ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭДС КОНВЕКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕВОЗМУЩЁННОЙ АТМОСФЕРЫ НАД СУШЕЙ СРЕДНИХ ШИРОТ

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А.

ГО «Борок» ИФЗ РАН, Лаборатория геофизического мониторинга

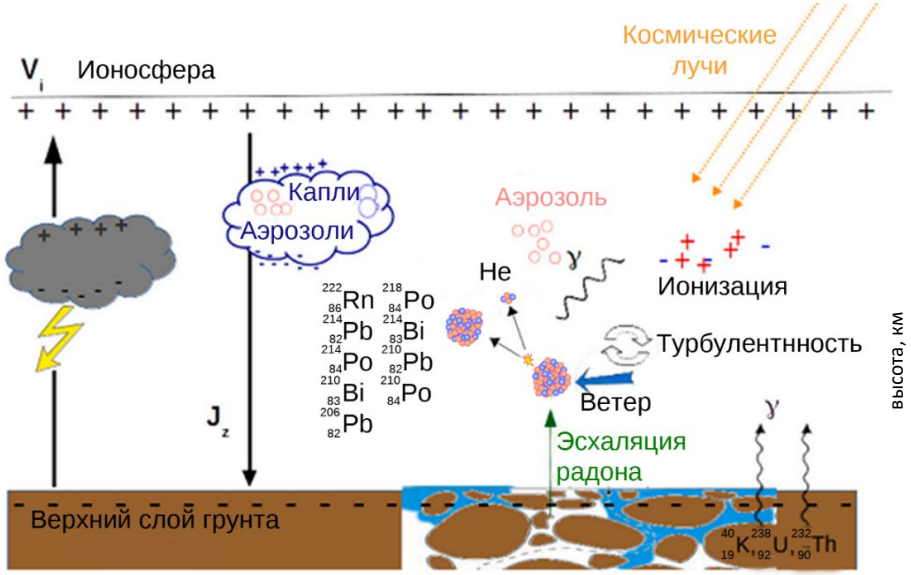
Электродинамика атмосферного пограничного слоя

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

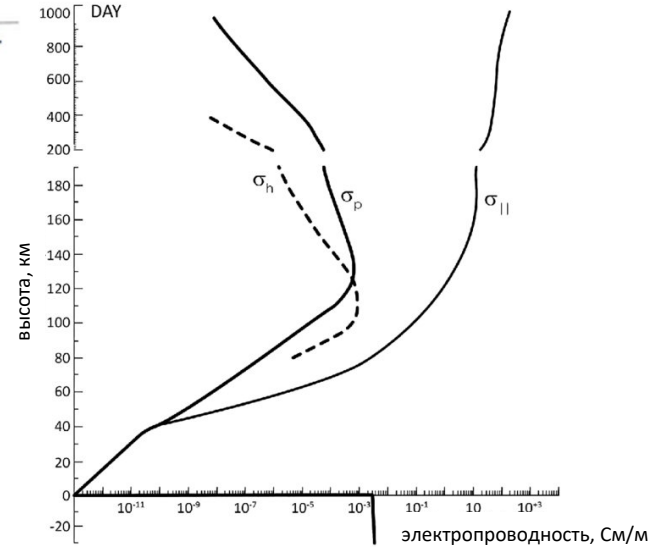
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$



вертикальный профиль электропроводности атмосферы



электропроводность нижней атмосферы

$$\sigma_{\pm} = \int_{\mu_1}^{\mu_2^{\pm}} \mu f_{\pm}(\mu)\, d\mu \approx e\left(\overline{\mu^{+}} \sum_i n_i^{+} + \overline{\mu^{-}} \sum_k n_k^{-}\right)$$

μ - подвижность ионов
n - концентрация ионов
f(μ) - распределение ионов по подвижности

Уравнения баланса заряженных частиц

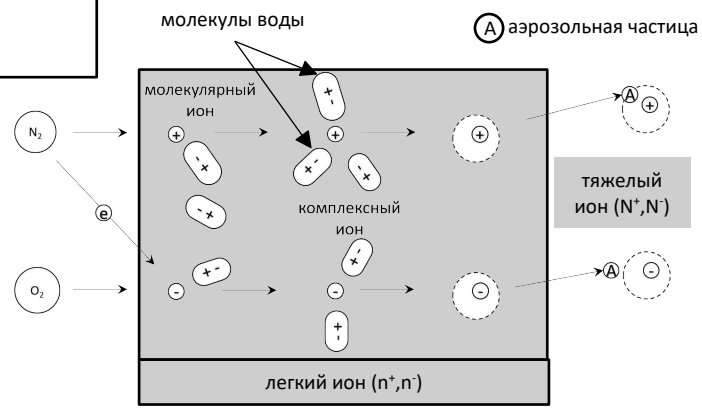
$$\frac{\partial n^{\pm}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot\nabla)\, n^{\pm} = q - \alpha n^{\pm} n^{\mp} - n^{\mp} \sum_j \beta_j^{\pm}(r) \frac{dN_j^{\pm}(r)}{dr} dr - \nabla\left(\overrightarrow{\mu^{\pm}} n^{\pm} \vec{E}\right) + \nabla\left(\overrightarrow{D^{\pm}} \nabla n^{\pm}\right)$$

