



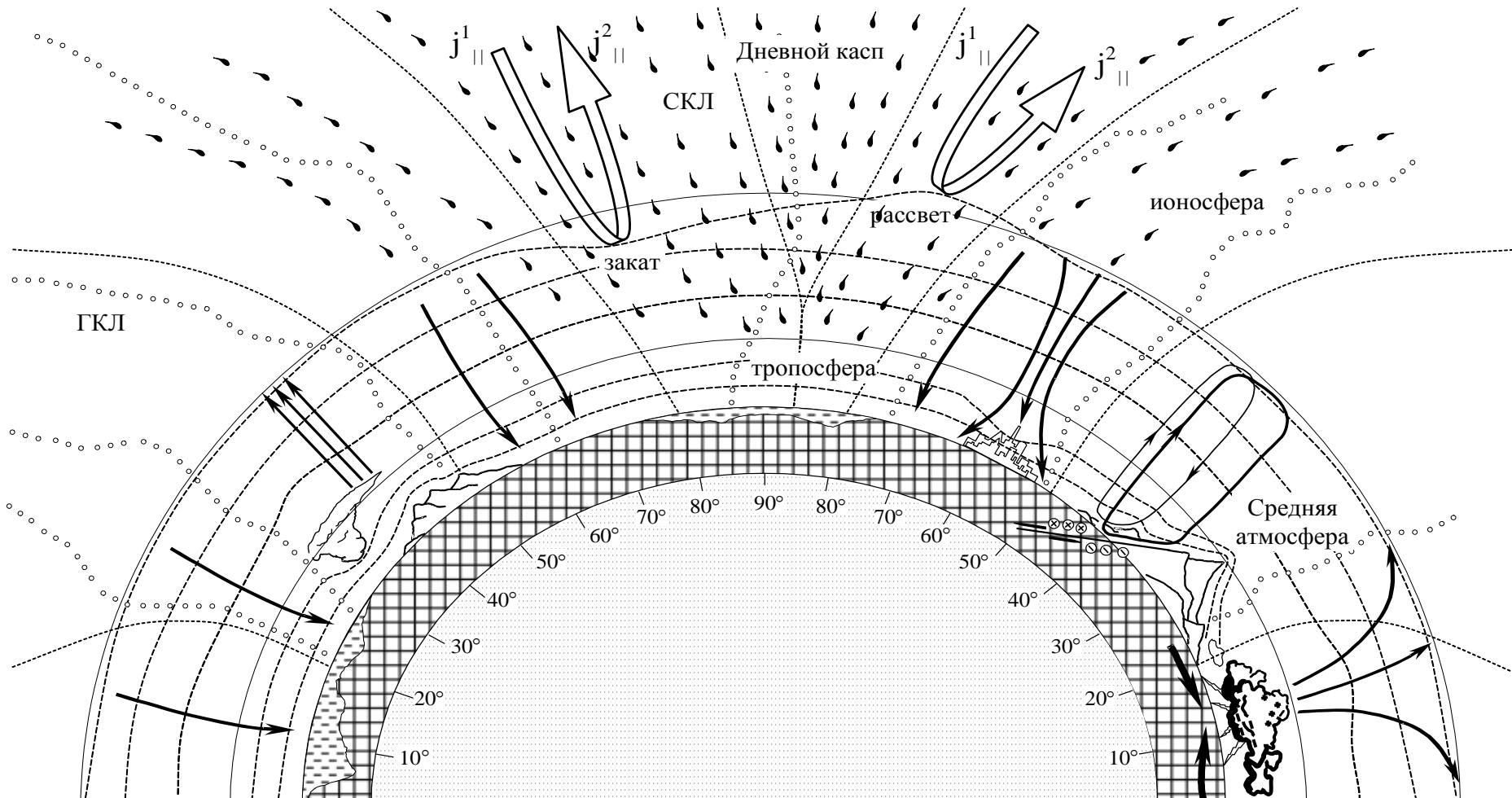
Российская академия наук  
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта  
Геофизическая обсерватория «Борок»

**«Электроаэродинамика приземного участка глобальной электрической цепи: результаты и проблемы»**

# Содержание

1. ГЭЦ – замкнутая токовая система, формируемая космическими и атмосферными источниками. Источники формирования ГЭЦ.
2. Классический профиль электрической проводимости геосферных оболочек. Электрическая проводимость и время релаксации атмосферы для различных геофизических условий. Электрическая стратификация атмосферы.
3. Натурные аэроэлектрические наблюдения. Унитарная вариация электрического поля атмосферы средних широт.
4. Нелинейная динамика и фрактальность аэроэлектрического поля.
5. Электричество пограничного слоя: моделирование и эксперимент.
6. Приземный атмосферный слой – верификация математической модели.
7. Планы натуральных экспериментов.

# Глобальная электрическая цепь



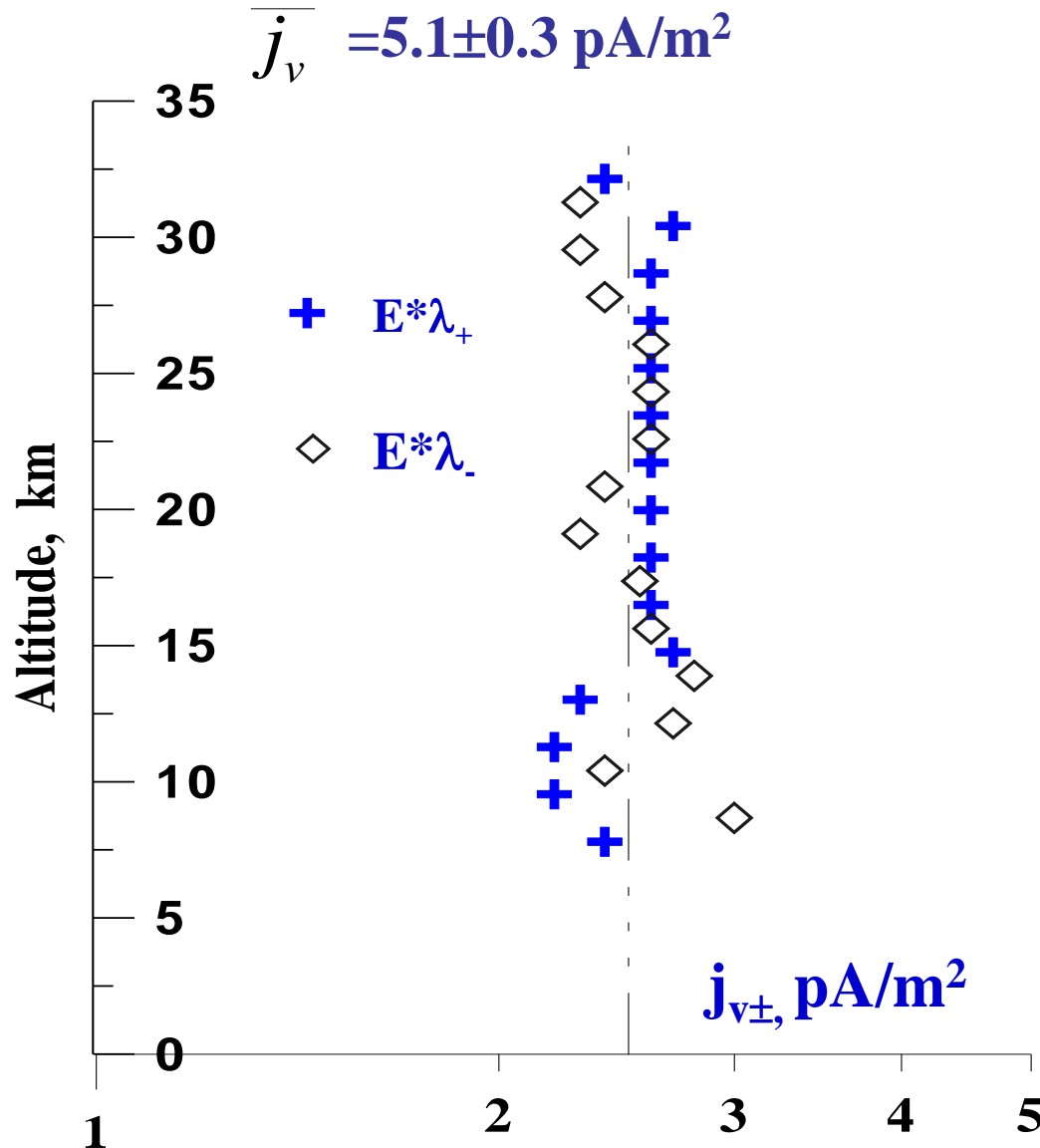


# Некоторые параметры ГЭЦ

Название параметра	Величина		
• Число гроз, действующих одновременно	1500 – 2000.		
• Токи над грозами:			
• а) диапазон изменения величины	0.5 – 6.0 А,		
• б) среднее значение	0.5 – 1.0 А.		
• Глобальный ток	750 – 2000 А.		
• Ионосферный потенциал:			
• а) диапазон изменения величины	150 – 600 кВ,		
• б) среднее значение	280 кВ.		
• Сопротивление столба атмосферы:			
• а) низкие широты (над уровнем моря)	$1.3 \times 10^{17}$ Ом/м <sup>2</sup> ,		
• б) высокие широты (над уровнем моря)	$3.0 \times 10^{17}$ Ом/м <sup>2</sup> ,		
• в) Тибет и плато Антарктиды	$2.0 \times 10^{16}$ Ом/м <sup>2</sup> .		
• Полное сопротивление с учетом влияния гор	230 Ом.		
• Плотность тока:			
• а) заселенные и индустриальные области	$1.0 \times 10^{-12}$ А/м <sup>2</sup> ,		
• б) растительная поверхность и пустыни	$2.4 \times 10^{-12}$ А/м <sup>2</sup> ,		
• в) станции Южного полюса	$2.5 \times 10^{-12}$ А/м <sup>2</sup> .		
		• Градиент потенциала	
		• а) экватор	120 В/м,
		• б) широта 60°	155 В/м,
		• в) Южный полюс	71 В/м,
		• г) промышленные области	300-500 В/м.
		• Электрическая проводимость	
		• а) уровень моря	$\sim 10^{-14}$ См/м,
		• б) тропопауза	$\sim 10^{-13}$ См/м,
		• в) стратопауза	$\sim 10^{-10}$ См/м,
		• г) ионосфера (пердерсеновская проводимость)	$\sim 10^{-4}-10^{-5}$ См/м,
		• ионосфера (параллельная проводимость)	$\sim 10$ См/м.
		• Время релаксации электрического заряда	
		• а) 70 км	$10^{-4}$ с
		• б) 18 км	4 с
		• в) 10 м	5-10 мин
		• г) проводящая земля	$10^{-5}$ с



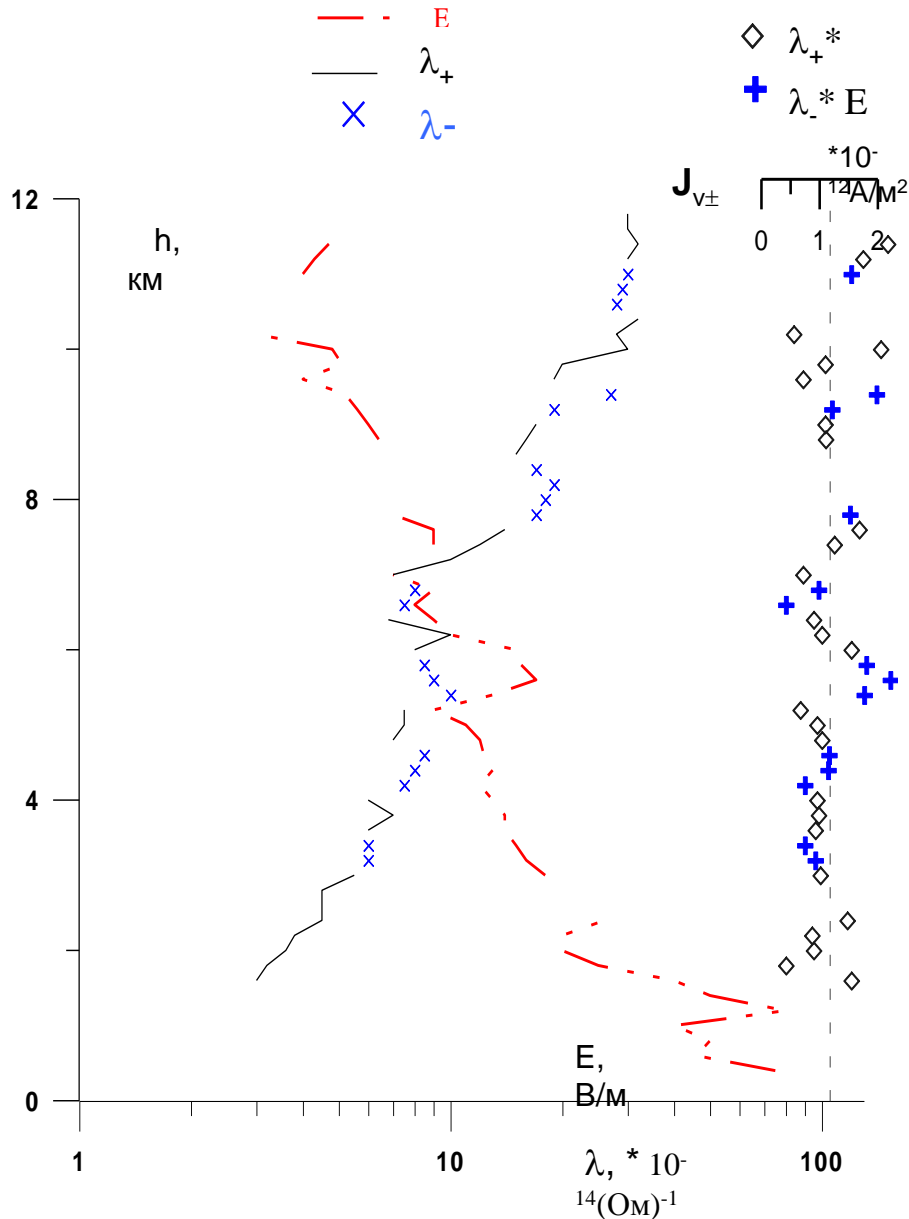
# Вертикальный электрический ток атмосферы



- Плотность полярных аэроэлектрических токов, вычисленная по результатам баллонных измерений напряженности электрического поля и полярных проводимостей 4 августа 1978 г. (from *Rosen J.M., D.J.Hofman, W. Gringel, J. Berlinski, S. Michnowski, Y. Morita, T. Ogava and D. Olson, 1982*).



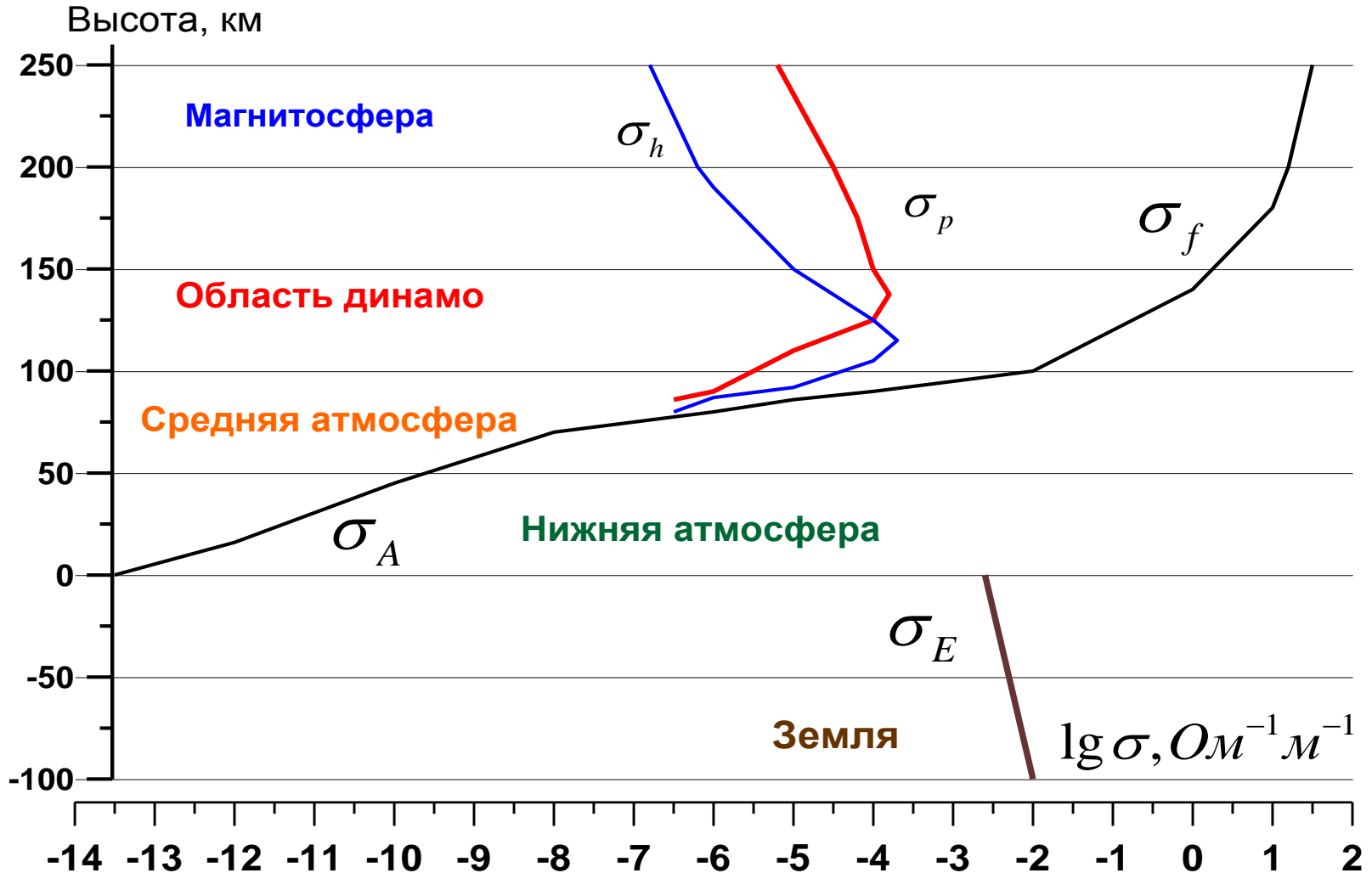
# Вертикальные электрические профили атмосферы



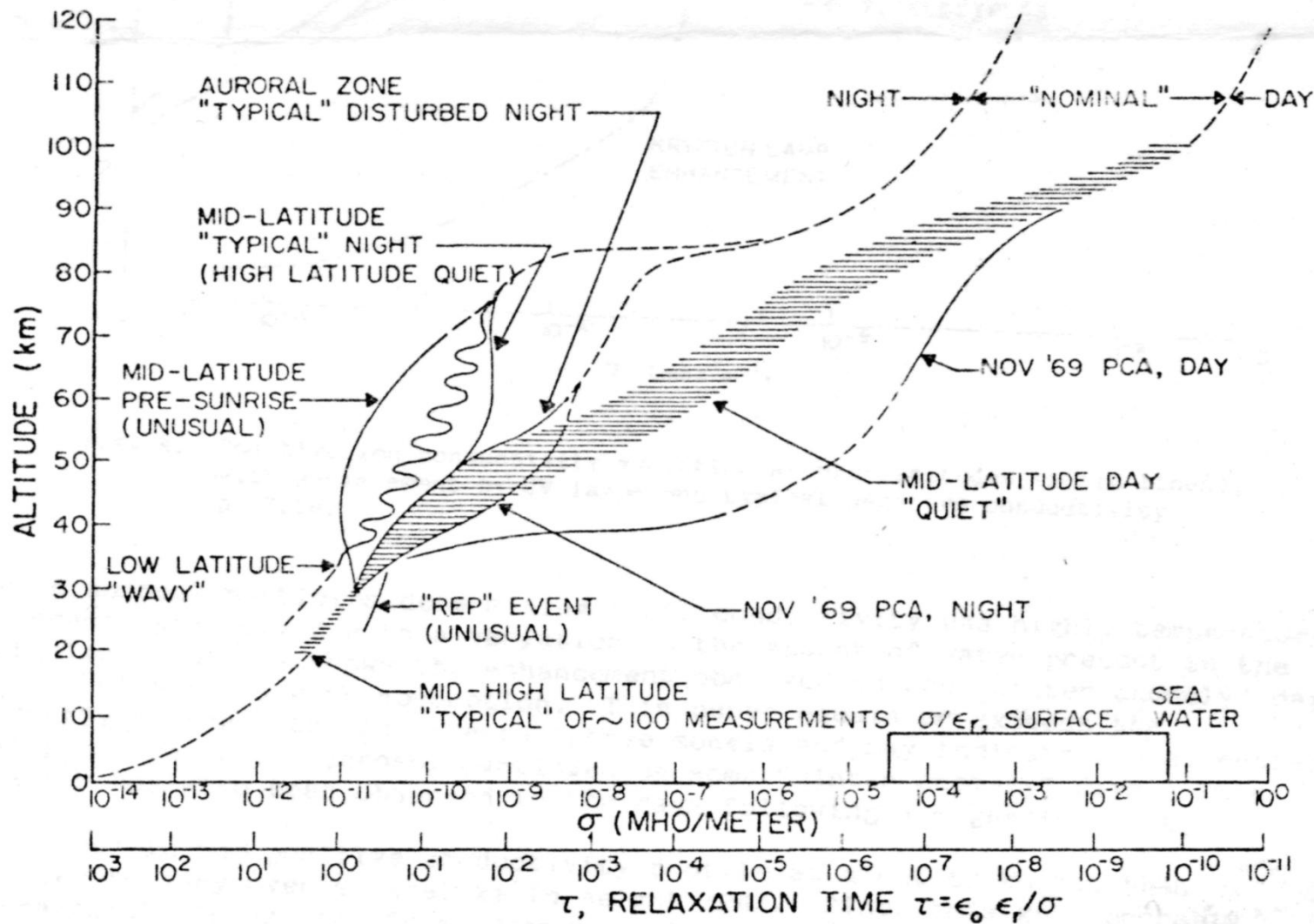
Вертикальные профили плотности вертикального электрического тока, вычисленные по результатам одновременных измерений напряженности электрического поля и  $E$  и полярных проводимостей  $\lambda$  над Северной Атлантикой (from Gringel W., J. Leidel and Muhleisen, 1978 ).



