ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА · 2026

Турбулентные потоки заряда и ковариационная поправка к скорости рекомбинации лёгких ионов в приземном слое атмосферы

А. А. Прохорчук[1], С. В. Галиченко[1], Э. М. Дмитриев[1], С. В. Анисимов[1]

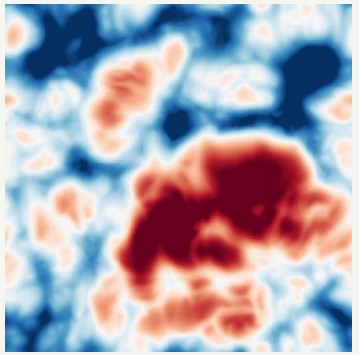
[1] Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

152742, Ярославская область, п. Борок, д. 142

aleksandr.prokhorchuk@mail.ru









Атмосферное электричество: масштабы явлений

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПЛОЩАДКА

Лаборатория геофизического мониторинга обсерватории «Борок»

Филиал ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН

поселок Борок

Многолетние исследования атмосферного электричества



Геофизическая обсерватория «Борок» · фото: официальный сайт

Явления атмосферного электричества различаются по времени и пространству на многие порядки

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ОБЛАСТИ

Ионизация и рекомбинация

Между лёгкими ионами в среднем — 1–2 мм

~ 1 КМ

Пограничный слой атмосферы

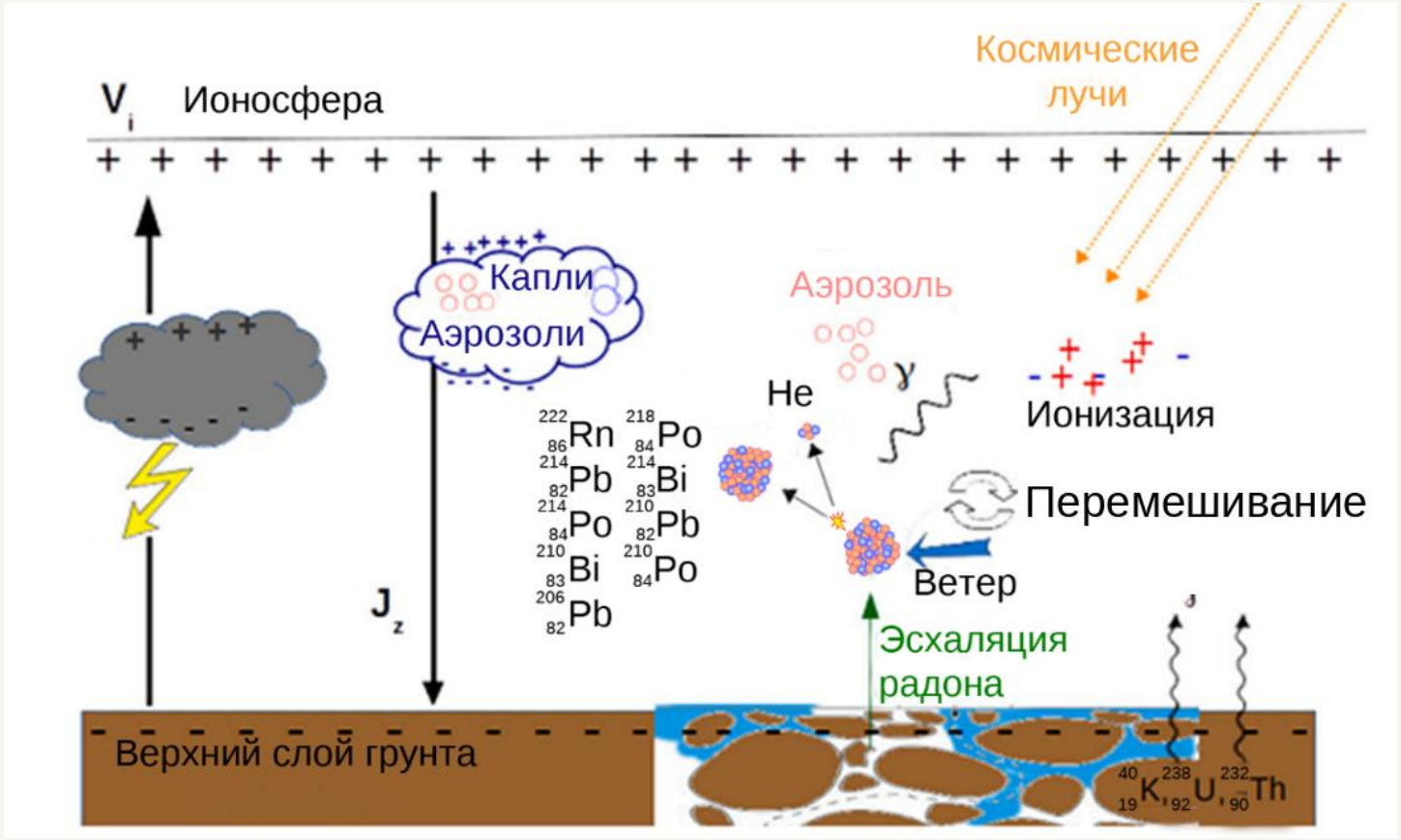
ПЛАНЕТАРНЫЙ МАСШТАБ

Глобальная электрическая цепь

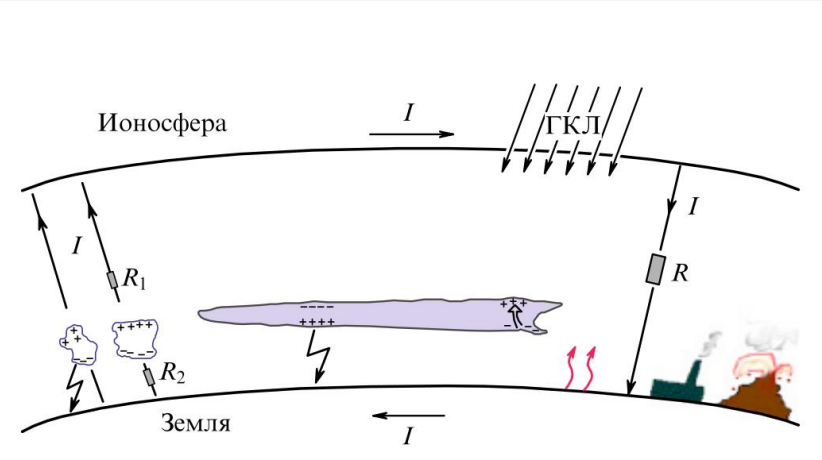
Ионосфера — атмосфера — верхняя литосфера

Унитарная вариация аэроэлектрического поля

Глобальная электрическая цепь



Ионосферный потенциал, грозовые генераторы, возвратный ток, ионизация и турбулентный перенос заряда.



ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА

I ≈ 10³ А — суммарный ток в цепи

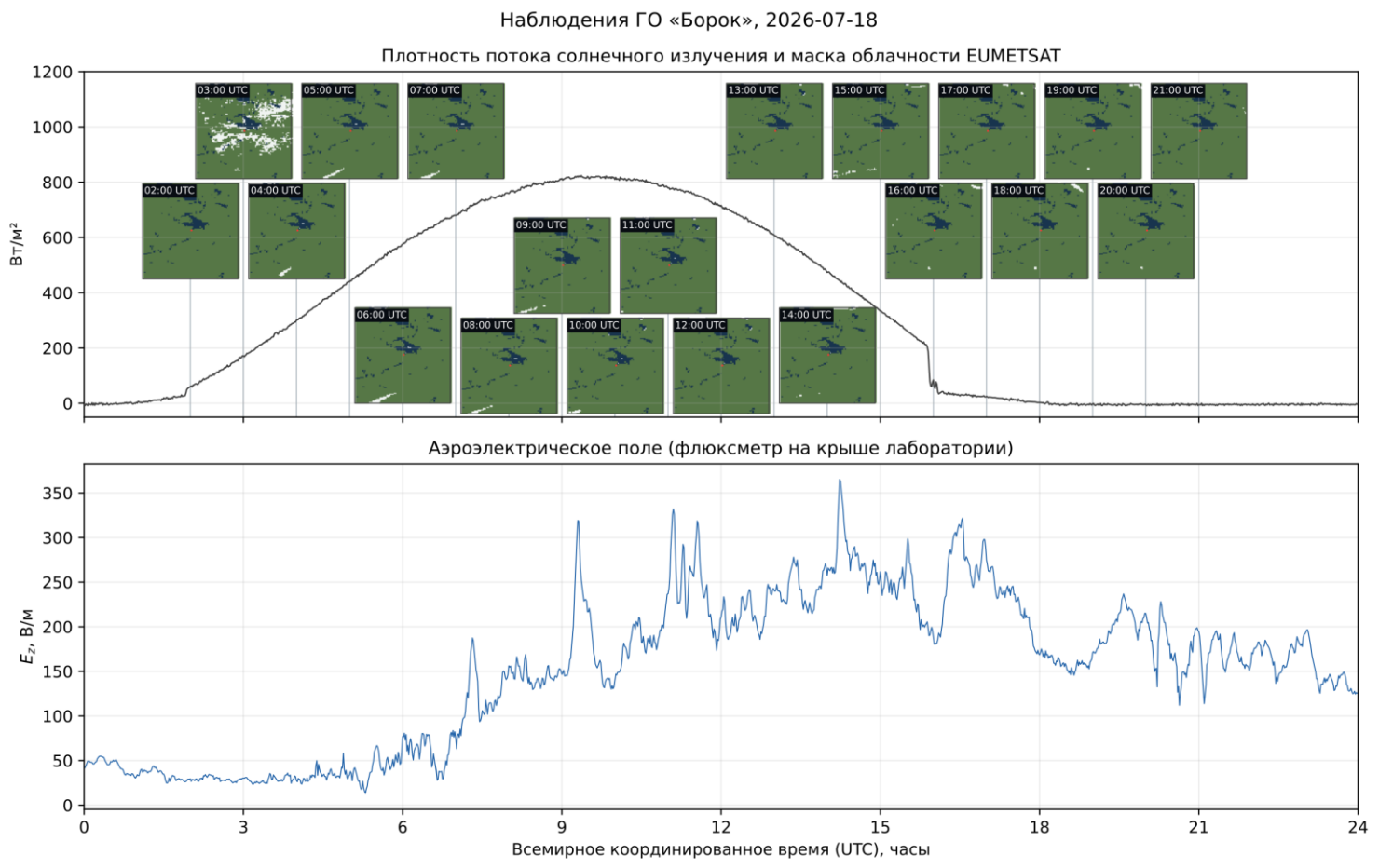
R ≈ 230 Ом — сопротивление атмосферы

R_1 ≈ 10⁴ Ом, R_2 ≈ 10⁵ Ом — сопротивления отдельных участков

Грозы поддерживают разность потенциалов между землей и ионосферой; в «хорошую» погоду цепь замыкается через невозмущенный атмосферный участок.