$$\frac{\partial N_{im}}{\partial t} + (\vec{v}\cdot\nabla)\, N_{im} = n^{+}\beta_{i-1m}^{+} N_{i-1m} - n^{+}\beta_{im}^{+} N_{im} + n^{-}\beta_{i+1m}^{-} N_{i+1m} - n^{-}\beta_{im}^{-} N_{im}$$

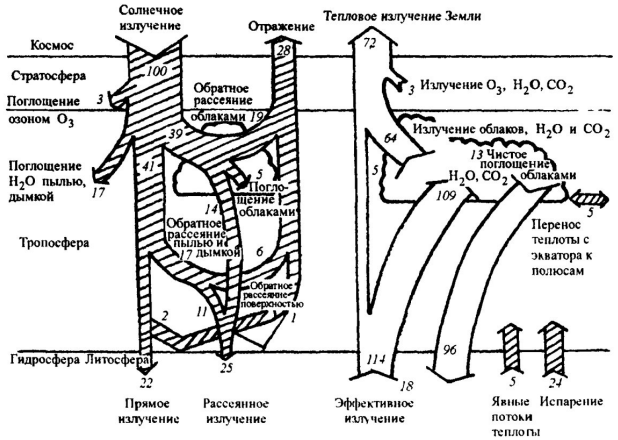
Интенсивность ионизации атмосферы

$$q = q_g + q_c + q_r$$

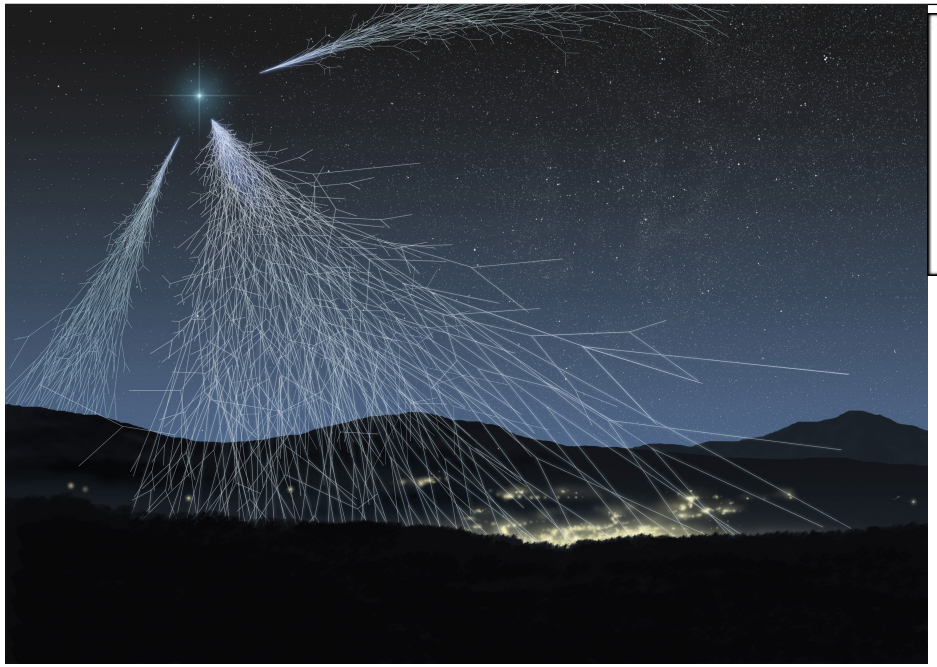
q_g – радиоактивность грунта (г.о. γ-излучение, ряды ^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K),
q_c – галактические космические лучи,
q_r – активность цепочек распада ^{222}Rn и ^{220}Rn (в атмосфере)