# Средний профиль электрической проводимости геосферных оболочек



# Высотный профиль электрической проводимости атмосферы и соответствующее время релаксации для различных условий геофизической обстановки





# ИСТОЧНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЭЦ

*Фундаментальной проблемой глобальной электрической цепи является проблема баланса токов.*

1. Электрические поля магнитосферной конвекции.
2. Электрические поля ионосферного динамо.
3. Планетарный электрический генератор.
4. Грозовые генераторы.
5. Мезомасштабные конвективные системы.
6. Электрические поля региональных метеорологических событий.
7. Электрические поля сейсмических источников.

# НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ



**Электростатические флюксометры типа «field mill»:**  
тактовая частота 10 Гц,  
пороговая чувствительность 0.1 В/м .



**Счетчик легких ионов.**



**Ультразвуковая метеостанция «Метео-2Н»,**  
тактовая частота 10 Гц .



**Сейсмическая радоновая станция СРС-5.**



**Акустический доплеровский трёхкомпонентный локатор (содар) «ВОЛНА-3» :**  
рабочая частота 1700 Гц,  
высотный диапазон 50 - 800 м,  
диапазон измерения средней скорости ветра от 0.3 до 20 м/с,  
период цикла зондирования 16 с,  
разрешение по высоте 5 м.



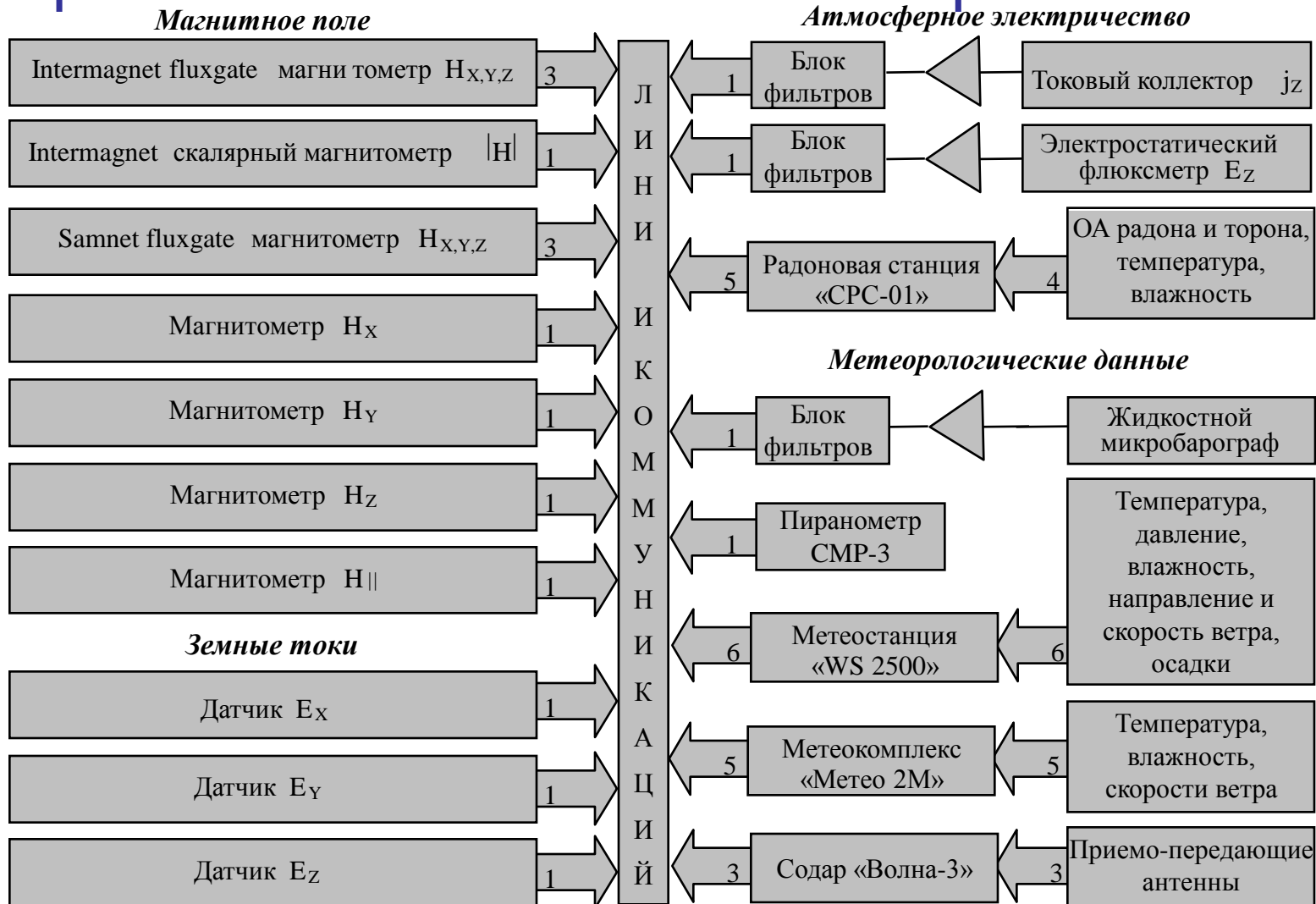
**Пиранометр СМР3.**

# РАДОНОМЕТР Alpha GUARD





# Измерительный комплекс ГО «Борок» ИФЗ РАН

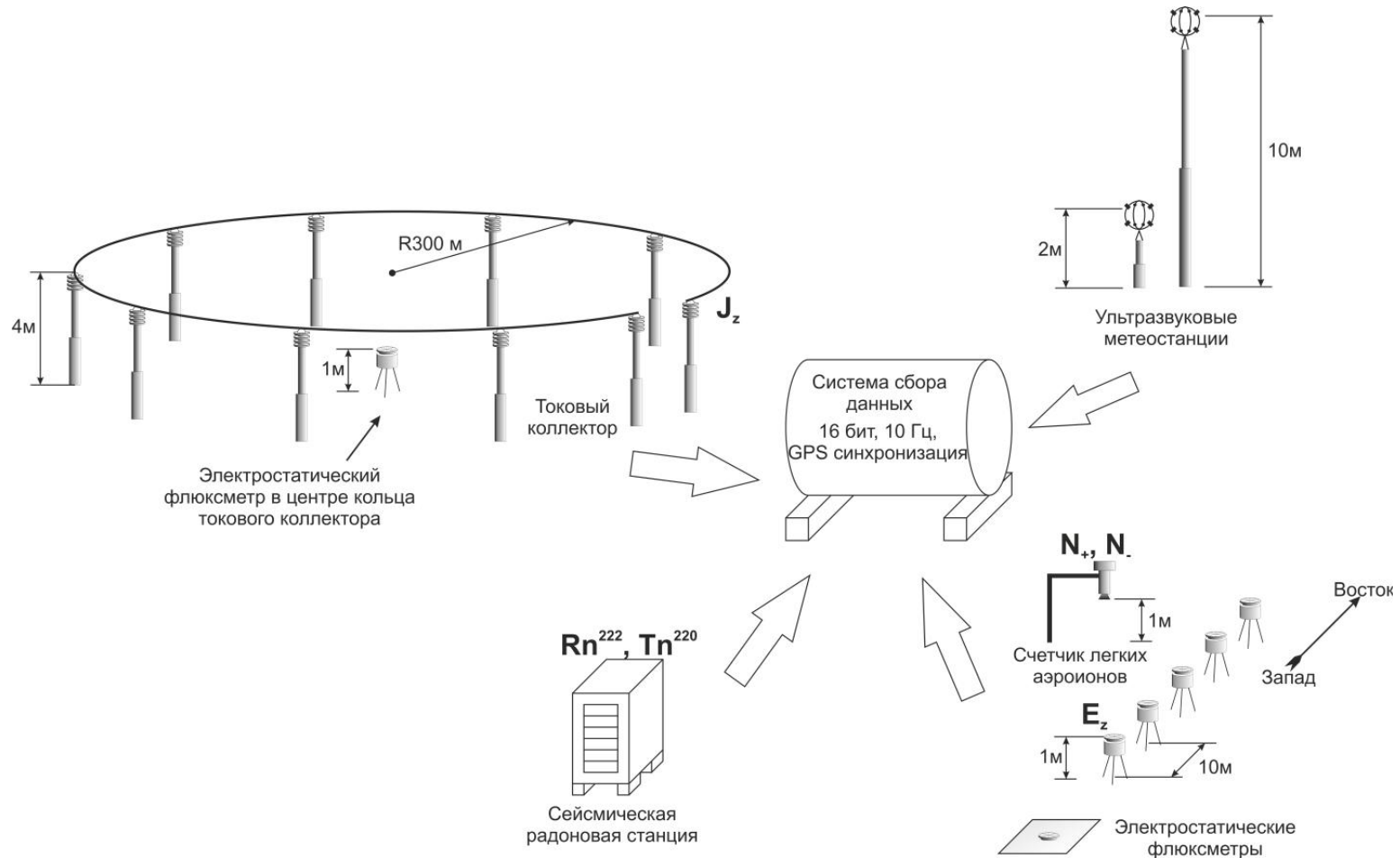




Synchronous observations of the electric field have been organized at three stations, spaced at the distances from 100 to 370 km each from another: “Borok” ( $58^{\circ}04' \text{ N}$  and  $38^{\circ}14' \text{ E}$ ), “Prozorovo” ( $58^{\circ} 23' \text{ N}$ ;  $37^{\circ} 39' \text{ E}$ ) and “Gorodets” ( $56^{\circ}41' \text{ N}$  and  $43^{\circ}26' \text{ E}$ )



# ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ



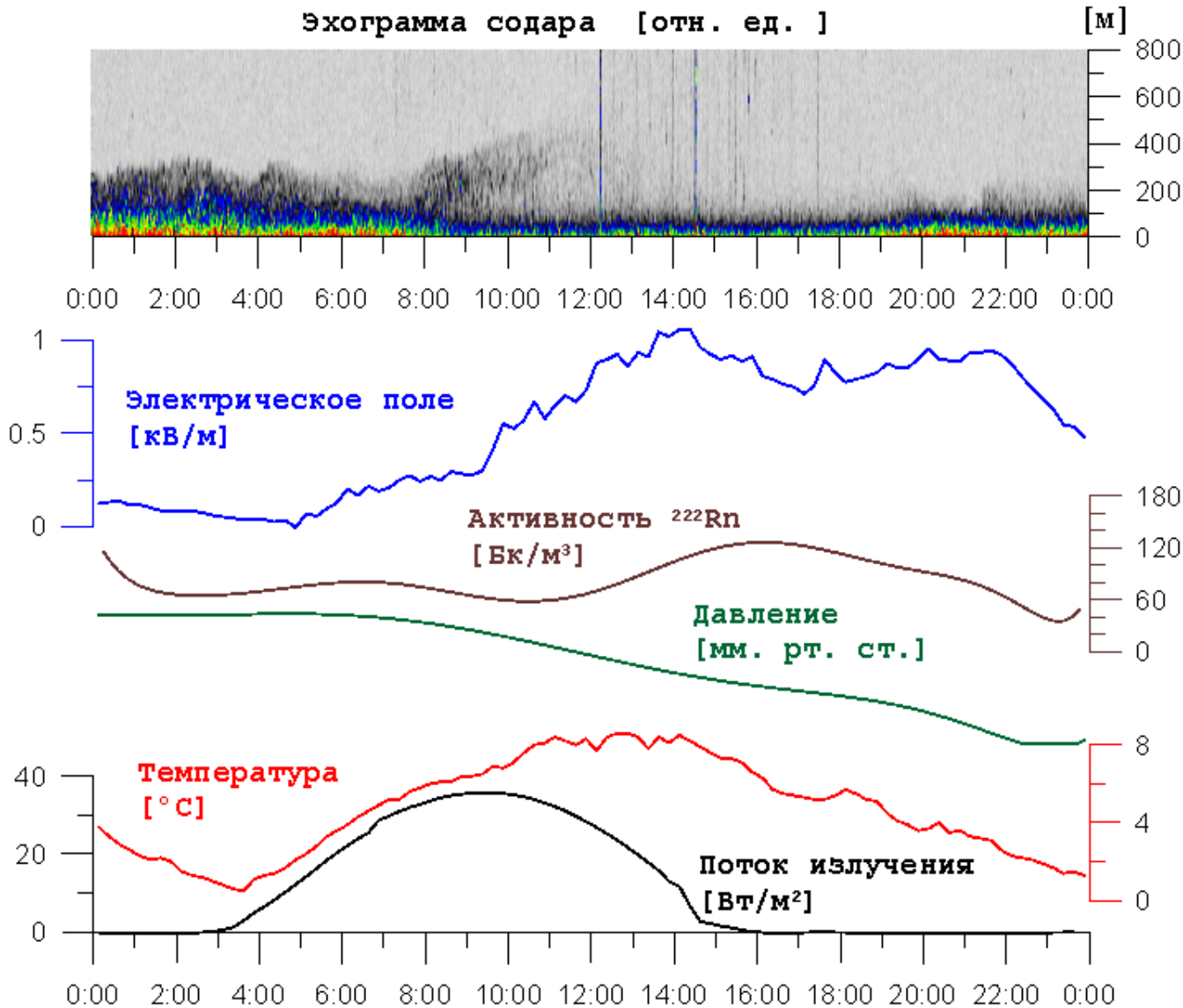
Анисимов С.В., Шихова Н.М., Афиногенов К.В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Изв. Вузов, Радиофизика. 2013, выпуск 11-12, т. 56, стр787-804.

# Данные аэрофизических наблюдений

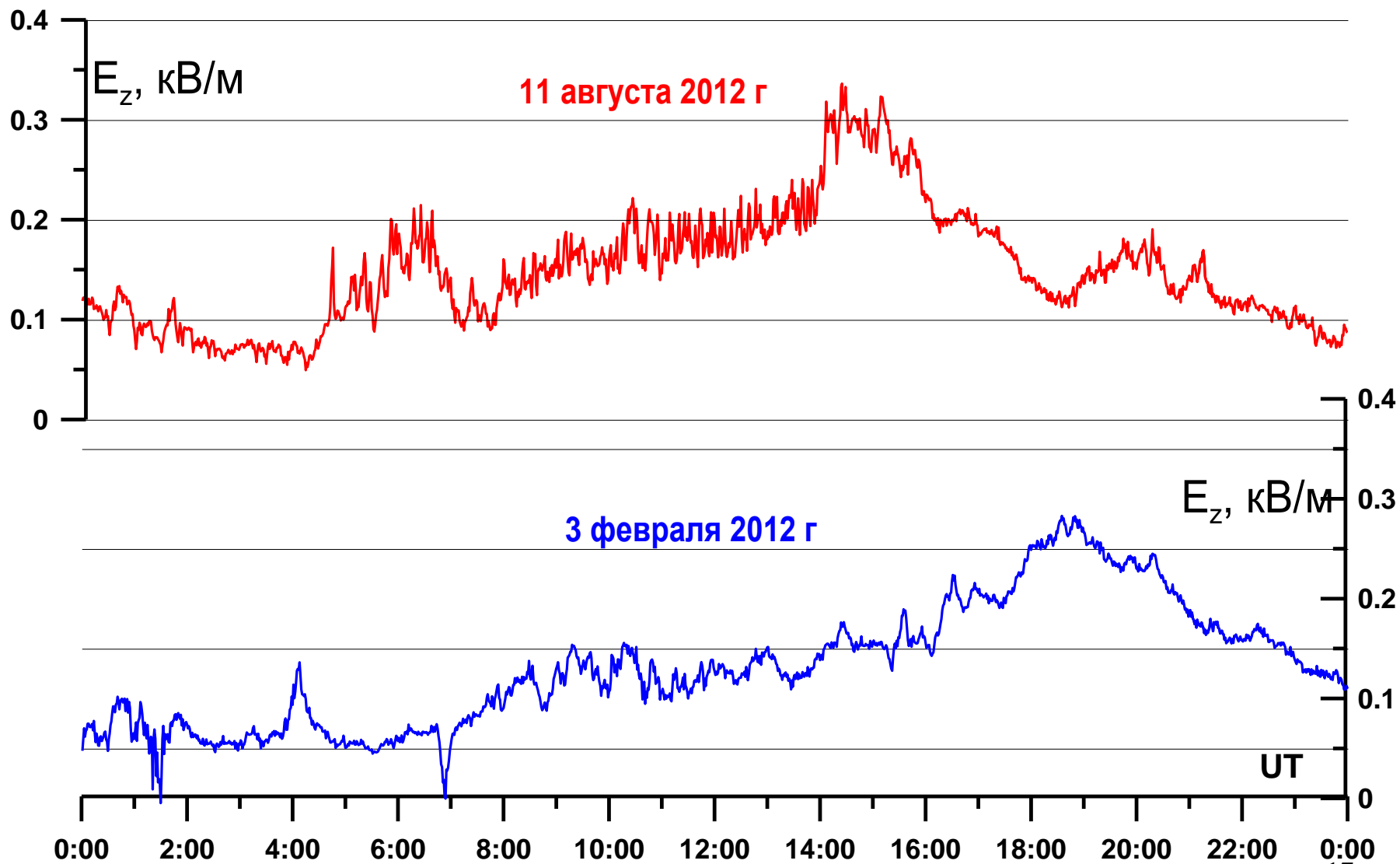
## Данные наблюдений обсерватории «Борок 4 апреля 2011г. (UT).

Anisimov S.V., Chulliat A., Dmitriev E.M. Information-measuring complex and database of mid-latitude Borok Geophysical Observatory // Russian Journal of Earth Sciences. 2008. V. 10, ES3007, doi:10.2205/2007ES000227

Анисимов С.В., Э.М. Дмитриев, Информационно-измерительный комплекс и база данных Геофизической обсерватории «Борок» РАН, ОИФЗ РАН, 44с., 2003



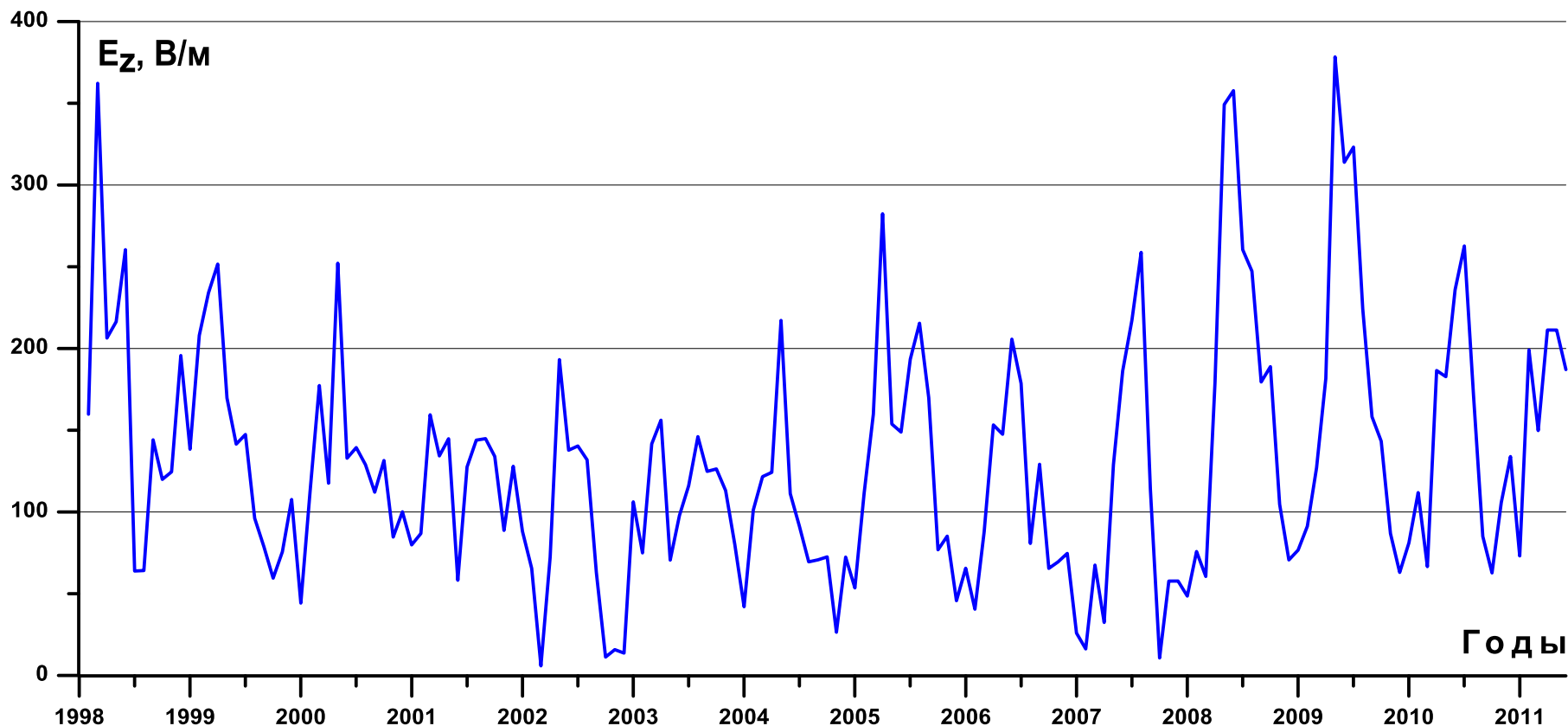
# Суточные вариации напряженности аэроэлектрического поля по наблюдениям обсерватории "Борок"