Источники: [1, 10, 11] · схема справа: [1], рис. 2 · doi:10.3367/UFNr.0180.201005h.0527

Солнечный день и динамика аэроэлектрического поля



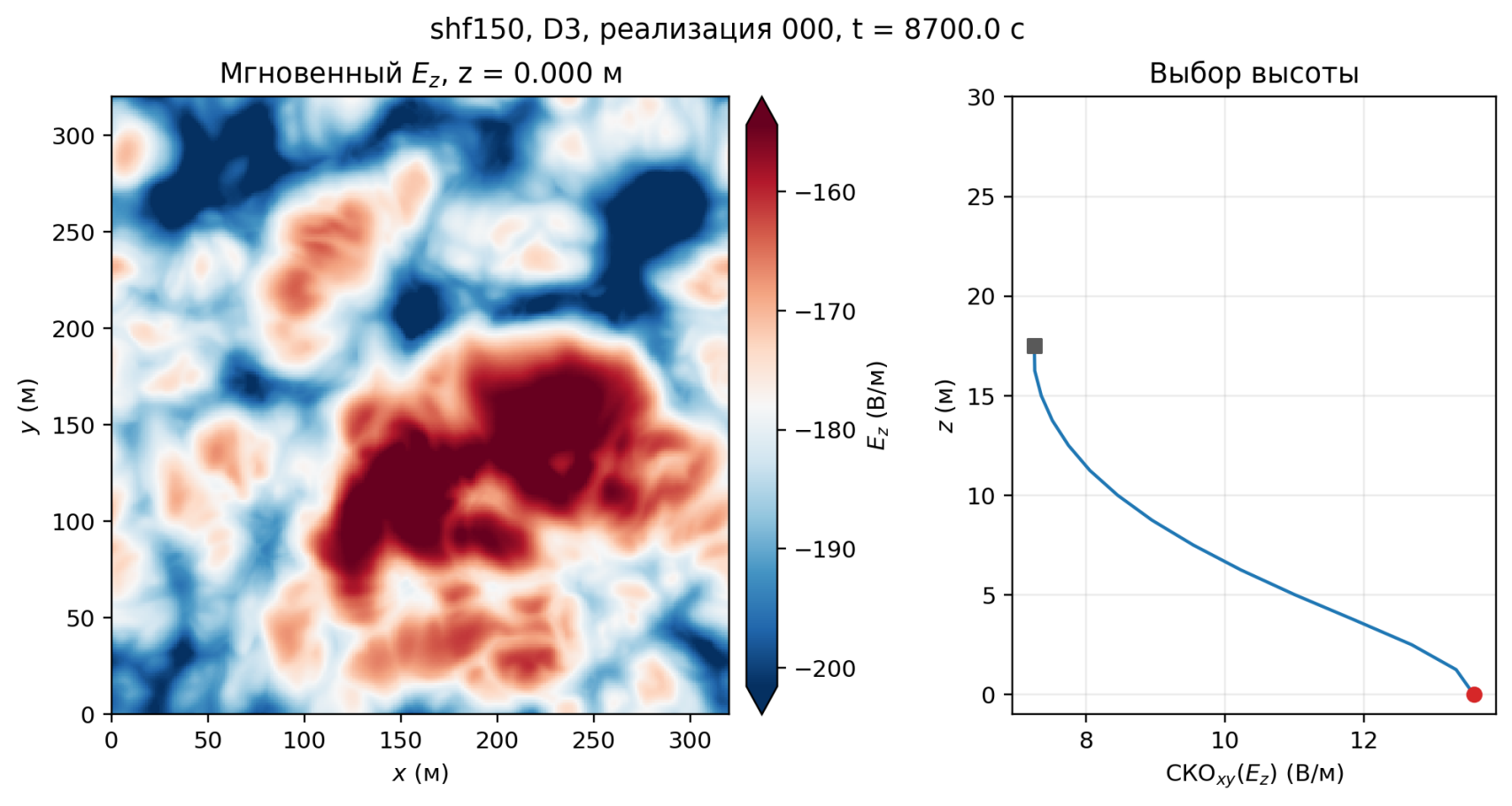


Флюксметр на крыше лаборатории ГО «Борок».

Атмосферное электричество “хорошей” погоды - самостоятельный предмет исследования и источник опорных показателей.

ГО «Борок», 18.07.2026, UTC · минутные ряды СМР-3 и флюксметра

Горизонтальная структура аэроэлектрического поля у земной поверхности: численное моделирование



Расчёт PALM 24.04 (модификация) · режим “shf150”, домен D3

Приземный воздух — слабоионизированная плазма

$$N_{STP} = \frac{p_0}{k_B T_0} = 2{,}68678 \cdot 10^{25}\ \text{м}^{-3}$$

$$\chi_{\pm} = n_{\pm}/N_{STP}, \chi_l = (n_+ + n_-)/N_{STP}$$

$< 10^{-16}$

Концентрация	P05, см⁻³	Медиана, см⁻³	P95, см⁻³	Доля χ, P05–P95
n_+	519	838	1254	$(1{,}93–4{,}67)\cdot10^{-17}$
n_-	315	619	1099	$(1{,}17–4{,}09)\cdot10^{-17}$
$n_l = n_+ + n_-$	836	1456	2351	$(3{,}11–8{,}75)\cdot10^{-17}$

ПОЧЕМУ ВОЗМОЖНЫ ОПИСАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ ПОЛЯМИ

В кубе со стороной 0,1 м содержится около $5\cdot10^5$ ионов каждого знака. Условие $nL^3 \gg 1$ выполняется с большим запасом.

СЛЕДСТВИЕ ДЛЯ МОДЕЛИ

Нейтральная компонента описывается гидродинамикой; ионы переносятся потоком и дрейфуют в электрическом поле.

Электродный эффект: заряд у поверхности Земли



ЗЕМНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАК ЭЛЕКТРОД

Качественная схема · расположение частиц условно, без масштаба

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Свойства среды зависят от расстояния до электрода

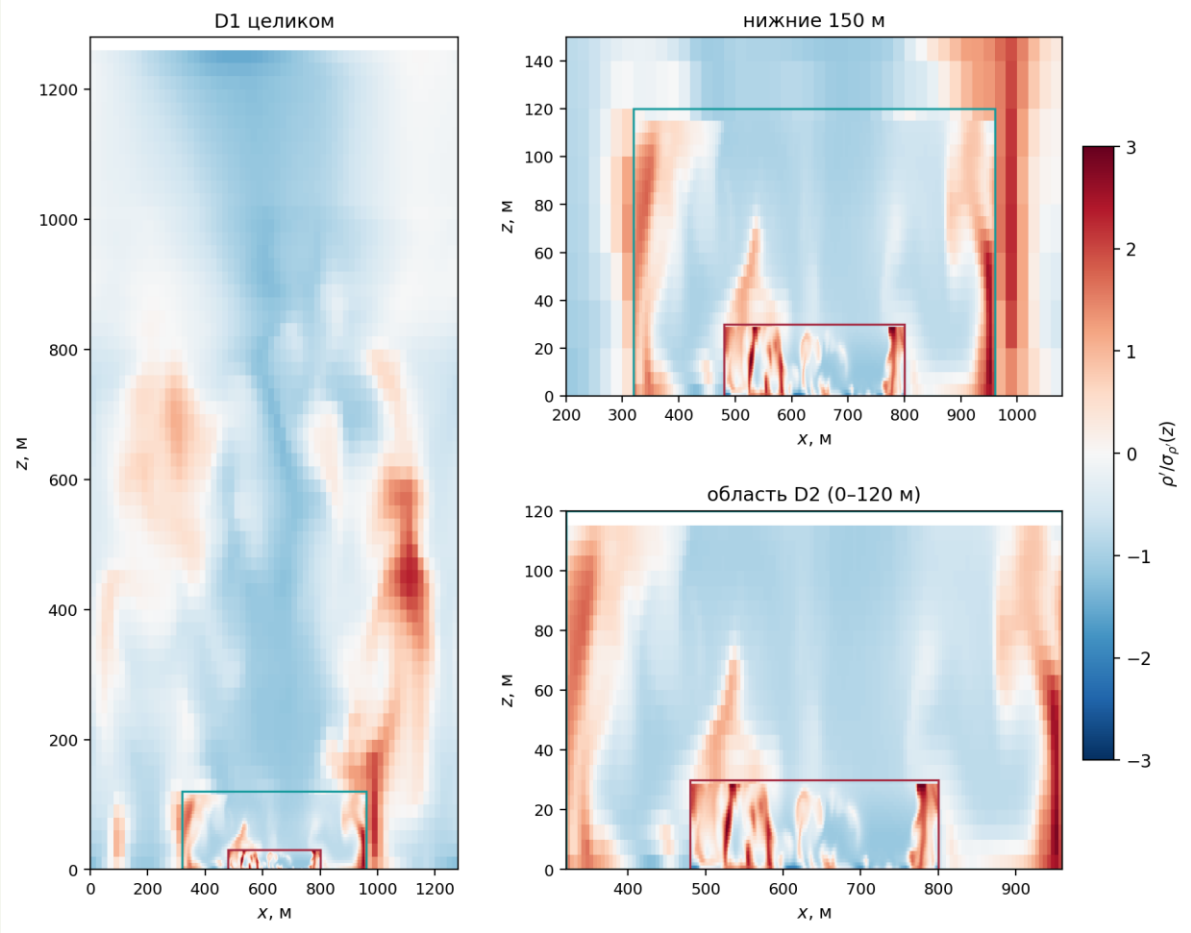
НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ

- внешнее электрическое поле;
- неоднородность электропроводности.

> Профили формируются ионизацией, турбулентным переносом, электрическим дрейфом, рекомбинацией, прилипанием ионов к аэрозолям и поглощением поверхностью.

Определение электродного эффекта: [5, 6] · наблюдения в приземном слое: [7, 8]

Неоднородность заряда на масштабах D1–D3



Мгновенное XZ-сечение $\rho'/\sigma_{\rho'}$, реализация 000, t ≈ 8700 с

Мгновенное состояние нельзя полностью описать одним вертикальным профилем.

НОРМИРОВКА

ρ′ рассчитана относительно среднего по XY и нормирована на горизонтальное СКО на каждой высоте.

ТРИ РАСЧЕТНЫХ ОБЛАСТИ · ОДНОНАПРАВЛЕННОЕ ВЛОЖЕНИЕ

D1 целиком · нижние 150 м · D2 с вложенными областями. Поле остаётся неоднородным в каждой области.

Расчёт PALM 24.04 (модификация) · режим “shf150”

Неполное уравнение динамики лёгких ионов

$$\frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} + \nabla \cdot J_{\pm} = q - \alpha n_{+} n_{-}$$

$$J_{\pm} = u n_{\pm} \pm b_{\pm} E n_{\pm} - D_{\pm} \nabla n_{\pm}$$

ТРИ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПЕРЕНОСА ЛЁГКИХ ИОНОВ

01 **u n±** — адвекция. LES вычисляет разрешённое поле скорости ветра.

02 **±b±E n±** — электрический дрейф двух полярных фракций.

03 **−D±∇n±** — молекулярная диффузия. В LES параметризована подсеточная турбулентная диффузия.

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ СТОК

$$R_{loc} = \alpha n_{+} n_{-}$$

Произведение концентраций нелинейно: совместные флуктуации n_+ и n_- изменяют не только мгновенный, но и средний сток.

В расчётах прилипание ионов к аэрозолю отключено.

Обозначения: q — интенсивность ионизации, α — коэффициент рекомбинации, b± и D± — подвижности и коэффициенты молекулярной диффузии лёгких ионов

Почему средних концентраций недостаточно

$$n_+ = \langle n_+ \rangle + n'_+, n_- = \langle n_- \rangle + n'_-$$

$$R = \alpha \langle n_+ n_- \rangle = \alpha \langle n_+ \rangle \langle n_- \rangle + R_F, R_F = \alpha \langle n'_+ n'_- \rangle$$

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Моделирует только динамику средних концентраций

ДОЛЯ КОВАРИАЦИОННОГО ВКЛАДА

$$\eta_R \equiv \frac{R_F}{R} = \frac{\langle n'_+ n'_- \rangle}{\langle n_+ n_- \rangle}$$

> Вихреразрешающее моделирование (LES) в PALM предоставляет источник данных для вычисления ковариации произведения полярных фракций лёгких ионов. Производятся усреднение по горизонтальной плоскости и времени за модельное время 7200–10800 с в каждой реализации, вычисление медианы и IQR.

Усреднение ⟨·⟩: по времени, пространственной области или ансамблю · среднее произведения ≠ произведение средних

Модифицированная PALM 24.04

Совместный расчёт турбулентного поля скорости ветра, переноса ионов и электрического поля

01 · Турбулентный перенос лёгких ионов (Large Eddy Simulation, LES)

02 · Дрейф ионов в электрическом поле

03 · Ионизация и ион-ионная рекомбинация

04 · Решение уравнение Пуассона для электрического потенциала в трёх измерениях

Перед 3D-расчётом встроенная метеорологическая 1D-модель PALM интегрируется 10 суток; дочерние домены инициализируются интерполяцией родительских трёхмерных полей.

КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

$$E = -\nabla\phi$$

$$\nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\rho = e(n_+ - n_-) + \rho_a$$

$$\rho_a = e\sum_s Z_s N_s$$

ρ_a - плотность заряда аэрозольных частиц

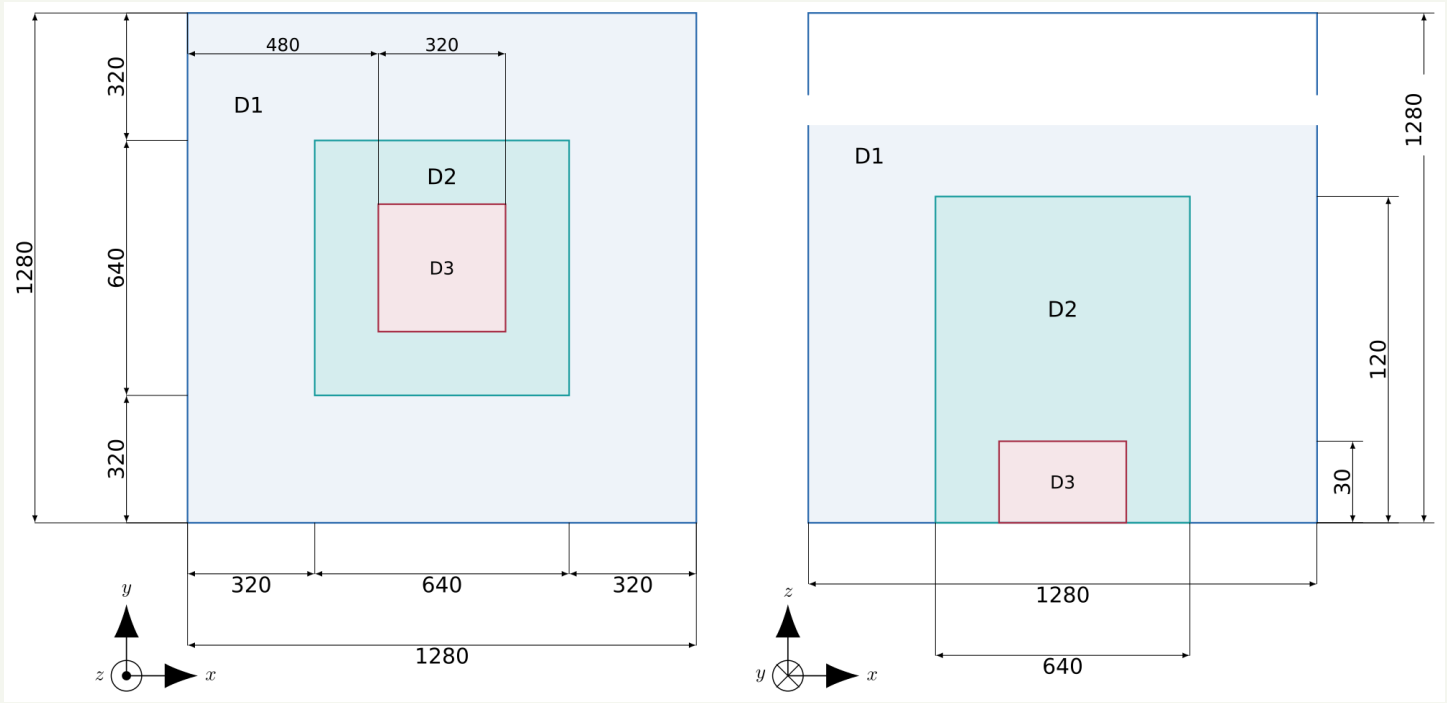
ПРИБЛИЖЕНИЯ И НАСТРОЙКИ

Сухая LES в приближении Буссинеска · 1.5-order SGS · параметризация Монина–Обухова · z_0 = 0,1 м · географическая широта 58°.

Модель PALM и электродинамический блок: [2–4]

Общие параметры расчётов: q = $7\cdot10^{6}$ м$^{-3}$с$^{-1}$ · α = $2\cdot10^{-12}$ м^{3}с$^{-1}$ · μ_+ = $1{,}2\cdot10^{-4}$ м^{2}В$^{-1}$с$^{-1}$ · μ_- = $1{,}4\cdot10^{-4}$ м^{2}В$^{-1}$с$^{-1}$

Вложенные области D1–D3 и временная статистика



Не все реальные пропорции сохранены.