радиационный баланс



Ионизирующее излучение



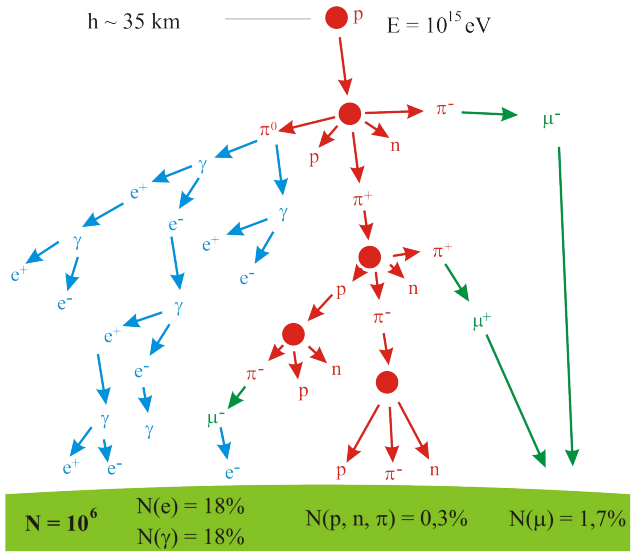
типы излучения:

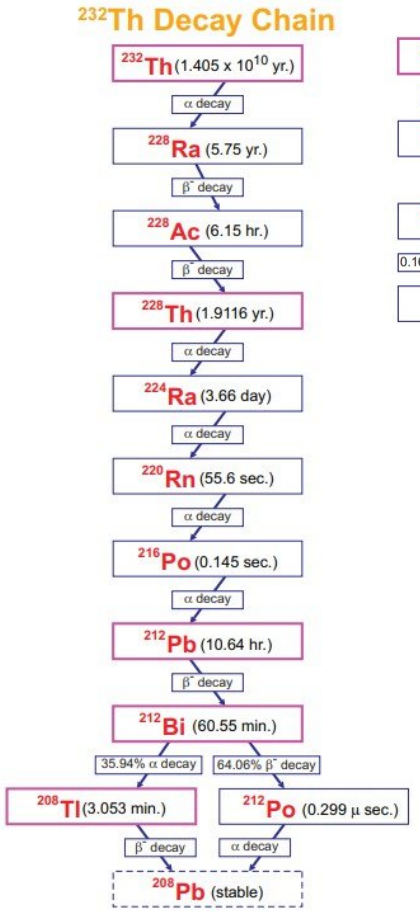
- α ($^4_2He^{2+}$)
- β (e^-)
- γ (фотоны)

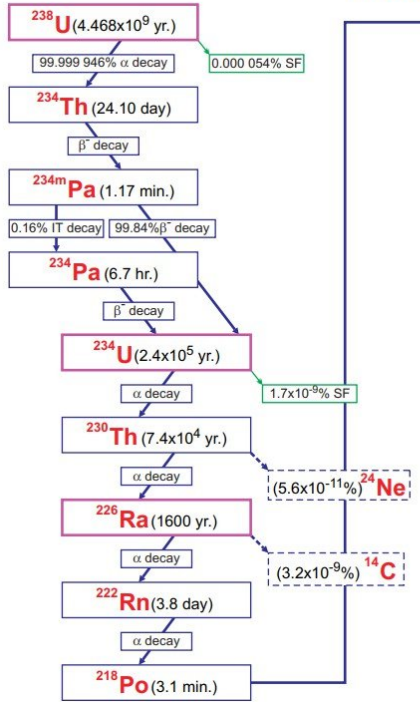
галактические космические лучи (ГКЛ)

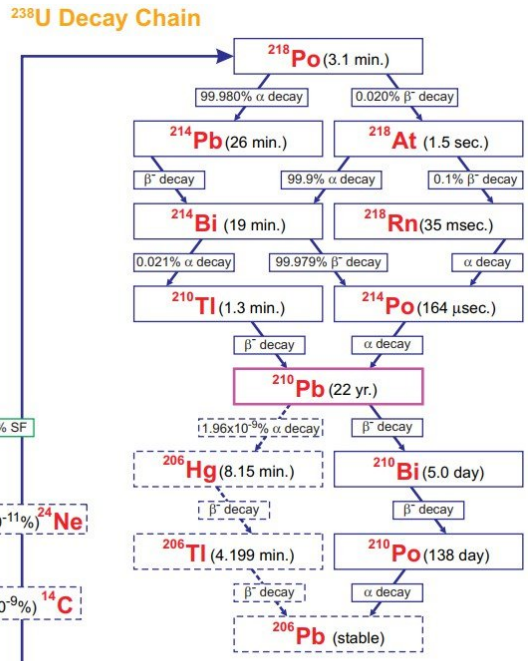
радиоактивные газы в атмосфере и их дочерние продукты

