

**Математическая модель приземного
турбулентного электродного эффекта
с учётом поглощения аэроионов в слое
ниже высоты шероховатости
подстилающей поверхности**

Э. М. Дмитриев

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН

Ярославская обл., пос. Борок

Электродный эффект

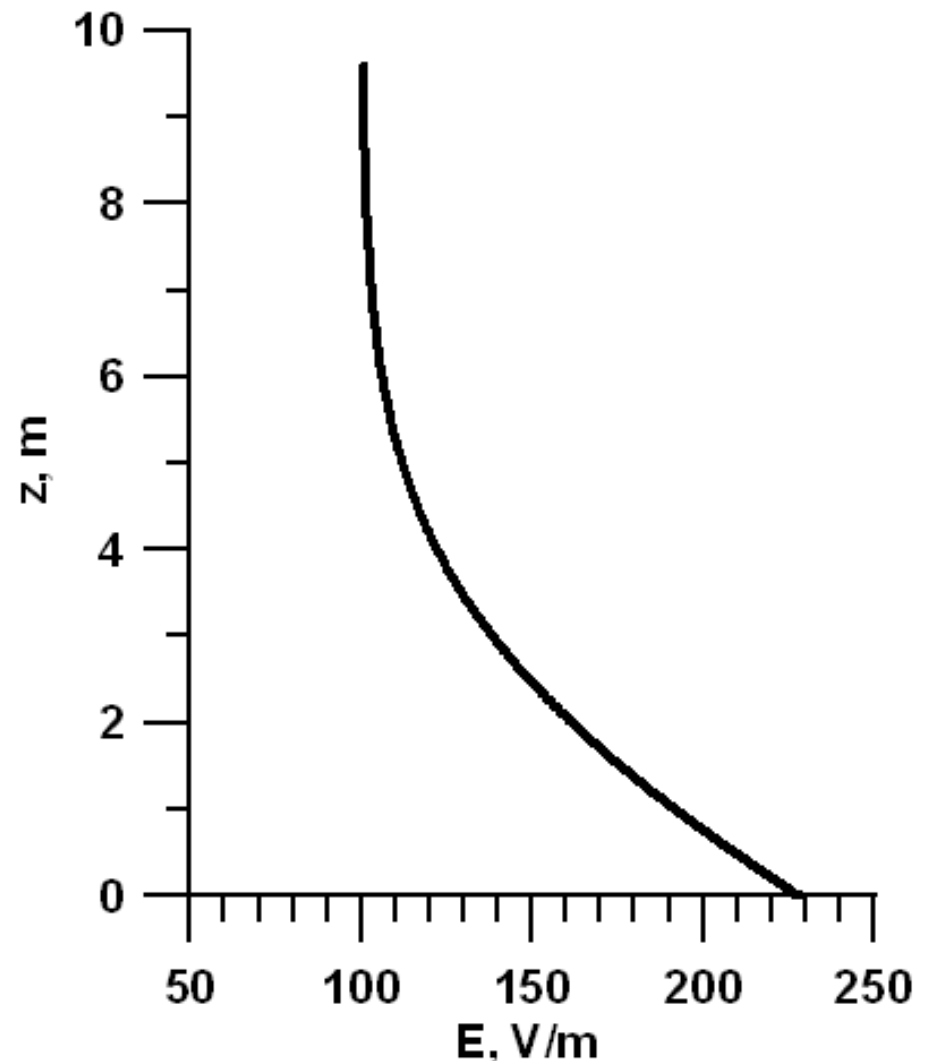
- Условия «хорошей погоды»:

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.



Классический электродный эффект

подвижности аэроионов

интенсивность ионообразования

$$\frac{d}{dz}(\pm b_{\pm} E n_{\pm}) = q - \alpha n_{+} n_{-},$$

высота

аэроэлектрическое поле

коэффициент рекомбинации аэроионов

$$\frac{dE}{dz} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_{+} - n_{-}),$$

концентрации аэроионов

внешнее аэроэлектрическое поле

$$E|_{z \rightarrow \infty} = E_{\infty},$$

равновесная концентрация аэроионов

$$n_{\pm}|_{z \rightarrow \infty} = n_{\infty} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad n_{-}|_{z=0} = 0.$$

Турбулентный электродный эффект

подвижности аэроионов концентрации аэроионов

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

высота,

аэроэлектрическое поле,

коэффициент рекомбинации аэроионов

коэффициент турбулентной диффузии,

интенсивность ионообразования

$$K_T(z) = K_0 z^m,$$

показатель роста:

$m = 1$ – устойчивая стратификация

$m = 4/3$ – неустойчивая стратификация

$$\frac{dE}{dz} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_{+} - n_{-}),$$

внешнее аэроэлектрическое поле

равновесная концентрация аэроионов

$$E|_{z \rightarrow \infty} = E_{\infty},$$

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

$$n_{\pm}|_{z=h} = 0. \quad ?$$

высота шероховатости подстилающей поверхности

Учёт процессов ниже высоты шероховатости

$$\frac{d}{dz} \left(- \left(K_M + K_0 z^m \right) \frac{dn_{\pm}}{dz} \pm b_{\pm} E n_{\pm} \right) = q - \alpha n_{+} n_{-}, \quad z > h,$$

$$\frac{d}{dz} \left(- K_M \frac{dn_{\pm}}{dz} \pm b_{\pm} E n_{\pm} \right) = q - \alpha n_{+} n_{-} - \frac{n_{\pm}}{T_A}, \quad z < h,$$

коэффициент
молекулярной диффузии,

характерное время поглощения
аэроионов поверхностью

$$\left(\pm b_{\pm} E n_{\pm} - \left(K_M + K_0 z^m \right) \frac{dn_{\pm}}{dz} \right) \Big|_{z \rightarrow +h} = \left(\pm b_{\pm} E n_{\pm} - K_M \frac{dn_{\pm}}{dz} \right) \Big|_{z \rightarrow -h},$$

плотность потоков аэроионов при $z < h$

$$n_{\pm} = T_A \left[q - \alpha n_{+} n_{-} - \frac{d}{dz} \left(- K_M \frac{dn_{\pm}}{dz} \pm b_{\pm} E n_{\pm} \right) \right] \xrightarrow[T_A \rightarrow 0]{?} 0, \quad z < h,$$

Характерные масштабы

$$\frac{d}{dz} \left(\pm L_{\pm} \left(\frac{E}{E_{\infty}} \right) \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right) - (L_M^2 + L_0^{2-m} z^m) \frac{d}{dz} \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right) \right) = 1 - \left(\frac{n_+}{n_{\infty}} \right) \left(\frac{n_-}{n_{\infty}} \right), \quad z > h$$

время
поглощения
аэроионов

$$\frac{d}{dz} \left(\pm L_{\pm} \left(\frac{E}{E_{\infty}} \right) \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right) - (L_M)^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right) \right) = 1 - \left(\frac{n_+}{n_{\infty}} \right) \left(\frac{n_-}{n_{\infty}} \right) - \frac{T_A}{T_R} \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right), \quad z < h$$

$$L_E \frac{d}{dz} \left(\frac{E}{E_{\infty}} \right) = \left(\left(\frac{n_+}{n_{\infty}} \right) - \left(\frac{n_-}{n_{\infty}} \right) \right)$$

время
релаксации
заряда

$$\left((L_M^2 + L_0^{2-m} z^m) \frac{d}{dz} \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right) \right) \Big|_{z \rightarrow +h} = \left(L_M^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right) \right) \Big|_{z \rightarrow -h},$$