	Размер, м	Шаг сетки, м
D1	1280×1280×1280	20
D2	640×640×120	5
D3	320×320×30	1,25

ОДНОСТОРОННЕЕ СООБЩЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ

top_nested: поля на верхней границе дочерней области интерполируются из родительской; на боковых границах — периодические граничные условия.

длительность расчёта: 3 часа внутримодельного времени

временной отрезок для анализа: 7200–10800 с

Четыре режима: нейтральный и конвективный пограничный слой

Режимы различаются значениями однородной по высоте восточной компоненте скорости геострофического ветра u_g и кинематическим потоком тепла на земной поверхности H_s (приближение Буссинеска); остальные физические параметры одинаковы.

Режим	u_g, м/с	H_s, К·м/с	u_*, м/с	σ_w^2, м²/с²	e_{SGS}, м²/с²
ug2	2	0	0,0969	0,0123	0,00399
ug10	10	0	0,362	0,185	0,0573
shf050	0	0,050	0,112	0,102	0,00827
shf150	0	0,150	0,178	0,219	0,0177

НЕЙТРАЛЬНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ

ug2 и ug10 · плавучесть не учитывается; потенциальная температура не прогнозируется.

НЕУСТОЙЧИВАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ

shf050 и shf150 · конвекция поддерживается заданным потоком тепла на поверхности земли · параметризуется крупномасштабное осаждение

u_*, σ_w^2 и e_{SGS}: D3, z = 5,625 м · осреднены за 7200–10800 с

Одномерная турбулентно-диффузионная модель

$$\frac{dF_{\pm}}{dz} = q - \alpha n_+ n_-, F_{\pm} = \pm b_{\pm} E_z n_{\pm} - K\frac{dn_{\pm}}{dz}$$

$$\frac{dE_z}{dz} = \frac{e}{\varepsilon_0}(n_+ - n_-), z \in [h, L]$$

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

$$E_z(L) = -E_\infty, n_+(L) = n_-(L) = \sqrt{q/\alpha}, n_{\pm}(h) = 0$$

Параметр	Значение
Интенсивность ионизации q	$7 \cdot 10^6$ м$^{-3}\cdot$с$^{-1}$
Коэффициент рекомбинации α	$2 \cdot 10^{-12}$ м$^3\cdot$с$^{-1}$
Подвижность положительных ионов b_+	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$ м$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$
Подвижность отрицательных ионов b_-	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$ м$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$
Высота шероховатости h	0,1 м

ГЛАВНАЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ

Вертикальный профиль коэффициента турбулентной диффузии K

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Неявная схема второго порядка; метод прогонки до достижения стационарного решения.

Численная схема одномерной модели: [9]

Экстраполяция K к поверхности земли: варианты 1D А и 1D Б

Эффективный K получен по данным LES; варианты различаются ниже второго снизу узла D3.

1D А · MIN_ANGLE_HOLD

$$K(z < z_1) = K(z_1).$$

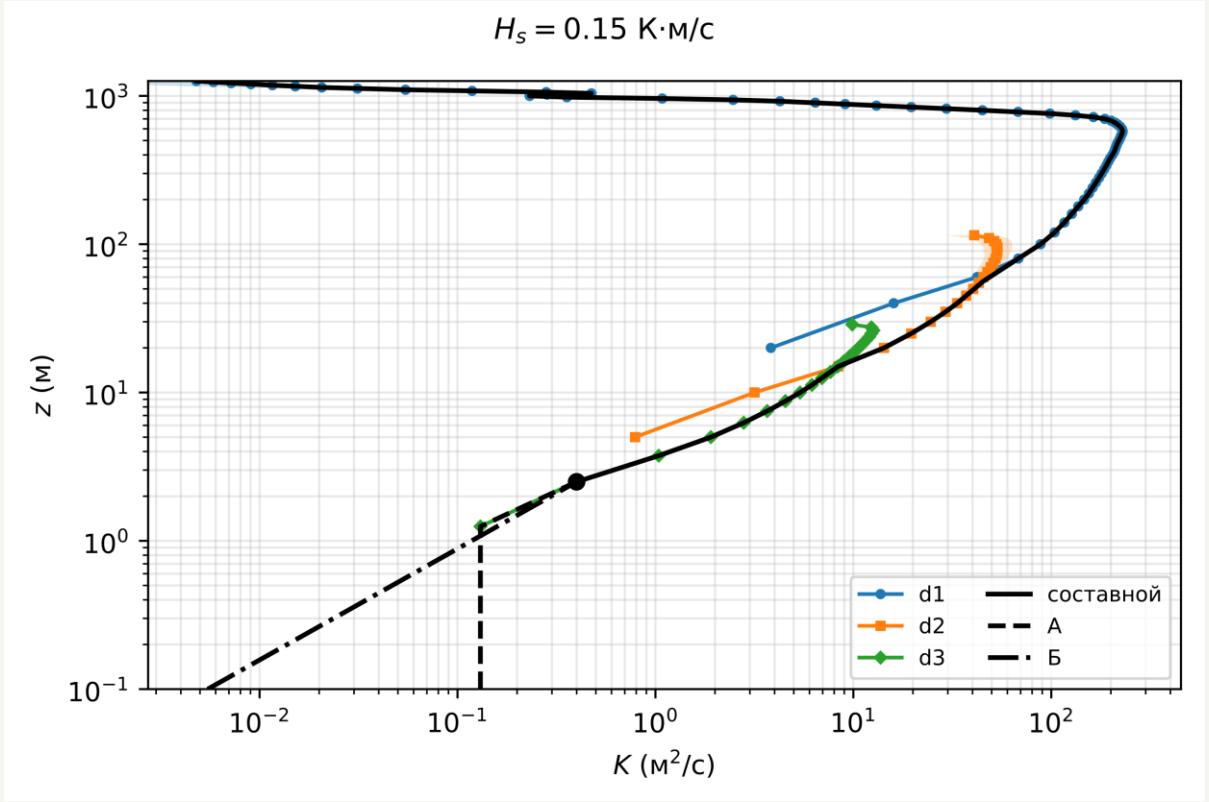
z_1 - высота ячейки домена D3.