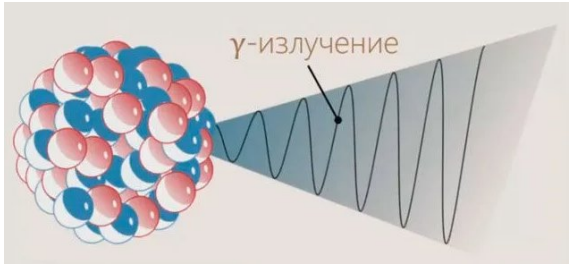
радионуклиды в почве









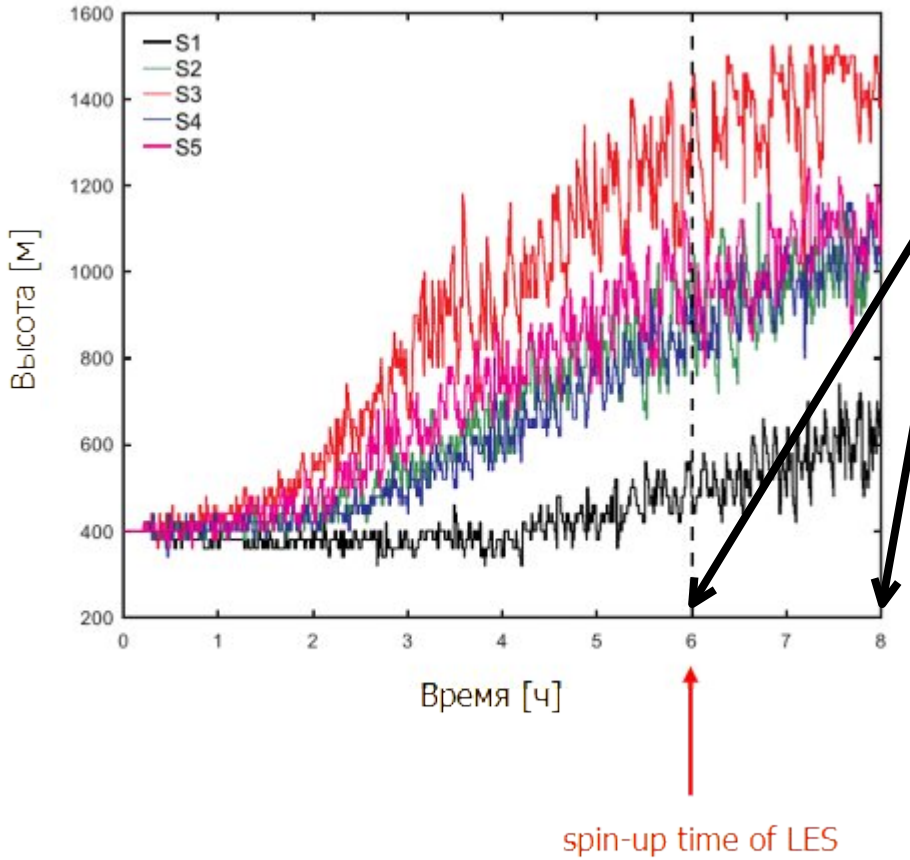


Численное моделирование электродинамики АПС

Электродинамическая модель АПС использует решение вихреразрешающего моделирования (LES), осуществляемого PALM.

PALM – система и программный инструмент для вихреразрешающего моделирования пограничных слоёв атмосферы и океана.

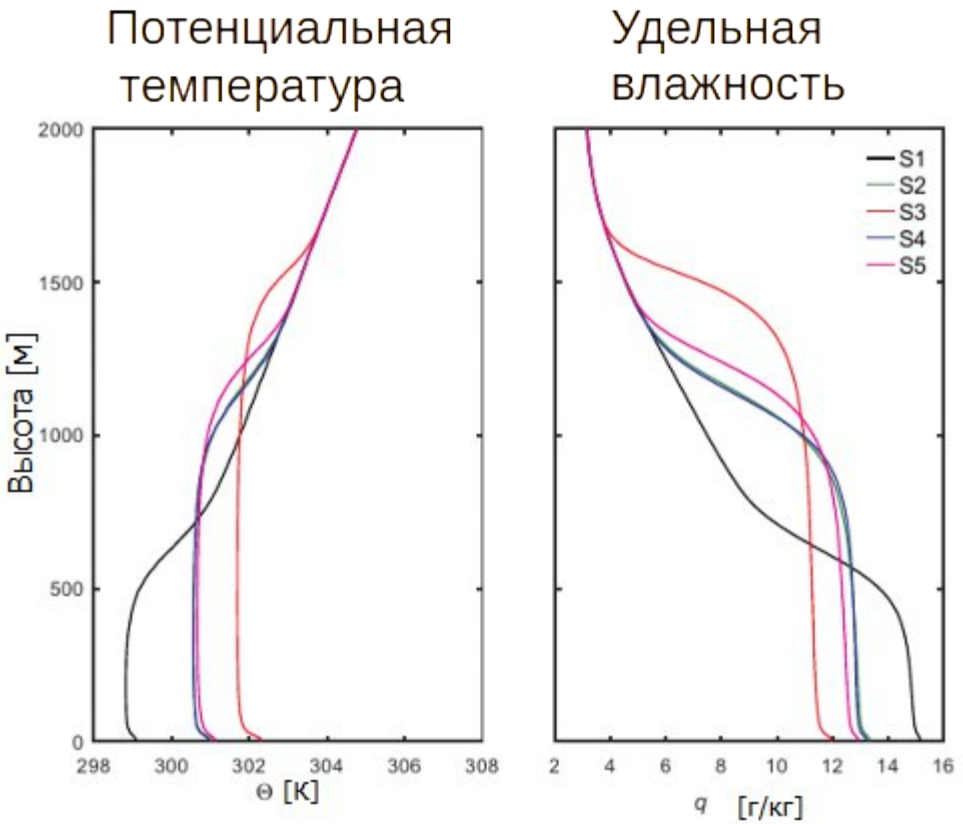
Эволюция высоты слоя конвективного перемешивания z_i