концентрация
положительных
аэроионов
на земной
поверхности

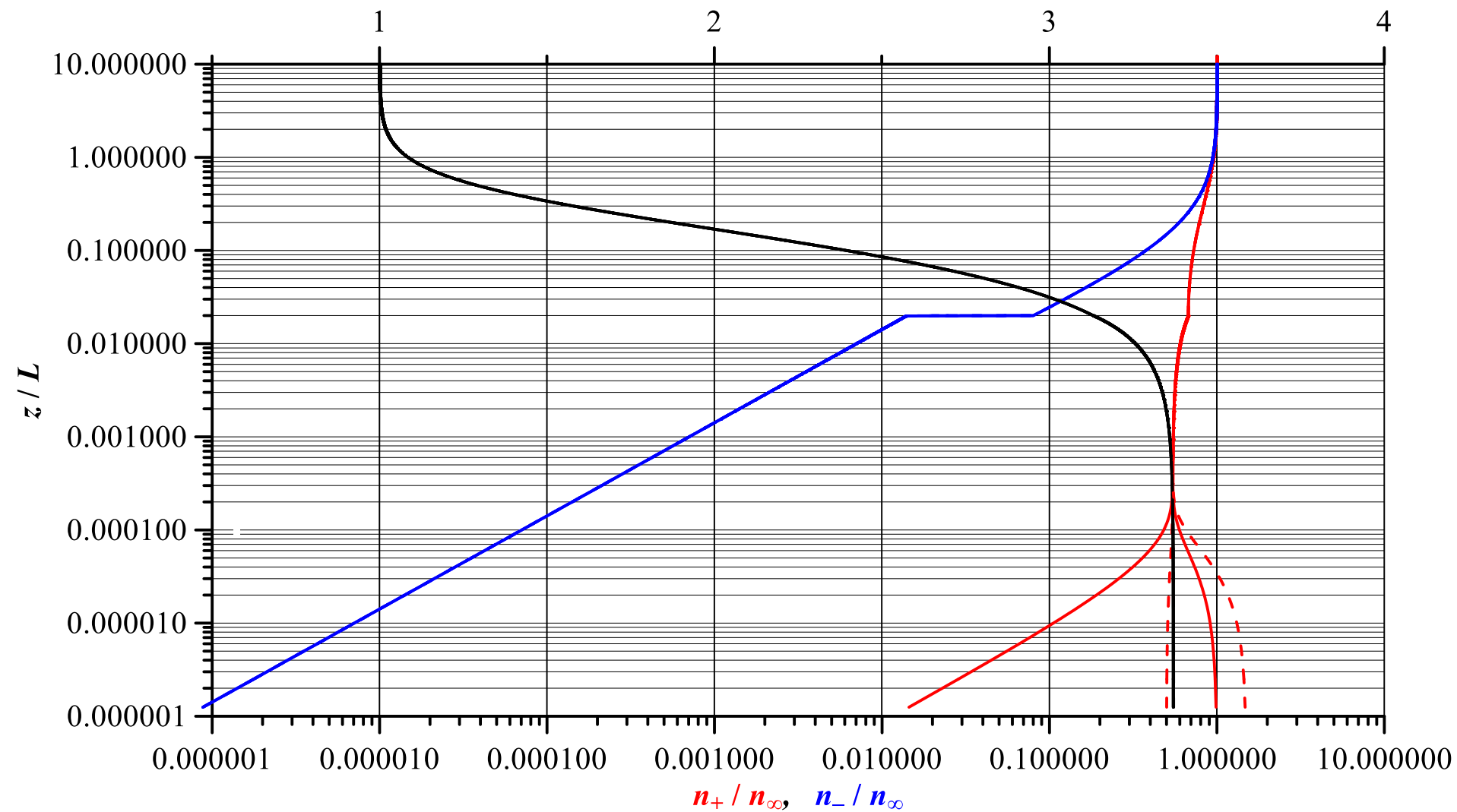
$$\left(\frac{E}{E_{\infty}} \right) \Big|_{z \rightarrow \infty} = 1, \quad \left(\frac{n_{\pm}}{n_{\infty}} \right) \Big|_{z \rightarrow \infty} = 1, \quad \left(\frac{n_-}{n_{\infty}} \right) \Big|_{z=0} = 0, \quad \left(\frac{n_+}{n_{\infty}} \right) \Big|_{z=0} = n_{+0}.$$

$$T_R = (q\alpha)^{-1/2}, \quad L_{\pm} = b_{\pm} E_{\infty} T_R, \quad L_E = \frac{\varepsilon_0 E_{\infty}}{en_{\infty}}, \quad L = (K_0 T_R)^{1/(2-m)}, \quad L_M = (K_M T_R)^{1/2}$$

$$T_R = 300 \text{ с}, \quad L_+ = 3.6 \text{ м}, \quad L_- = 4.2 \text{ м}, \quad L_E = 0.5 \text{ м}, \quad L = 10 \text{ м}, \quad L_M = 0.075 \text{ м}$$