1D Б · MIN_ANGLE

$$K(z) = K_a \left(\frac{z}{z_a}\right)^m$$

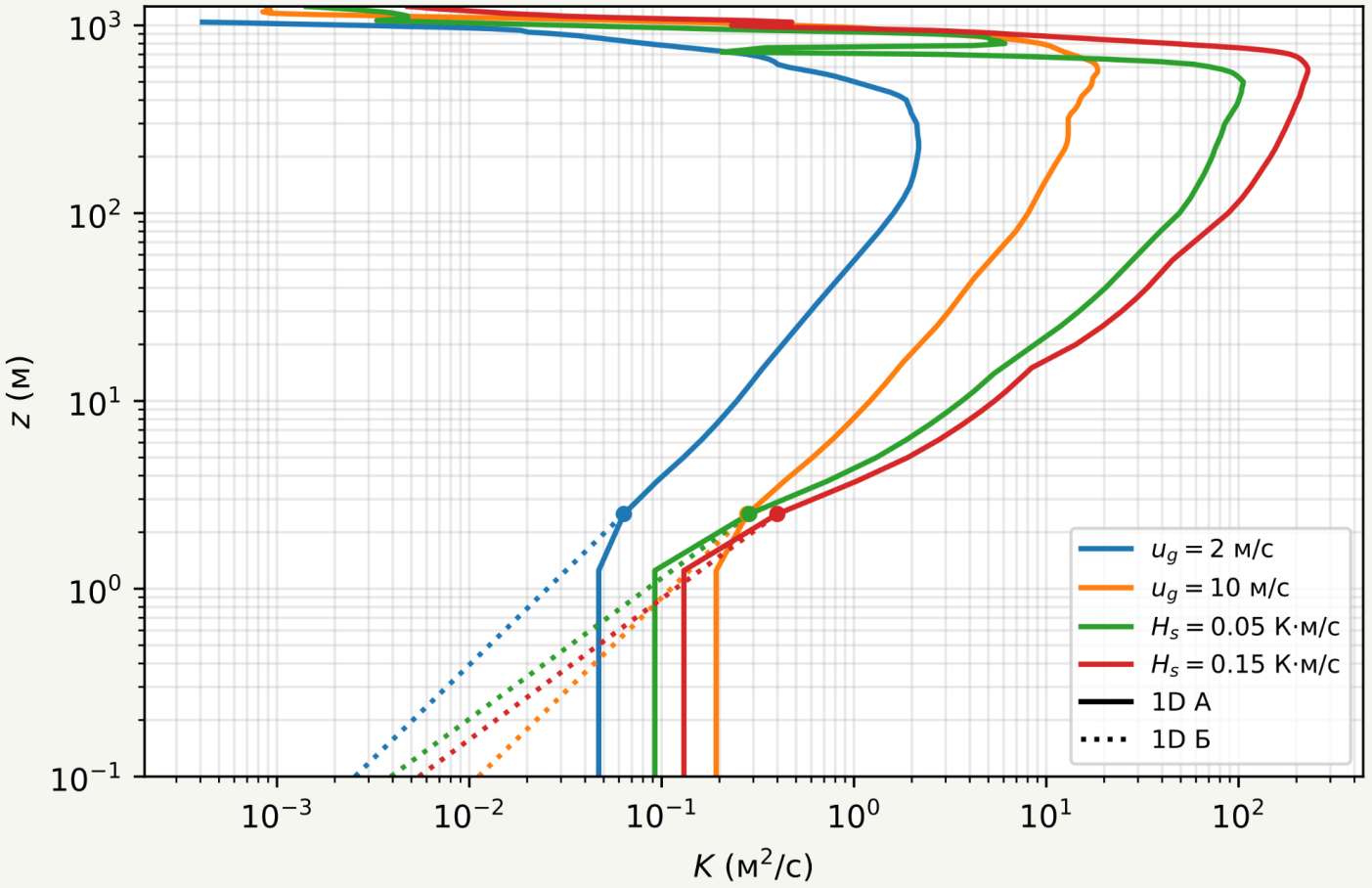
m = 1 для нейтральных режимов

m = 4/3 для конвективных режимов

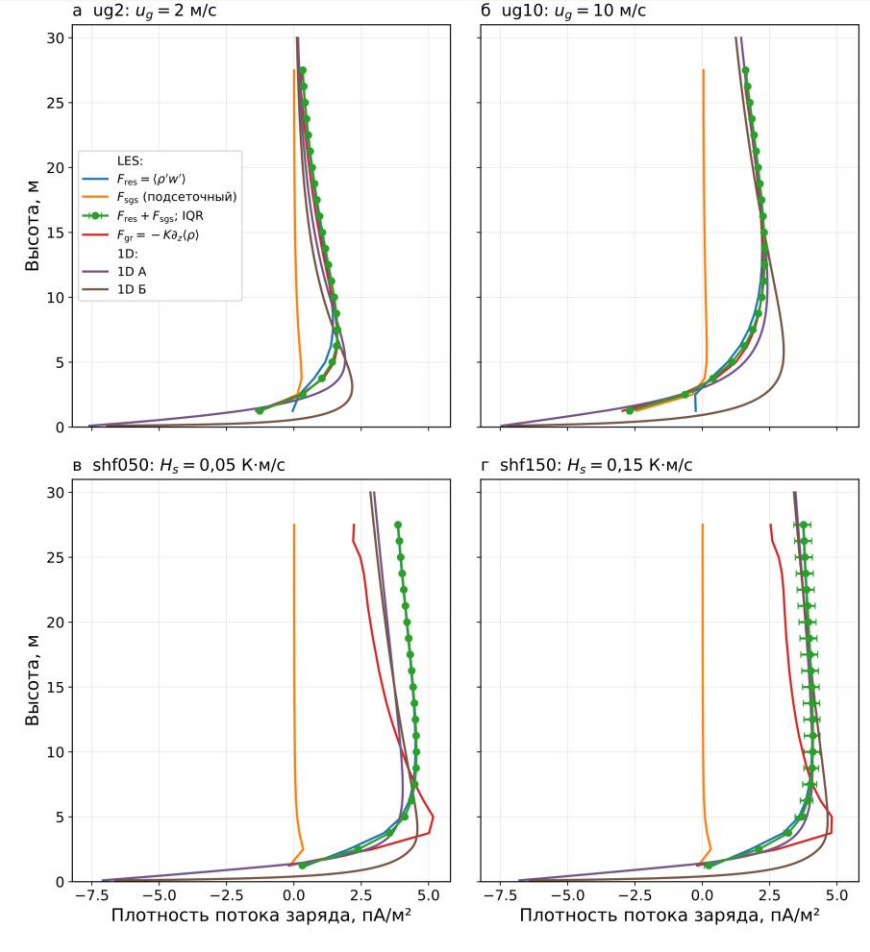


режим “shf150” · составной профиль K и варианты экстраполяции А и Б

Профили K для четырёх расчётных режимов



Вертикальные турбулентные потоки заряда



$$F_{res} = \overline{\langle \rho_f' w' \rangle_{xy}}^{\,t}$$

$$F_{sgs} = -\overline{\langle K_{h,f} \partial\rho/\partial z \rangle_{xy}}^{\,t}$$

$$F_\rho = F_{res} + F_{sgs}$$

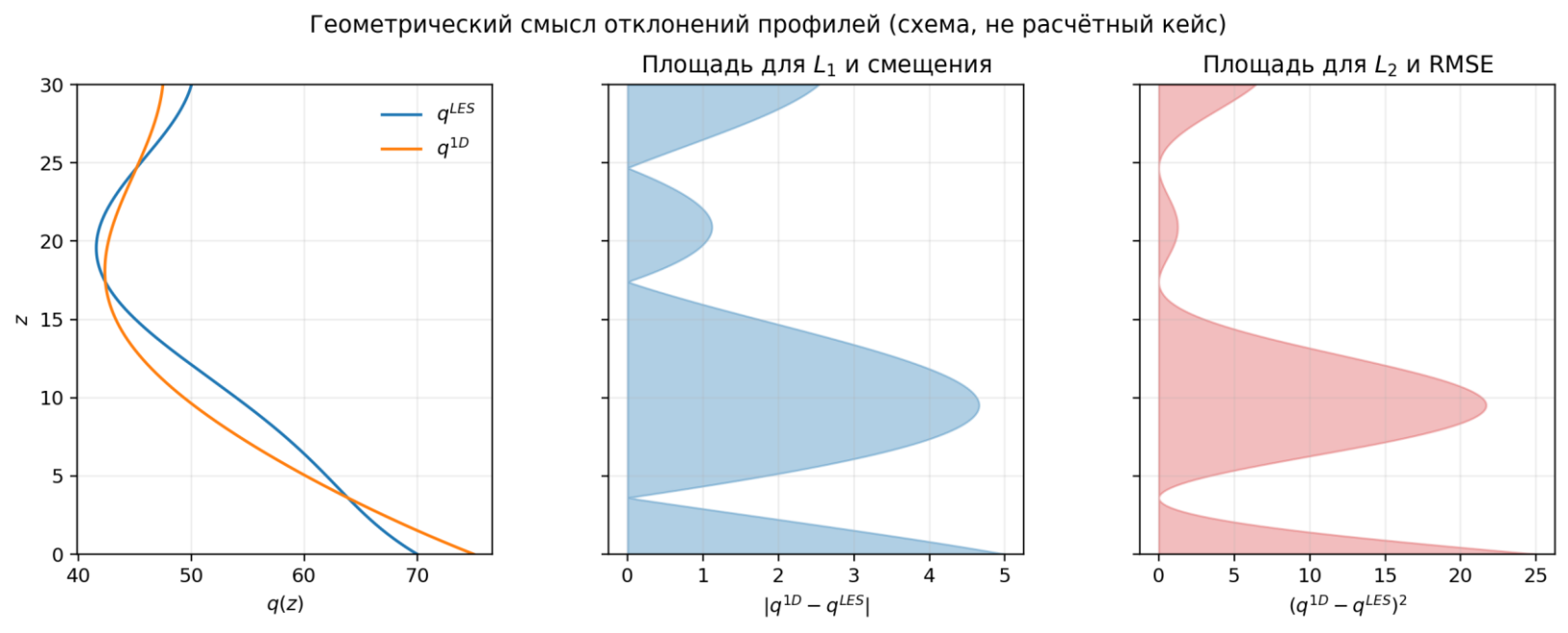
СРАВНЕНИЕ LES И 1D

LES: разрешённый и подсеточный потоки, их сумма и градиентная оценка $-K\partial_z\langle\rho\rangle$.

1D А и 1D Б: потоки $-K\ d\rho/dz$ для двух вариантов продолжения K к поверхности.

D3 · 7200–10800 с · для “ug2” и “shf150” показан IQR по реализациям · для “ug10” и “shf050” — реализация 000

Геометрический смысл отклонений профилей



$$\delta_i = M_i - L_i,\ L_i = q_i^{LES},\ M_i = q_i^{1D}$$

$$\varepsilon_{L2} = \sqrt{\frac{\sum_i w_i \delta_i^2}{\sum_i w_i L_i^2}}$$

$$\varepsilon_{L1} = \frac{\sum_i w_i |\delta_i|}{\sum_i w_i |L_i|}$$

$$RMSE^2 = \frac{1}{H}\sum_i w_i \delta_i^2 = B^2 + RMSE_c^2$$

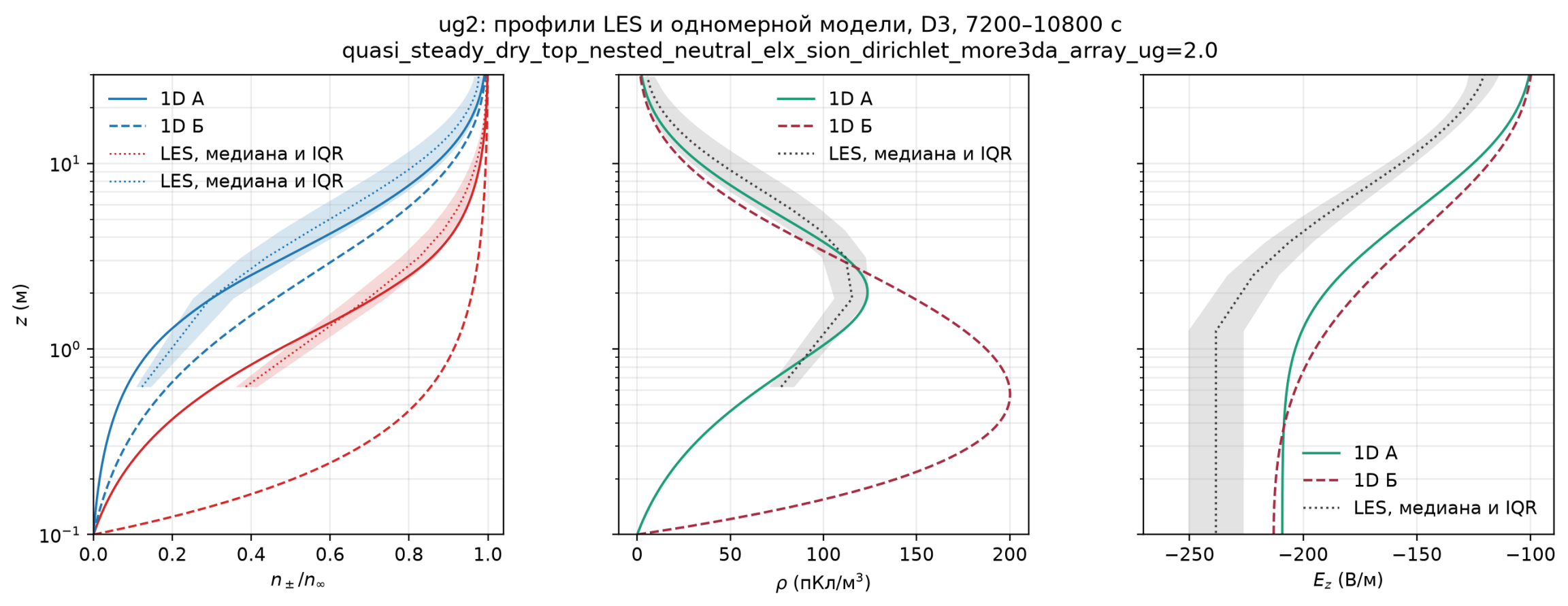
$$\varepsilon_{L2} = RMSE / \sqrt{H^{-1}\sum_i w_i L_i^2}$$