S1, S2,… - настройки PALM и электродинамической модели, отличающиеся значениями параметров

Временной отрезок после разгона LES используется для моделирования электродинамики АПС.

Численное моделирование электродинамики АПС



$$\theta = T\left(\frac{p_0}{p}\right)^{R/(Mc_p)}$$

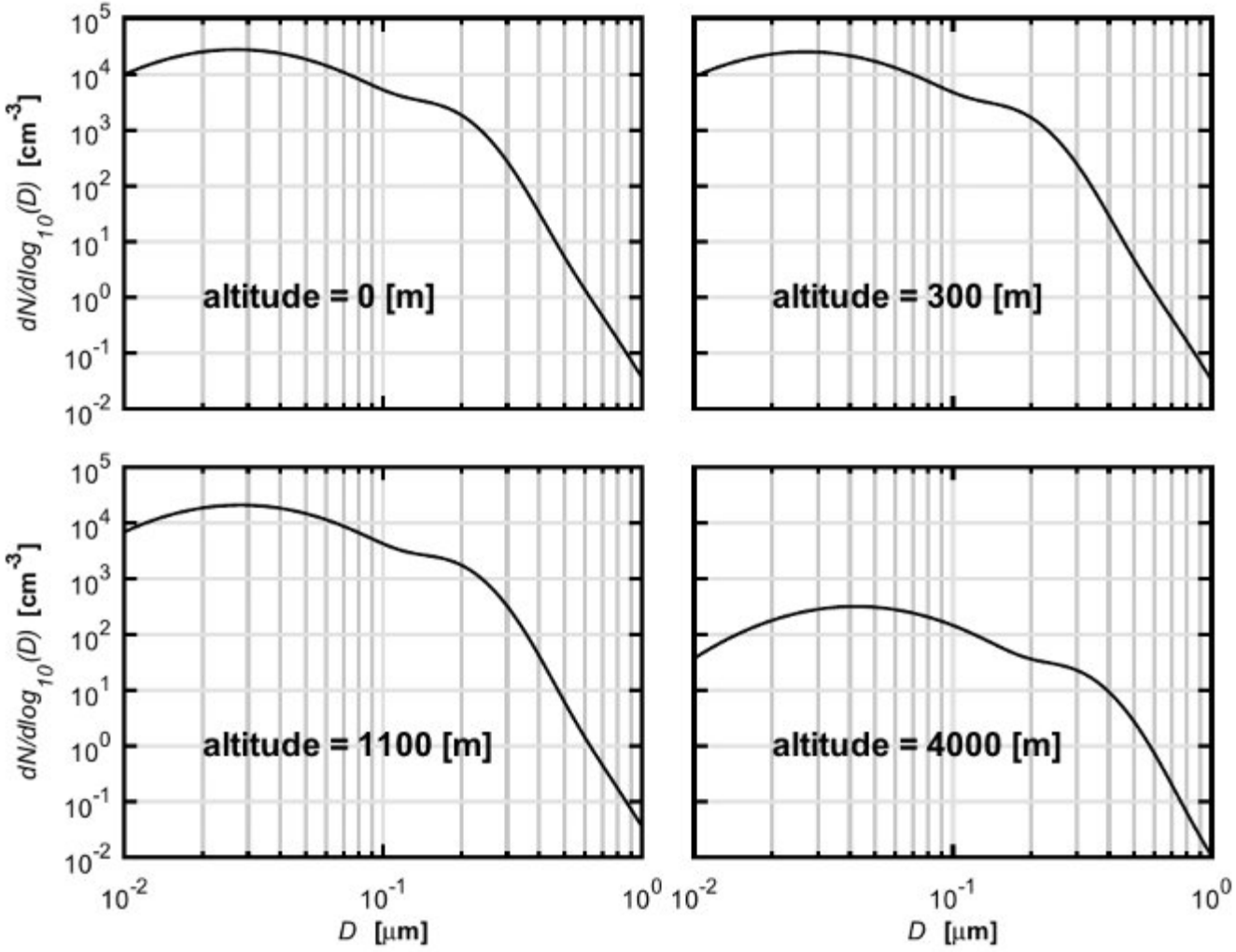
$$R/(Mc_p) = 0.286$$

$$q = \frac{0.622e}{p - 0.378e}$$

$$e = \frac{a_w RT}{M_w}$$

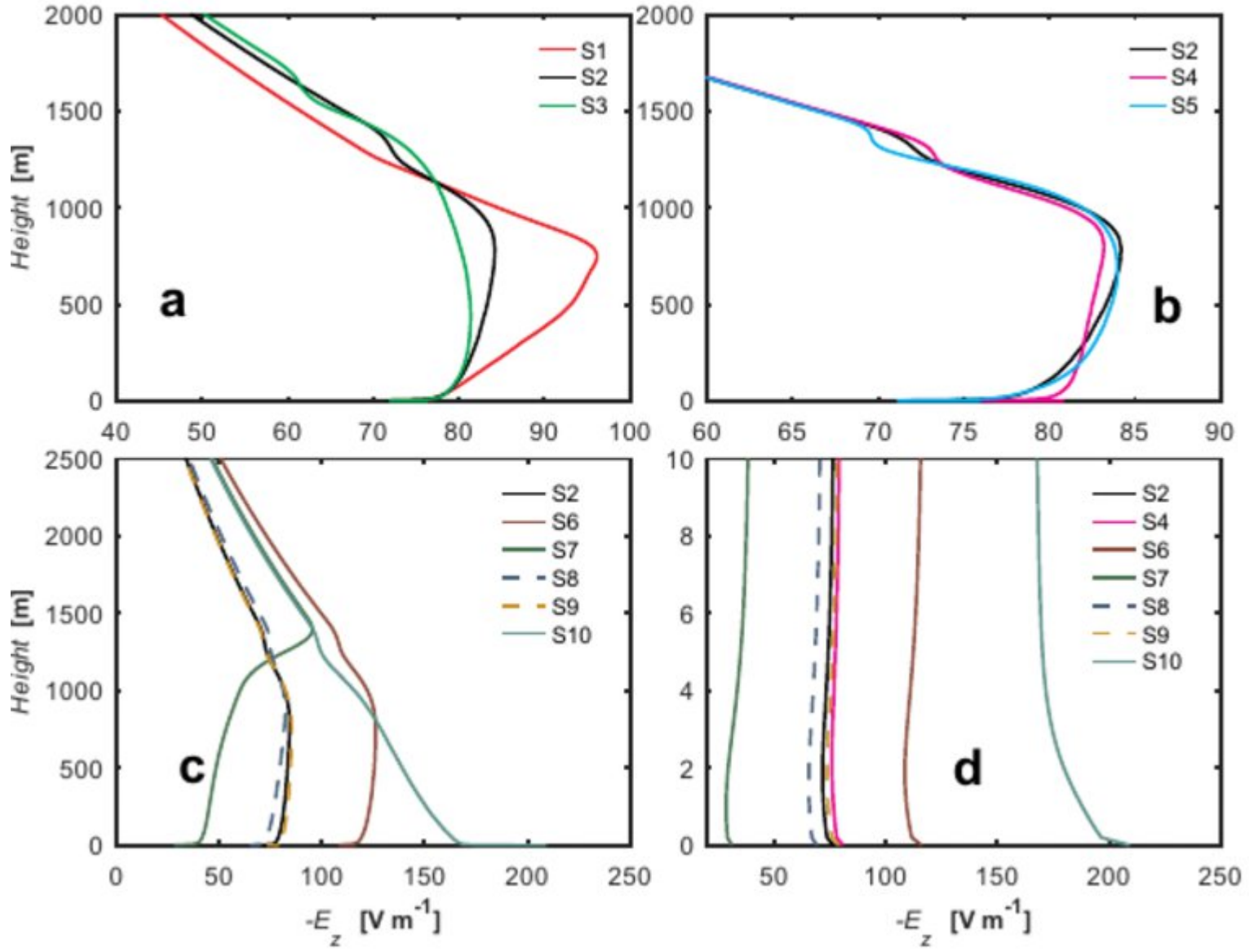
Численное моделирование электродинамики АПС