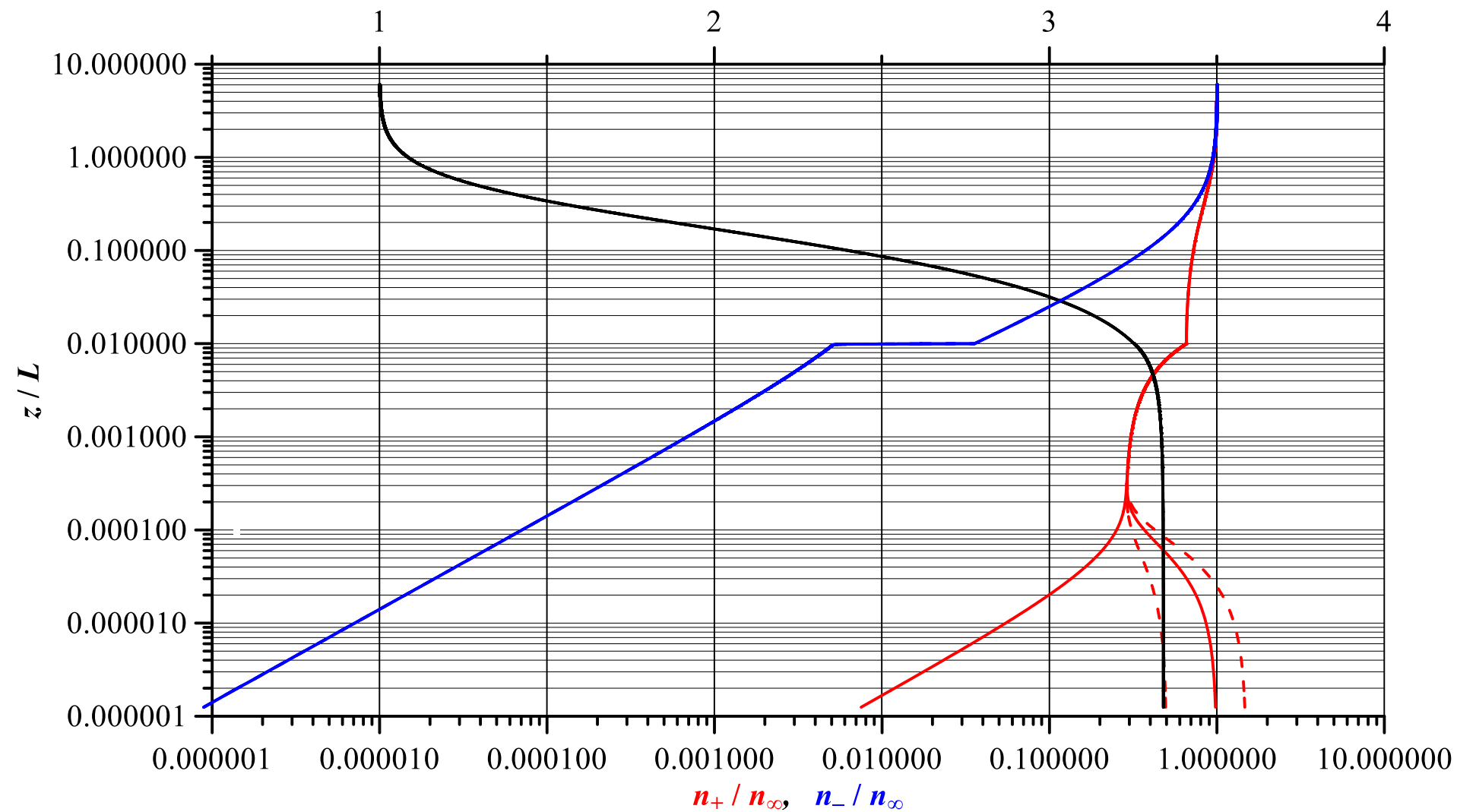
Модель приземного турбулентного электродного эффекта