RMSE — абсолютная ошибка; ε_{L2} — та же квадратичная ошибка, нормированная на RMS профиля LES. B — среднее смещение, а $RMSE_c$ — различие формы профилей после центрирования.

Иллюстративная схема · перед расчётом метрик q^{1D} осредняется по ячейкам PALM, а E_z^{1D} интерполируется методом PCHIP

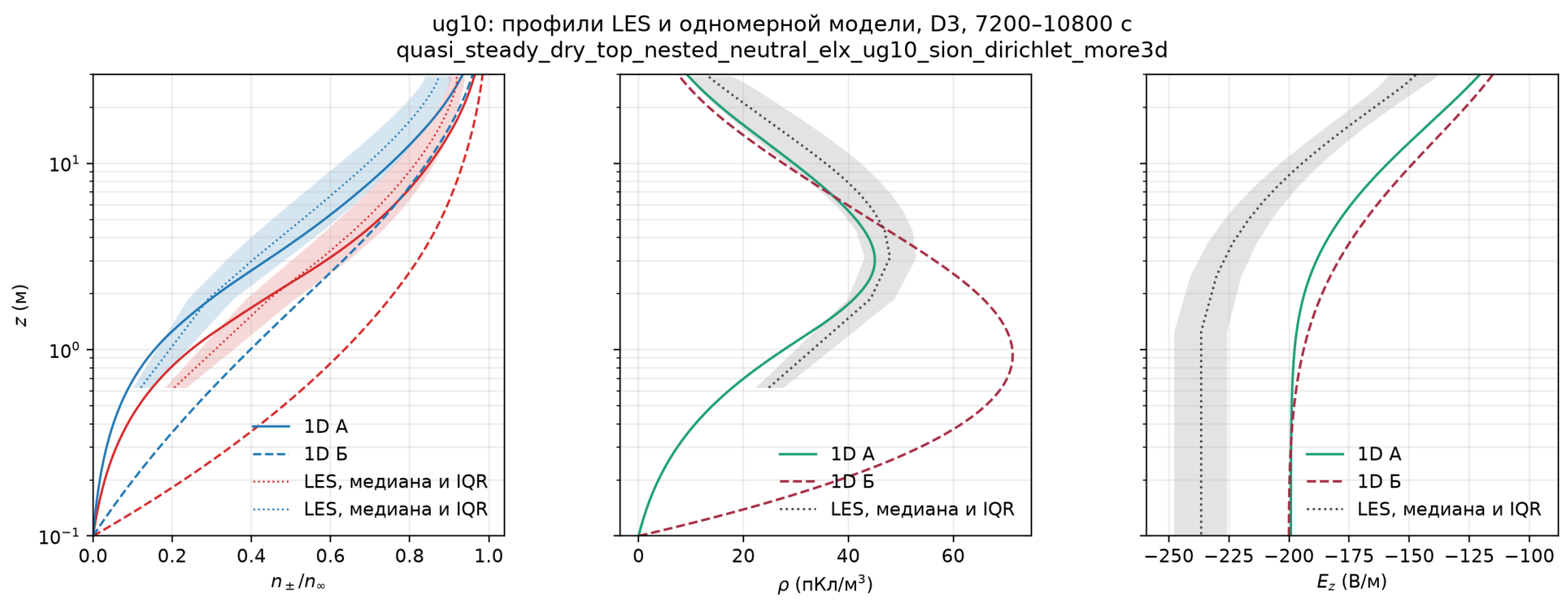
ug2: вариант 1D A точнее воспроизводит профиль заряда

НЕЙТРАЛЬНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ · u_g = 2 М/С · D3 · 10 РЕАЛИЗАЦИЙ



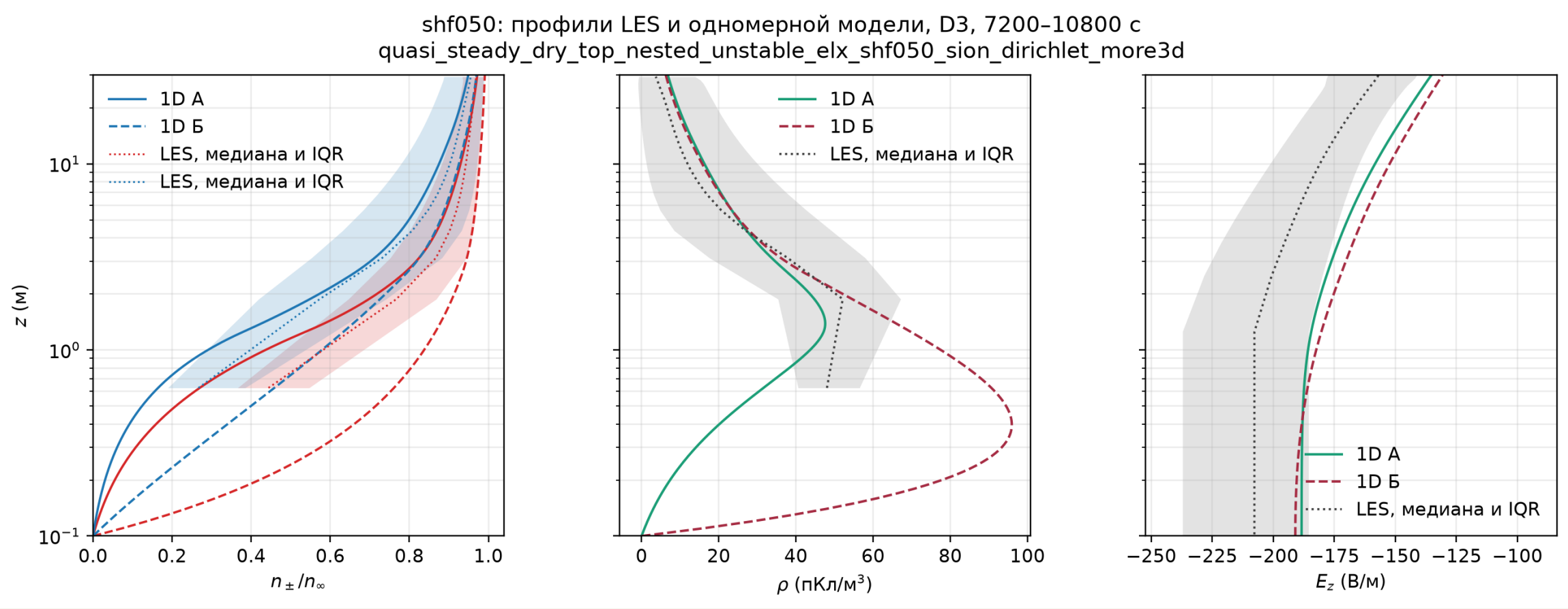
ug10: 1D A точнее передаёт амплитуду и форму профиля

НЕЙТРАЛЬНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ · u_g = 10 М/С · D3 · РЕАЛИЗАЦИЯ 000