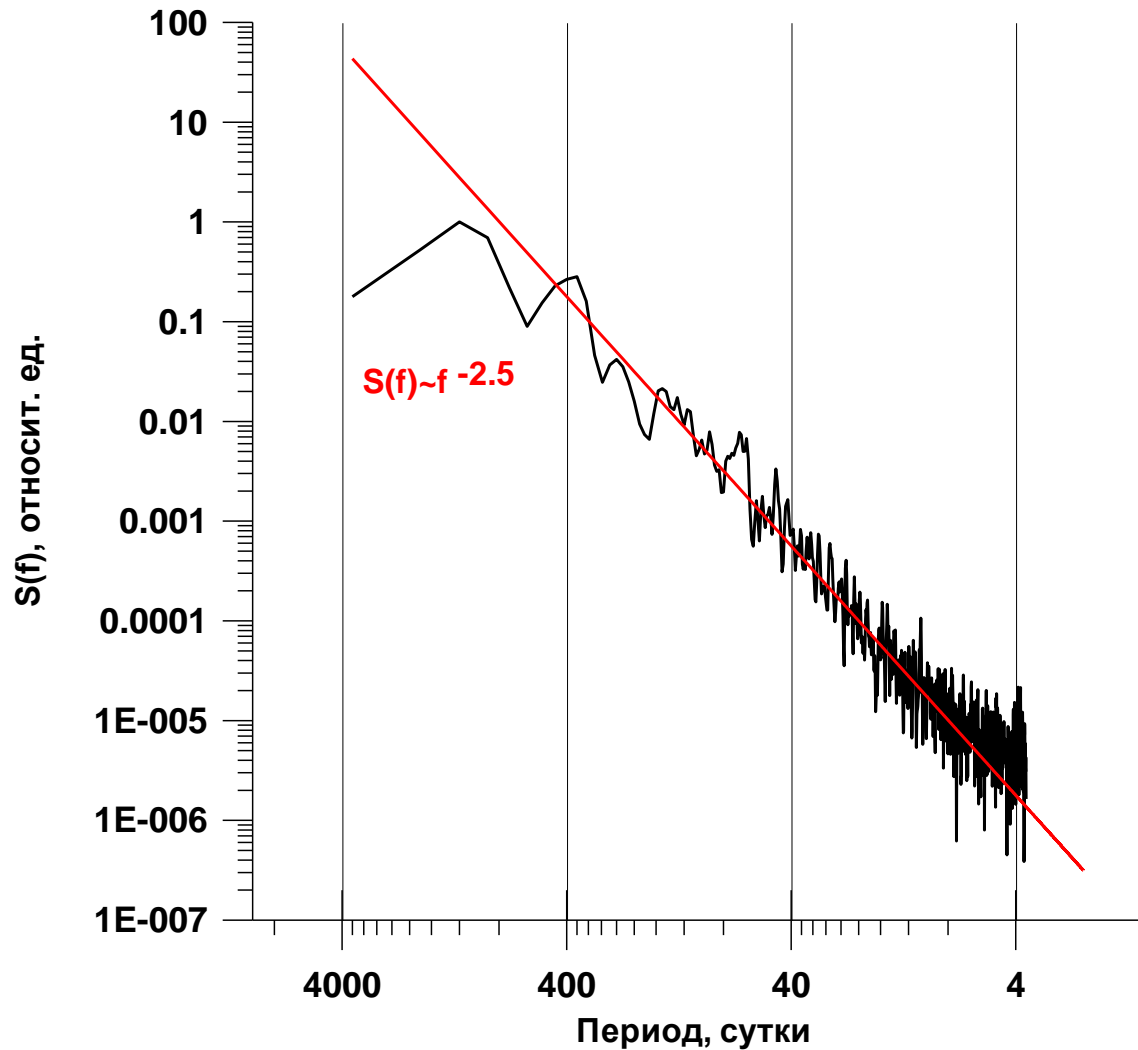
# Аэроэлектрические наблюдения

Среднемесячные значения напряженности электрического поля атмосферы по данным наблюдений обсерватории «Борок» (1998 – 2011 гг.)



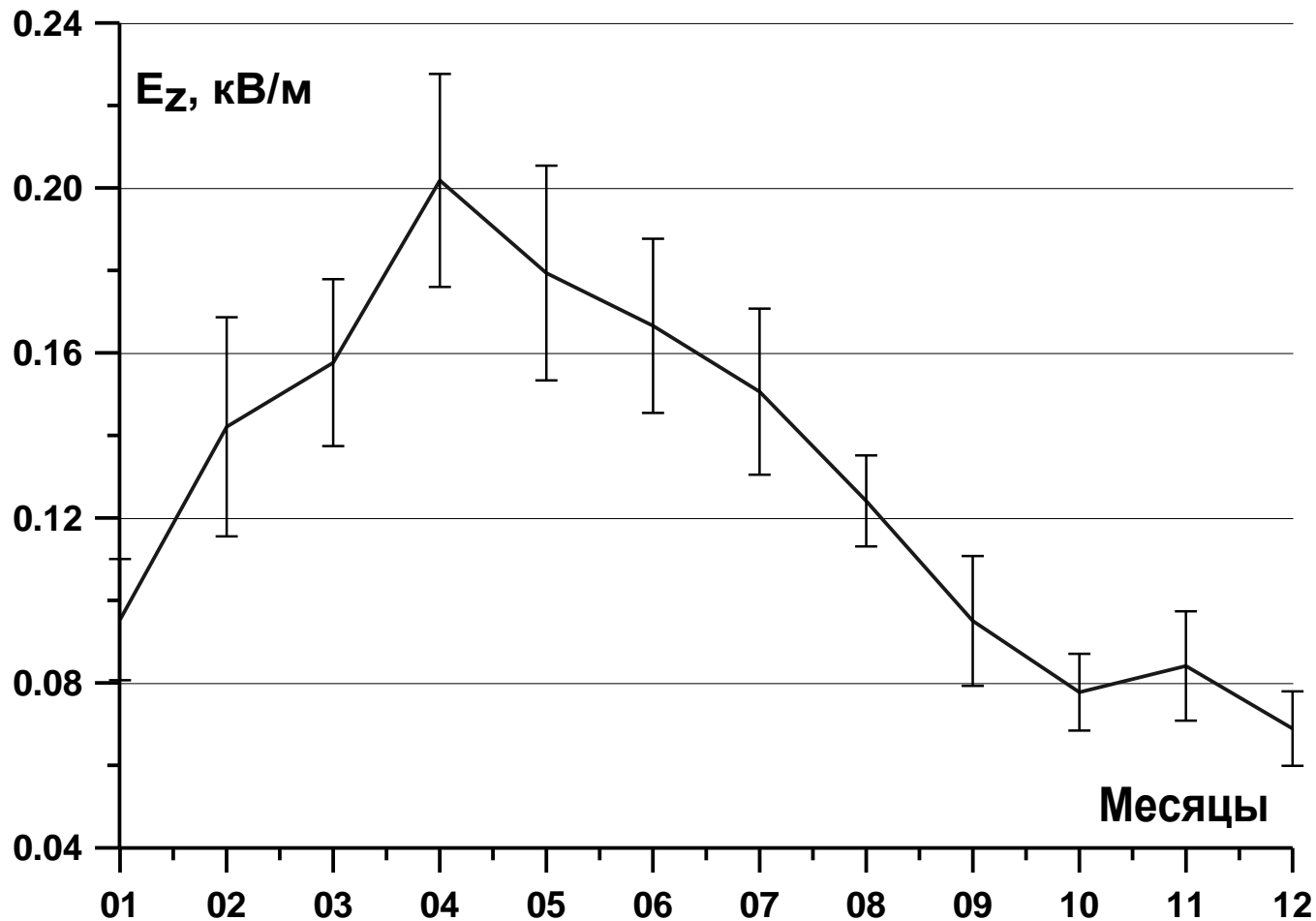
С.В.Анисимов, Н.М.Шихова, Вариабельность электрического поля  
невозмущенной атмосферы средних широт, *Геофизические исследования*,  
Т.9, №3, 25-38. 2008

# Аэроэлектрические наблюдения



Нормированная  
спектральная  
плотность суточных  
значений  
аэроэлектрического  
поля по данным  
наблюдений  
обсерватории "Борок"  
01.01.1999 – 31.07.  
2012.

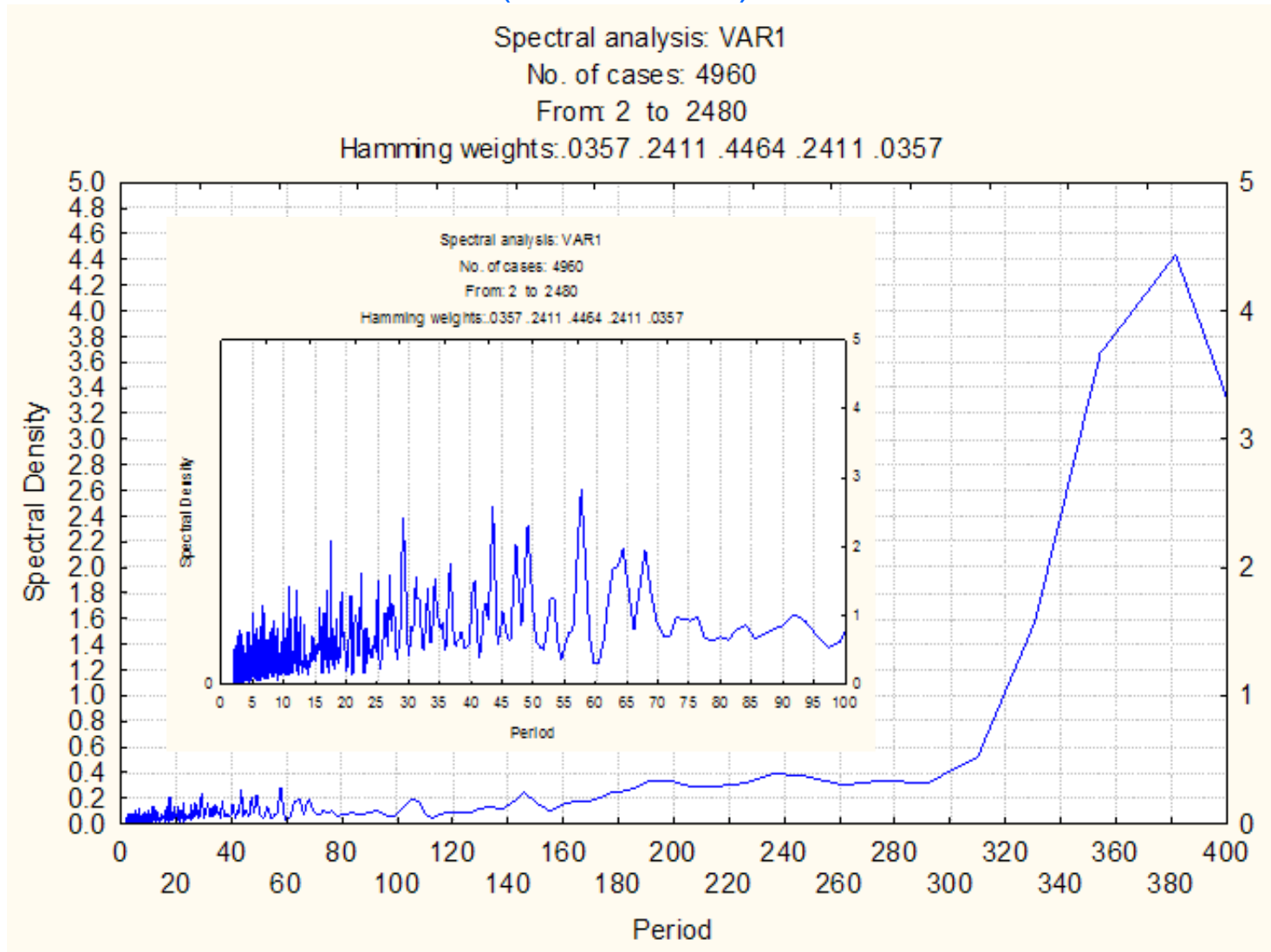
# Аэроэлектрические наблюдения



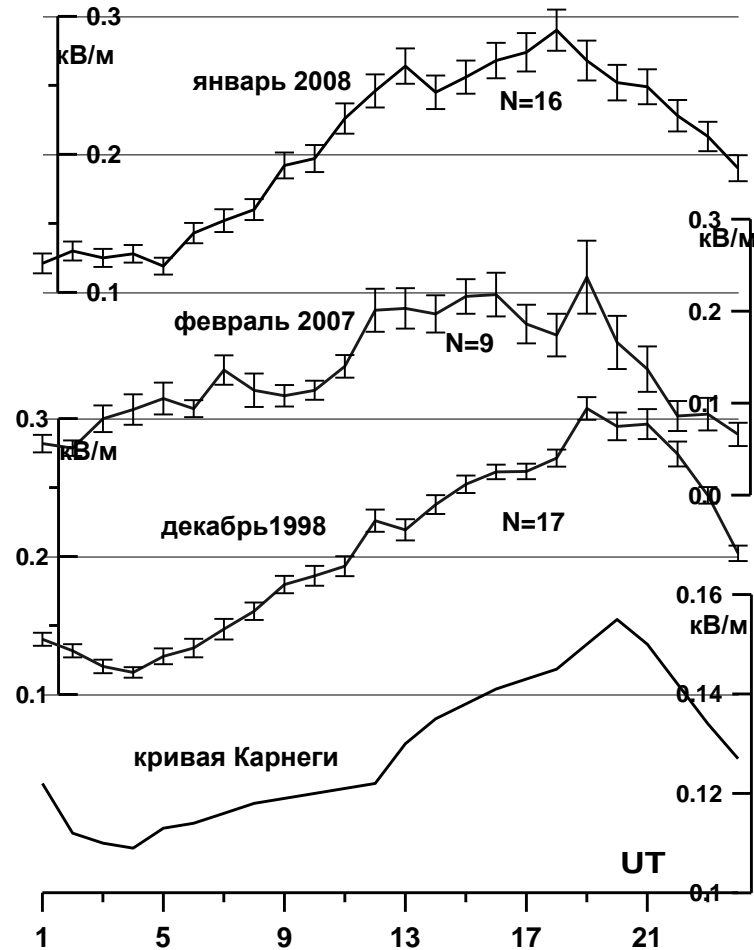
Годовая вариация напряженности электрического поля атмосферы по данным наблюдений обсерватории “Борок” 1998 – 2011 г. Вертикальными линиями здесь и далее на рисунках показана стандартная ошибка среднего значения.

# Аэроэлектрические наблюдения

Спектральная плотность *среднесуточных* значений напряженности аэроэлектрического поля по данным наблюдений обсерватории «Борок» (1998 – 2011)

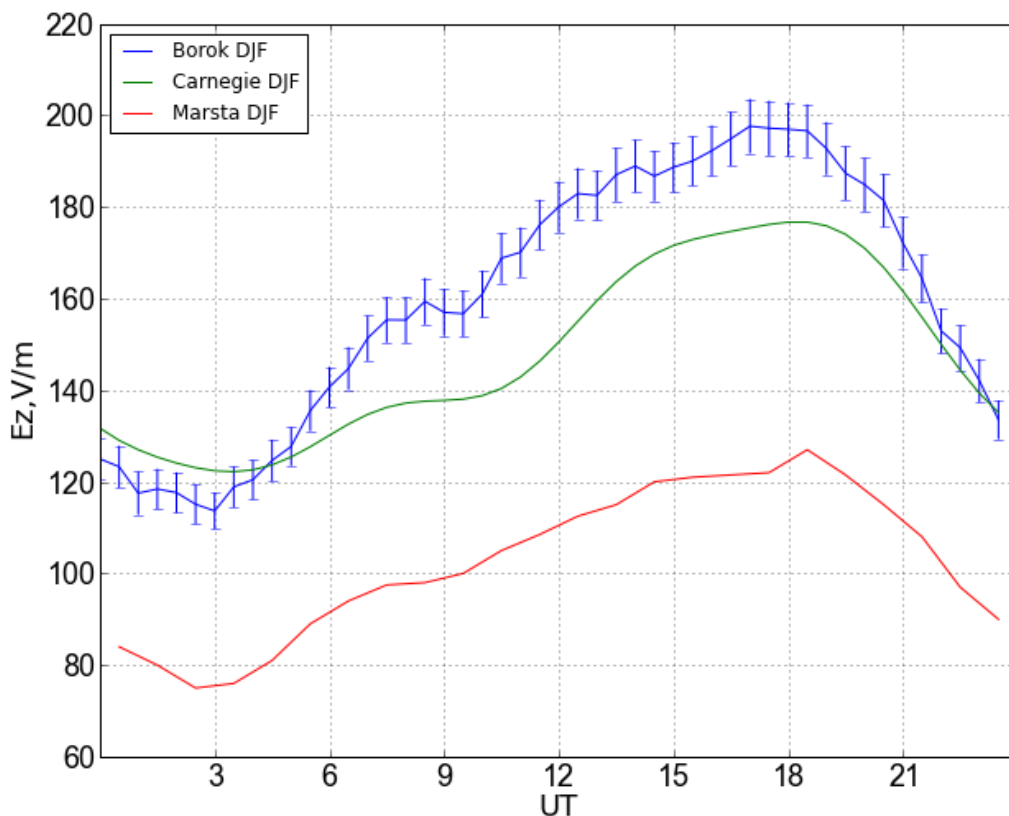


# Аэроэлектрические наблюдения



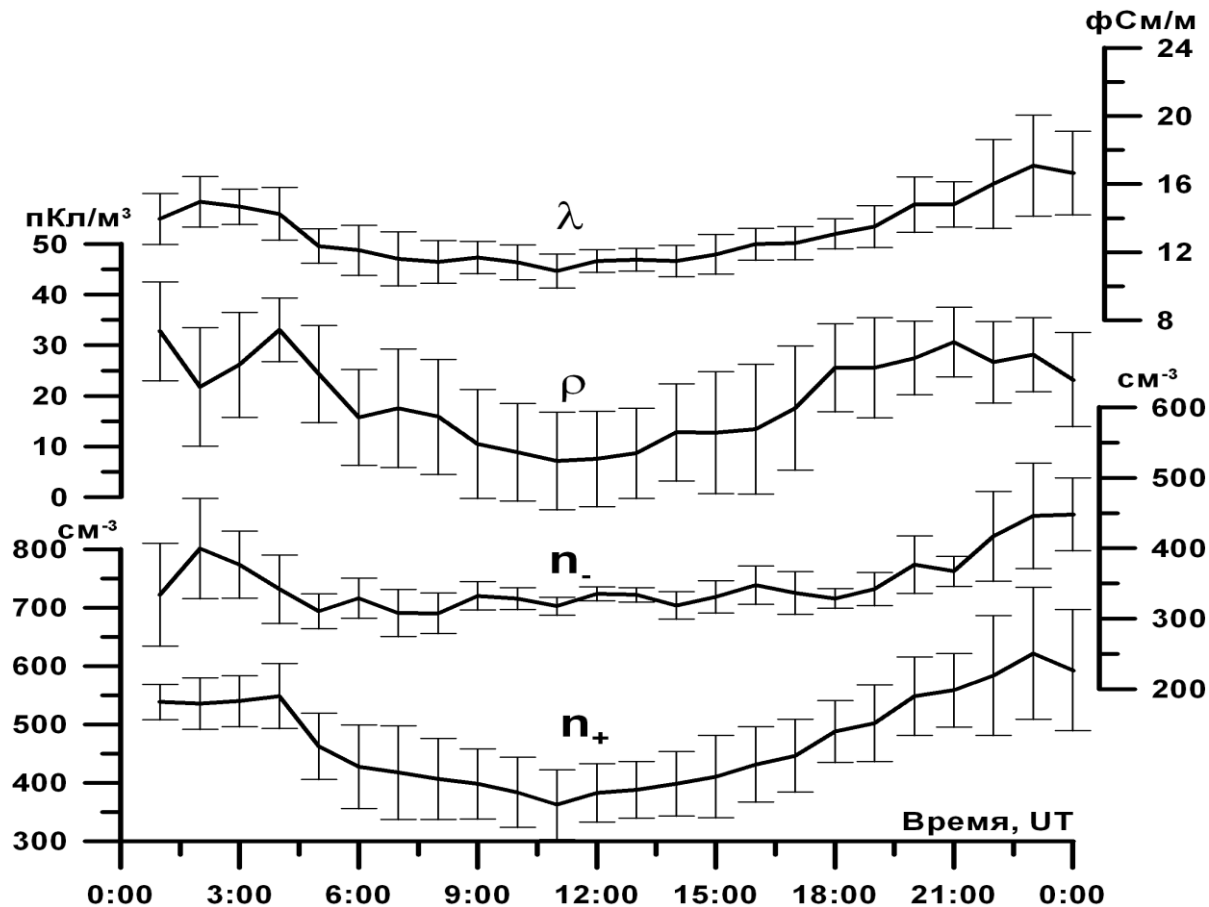
Суточная вариация аэроэлектрического поля по данным ГО “Борок” и экспедиции “Карнеги”. N – число дней хорошей погоды

## УНИТАРНАЯ ВАРИАЦИЯ АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, вариация аэроэлектрического поля ионосферного динамо



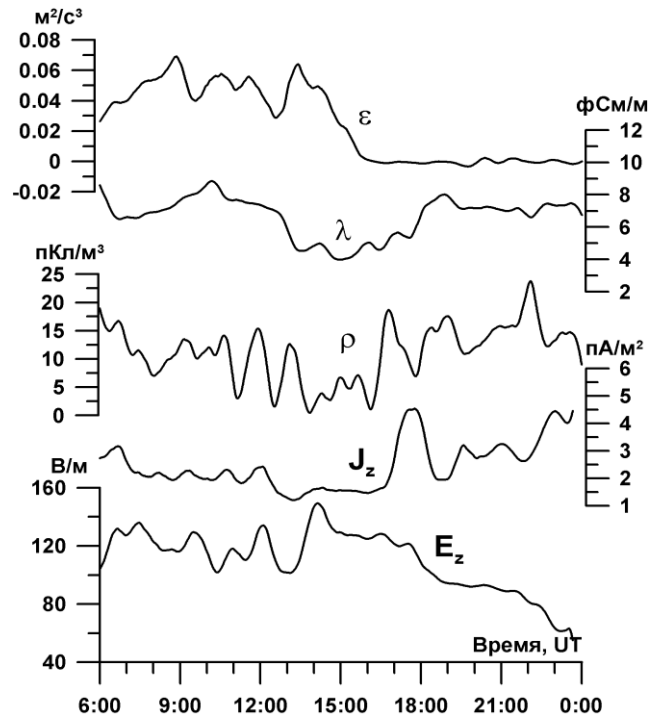
Унитарные вариации напряженности аэроэлектрического поля в зимний период (декабрь, январь, февраль - DJF) по наблюдениям обсерватории Борок, обсерватории Марста и кривая Карнеги. Вертикальными линиями обозначены стандартные ошибки среднего ( $n=346$ ).