Результаты численных расчётов

 $T_A/T_R=0.1$
 E / E_∞


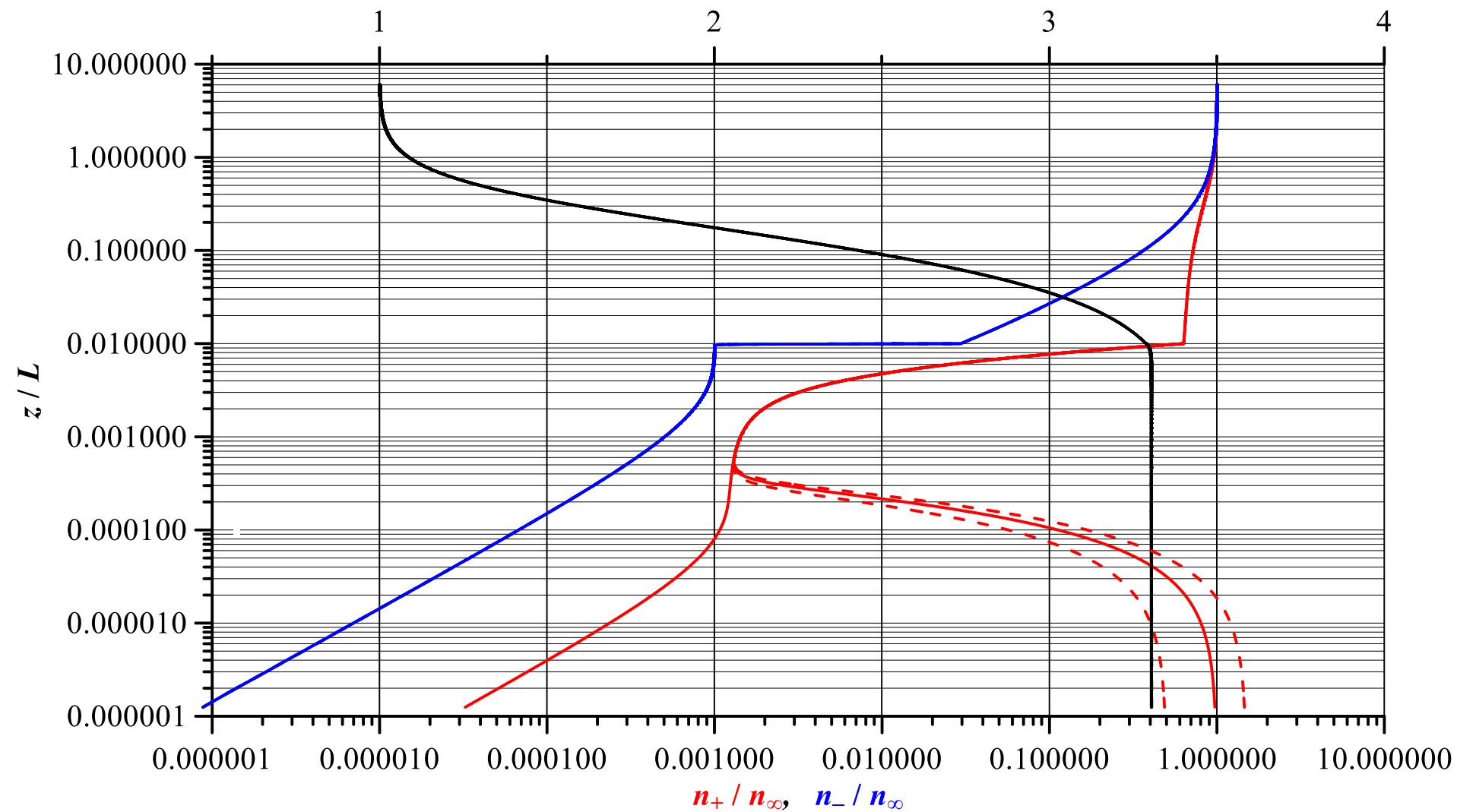
Модель приземного турбулентного электродного эффекта

Результаты численных расчётов

 $T_A/T_R=0.01$
 E / E_∞


Модель приземного турбулентного электродного эффекта

Результаты численных расчётов

 $T_A/T_R=0.001$
 E / E_∞


Пренебрегаем молекулярной диффузией для n_+

$$\frac{d}{dz} \left(- \left(K_M + K_0 z^m \right) \frac{dn_{\pm}}{dz} \pm b_{\pm} E n_{\pm} \right) = q - \alpha n_+ n_-, \quad z > h,$$

$$\frac{d}{dz} (b_+ E n_+) = q - \alpha n_+ n_- - \frac{n_+}{T_A}, \quad z < h,$$

$$\frac{d}{dz} \left(-K_M \frac{dn_-}{dz} - b_- E n_- \right) = q - \alpha n_+ n_- - \frac{n_-}{T_A}, \quad z < h,$$