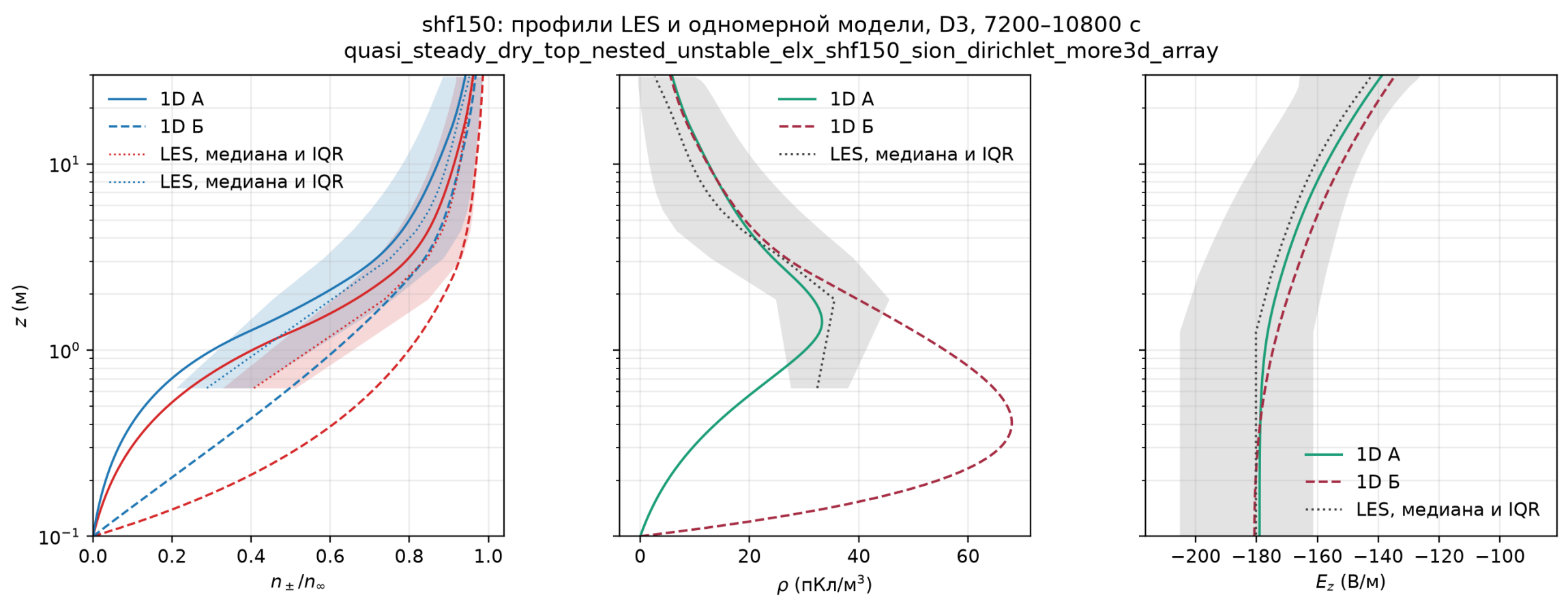
shf050: 1D Б точнее описывает заряд, 1D А — поле

НЕУСТОЙЧИВАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ · H_s= 0,05 К·М/С · D3 · РЕАЛИЗАЦИЯ 000



shf150: выбор варианта зависит от метрики

НЕУСТОЙЧИВАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ · H_s = 0,15 К·М/С · D3 · 10 РЕАЛИЗАЦИЙ



Сравнение 1D А и 1D Б: единого лучшего варианта нет

Режим	$\varepsilon_{L2}(\rho)$, А	$\varepsilon_{L2}(\rho)$, Б	$\varepsilon_{L2}(E_z)$, А	$\varepsilon_{L2}(E_z)$, Б	C_ρ, А	C_ρ, Б
ug2	0,150	0,409	0,184	0,223	0,991	0,892
ug10	0,173	0,334	0,179	0,224	0,996	0,837
shf050	0,285	0,263	0,127	0,156	0,951	0,975
shf150	0,283	0,318	0,023	0,052	0,947	0,975

НЕЙТРАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ

Для ug2 и ug10 вариант А уменьшает ошибку $\varepsilon_{L2}(\rho)$, повышает корреляцию формы профиля и покрытие IQR.

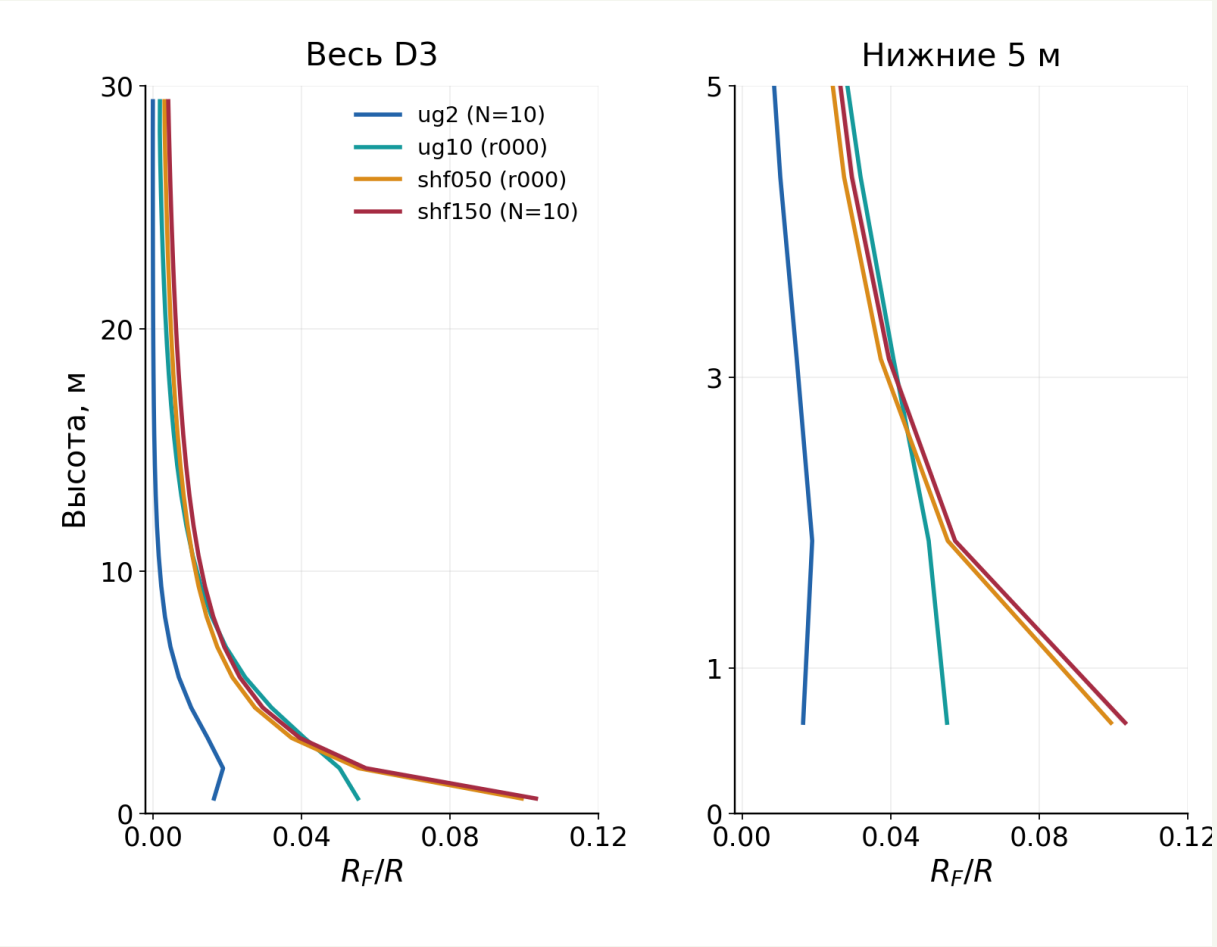
КОНВЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ

В обоих случаях вариант А даёт меньшую ошибку по E_z.

> Экстраполяцию K к поверхности следует выбирать с учётом режима и оцениваемой величины.

D3 · 0–30 м · относительные отклонения и корреляция формы · полный набор метрик вынесен в приложение

Ковариационный вклад максимален в приземном слое



1,89–10,31 %

Диапазон максимальных значений в домене D3 среди рассмотренных четырёх режимов

ug2: 1,89 % (z = 1,875 м)

ug10: 5,52 % (z = 0,625 м)

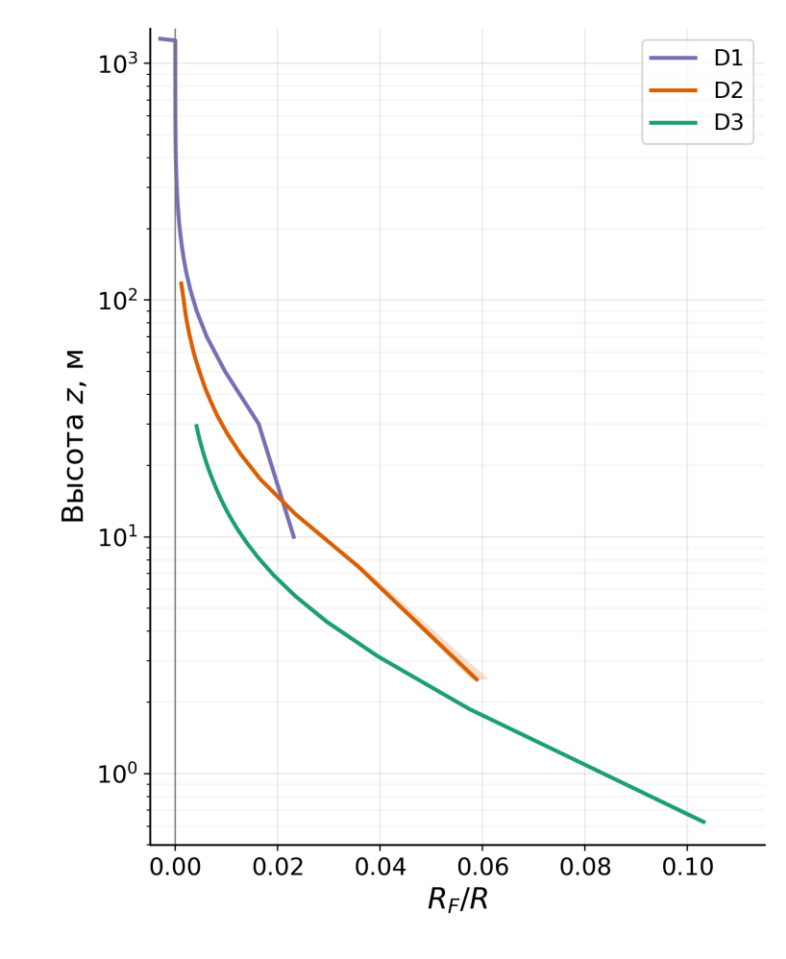
shf050: 9,93 % (z = 0,625 м)

shf150: 10,31 % (z = 0,625 м)

Для ug10 и shf050 показана реализация 000; для ug2 и shf150 — медиана и IQR по десяти реализациям.