Начальное распределение аэрозольных частиц
по высоте и размерам



Численное моделирование электродинамики АПС

Вертикальные профили вертикальной компоненты атмосферного электрического поля

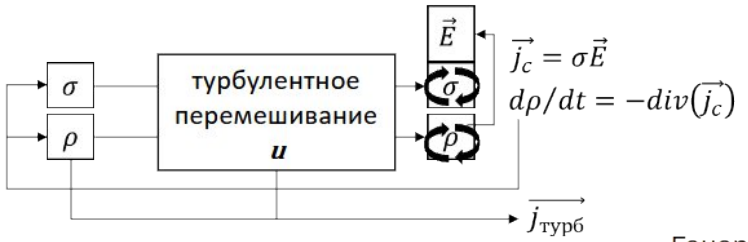


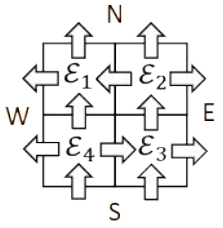
Численное моделирование электродинамики АПС

Big data

Горизонтально-однородная электродинамическая модель была реализована при всех сочетаниях значений следующих параметров модели из соответствующих наборов значений:
H_s: 100, 150 Вт/м^2;
AM: 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0;
F_R: 2000, 4000, 6000, 8000, 10000 1/м^2/с;
F_T: 20, 100 1/м^2/с,

где H_s – параметр PALM, плотность потока явного тепла с поверхности земли в атмосферу, AM – доля от эталонной счетной концентрации аэрозольных частиц, F_R – плотность эксхаляции атомов радона-222 в атмосферу на поверхности почвы, F_T – плотность эксхаляции атомов радона-220 в атмосферу на поверхности почвы. Всего 120 сочетаний. Состояние электродинамической модели во второй час используется для получения конечных продуктов постобработки, в т.ч. ЭДС АПС.





Генерация разности потенциалов между смежными областями АПС

$$\mathcal{E} = \int_0^{H_Д} \frac{j_{турб}}{\sigma} dz = V_i\,(\gamma_V - \gamma_R)/(1 - \gamma_R)$$

$$\gamma_V = V_{H_Д}/V_и \quad \gamma_R = R_{H_Д}/R_и$$

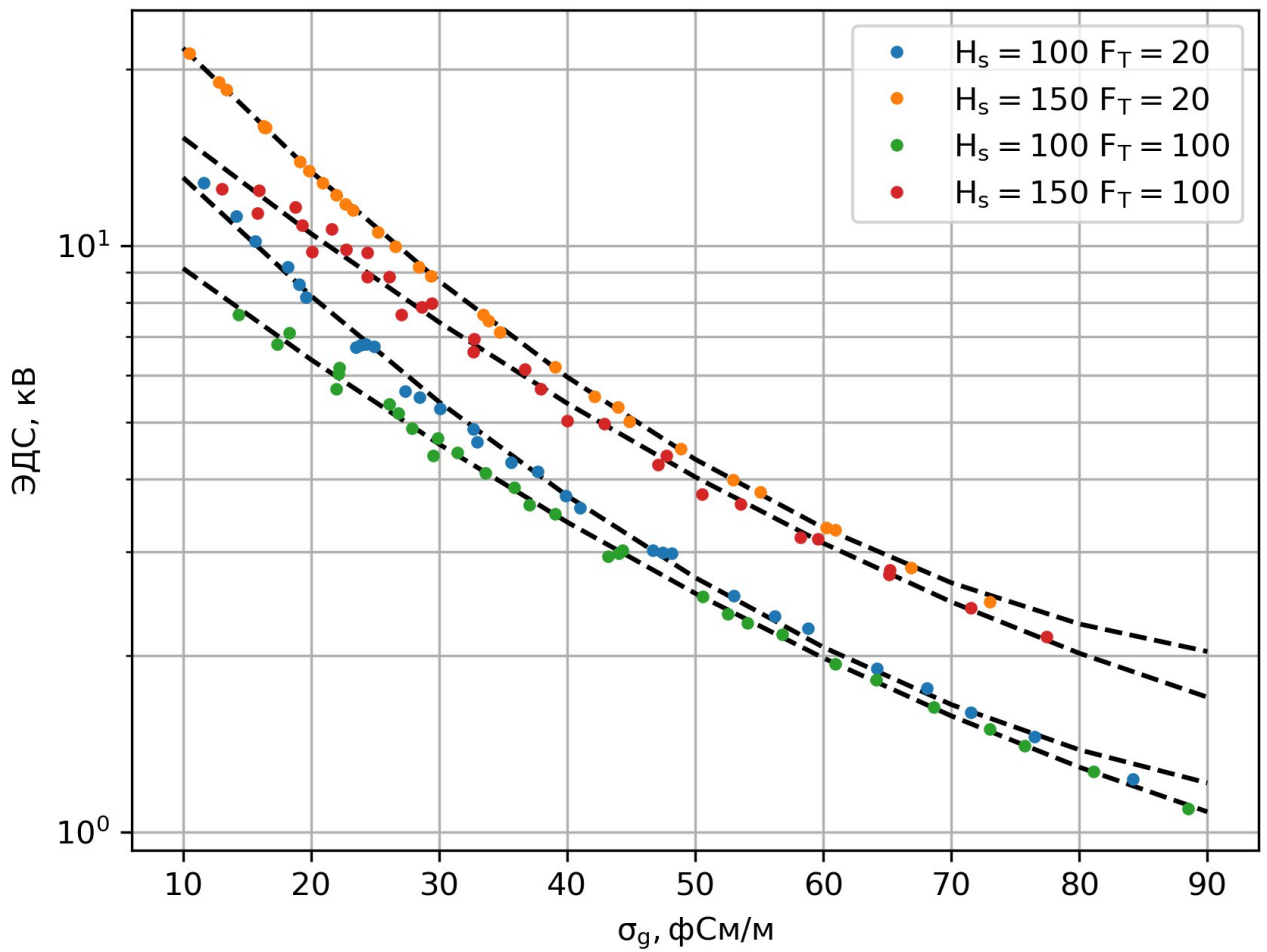
$V_и = V_i$ – разность электрических потенциалов поверхности земли и ионосферы
$R_и$ – сопротивление столба атмосферы единичной площади
$H_Д$ – высота рассчетного домена. $H_Д > z_i$.