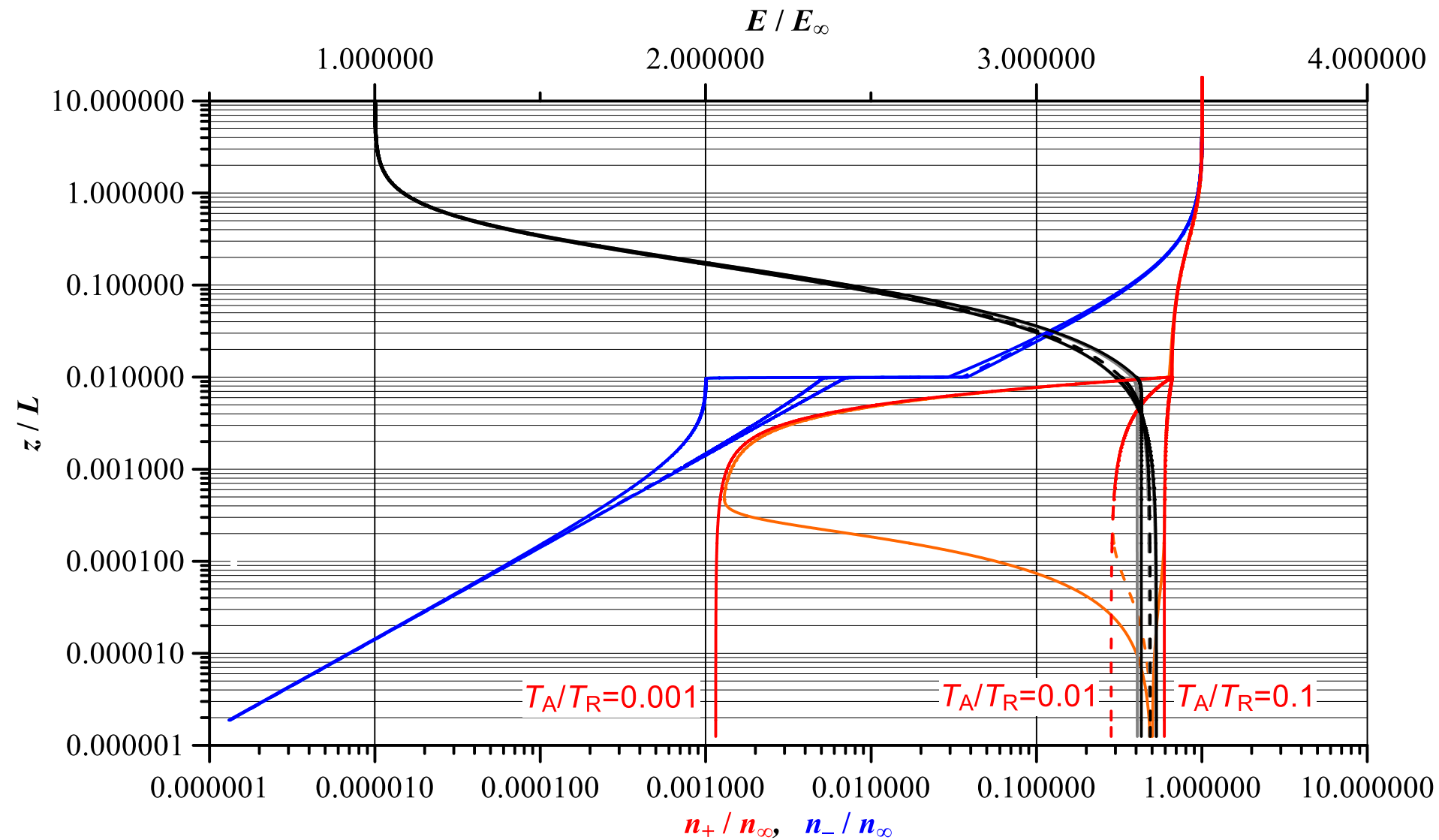
$$\left(b_+ E n_+ - \left(K_M + K_0 z^m \right) \frac{dn_+}{dz} \right) \Big|_{z \rightarrow +h} = (b_+ E n_+) \Big|_{z \rightarrow -h} \rightarrow \frac{dn_+}{dz} \Big|_{z \rightarrow +h} = 0,$$

$$\left(-b_- E n_- - \left(K_M + K_0 z^m \right) \frac{dn_-}{dz} \right) \Big|_{z \rightarrow +h} = \left(-b_- E n_- - K_M \frac{dn_-}{dz} \right) \Big|_{z \rightarrow -h},$$

$$E \Big|_{z \rightarrow \infty} = E_{\infty}, \quad n_{\pm} \Big|_{z \rightarrow \infty} = n_{\infty} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \quad n_- \Big|_{z=0} = 0.$$

Модель приземного турбулентного электродного эффекта

Результаты численных расчётов



Корректная постановка задачи для области $z > h$

$$\frac{d}{dz} \left(-K_T(z) \frac{dn_+}{dz} + b_+ E n_+ \right) = q - \alpha n_+ n_-,$$

$$\frac{d}{dz} \left(-K_T(z) \frac{dn_-}{dz} - b_- E n_- \right) = q - \alpha n_+ n_-,$$