# Натурные аэроэлектрические наблюдения



Суточный ход концентраций положительных ( $n_+$ ) и отрицательных ( $n_-$ ) легких атмосферных ионов, удельной электрической проводимости атмосферы ( $\lambda$ ) и плотности объемного заряда ( $\rho$ ) по данным за 13, 14, 15, 24, 25 августа 2011 года (усреднение 1 час).

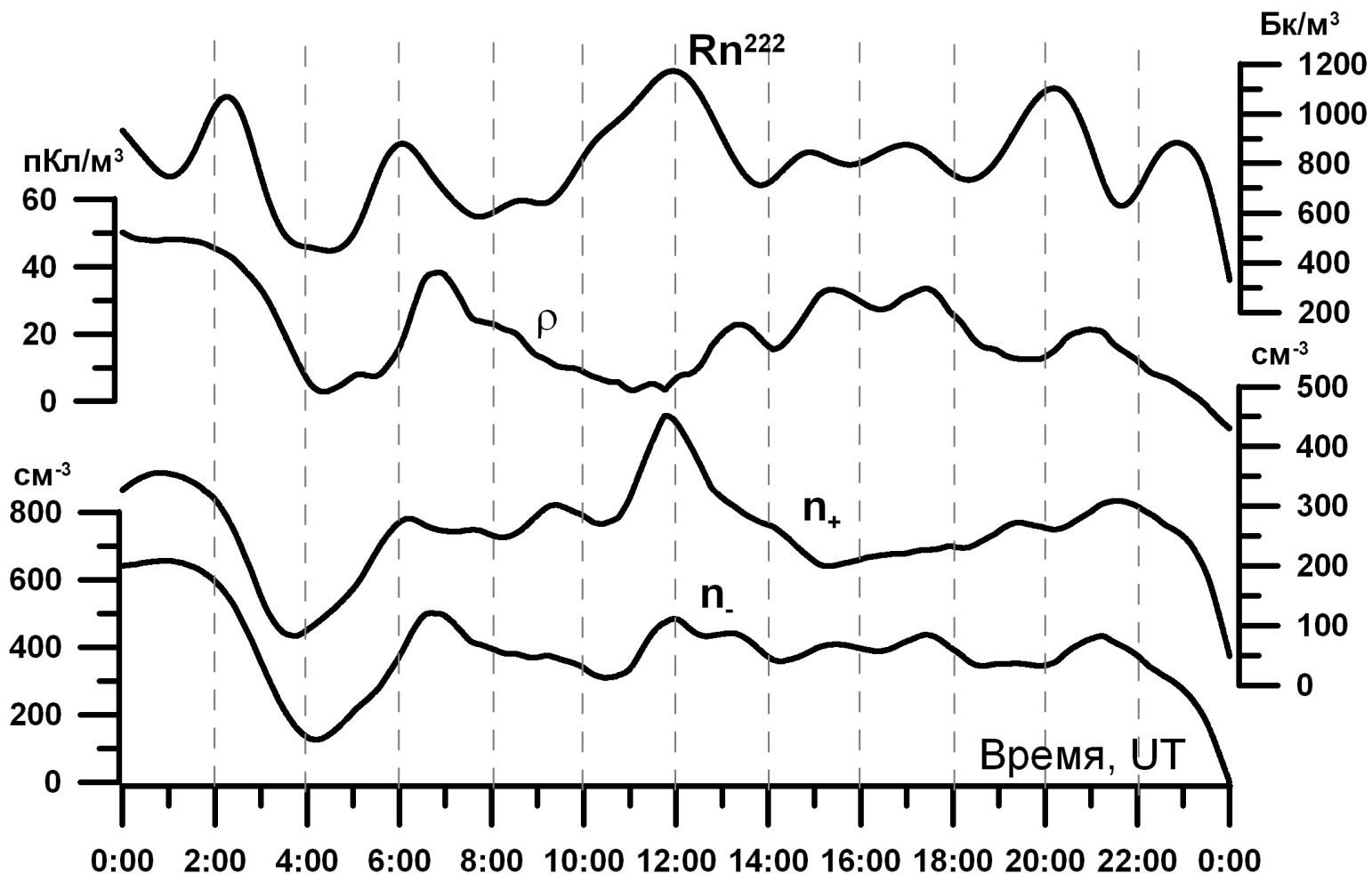
# Натурные аэроэлектрические наблюдения



Регистрограммы вариаций напряженности атмосферного электрического поля ( $E_z$ ), плотности вертикального атмосферного электрического тока ( $J_z$ ), плотности объемного заряда ( $\rho$ ), удельной электрической проводимости ( $\lambda$ ) и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности в тепло ( $\varepsilon$ ) по данным за 19.08.2012 (усреднение – 30 мин).

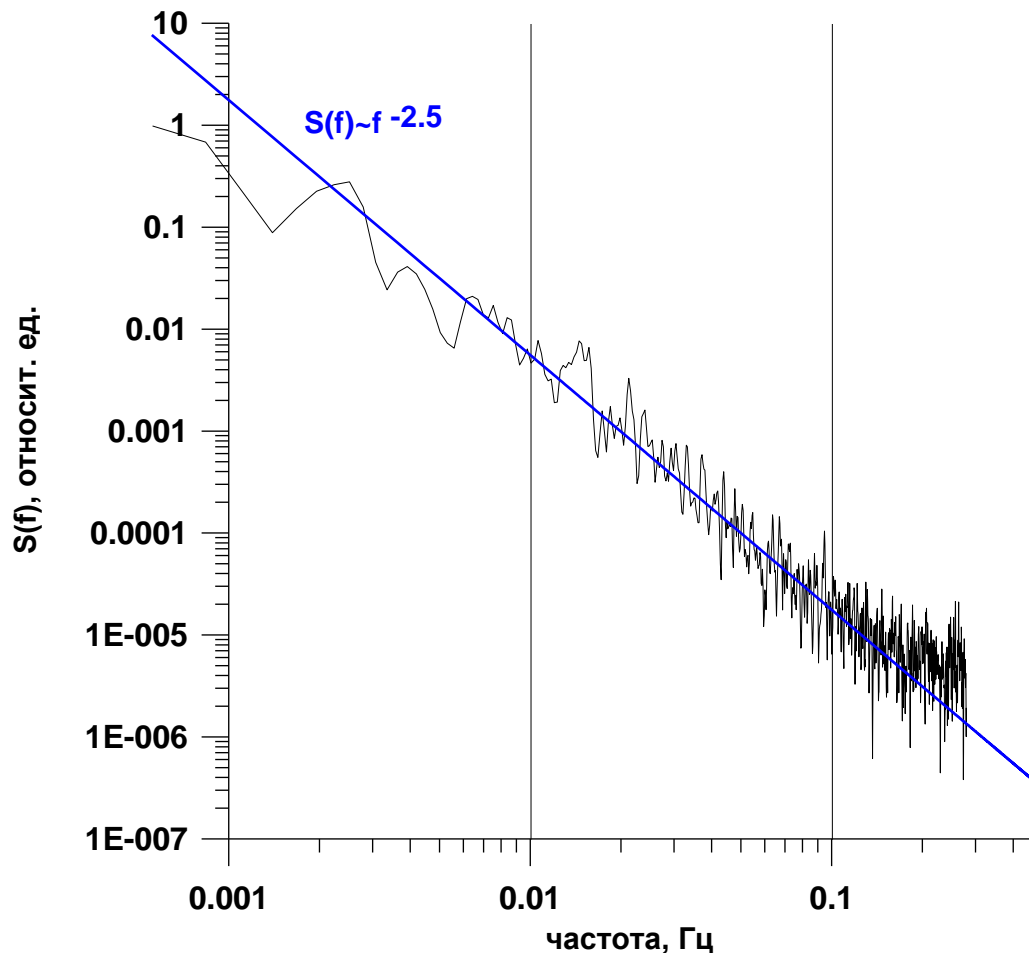


# Натурные аэроэлектрические наблюдения



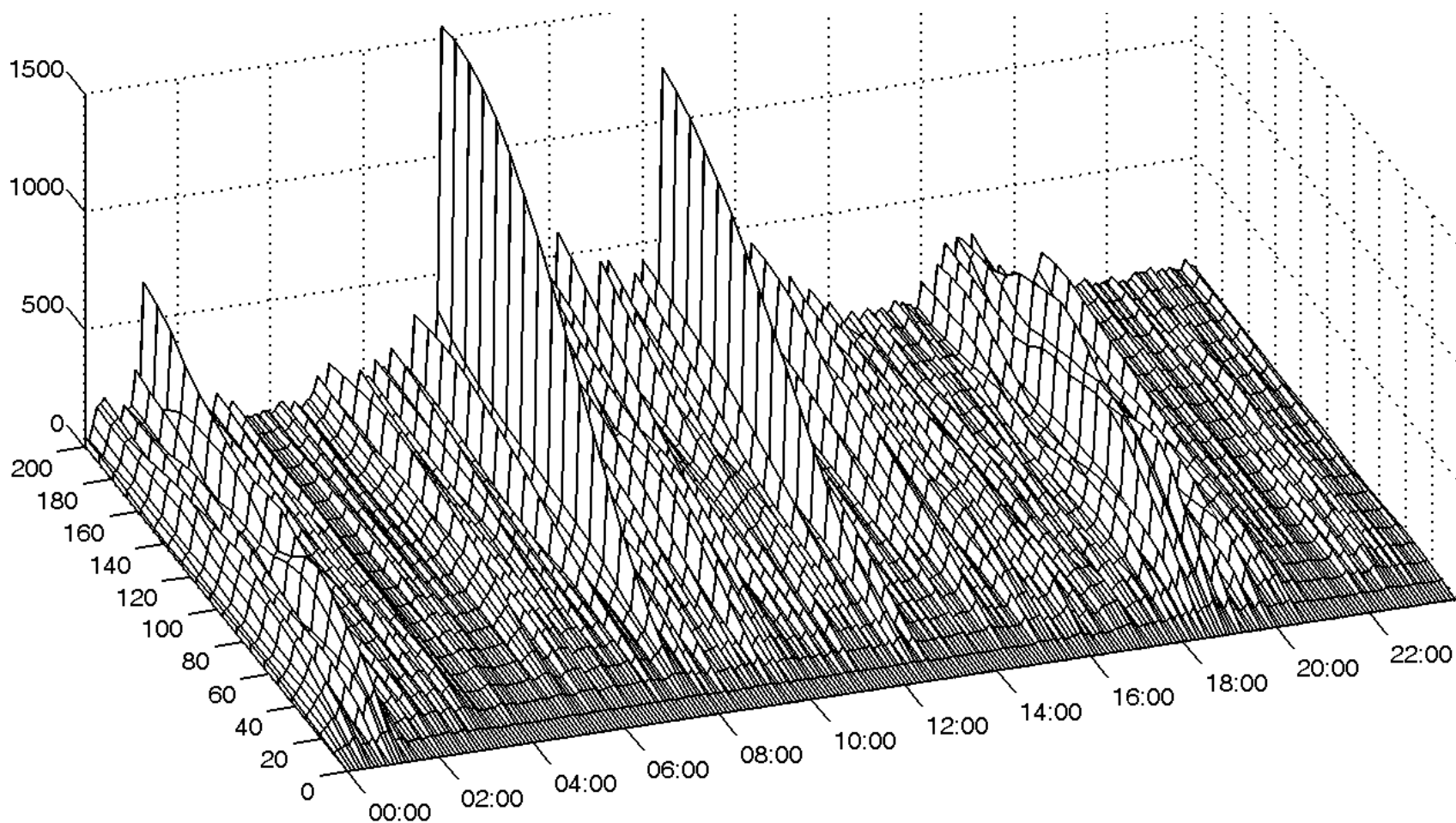
Суточные вариации объемной активности радона-222 ( $Rn^{222}$ ), плотности объемного заряда ( $\rho$ ), сосредоточенного на легких атмосферных ионах, и концентраций легких атмосферных ионов ( $n_+, n_-$ ) по данным наблюдений обсерватории "Борок" 26.09.2010. Данные сглажены часовым скользящим средним.

# Натурные аэроэлектрические наблюдения



Нормированная спектральная плотность аэроэлектрического поля по наблюдениям обсерватории “Борок” 30 июля 2012 г., 12:00 – 13:00 UT.

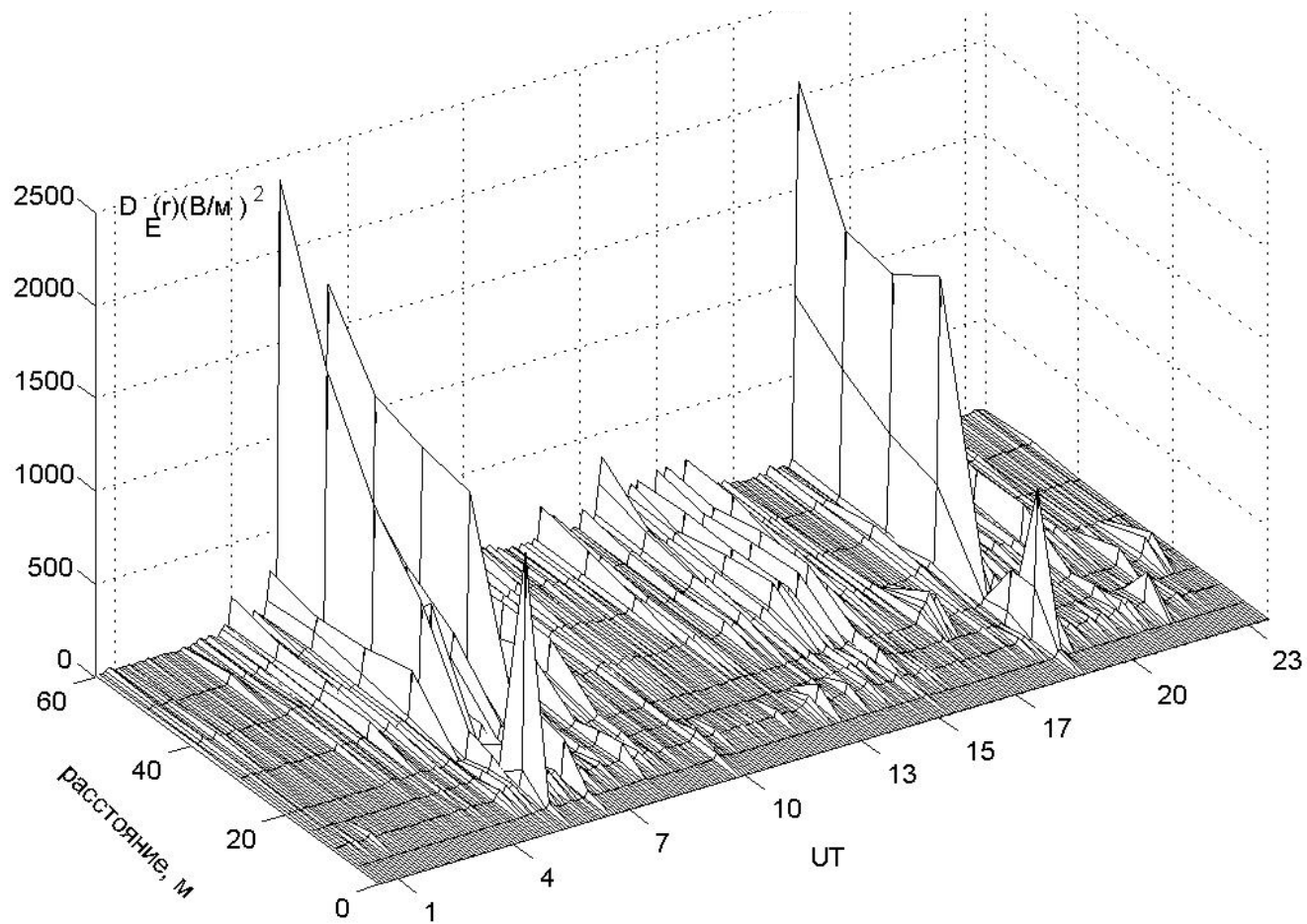
# Натурные аэроэлектрические наблюдения



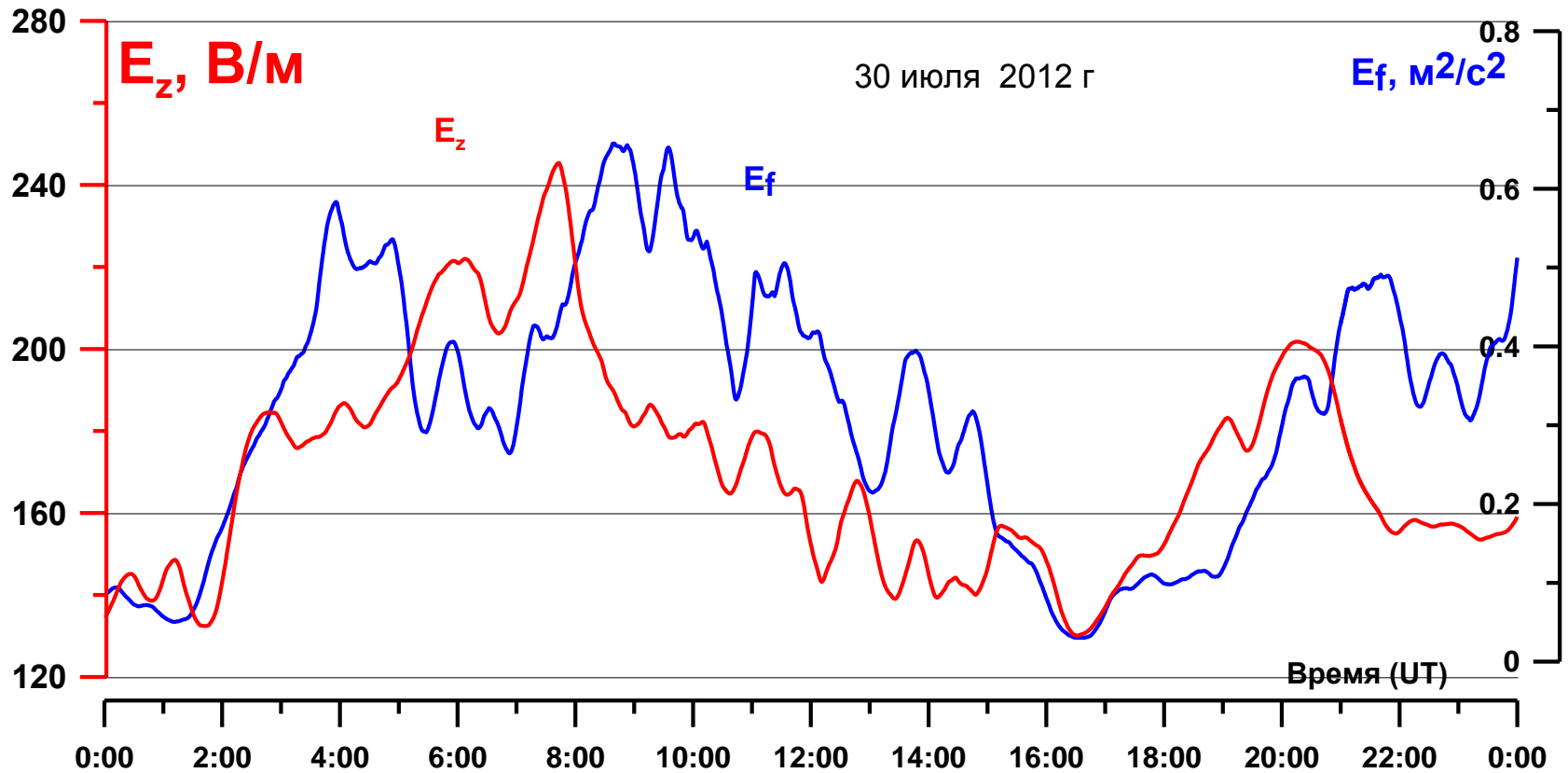
Структурные функции аэроэлектрического поля по данным наблюдений обсерватории “Борок” 30.07.2012, построенные методом стационарных приращений.