$V_{H_Д}$ - электрический потенциал на высоте $H_Д$ относительно поверхности земли

$R_{H_Д}$ - столбовое сопротивление между поверхностью земли и высотой $H_Д$

$\mathcal{E}$ - ЭДС

Численное моделирование электродинамики АПС



σ_g – приземная электропроводность воздуха

Модель для регрессии: $E_0 * \exp(a\sigma^2 + b\sigma)$

Таблица результатов регрессии ЭДС решений электродинамической модели

	E_0, кВ	a, 10^{-4}(м/фСм)^2	b, 10^{-2}м/фСм
H_s=100 F_T=20	21.8	2.39	-5.36
H_s=150 F_T=20	37.2	2.69	-5.65
H_s=100 F_T=100	13.4	1.31	-3.97
H_s=150 F_T=20	22.9	1.46	-4.21

Выводы

Увеличение общего поверхностного турбулентного теплового потока и уменьшение электропроводности атмосферы приводит к увеличению ЭДС. ЭДС конвективного генератора в хорошую погоду по отношению к проводимости на уровне земли аппроксимируется экспонентой с полиномом второй степени в качестве аргумента. На основании полученных оценок предполагается, что вклад генератора конвекции в хорошую погоду в поддержание ионосферного потенциала можно ожидать на уровне нескольких процентов от его величины.

Литература

1. Anisimov, S.V., Galichenko, S.V., Aphinogenov, K.V., Prokhorchuk, A.A., Kozmina, A.S. Turbulent electric current in the marine convective atmospheric boundary layer // Atmos. Res. 2019. 228, C. 86–94.
2. Anisimov, S.V., Galichenko, S.V., Aphinogenov, K.V., Prokhorchuk A.A. Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // Boundary-Layer Meteorol, V. 167, P. 327–348. 2018. https://doi.org/10.1007/s10546-017-0328-0
3. Anisimov, S.V., Galichenko, S.V., Prokhorchuk, A.A., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V. Measurements of the Atmospheric Electric Current Density by a Passive Horizontal Ring Antenna in the Surface Layer: Quasi-Stationary Approximation // Radiophys Quantum El V. 65, P. 809–827. 2023. https://doi.org/10.1007/s11141-023-10259-7
4. Petzold, A., M. Fiebig, H. Flentje, A. Keil, U. Leiterer, F. Schro¨der, A. Stifter, M. Wendisch, and P. Wendling, Vertical variability of aerosol properties observed at a continental site during the Lindenberg Aerosol Characterization Experiment (LACE 98), J. Geophys. Res., 107(D21), 8128, doi:10.1029/2001JD001043, 2002.

Спасибо за внимание

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025.