог динамически равновесной структуры, удерживаемой ионными и поляризационными силами. Оценки действующих сил и механизмов показывают, что для более полного описания процессов в ТЦ необходимо учитывать движение плазмоподобных подсистем. Электромагнитные силы принимают участие в генерации и поддержании структуры ТЦ.

## Литература

1. Артемах С.Н., Гольбраих Е., Ерохин Н.С. О роли электромагнитных взаимодействий в динамике мощных атмосферных вихрей // Вопросы атомной науки и техники. 2003. № 4. С. 94–99.
2. Артемах С.Н., Ерохин Н.С. О связи крупномасштабных вихревых атмосферных процессов с электромагнитными явлениями // Электромагнитные явления. 2005. № 5. № 1 (14). С. 3–20.
3. Байбаков С.Н., Мартынов А.И. С орбиты спутника – в глаз тайфуна. М.: Наука, 1986.
4. Добрышман Е.М. Некоторые статистические характеристики и особенности тайфунов // Метеорология и гидрология. 1994. № 11. С. 83–99.
5. Ландау Л.Д., Лишин Е.М. Гидродинамика. М: Наука, 1988.

6. Нерушев А.Ф., Нетреба С.Н., Свиркунов П.Н., Ярошевич М.И. Генерация возмущений геофизических полей при эволюции тропических циклонов // ДАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 96–100.
7. Хайн А.П., Сутырин Г.Г. Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л: Гидрометеоиздат, 1983.
8. Шарков Е.А. Аэрокосмические исследования тропических циклонов // Исследования Земли из космоса. 1997. № 6. С. 87–111.
9. Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям // Исследования Земли из космоса. 2011. № 2. С. 18–25.
10. Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В. Повышенное содержание водяного пара в атмосфере тропических широт как необходимое условие генезиса тропических циклонов // Исследования Земли из космоса. 2012. № 2. С. 73–82.
11. Black R.A., Hallet J. Electrification of the Hurricane // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. P. 2004–2028.
12. Byrne G.J., Few A.A., Stewart M.F. Electric Field Measurement within a Severe Thunderstorm Anvil // J. Geophys. Res. 1989. V. 94 (D5). P. 6297–6307.
13. Hare R. On the Causes of the Tornado or Waterspout // Amer. J. Sci. Arts. 1837. V. 32. P. 153–161.
14. Kazimirovsky E., Herraiz M., De La Morena B.A. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // Surveys in Geophys. 2003. V. 24. P. 139–184.
15. Leary L.A., Ritchie E.A. Lightning Flash Rates as an Indicator of Tropical Cyclone Genesis in the Eastern North Pacific // Month. Weather Rev. 2009. V. 137 (10). P. 3456–3470.
16. Marshall T.C., Rust W.D. Electrical Structure and Updraft Speeds in Thunderstorms over the Southern Great Plains // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 1001–1015.
17. Merill R.T. A Comparison of Large and Small Tropical Cyclones // Mon. Wea. Rev. 1984. V. 112. P. 1408–1418.
18. Price C., Asfur M., Yair Y. Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency // Nature Geosci. 2009. V. 2 (5). P. 329–332.
19. Rodgers E.B., Stout J., Steranka J., Chang S.W. Tropical cyclone-upper atmospheric interaction as inferred from satellite total ozone observations // J. Appl. Meteorol. 1990. V. 29 (9). P. 934–957.
20. Rycroff M.J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric circuit, solar activity and climate change // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 1563–1576.
21. Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. V. 63. P. 1681–1691.
22. Stout J., Rodgers E.B. Nimbus-7 total ozone observations of western North Pasific tropical cyclones // J. Appl. Meteorol. 1992. V. 31 (7). P. 758–783.
23. Stozhkov Y.I. The role of cosmic rays in the atmospheric processes // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2003. V. 29. P. 913–923.
24. Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere // Space Sci. Rev. 2000. V. 94. P. 231–258.

25. Vonnegut B. Electrical Theory of Tornadoes // *J. Geophys. Res.* 1960. V. 65 (1). P. 203–212.
26. Williams E.R. The Tripole Structure of Thunderstorms // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94 (D11). P. 13151–13167.
27. Winn W.P., Hunayday S.J., Aulich G.D. Electric Field at the Ground Tornado // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105 (D15). P. 20145–20153.
28. Ziegler C.L., MacGorman D.R. Observed Lightning Morphology Relative to Modeled Space Charge and Electric Field Distributions in a Tornadic Storm // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51 (6). P. 833–851.

## **Manifestations of electromagnetic phenomena in atmospheric processes**

**S.N. Artekha, A.V. Belyan, N.S. Erokhin**

*Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia*  
*E-mail: Sergey.Arteha@gmail.com*

Data from space and ground-based observations show a distinct asymmetry of typhoon genesis. Systematic data demonstrate the important role of electromagnetic phenomena in many atmospheric processes (thunderstorms, tornadoes, tropical cyclones – typhoons, hurricanes). Multilayer charged cloud system often represents a certain dynamic equilibrium structure. In the paper, it is made numerical estimates of the forces and mechanisms for atmospheric plasma-like subsystems and proved the need to account the influence of electromagnetic forces on the formation, maintenance of the structure and characteristics of their movement.

**Keywords:** tropical cyclones, typhoon genesis, tornado, multi-layer charged cloud system, electrical phenomena in the atmosphere.