# Аэроэлектрические пульсации

Аэроэлектрические структуры приземной атмосферы по наблюдениям 14 июля 2002 г.



# Динамика вертикальной компоненты атмосферного электрического поля ( $E_z$ ) и полной энергии турбулентных пульсаций ( $E_f = \sigma_w^2 + \sigma_u^2 + \sigma_v^2$ )



Анисимов С.В., Шихова Н.М. Перенос электричества в атмосферном слое обмена. «Геофизические исследования», Т.11, № 1, 2010, С.55–63.

Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М. Формирование электрически активных слоев атмосферы с температурной инверсией. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, том 48, № 4, с. 442–452

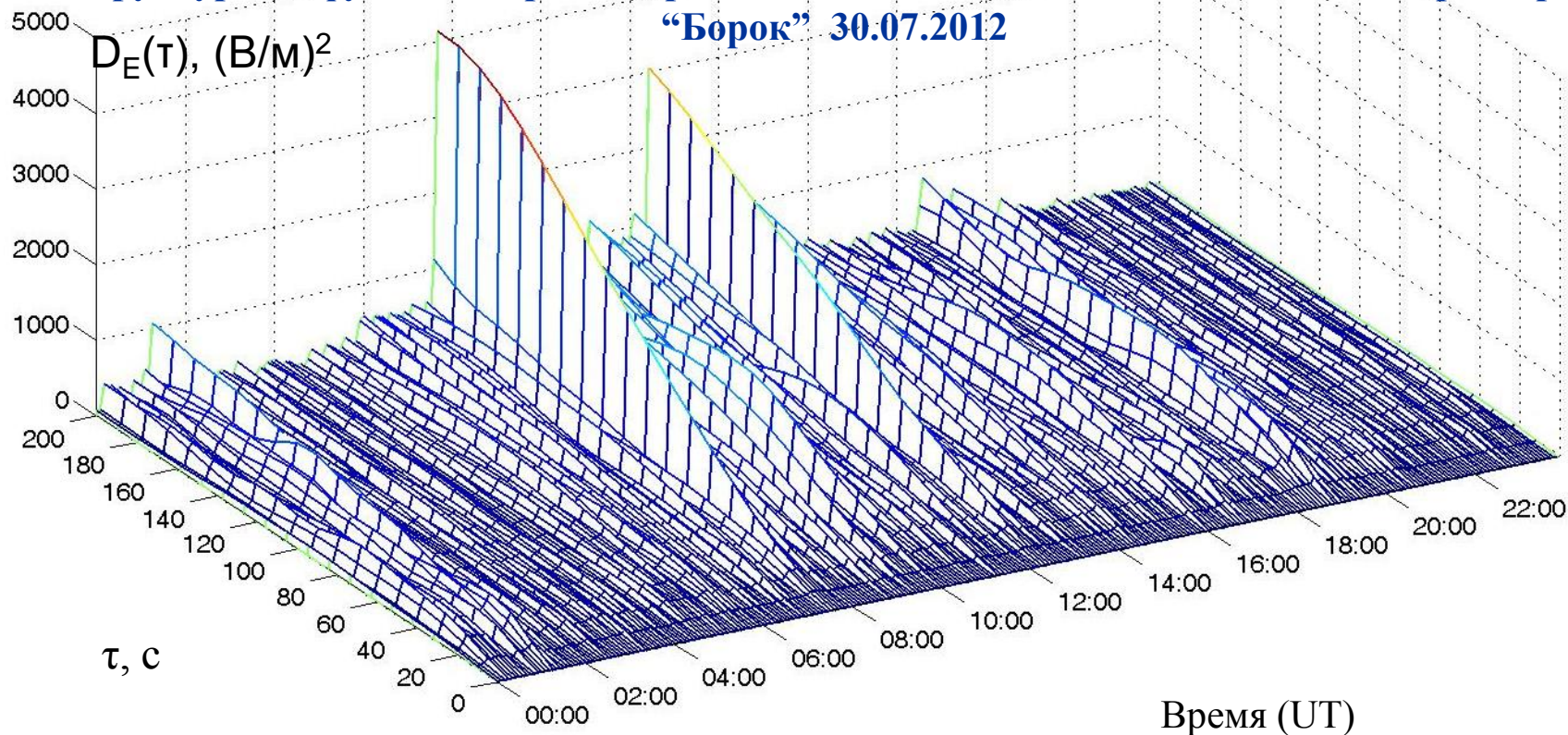
Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shikhova N.M. Space charge and aerelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study // Atmos. Res. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.012>

# Оценка интервала самоподобия динамической составляющей $E$

$$D_{E_z}(\tau) = \langle (E(t+\tau) - E(t))^2 \rangle$$

$$\langle (\Delta E_z(\tau))^2 \rangle \sim (\tau)^{\zeta_2}$$

Структурные функции аэроэлектрического поля по данным наблюдений обсерватории  
“Борок” 30.07.2012



Интервал самоподобия наблюдаемых когерентных  
аэроэлектрических структур

$$\tau \in (0 \div 120)s$$

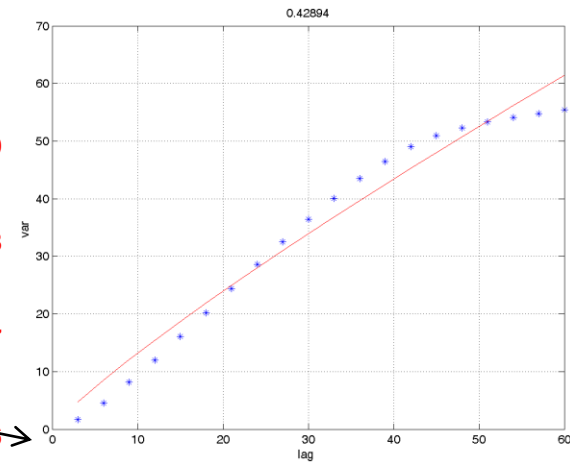
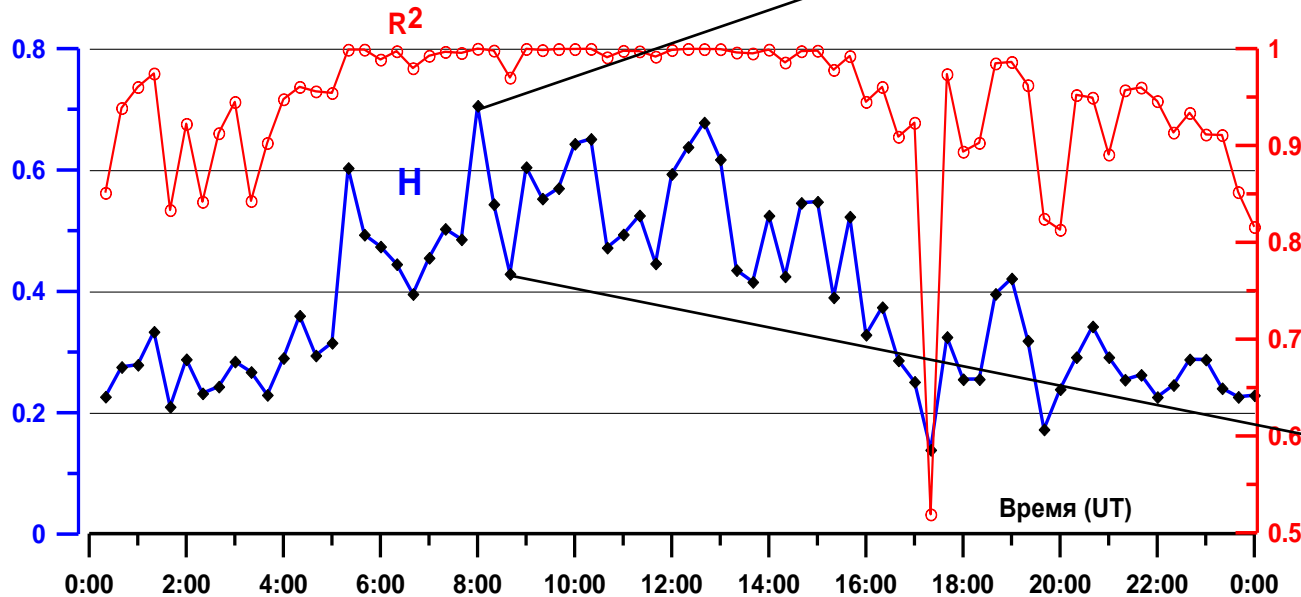
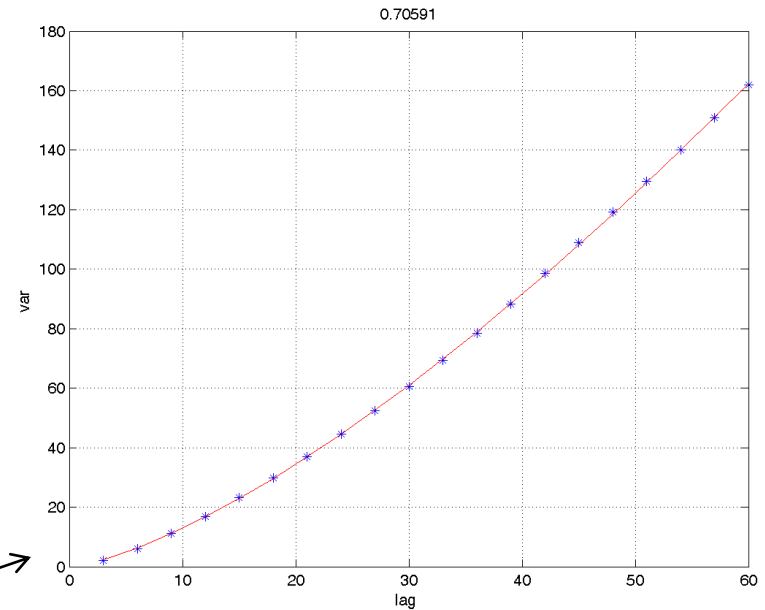
# Оценка самоподобия динамической составляющей $E$

$$D[(E(t_2) - E(t_1))] \sim |t_2 - t_1|^{2H}$$

$0 < H < 1$  - показатель Хёрста  
(параметр самоподобия)

Динамика показателя Херста ( $H$ ) в  
условиях “хорошей погоды” 30.07.2012 по  
данным наблюдений обсерватории “Борок”.

$R^2$  – коэффициент детерминации



# Оценка самоподобия динамической составляющей

## Фрактальная размерность

### Регуляризационная размерность

- $$RD(S) = \frac{\text{ряда } S}{\lim_{a \rightarrow 0} \frac{\log(L_a)}{-\log(a)}} + 1$$

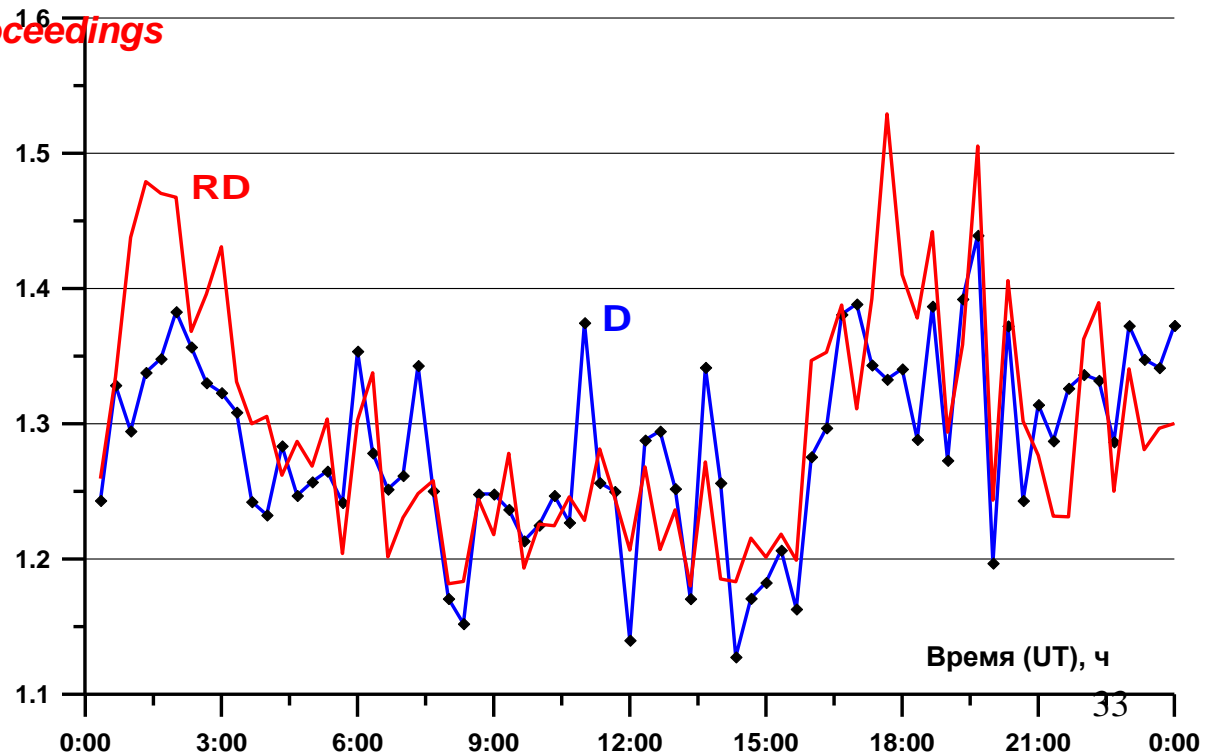
(FracLab toolbox for Matlab developed at INRIA  
[www.irccyn.ecnantes.fr/hebergement/FracLab](http://www.irccyn.ecnantes.fr/hebergement/FracLab))

[L. Lévy V'ehel and F. Roueff, *Proceedings of Fractals 98, Malta, 1998*]

- $D = 2 - H$ , где  $H$  :

$$\langle x^2(\tau) \rangle \sim \tau^{2H}$$

Динамика регуляризационной размерности (RD) и размерности Хаусдорфа-Безиковича (D) турбулентных аэроэлектрических пульсаций по данным наблюдений обсерватории "Борок" 9 августа 2009 г .

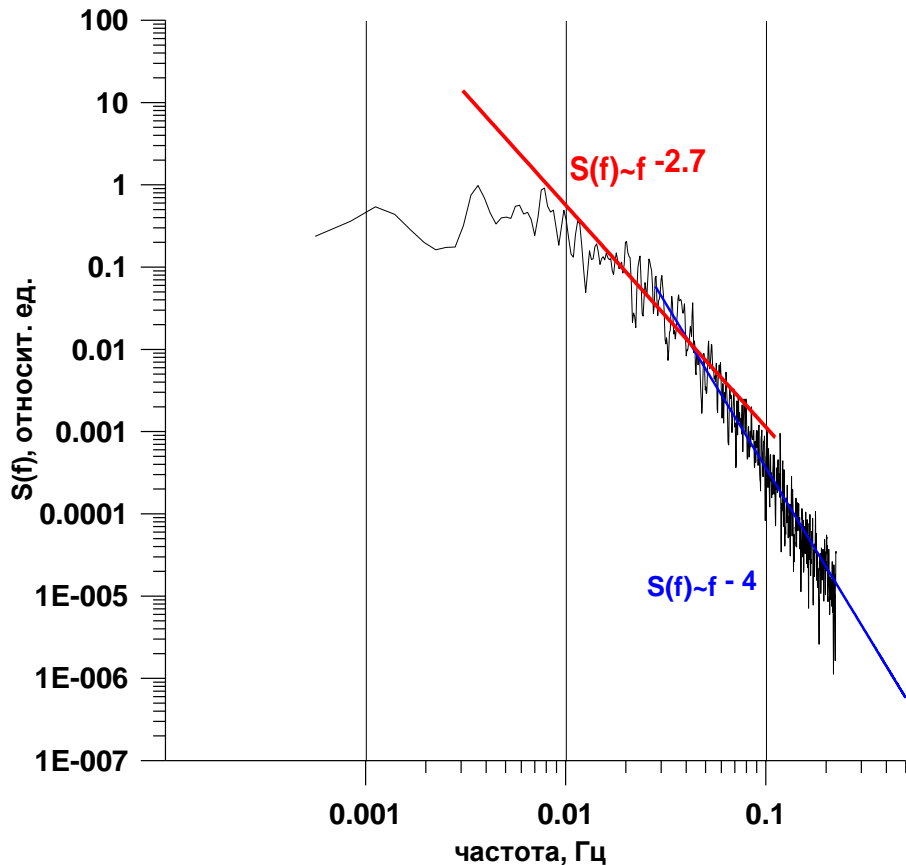




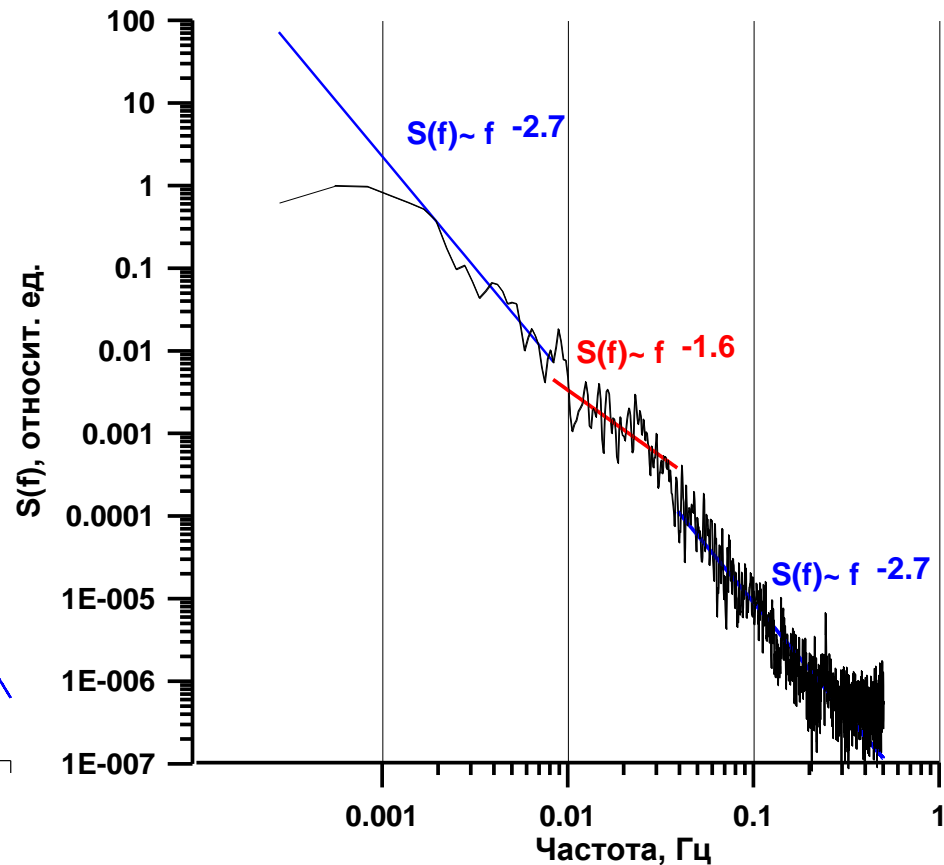
# Диссипация энергии в интервале самоподобия

## Спектральная плотность аэроэлектрических пульсаций

18:00–19:00 UT 29 июля 2012 г.



12:00–13:00 UT 17 августа 2007 г.



S.V. Anisimov, N.M. Shikhova. Intermittency of turbulent aeroelectric field // Atmospheric Research. Volumes 135–136, January 2014, Pages 255–262, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.018>

## Показатель перемежаемости аэроэлектрического поля.

### Алгоритм вычисления.

1. Обобщённая статистическая сумма

$$Z(q, a) = \sum |W(a, t)|^q$$

a - масштаб вариаций,  
q - момент.