Отношение рассчитано для каждой реализации · слева — вся область D3, справа — нижние 5 м · рис. 12

shf150: ковариационный вклад во вложенных областях



10,31 %

максимум медианного профиля в D3 · первый внутренний уровень z = 0,625 м

shf150 · десять реализаций · рис. 13

Выводы

01 Флуктуации n_+ и n_- пространственно коррелированы, поэтому одних средних вертикальных профилей недостаточно для расчёта среднего рекомбинационного стока: необходимо учитывать $\langle n'_+ n'_- \rangle$.

02 Ковариация флуктуаций n_+ и n_- увеличивает рекомбинационный сток. Максимум R_F/R составляет 1,89–10,31 %: для ug2 — на высоте 1,875 м, для остальных режимов — на 0,625 м.

03 В нейтральных режимах вариант “1D А” улучшает согласие формы и амплитуды профиля ρ с LES и увеличивает покрытие IQR по сравнению с “1D Б”, хотя модуль среднего смещения возрастает.

04 Ни “1D А”, ни “1D Б” не даёт наилучшего согласия с LES одновременно по ρ, E_z и C_ρ для всех режимов. На первом снизу узле D3 обычно $K_{LES}(z_1) > K_Б(z_1)$: диагностированный из PALM K не следует степенной экстраполяции вниз $K(z_2)(z/z_2)^m$ от второго узла. Представляют интерес проверка промежуточной параметризации K в 1D-модели и пересмотр параметризации приповерхностного переноса и граничных условий LES. Дополнительный аргумент — медиана решения PALM для ρ расположена между решениями “А” и “Б” (приложение «А»: дополнительные профили).

05 Для переноса результатов LES в одномерную модель требуются корректный профиль K у земной поверхности и замыкание $\langle n'_+ n'_- \rangle$.

Литература:

01 Мареев Е. А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527–534. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005h.0527.

02 Maronga B. et al. Overview of the PALM model system 6.0 // Geoscientific Model Development. 2020. Vol. 13. P. 1335–1372.

03 Anisimov S. V. et al. On the ratio of the components of the atmospheric vertical electric current density in fair weather // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. Vol. 1040. 012026.

04 Анисимов С. В., Мареев Е. А., Галиченко С. В. и др. Сравнение результатов мезомасштабного и вихреразрешающего моделирования с данными наблюдений в пограничном слое атмосферы // Изв. РАН. ФАО. 2025. Т. 61. № 2. С. 133–157.

05 Thomson J. J. Conduction of Electricity through Gases. Cambridge: Cambridge University Press, 1903. 566 p.

06 Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Издательство ТРТУ, 1998. 123 с.

07 Crozier W. D. Atmospheric electrical profiles below three meters // Journal of Geophysical Research. 1965. Vol. 70. № 12. P. 2785–2792.

08 Kamra A. K. Fair weather space charge distribution in the lowest 2 m of the atmosphere // Journal of Geophysical Research. 1982. Vol. 87. № C6. P. 4257–4263.

09 Куповых Г. В., Марченко А. Г., Морозов В. Н. Электрическая структура нестационарного приземного слоя в приближении турбулентного электродного эффекта // Известия вузов. СКР. Естественные науки. 2005. № 5. С. 46–51.

10 Анисимов С. В., Мареев Е. А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8–18. DOI: 10.1134/S1069351308100030.

11 Mareev E. A., Anisimov S. V. Lifetime of the thunderstorm electric energy in the global atmospheric circuit and thunderstorm energy characteristics // Atmospheric Research. 2009. Vol. 91. P. 161–164.

Ссылки: [1, 10, 11] — слайд 3 · [5–8] — слайд 7 · [2–4] — слайд 11 · [9] — слайд 14 · записи сокращены

Спасибо за внимание

Турбулентные потоки заряда и ковариационная поправка к скорости рекомбинации лёгких ионов в приземном слое атмосферы

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН №FMWU-2025-0049.

КОНТАКТЫ

С. В. Анисимов · anisimov@borok.yar.ru

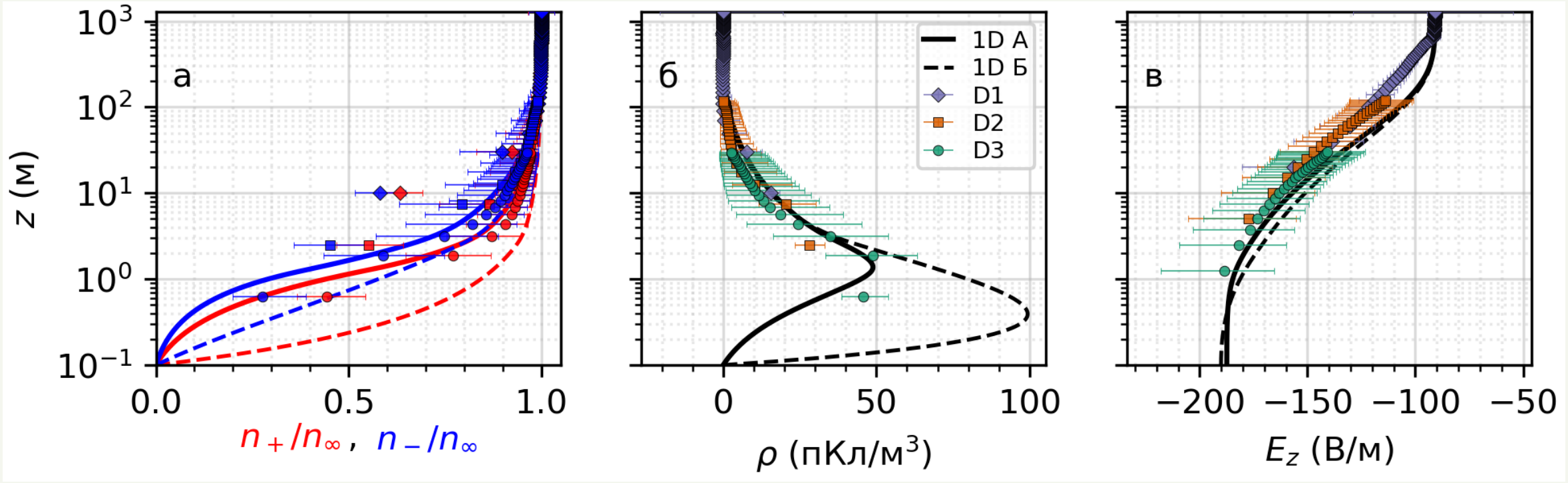
С. В. Галиченко · svga@borok.yar.ru

Э. М. Дмитриев · eldar@borok.yar.ru

А. А. Прохорчук · aleksandr.prokhorchuk@mail.ru

shf050: профили во вложенных областях D1–D3

H_s = 0,05 К·м/с · медиана и IQR пространственно-временной статистики LES



Безразмерные метрики профилей ρ и E_z

ОБЪЁМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА ρ

Режим	Вариант	ε_{L1}	D_N	B_N	$RMSE_{c,N}$	R_σ	F_{IQR}
ug2	А	0,177	0,146	−0,165	0,130	0,989	0,917
ug2	Б	0,383	0,673	−0,141	0,586	1,266	0,042
ug10	А	0,182	0,168	−0,182	0,095	1,005	0,917
ug10	Б	0,297	0,631	−0,121	0,864	1,506	0,167
shf050	А	0,299	0,392	0,109	0,398	0,701	0,958
shf050	Б	0,249	0,403	0,241	0,285	1,153	0,958
shf150	А	0,306	0,377	0,151	0,396	0,715	0,958
shf150	Б	0,307	0,478	0,307	0,331	1,220	0,958

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ АЭРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ E_z

Режим	Вариант	ε_{L1}	D_N	B_N	$RMSE_{c,N}$	R_σ	F_{IQR}
ug2	А	0,184	0,161	0,184	0,185	0,830	0,000
ug2	Б	0,218	0,214	0,218	0,301	0,747	0,000
ug10	А	0,180	0,170	0,180	0,157	0,846	0,000
ug10	Б	0,224	0,203	0,224	0,202	0,832	0,000
shf050	А	0,127	0,121	0,127	0,045	0,973	0,000
shf050	Б	0,157	0,133	0,157	0,067	0,989	0,000
shf150	А	0,022	0,031	0,022	0,032	0,988	1,000
shf150	Б	0,052	0,047	0,052	0,064	1,023	1,000

$L_i = q_i^{LES}$; ε_{L1} — относительная средняя абсолютная ошибка; $D_N = max_i|\delta_i|/max_i|L_i|$; $B_N = \sum_i w_i\delta_i/\sum_i w_i|L_i|$; $RMSE_{c,N} = RMSE/\sigma_L$; $\sigma_L = (H^{-1}\sum_i w_i(L_i - \bar{L})^2)^{1/2}$; $R_\sigma = \sigma_{1D}/\sigma_L$ — отношение вариативности, значение 1 соответствует равной вариативности; F_{IQR} — доля высот, на которых профиль 1D находится между квартилями LES.