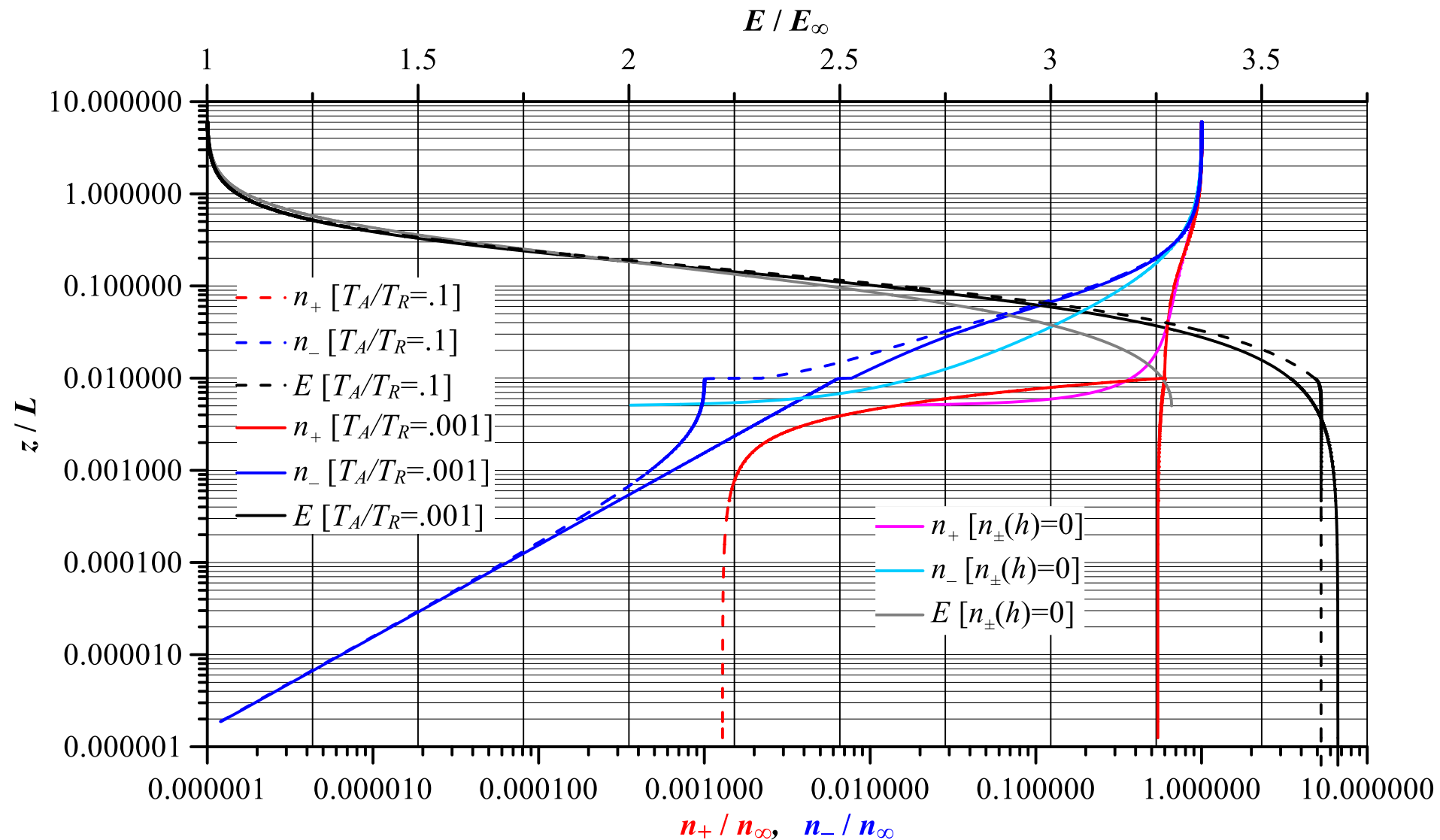
$$\frac{dE}{dz} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_+ - n_-),$$

$$E|_{z \rightarrow \infty} = E_\infty, \quad n_\pm|_{z \rightarrow \infty} = n_\infty = \sqrt{\frac{q}{\alpha}},$$