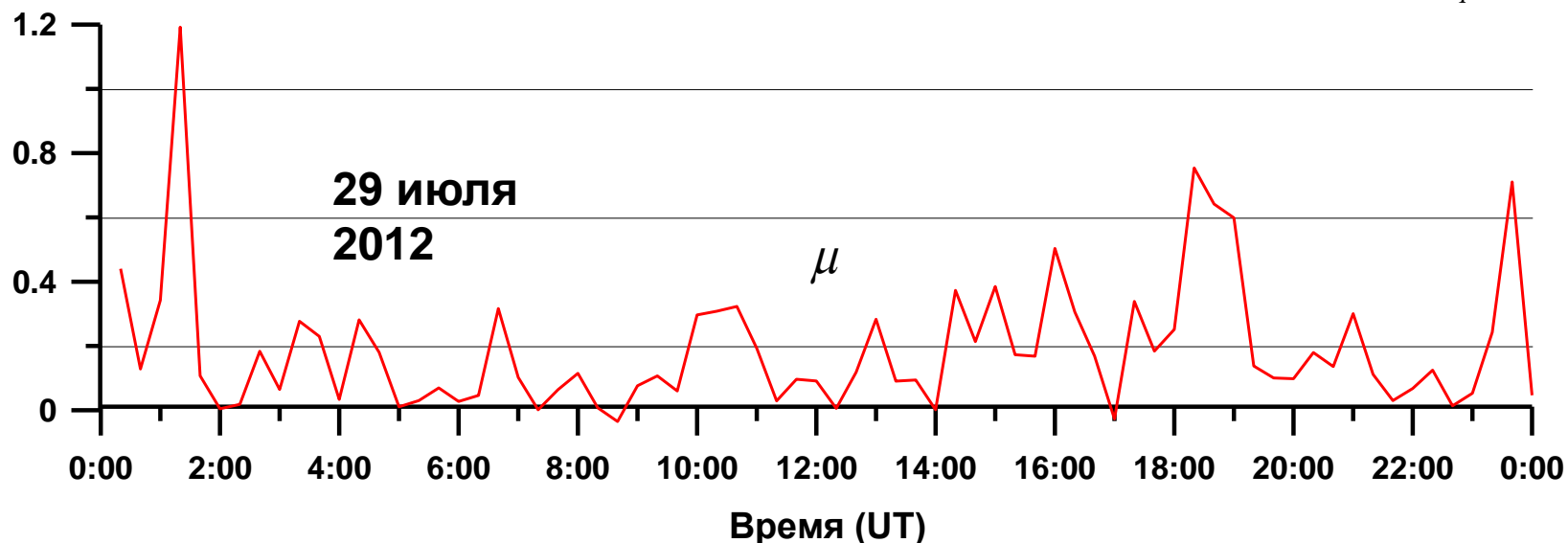
2. Скейлинговая экспонента  $\tau(q)$

$$\tau(q) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln Z(q, a)}{\ln a}$$

3. Показатель перемежаемости  $\mu$

$$Z(q, a) \sim a^{\tau(q)};$$

$$\mu = - \left. \frac{d^2 \tau(q)}{dq^2} \right|_{q=0}$$



Динамика показателя перемежаемости аэроэлектрического поля по данным наблюдений обсерватории “Борок”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

- Проанализирована динамика энергетических и фрактальных показателей короткопериодных пульсаций электрического поля на основе данных природных полевых и обсерваторских аэроэлектрических наблюдений.
- Показано, что аэроэлектрические пульсации обладают свойством самоподобия.
- Обнаружены участки с перемежаемостью на временных интервалах, характеризующихся сменой стратификации состояний атмосферы.
- Показано, что перемежаемость аэроэлектрического поля характеризуется :
  - негауссовостью распределения приращений поля;
  - изменением показателей спектральной плотности в диапазоне частот 0.01 – 1 Гц от -2.3 до -4;
  - нелинейностью скейлинговой экспоненты  $\tau(q)$ ;
  - отличием показателя перемежаемости  $\mu$  от нуля;
  - линейностью логарифма показателя пологости  $F$  от масштаба вариаций.

## АПС, УРАВНЕНИЯ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ЗАРЯДОВ, ПОЛЯ И ТОКА

$$\frac{\partial n_+}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)n_+ = q(\mathbf{r}, t) - n_+ \left[ \alpha n_- + \sum_{D_a} (\beta_{+0}(D_a)N_{0a} + \beta_{+-}(D_a)N_{-a}) \right] - \mu_+ \nabla(n_+ E)$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)n_- = q(\mathbf{r}, t) - n_- \left[ \alpha n_+ + \sum_{D_a} (\beta_{-0}(D_a)N_{0a} + \beta_{-+}(D_a)N_{+a}) \right] + \mu_- \nabla(n_- E)$$

$$\frac{\partial N_+}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)N_+ = \frac{n_+}{\tau_{+0}} - \frac{n_-}{\tau_{-e}}, \quad \frac{\partial N_-}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)N_- = \frac{n_-}{\tau_{-0}} - \frac{n_+}{\tau_{+e}}$$

$$\tau_{\pm 0}^{-1} = \sum_{D_a} \beta_{\pm 0}(D_a)N_{0a} = \int_{D_1}^{D_2} \beta_{\pm 0}(D) f_0(D) dD = \overline{\beta_{\pm 0}} N_0$$

$$\left. \frac{\partial n_{\pm}}{\partial z} \right|_{z_0} = \frac{n_{\pm}(z_0)}{kz_0 B_n^{-1}}$$

$$\tau_{\pm e}^{-1} = \sum_{D_a} \beta_{\pm}(D_a)N_{\mp a} = \int_{D_1}^{D_2} \beta_{\pm}(D) f_{\mp}(D) dD = \overline{\beta_{\pm}} N_{\mp}$$

$$B_n^{-1} = - \left. \frac{\bar{n}(z_0) u_*}{(n' w')} \right|_{z_0}$$

$$\nabla E = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_+ - n_- + N_+ - N_-)$$

$$j_z = V / R = \sigma E_z$$

$$\sigma(z, t) = e(\mu_+ n_+(z, t) + \mu_- n_-(z, t))$$

$$E_z(h, t) = \frac{V_i(t)}{\sigma(h) \left[ \int_0^{h(t)} \frac{dz}{\sigma(z, t)} + \int_{h(t)}^{\infty} \frac{dz}{\sigma(z)} \right]}$$

# АПС, ФОРМУЛИРОВКА ЛАГРАНЖЕВОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

$$W = w[Z(z(t_0), t_0), t]$$

$$dW = a(Z, W, t)dt + b(Z, W, t)d\zeta$$

$$dZ = Wdt$$

$$P_w = A_b g_b + A_d g_d$$

$$g_b = \exp\left(\frac{-(W - w_b)^2}{2\sigma_b^2}\right) / \sqrt{2\pi\sigma_b^2}$$

$$g_d = \exp\left(\frac{-(W - w_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) / \sqrt{2\pi\sigma_d^2}$$

$$\frac{\partial P_w}{\partial t} + \frac{\partial W P_w}{\partial z} + \frac{\partial a P_w}{\partial w} = \frac{1}{2} C_0 \varepsilon \frac{\partial^2 P_w}{\partial w^2} \quad \left| \begin{array}{l} \Phi = -\frac{1}{2} \frac{\partial(A_b w_b)}{\partial z} \operatorname{erf}\left(\frac{W - w_b}{\sqrt{2}\sigma_b}\right) + \sigma_b \left[ A_b \frac{\partial \sigma_b}{\partial z} \left(\frac{W^2}{\sigma_b^2} + 1\right) + \sigma_b \frac{\partial A_b}{\partial z} \right] g_b - \\ -\frac{1}{2} \frac{\partial(A_d w_d)}{\partial z} \operatorname{erf}\left(\frac{W - w_d}{\sqrt{2}\sigma_d}\right) + \sigma_d \left[ A_d \frac{\partial \sigma_d}{\partial z} \left(\frac{W^2}{\sigma_d^2} + 1\right) + \sigma_d \frac{\partial A_d}{\partial z} \right] g_d \end{array} \right.$$

$$a(Z, W) = \left(-\frac{C_0 \varepsilon}{2} Q + \Phi\right) / P_w$$

$$b = \sqrt{C_0 \varepsilon}$$

$$Z(t + \Delta t) \rightarrow \begin{cases} Z = -Z(t + \Delta t), & Z(t) > z_d, & Z(t + \Delta t) \leq 0 \\ Z = 2z_d - Z(t + \Delta t), & Z(t) > z_d, & Z(t + \Delta t) \leq z_d \\ Z = 2h - Z(t + \Delta t), & Z(t) < h, & Z(t + \Delta t) \geq h \end{cases}$$

$$A_b = -w_d / (w_b - w_d) \quad g_0 = \exp\left(\frac{-W^2}{2\sigma_w^2}\right) / \sqrt{2\pi\sigma_w^2}, \quad \sigma_w = 1.3u_*, \quad u_* = \left[(u'w')^2 + (v'w')^2\right]^{1/4}$$

$$A_d = 1 - A_b$$

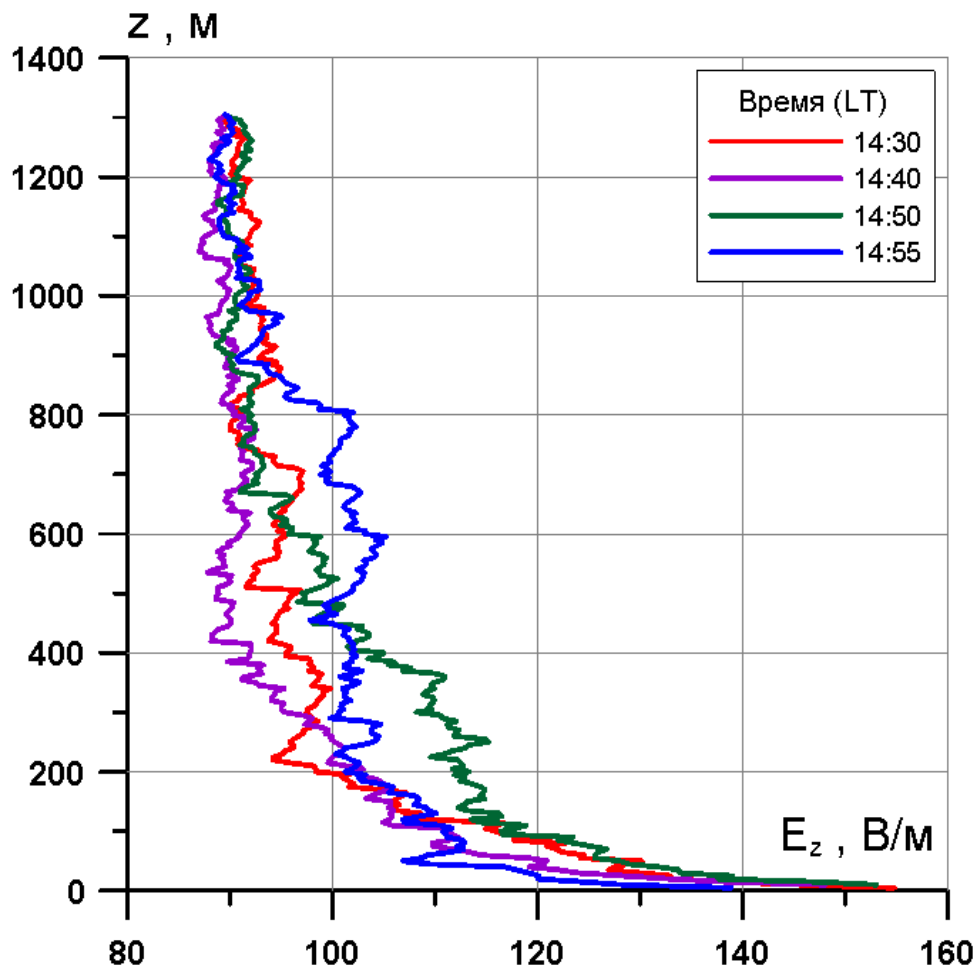
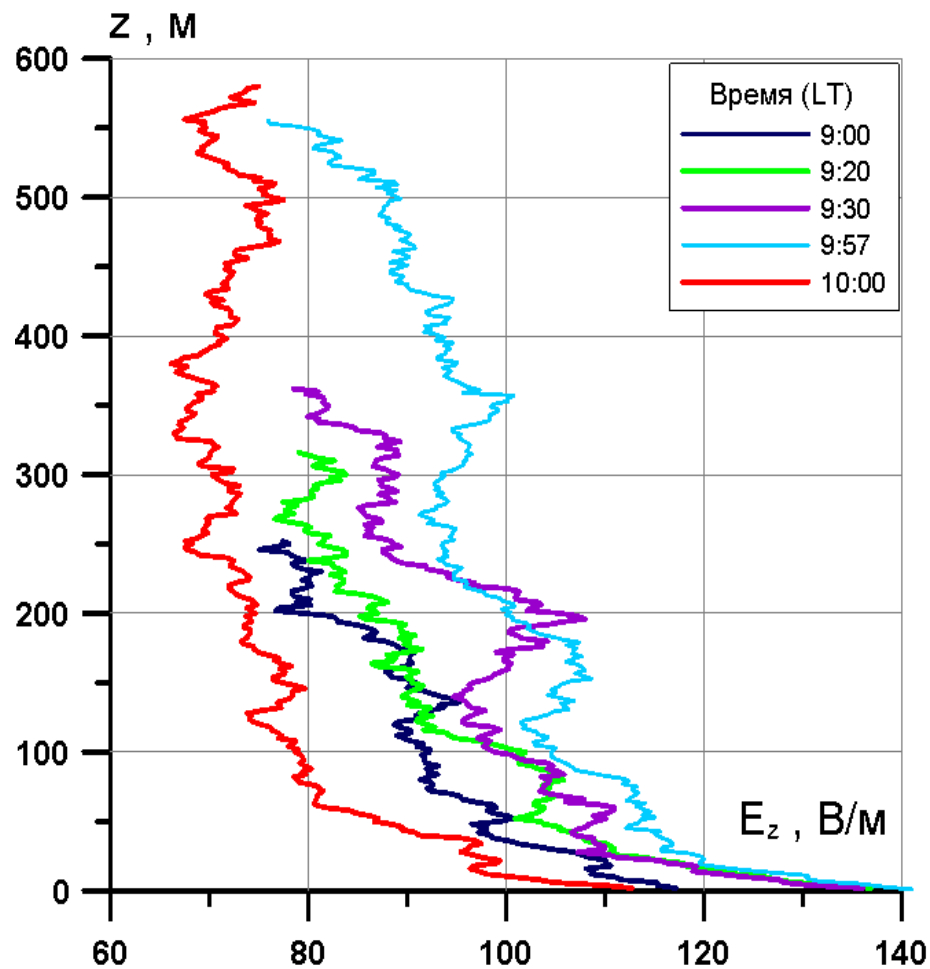
$$dW = [a(z, W) + W_c]dt + \sqrt{C_0 \varepsilon} d\zeta, \quad W_c = T_w \frac{\partial \sigma_w^2}{\partial z} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_w}\right)\right], \quad T_w = \frac{2\sigma_w^2}{C_0 \varepsilon}$$

$$w_b = -\sigma_w^2 / (2w_d)$$

$$w_d = \left(\langle w^3 \rangle - \sqrt{\langle w^3 \rangle^2 + 8\sigma_w^6}\right) / (4\sigma_w^2)$$

$$\left| \begin{array}{l} Q = g_b A_b (W - w_b) / \sigma_b^2 + \\ + g_d A_d (W - w_d) / \sigma_d^2 \end{array} \right.$$

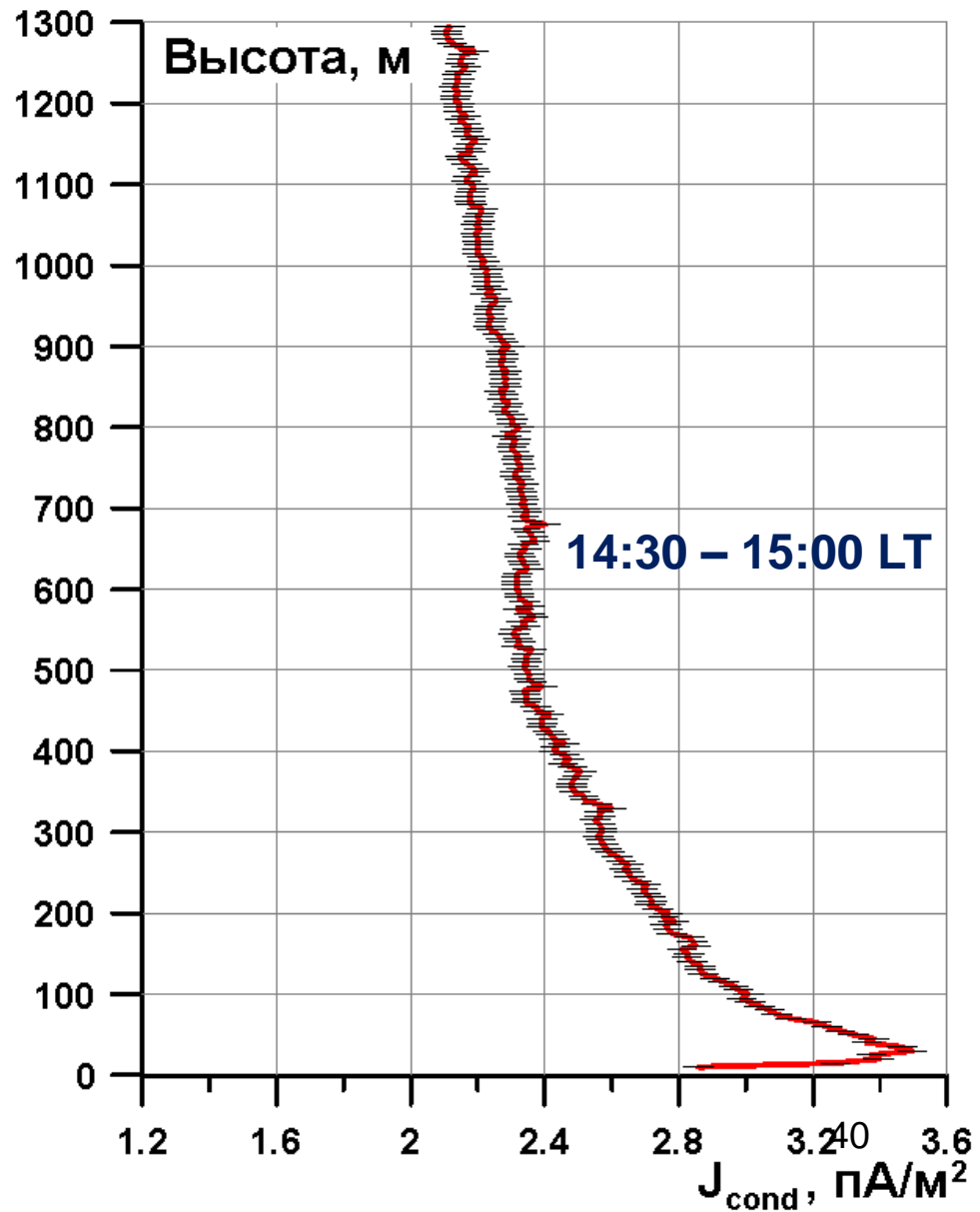
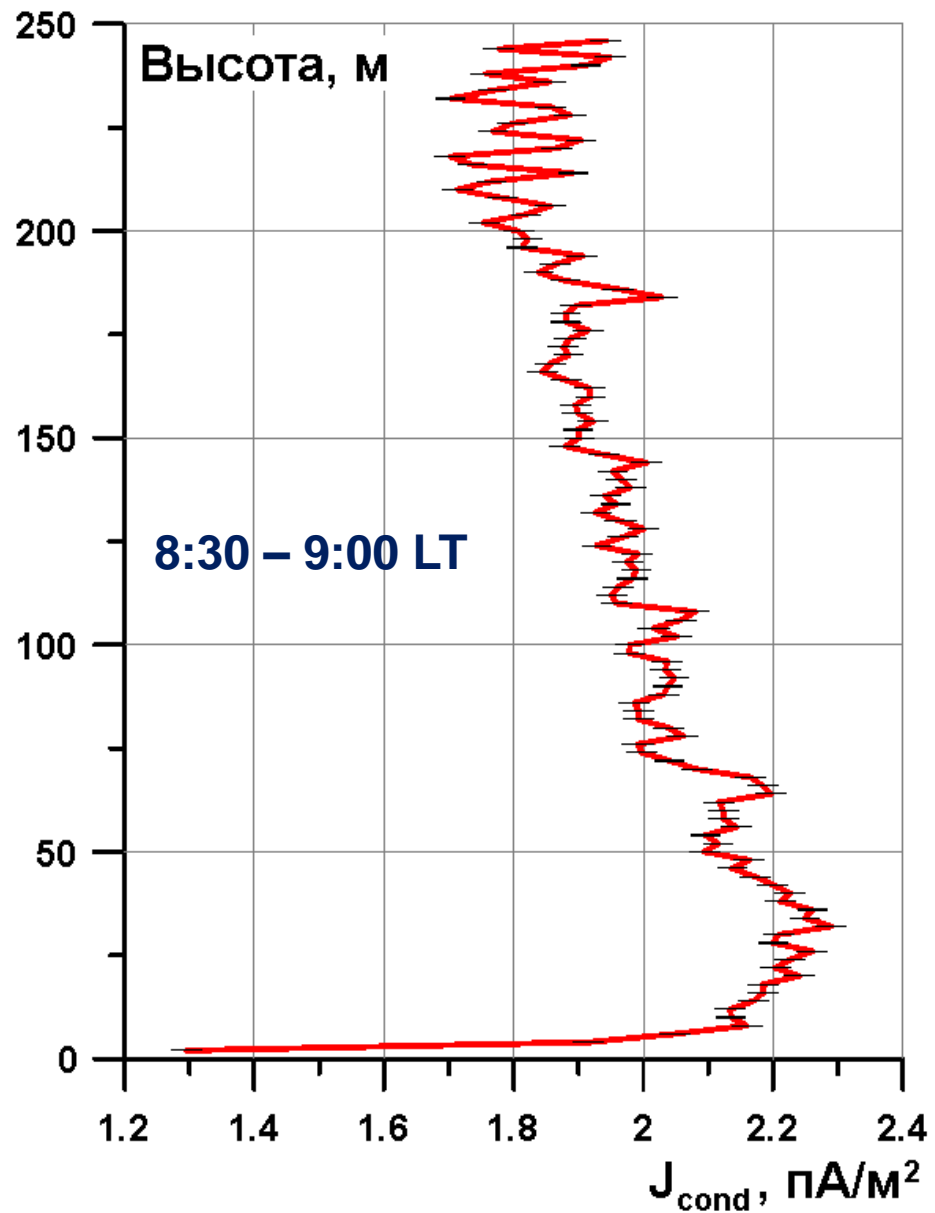
Электричество атмосферного пограничного слоя.  
Результаты моделирования  
ЭВОЛЮЦИЯ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



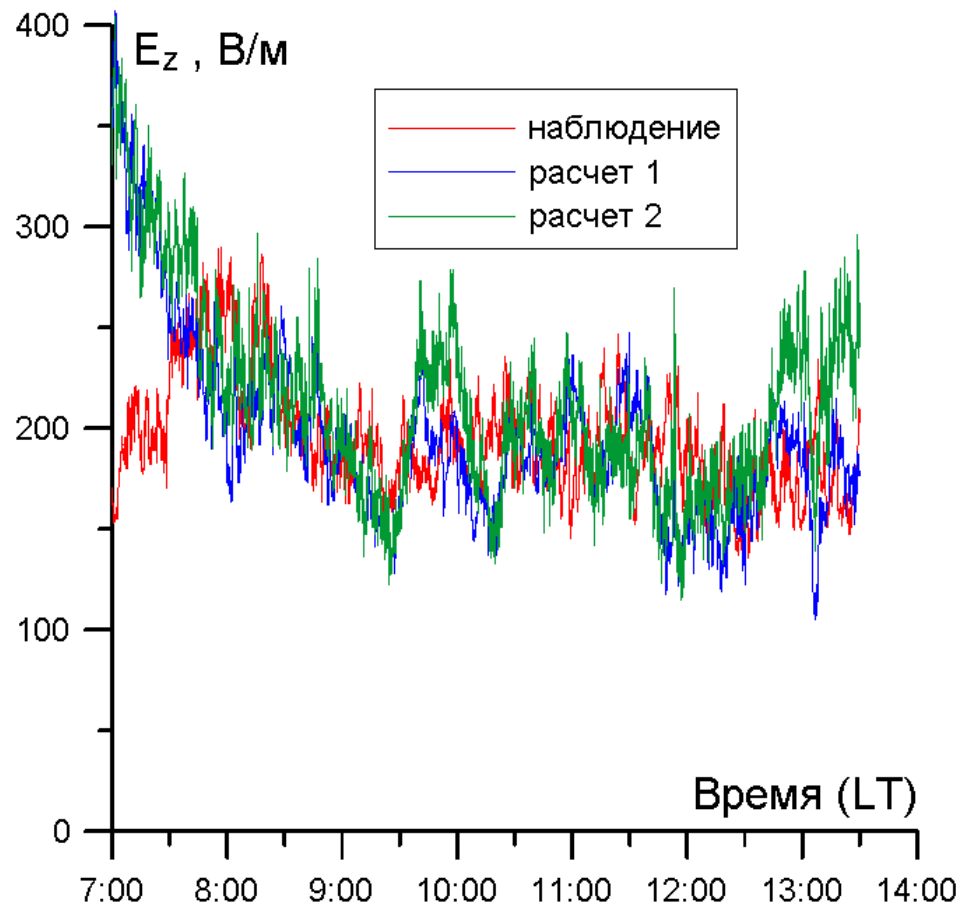
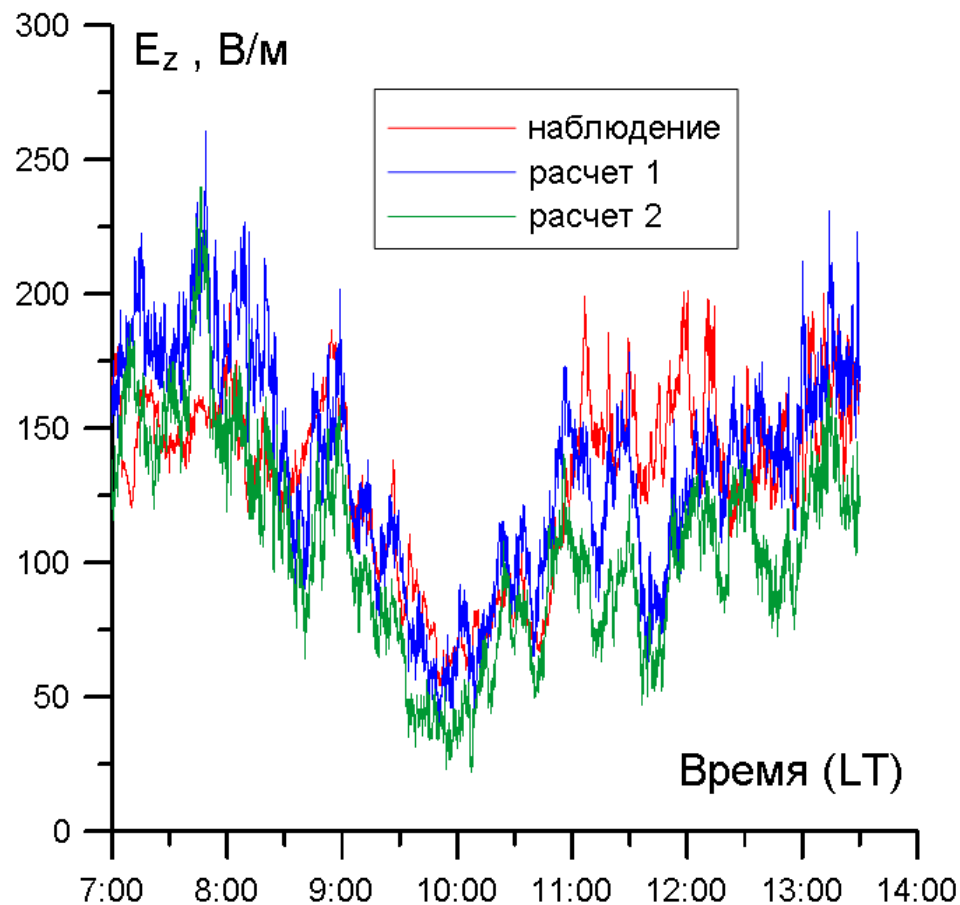
Расчётные высотные профили аэроэлектрического поля

# Электричество атмосферного пограничного слоя

РАСЧЁТНЫЕ ВЫСОТНЫЕ ПРОФИЛИ ПЛОТНОСТИ ТОКА ПРОВОДИМОСТИ  
(СРЕДНЯЯ ВЕЛИЧИНА ЗА 30 МИНУТ).



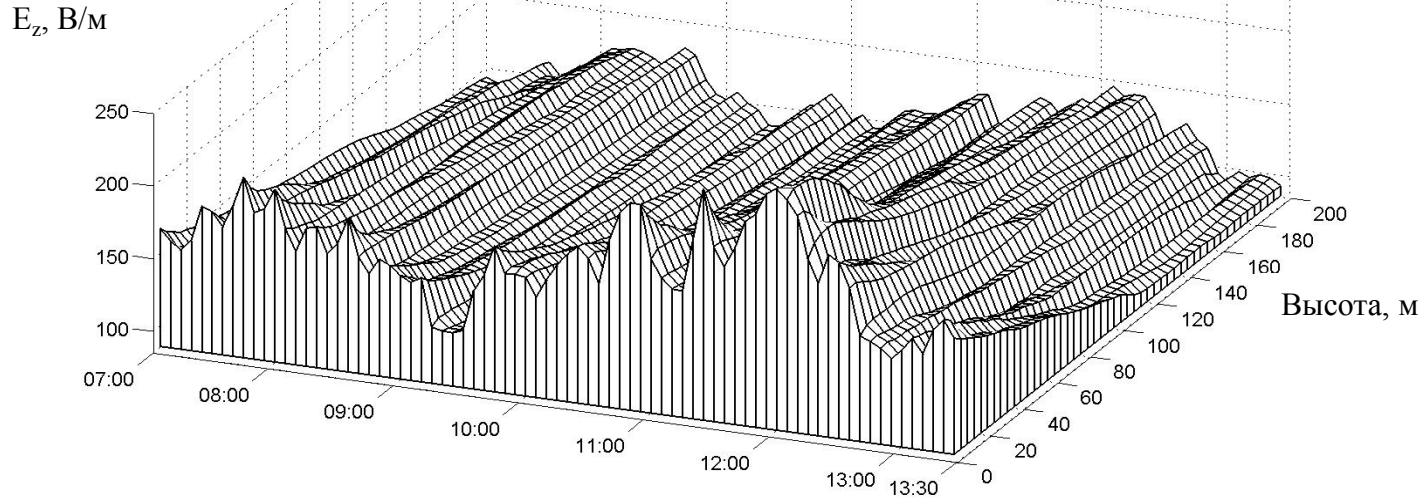
# Геокозмофизические процессы формирования глобальной электрической цепи.



**ВАРИАЦИИ АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ 28 и 29 июля 2012 г.  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ ОБСЕРВАТОРИИ “БОРОК” ИФЗ и РЕЗУЛЬТАТЫ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

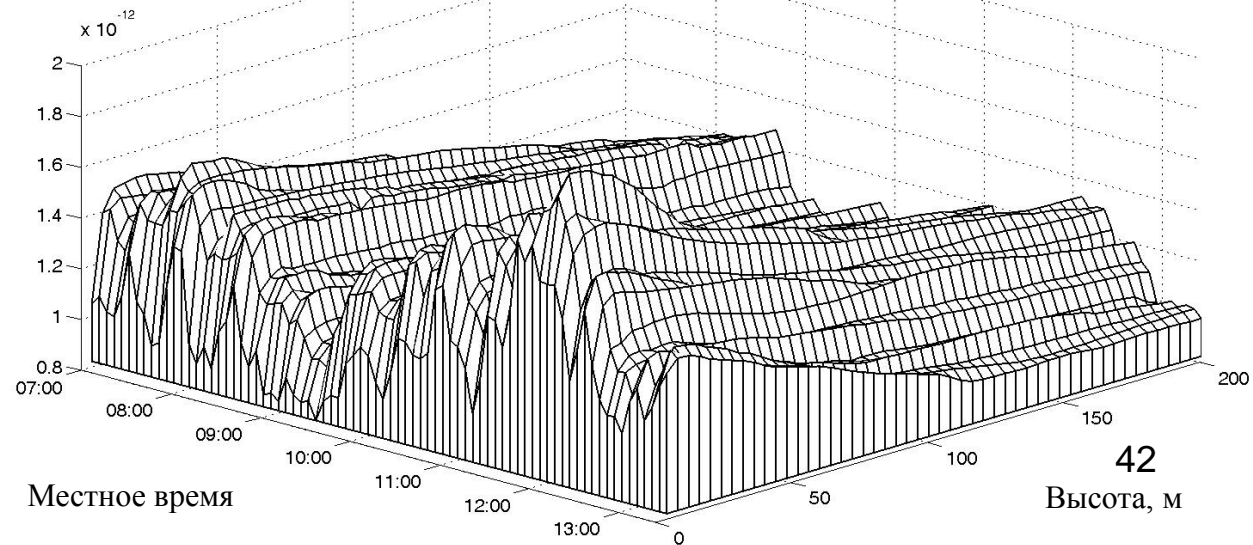


# Эволюция высотных аэроэлектрических профилей (расчет по результатам наблюдений 30.07.2012)



Местное время

$J_z, \text{А/м}^2$



# Электричество атмосферного пограничного слоя

## РЕЗУЛЬТАТЫ

- Исследовано электрическое состояние среднеширотного конвективного атмосферного пограничного слоя (АПС), невозмущенного облачностью, осадками, туманом, промышленными аэрозолями.
- Разработана численная модель, позволяющая оценивать электроаэродинамическое состояние конвективного АПС.
- Выполнена параметризация предлагаемой модели посредством результатов натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов.
- Рассчитаны высотные профили напряженности атмосферного электрического поля, плотности объемного заряда, удельной электрической проводимости и плотности атмосферного электрического тока; расчеты выполнены согласно разработанной модели в горизонтально однородном приближении с высоким пространственно-временным разрешением

# Электричество приземного слоя

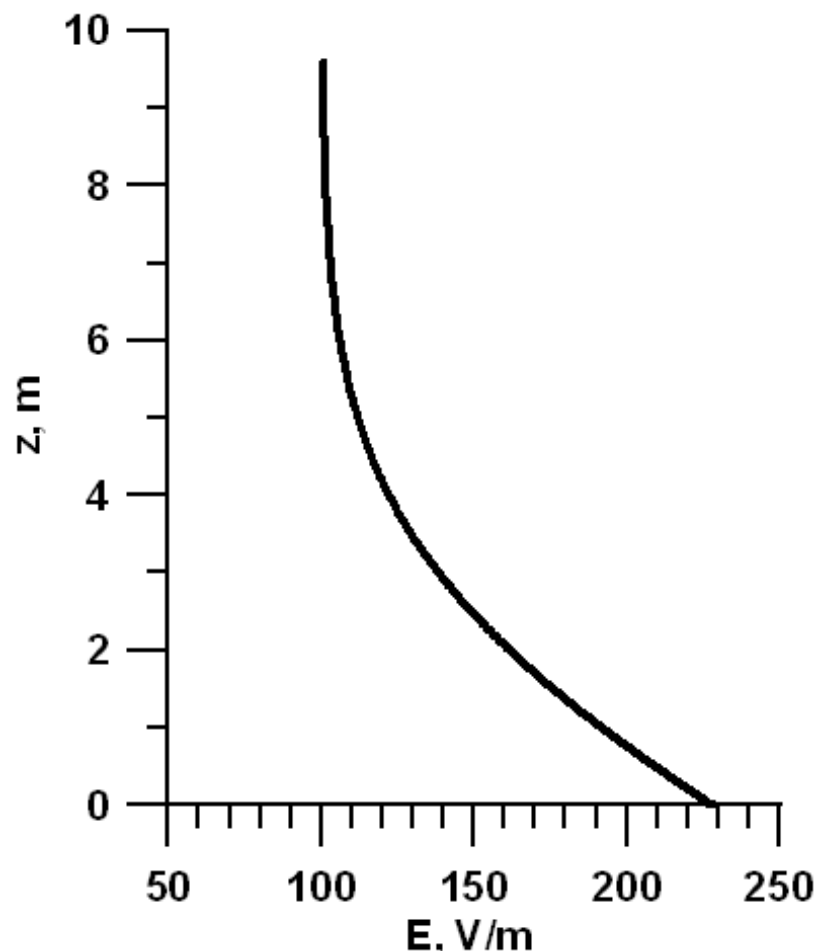
- Условия «хорошей погоды»:

электрическое поле направлено вниз,  
ветер менее 3 м/с,  
отсутствие осадков,  
малая облачность.

- Стационарное состояние.
- Однородное в горизонтальной плоскости.

«Электродный эффект» :

Совокупность процессов вблизи электрода в слабоионизированной среде, приводящих к появлению зависимости электрических характеристик среды от расстояния до поверхности электрода.



# Уравнения электродного эффекта

подвижность аэроионов,

концентрации аэроионов,

$$\frac{d}{dz} \left( -D(z) \frac{dn_{\pm}}{dz} \pm bEn_{\pm} \right) = q - \alpha n_{+} n_{-},$$

высота, аэроэлектрическое поле,

коэффициент рекомбинации аэроионов,

$$\frac{dE}{dz} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_{+} - n_{-}),$$

интенсивность ионообразования,

$$D(z) = D_0 (z + z_0),$$

параметр шероховатости земной поверхности,

коэффициент турбулентной диффузии,

аэроэлектрическое поле над приземным слоем

$$E|_{z \rightarrow \infty} = -E_{\infty}, \text{ или } E|_{z=0} = -E_0, \leftarrow \text{ аэроэлектрическое поле на уровне земли}$$

$$n_{-}|_{z=0} = 0, \quad n_{\pm}|_{z \rightarrow \infty} = n_0. \leftarrow \text{ равновесная концентрация аэроионов}$$

$$\left. \frac{dn_{+}}{dz} \right|_{z=0} = \frac{1}{k} n_{+}|_{z=0} \xrightarrow{k \rightarrow 0} n_{+}|_{z=0} = 0. \leftarrow \text{ граничное условие при } D \neq 0$$

# Турбулентный электродный эффект ( $D \neq 0$ )

## Формулировка краевой задачи

$$\frac{d}{dz} \left( -D_0(z+z_0) \frac{dn_+}{dz} + bEn_+ \right) = q - \alpha n_+ n_-$$

$$\frac{d}{dz} \left( -D_0(z+z_0) \frac{dn_-}{dz} - bEn_- \right) = q - \alpha n_+ n_-$$

$$\frac{d}{dz} E = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_+ - n_-)$$

$$n_{\pm} \Big|_{z=0} = 0$$

$$n_{\pm} \Big|_{z \rightarrow \infty} = n_0 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}$$

$$E \Big|_{z=0} = -E_0$$

## Измеряемые величины

$T$  | температура

$w$  | компоненты

$u$  | скорости

$v$  | ветра

$p$  | давление

$E$  | электрическое поле

$D$  | коэффициент

диффузии

## Определение параметров

$$D = \frac{\sqrt{\langle w' \cdot v' \rangle^2 + \langle w' \cdot u' \rangle^2}}{dw/dz}$$

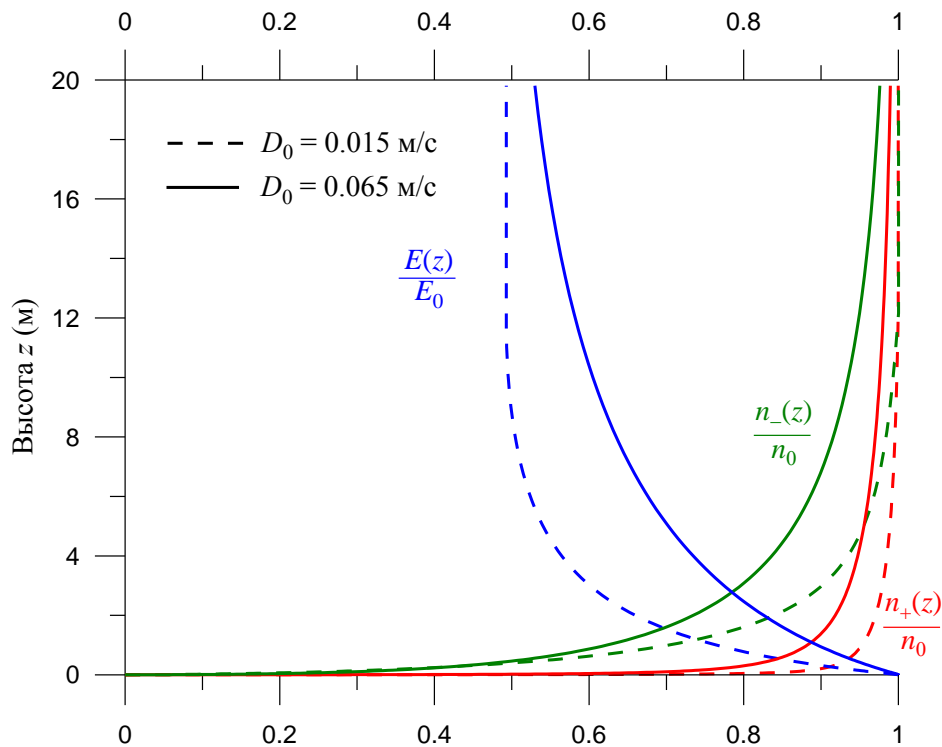
$$q = q_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} \quad b = b_0 \frac{T}{T_0} \frac{p_0}{p}$$

$$\alpha = \frac{1.75}{M^{1/2}} \cdot 10^{-5} \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{3}{2}} f(x)$$

$$f(x) = 1 - \frac{4}{x^4} \left( 1 - (x+1)e^{-x} \right)^2$$

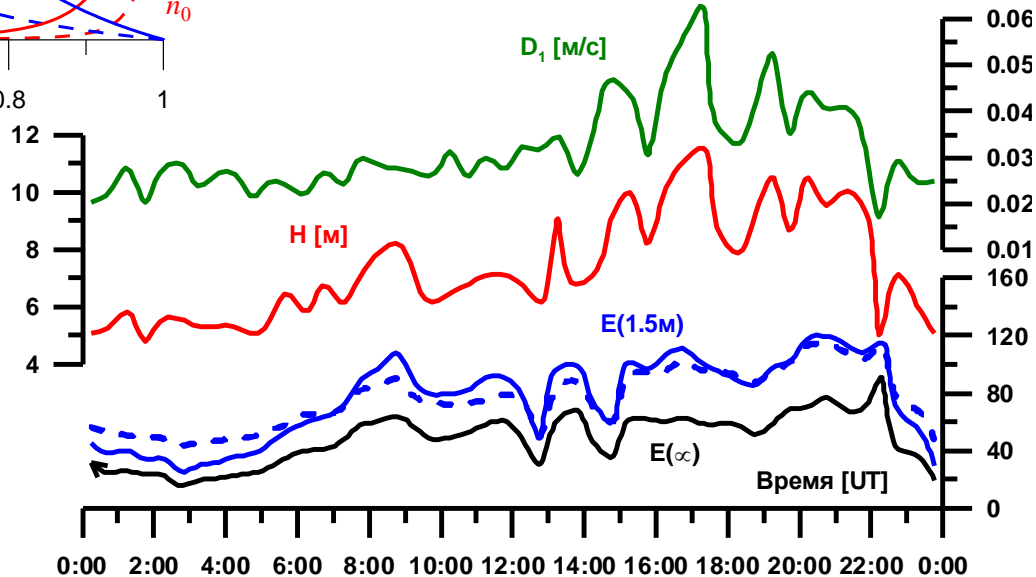
$$x = 0.81 \left( \frac{T_0}{T} \right)^2 \left( \frac{p}{p_0} \right) \frac{L_A}{L}$$