$$n_-|_{z=h} = 0, \quad \left. \frac{dn_+}{dz} \right|_{z=h} = 0.$$

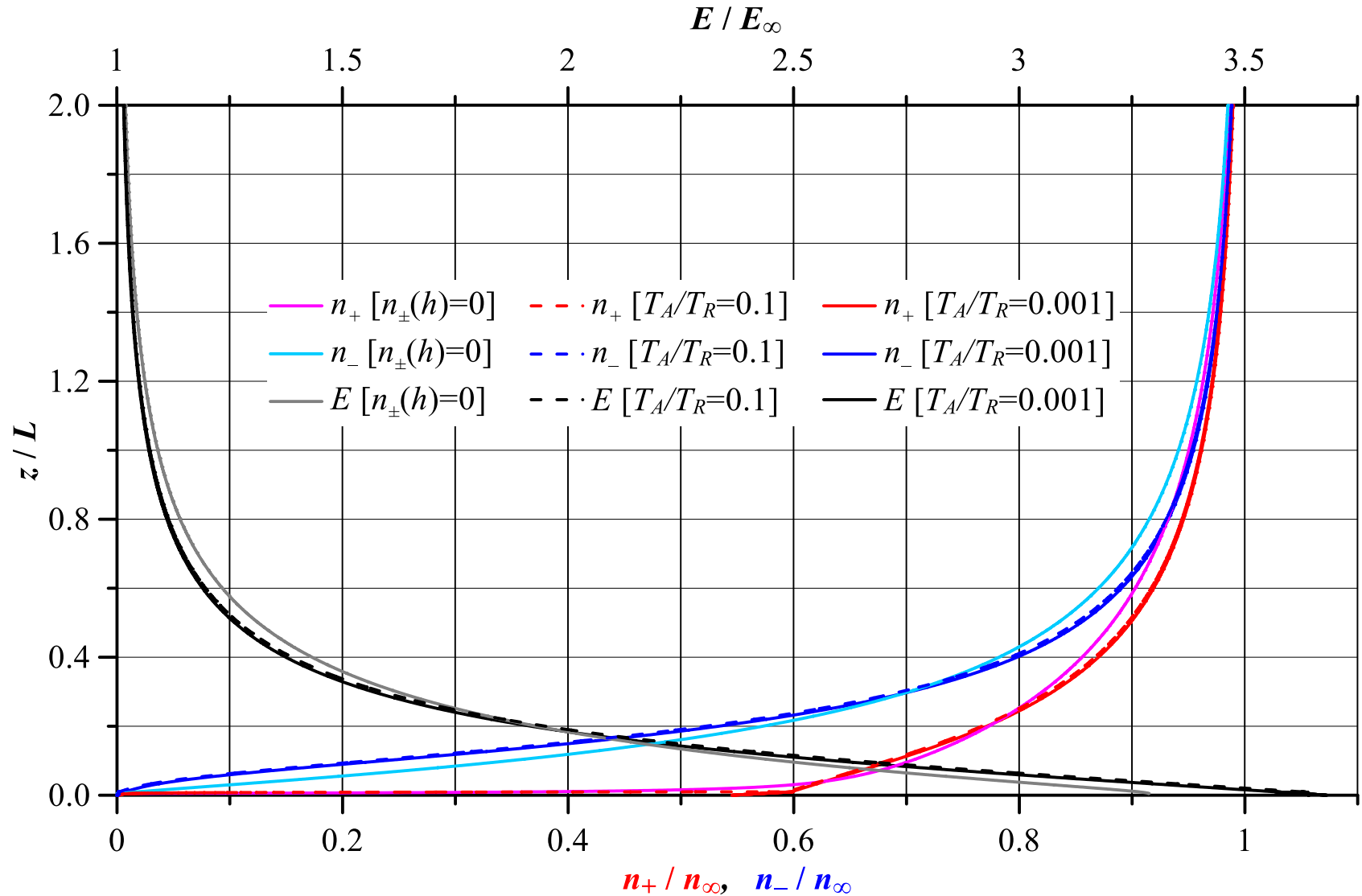
Модель приземного турбулентного электродного эффекта

Результаты численных расчётов



Модель приземного турбулентного электродного эффекта

Результаты численных расчётов



Заключение

Обсуждены модели стационарного приземного электродного эффекта и способы задания граничных условий для концентраций аэроионов.

Предложена модель стационарного приземного турбулентного электродного эффекта, учитывающая поглощение аэроионов и их диффузию в слое ниже высоты шероховатости.

Проведены численные расчёты высотных профилей концентраций аэроионов и электрического поля атмосферы для различных параметров модели.

Показано наличие пограничных слоёв, толщиной ~ 1 см, локализованных ниже высоты шероховатости для отрицательных аэроионов и у земной поверхности для положительных.

Показано, что модельные решения не зависят от задаваемой на земной поверхности концентрации положительных аэроионов для высот, больших 1 см.

Показано, что в пренебрежении молекулярной диффузией для положительных аэроионов пограничный слой у земной поверхности исчезает, при этом упрощённая модель верно описывает высотные профили аэроэлектрических параметров для высот, больших 1 см.

Обоснованы корректные граничные условия краевой задачи при сильном поглощении аэроионов подстилающей поверхностью в области выше высоты шероховатости.

Обсуждены причины относительного соответствия рассчитанных для традиционных граничных условий высотных профилей аэроэлектрических параметров наблюдениям.

Спасибо за внимание!