# Турбулентный электродный эффект

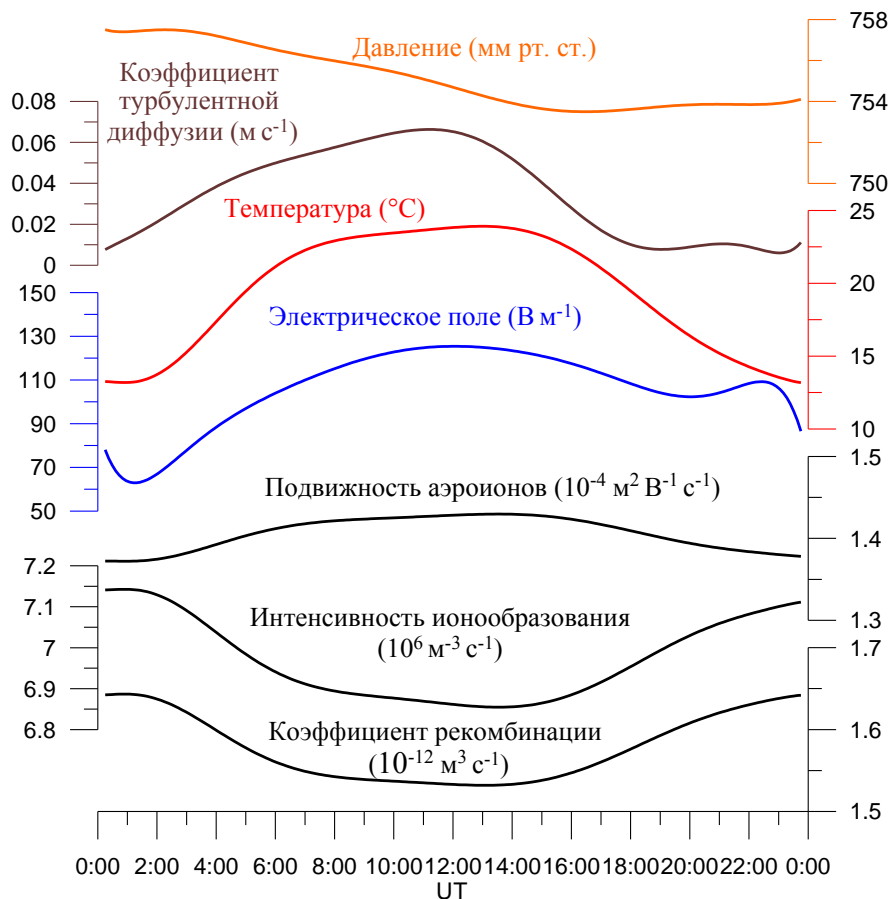


Характерные высотные профили  
аэроэлектрического поля и  
концентраций легких аэроионов  
для турбулентного электродного эффекта

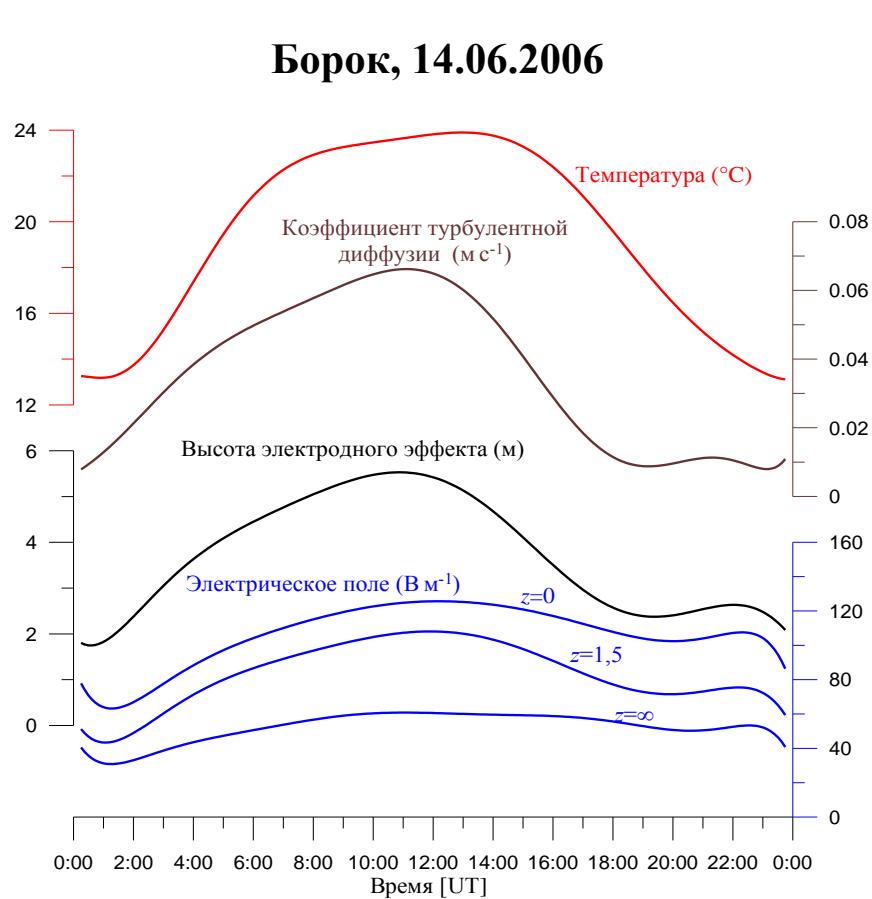
Расчет коэффициента турбулентной  
диффузии ( $D_1$ ),  
высоты электродного слоя ( $H$ ),  
аэроэлектрического поля ( $E$ ),  
по данным наблюдений 19.09.2009.  
Штриховая линия — данные  
измерений аэроэлектрического поля  
на высоте 1.5 м.



# Турбулентный электродный эффект

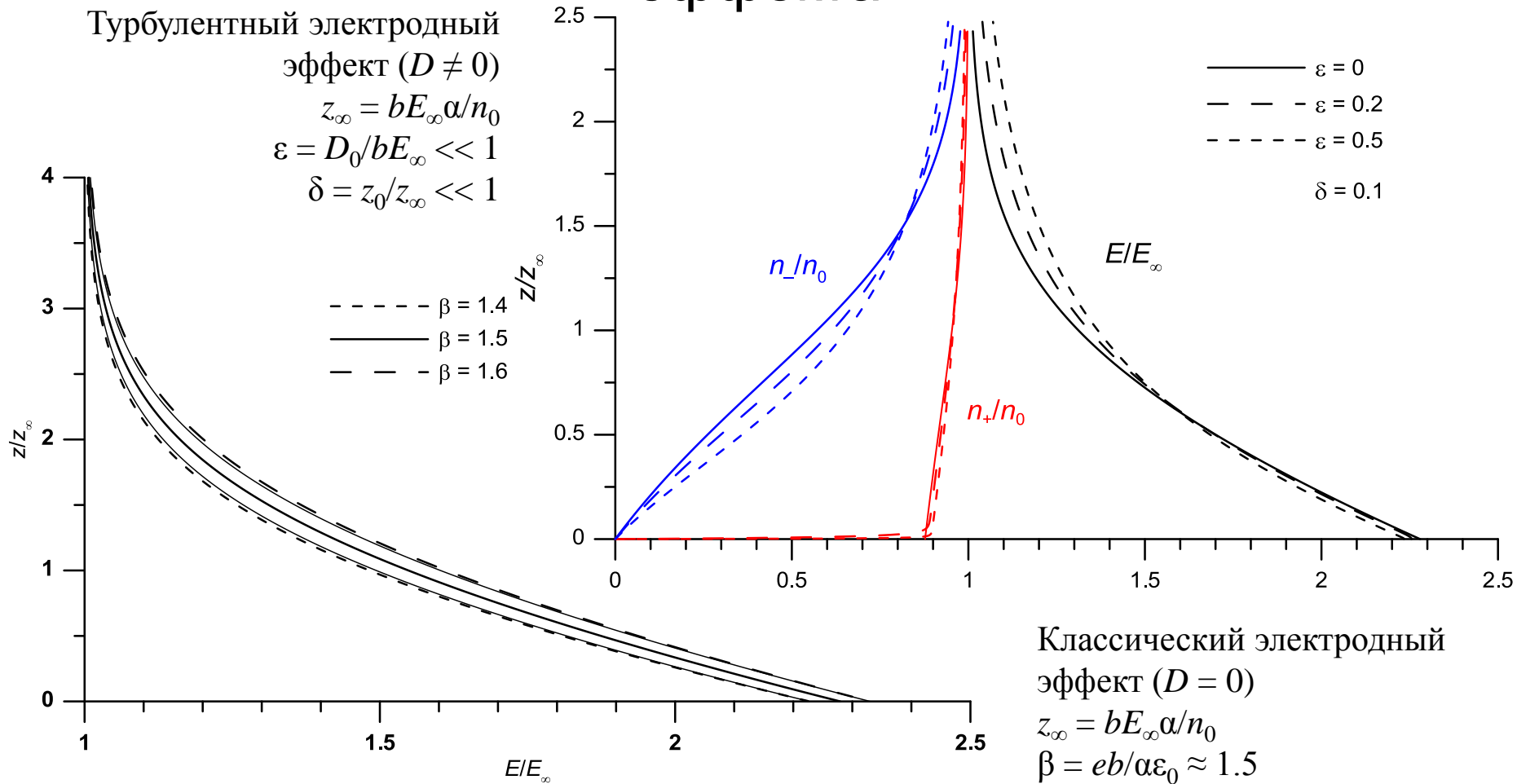


Наблюдаемые (цветные кривые) и рассчитанные (черные кривые) параметры модели



Поведение температуры, коэффициента турбулентной диффузии и характеристик электродного эффекта

# Аналитические оценки для электродного эффекта

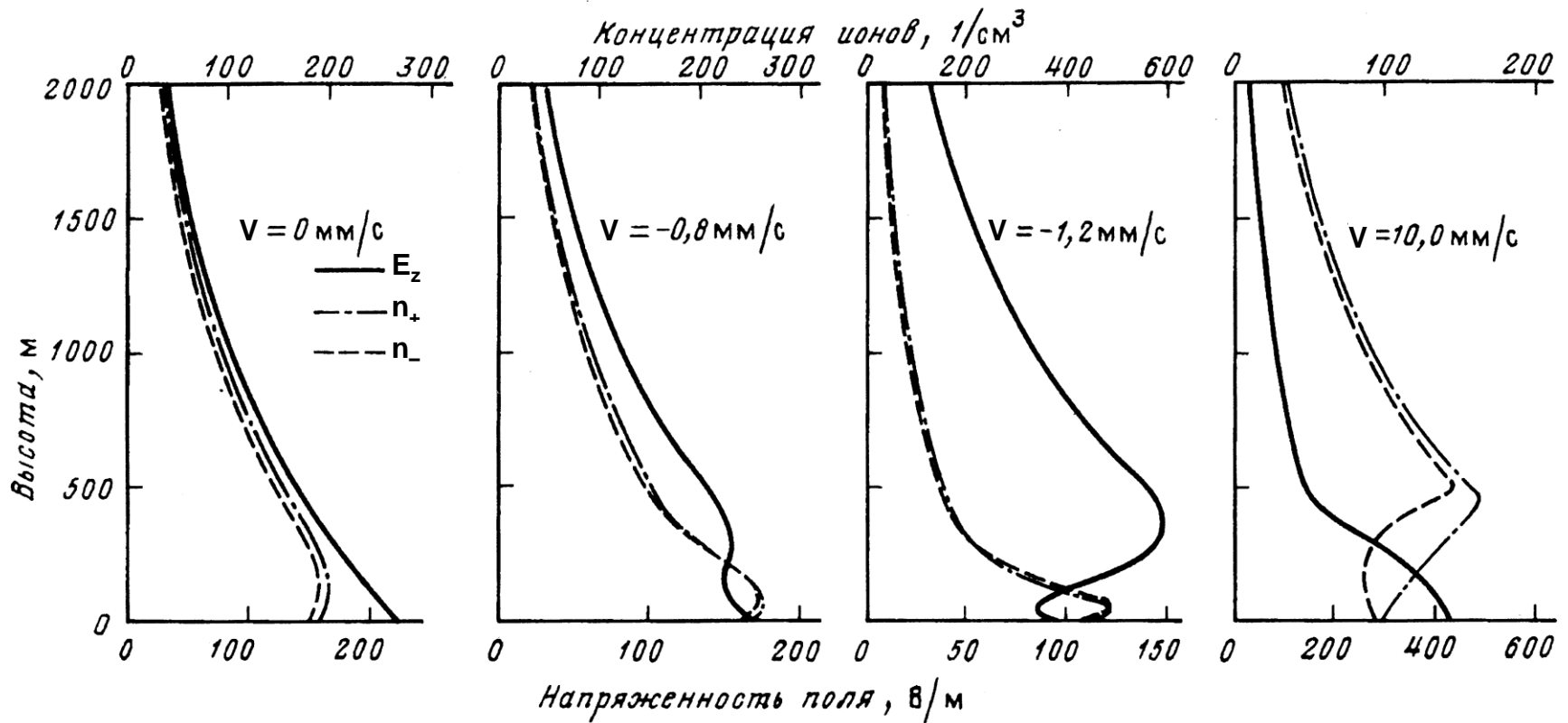


Дмитриев Э.М., Филиппов В.А. Аналитическое решение задачи классического электродного эффекта в приземной атмосфере // Геофизические исследования. 2010. Т. 11, № 4. С.53–59.

Дмитриев Э.М. Асимптотическое решение задачи приземного электродного эффекта при слабом турбулентном перемешивании // Геофизические исследования. 2011. Т. 12, № 4. С.52–58.



# Высотные аэроэлектрические профили



Виды высотных аэроэлектрических профилей в зависимости от скорости вертикальной конвекции.  $V$  – максимальная скорость конвекции,  $E_z$  – напряженность поля,  $n_{\pm}$  – концентрации ионов.

Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Формирование высотного профиля электрического поля слабоионизированной атмосферы, Геомагнетизм и аэрномия, т.37, № 1, с.209-218, 1997.

Anisimov S.V., Dmitriev E.M., Aeroelectrical altitude profile in limit of regular convection, J.Atmos.Electr., v.19, №1, p.25-33, 1999.

## Результаты

Получены оценки характерных пространственно-временных масштабов для различных типов электродного эффекта.

Построена модель формирования высотных профилей электрических параметров приземной атмосферы, учитывающая влияние аэродинамических факторов.

Модель позволяет рассчитывать изменения аэроэлектрических параметров приземного слоя по данным непрерывных наземных наблюдений.

Получены приближённые аналитические решения для задачи классического электродного эффекта и турбулентного электродного эффекта при слабом турбулентном перемешивании.

Получена аналитическая оценка величины электродного эффекта при наличии аэрозольных частиц.

# Оперативный мониторинг параметров пограничного слоя атмосферы с помощью наземных электрических измерений

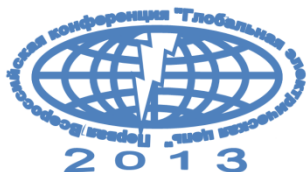
В Научные Советы РАН по проблемам  
«Исследования по теории климата Земли»  
«Солнце-Земля»  
Рекомендован в отчет РАН

Экспериментально исследованы характеристики электрогазодинамической турбулентности в пограничном слое атмосферы как в условиях развитой конвекции, так и при устойчивой стратификации. Предложен и реализован метод мониторинга параметров приземного слоя атмосферы, основанный на измерениях характеристик атмосферного электричества – электрического поля, тока и проводимости. Установлено, что даже в условиях долгоживущего ночного устойчивого пограничного слоя высотой до 200 м регулярно формируются области турбулентного перемешивания и аэроэлектрические структуры.

Авторы: С.В.Анисимов, С.В.Галиченко, Н.М.Шихова (Институт физики Земли РАН), Е.А.Мареев, М.В. Шаталина (Институт прикладной физики РАН), С.С.Зилитинкевич (ННГУ).

## Литература

1. S. V. Anisimov, E. A. Mareev, N. M. Shikhova, M. V. Shatalina, S. V. Galichenko, S. S. Zilitinkevich, Aeroelectric structures and turbulence in the atmospheric boundary layer // *Nonlin. Processes Geophys.*, 20, 819–824, 2013.
2. S.V. Anisimov, N.M. Shikhova, Intermittency of turbulent aeroelectric field, *Atmospheric Research*, 2013. Available online 4 February 2013, S.V. Anisimov, N.M. Shikhova. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.018>.
3. S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, N.M. Shikhova, Space charge and aeroelectric flows in the exchange layer: An experimental and numerical study, *Atmospheric Research*, 2013. Available online 15 February 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.012>.
4. Анисимов С.В., Галиченко С.В., Шихова Н.М. Формирование электрически активных слоев атмосферы с температурной инверсией // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2012, Т. 48, № 4, С. 442-452, DOI: 10.1134/S0001433812040020.



# Первая Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь»

## Материалы конференции



Всероссийская конференция

УДК 621.3.01(063)  
ББК 31.211я431  
Г54

Глобальная электрическая цепь. Материалы Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль, 2013. – 136 с.

ISBN 978-5-91730-265-2

Ответственный редактор:  
д.ф.-м.н. С.В. Анисимов

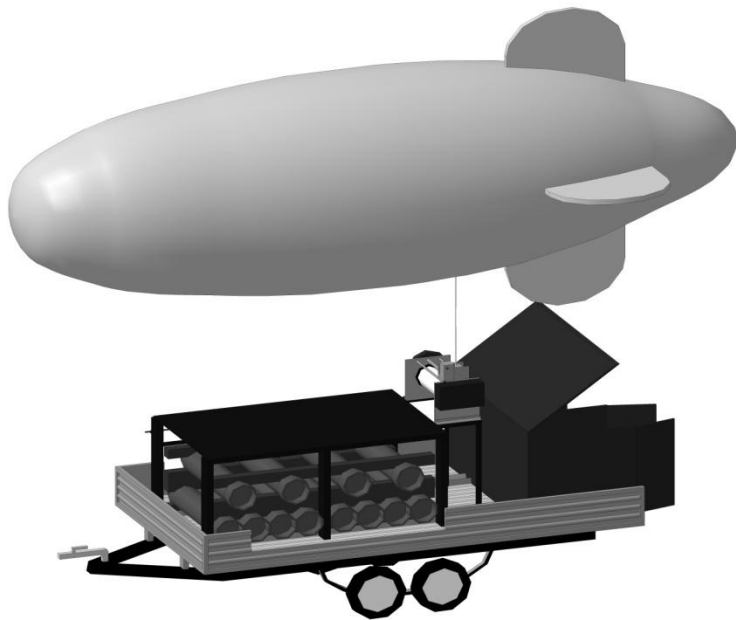
В сборнике материалов первой всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований глобальной электрической цепи. Для ученых, работающих в области глобальной электрической цепи, атмосферного электричества, геомагнетизма, физики атмосферы и смежных областях, преподавателей и студентов ВУЗов.

Проведение конференции и издание материалов осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Отделения наук о Земле РАН, Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

ISBN 978-5-91730-265-2

© 2013 ГО «Борок» ИФЗ РАН  
макет, оформление, верстка  
© Коллектив авторов, текст

# Performed&planned experiments



1. Грант РФФИ №09-05-00888-а «Закономерности и физические механизмы формирования электричества нижней атмосферы в глобальной электрической цепи (экспериментальное исследование и численное моделирование)», (2009–2011 гг.)
2. Грант РФФИ №10-05-10016-к "Организация и проведение комплексных полевых среднеширотных геофизических исследований", 2010 - 2010г. - руководитель.
3. Грант РФФИ №11-05-10011-к "Организация и проведение полевых среднеширотных геофизических исследований формирования глобальной электрической цепи", 2011 - 2011г.
4. 11-05-06810-моб\_г Организация и проведение XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», 2011 - 2011г.
5. Грант РФФИ №12-05-00820-а «Электрическая стратификация атмосферы в глобальной электрической цепи», (2012–2014 гг.)
6. Грант РФФИ №12-05-10023-к Организация и проведение полевых среднеширотных геофизических исследований электроаэродинамики глобальной электрической цепи 2012 - 2012г.
7. Грант РФФИ №13-05-10005 "Организация и проведение полевых разнесенных геофизических исследований глобальной электрической цепи", 2013-2013г.
8. Грант РФФИ №13-05-06101 "Научный проект организации Всероссийской конференции "Глобальная электрическая цепь"", , 2013-2013г.
9. Грант РФФИ №13-05-12060-офи\_м "Геокосмофизические процессы формирования глобальной электрической цепи", 2013-2015г.
10. Грант РФФИ № «09-05-05009» - мтб «Развитие МТБ для проведения исследований в области знаний 05 по направлению исследований формирования глобальной электрической цепи» (2009г.)
11. Грант РФФИ №10-05-05040 - мтб «Развитие МТБ для проведения исследований в области знаний 05 по направлению формирования глобальной электрической цепи» (2010 г.) .
12. Грант РФФИ №11-05-05003 - мтб «Развитие МТБ для проведения исследований в области знаний 05 по направлению глобальной электрической цепи» (2011 г.) .

Спасибо за внимание!

