

ВЪРХУ ЗАКОНИТЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕ
ЗА НЕУТРАЛНО И УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРАН
ПЛАНЕТАРЕН ГРАНИЧЕН СЛОЙ ПРИ ОТЧИТАНЕ
НА НЕЛОКАЛНИ ЕФЕКТИ, СВЪРЗАНИ
СЪС СВОБОДНАТА АТМОСФЕРА

ЕВГЕНИ СИРАКОВ, ЕМИЛ ЧОЛАКОВ, МИЛЕН ЦАНКОВ

Катедра „Метеорология и геофизика“

Евгени Сираков, Емил Чолаков, Милен Цанков. ВЪРХУ ЗАКОНИТЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕ ЗА НЕУТРАЛНО И УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРАН ПЛАНЕТАРЕН ГРАНИЧЕН СЛОЙ ПРИ ОТЧИТАНЕ НА НЕЛОКАЛНИ ЕФЕКТИ, СВЪРЗАНИ СЪС СВОБОДНАТА АТМОСФЕРА

Законите за съпротивление в планетарния граничен слой (ПГС) изразяват приземните потоци на импулс и топлина чрез основните външни параметри на ПГС. Универсалните функции A , B , C , участващи в тези закони при стационарен, баротропен, нощен (кратко съществуващ) ПГС, са функции на вътрешния параметър на стабилността μ . При дълго съществуващ ПГС (във високите географски северни ширини) тези функции зависят още и от външния параметър на стабилност t_N , свързан с честотата на Брунт–Вайсала в свободната атмосфера [1, 2]. При тези условия, в настоящата работа е определен явният вид на зависимостта на A , B , C , височините на приземния слой (ПС) и на ПГС от тези параметри, а също въз основа на числено решение на законите на съпротивление, са определени основни параметри, характеризиращи взаимодействието атмосфера–земна повърхност.

Evgeni Syrakov, Emil Cholakov, Milen Tsankov. ON THE RESISTANCE LAWS FOR NEUTRAL AND STABLE PLANETARY BOUNDARY LAYERS CONSIDERING NON-LOCAL EFFECTS CAUSED BY FREE-FLOW STABILITY

The planetary boundary layer (PBL) resistance and heat-transfer laws express the surface fluxes of momentum and heat through the PBL governing parameters. The universal functions taking part in these laws, A , B , C in a steady-state, barotropic, nocturnal (that is short-lived) PBL become functions of the internal stability parameter μ . At long-lived regime (in the high

northern latitudes), these functions also depend on the external free atmosphere stability parameter μ_N connected with Brant–Vaisala frequency in the free atmosphere [1, 2]. At these conditions, in the present work it is determined the explicit form of dependence of A , B , C and the heights of surface layer (SL) and PBL on these parameters, and also on the basis of numerical decision of the resistance laws, it is determined basic parameters characterizing the interaction atmosphere–land surface.

Keywords: universal functions, resistance laws, non-local effects, free atmosphere stability, neutral and stable PBL.

PACS number: 92.10.Lq

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че при обичайни нощни условия стабилно стратифицираният планетарен граничен слой (ПГС) е отделен от свободната атмосфера с така наречения остатъчен неутрално стратифициран слой (residual layer) и практически не взаимодейства с нея. В последно време стана ясно [1–4], че в северните области (с високи географски ширини) се наблюдава друг качествено различен, дълго съществуващ (long-lived) ПГС. В този случай липсва остатъчният слой, ПГС е директно “похлупен” от устойчиво стратифицирана свободна атмосфера и е съществено повлиян от нея чрез пренос на импулс и топлина, осъществяван главно чрез вътрешни гравитационни вълни [5].

Тези ефекти влияят също на профилите на скоростта $U(Z)$ и потенциалната температура $\theta(z)$ в приземния слой (ПС), които в този случай приемат вида [2]

$$\frac{dU}{dz} = \frac{U_*}{\kappa z} \varphi_U, \quad \varphi_U = 1 + C_U \frac{z}{L} (1 + C_{NM}^2 F_i^2)^{1/2}, \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{\theta_*}{\kappa_T z} \varphi_\theta, \quad \varphi_\theta = 1 + C_\theta \frac{z}{L} (1 + C_{NH} F_i^2), \quad (2)$$

където U_* е динамичната скорост, $\theta_* = -q/U_*$ – мащаб на температура, q – кинематичен поток на топлина в ПС, $L = \kappa L_{MO}$, $L_{MO} = -U_*^3 / \kappa \beta q$ е мащабът на Монин-Обухов, β – параметър на конвекция, $C_U = C_\theta = 2$, $C_{NM} = 0.06$, $C_{NH} = 0.6$, $\kappa \approx \kappa_T = 0.4$. Тук F_i е число, обратнопропорционално на числото на Фруд:

$$F_i = \frac{LN}{U_*}, \quad (3)$$

характеризиращо не локалните ефекти на взаимодействие между свободната атмосфера и ПГС, $N = \beta(d\theta/dz)|_{z=h}$ е честота на Брунт–Вайсала в свободната атмосфера, h – височина на ПГС. При $F_i = 0$ формулите (1–2) пре-

нават в добре известните такива от теорията на подобие на Монин–Обухов. Основна задача в работата е при отчитане на горните резултати да се определят основните характеристики на взаимодействието между атмосферата и земната повърхност при условия на дълго съществуващ ПГС.

2. ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Ще изходим от законите на съпротивления в ПГС при баротропни условия, записани във вида

$$A = \ln(R_0 C_d) - \kappa \frac{\cos \alpha}{C_d}, \quad (4)$$

$$B = -\kappa \frac{\sin \alpha}{C_d}, \quad (5)$$

$$C = \ln(R_0 C_d) - \kappa \frac{C_d}{C_H}, \quad (6)$$

където $R_0 = G_0/fz_0$ е геострофното число на Росби, z_0 – грапавостта, f – параметър на Кориолис, $G_0 = (U_{g0}^2 + V_{g0}^2)^{1/2}$ – модул на геострофния вятър, $U_{g0} = G_0 \cos \alpha$, $V_{g0} = G_0 \sin \alpha$ са негови компоненти, C_d , C_H , α са геострофен коефициент на съпротивление, топлинно число на Стентон и ъгъл на пълно завъртане на вятъра в ПГС. A, B, C са универсални функции, зависещи от вътрешния параметър на стратификация $\mu = (\kappa U_* / f) L_{M0}$ и външния, характеризиращ устойчиво стратифицираната свободна атмосфера параметър $\mu_N = N/f$. Нека преминем сега към определяне на тези зависимости, както и към решаване на законите на съпротивления (4–6) при споменатите условия.

За определяне на явната зависимост на A, B, C от параметрите μ и μ_N се използва двуслоен модел на ПГС: при $z \leq h$ – ПС при отчитане на (1–3) и слой под него ($h_s \leq z \leq h$), където се използва решение от екманов тип. При това височината h_s на ПС се определя от условието за постоянство на вертикалните потоци в ПС [6], а топлинният поток в ПГС се изразява във вида: $q(1 - m_1 z/h)^m$, където m_1 и m са константи. На тази база след съответни процедури на слепване на дефектите (при $z = h_s$) на скоростта и температурата е определен явният вид на зависимостта на A, B, C от μ и μ_N [7–9]:

$$A = -\ln \kappa H_s + \psi_{Uh} - B, \quad (7)$$

$$B = \frac{\varepsilon}{H_s},$$

$$C = -\ln \aleph H_s + \psi_{\theta h} - 2plB, \quad (9)$$

където:

$$\psi_{U_h} = \tilde{C}_U H_s \mu_M, \quad \mu_M = (\mu^2 + \tilde{C}_{NM}^2 \mu_N^2)^{1/2}, \quad (10)$$

$$\psi_{\theta h} = \tilde{C}_\theta H_s \mu_H, \quad \mu_H = (\mu^2 + \tilde{C}_{NH}^2 \mu_N^2)^{1/2}, \quad (11)$$

$$H_s = \frac{\varepsilon^2}{1 + \sqrt{1 + 8\varepsilon^2 \tilde{C}_U \mu_M}}. \quad (12)$$

Тук μ_M и μ_H са обобщени параметри на стратификация, отчитащи сумарния ефект от класическия вътрешен (μ) и външен (μ_N) параметър $H_s = h_s/(\aleph U_*/f)$, е безразмерна височина на ПС

$$\varepsilon = 0,1, \quad p = \left(1 - (1 - m_1)^{1+m}\right) / m_1(1+m), \quad l = \pi = 3,14, \quad \tilde{C}_U = C_U/\aleph = 5,$$

$$\tilde{C}_\theta = C_\theta/\aleph = 5, \quad \tilde{C}_{NM} = C_{NM}\aleph^2 = 0,01, \quad \tilde{C}_{NH} = C_{NH}\aleph^2 = 0,1, \quad m_1 = m = 1.$$

Въз основа на просто съотношение между височините на ПС и екманов ПГС (вж. [6]) се определя и безразмерната височина $H = h/(\aleph U_*/f)$ на ПГС:

$$H = C_H H_s, \quad (13)$$

където H_s се задава чрез (12), $C_H = 0,03$. Съгласно (13) H също зависи от параметрите μ и μ_N чрез тяхната комбинация – обобщения параметър на стратификация μ_M от (10).

3. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ

Подробен анализ на универсалните функции (7–9) се дава в [7–9]. Тук ще се спрем на някои резултати от численото решение на законите на съпротивление (4–6) при отчитане на (7–9). Ще отбележим, че вътрешният параметър на стратификацията μ може да бъде представен във вида

$$\mu = \aleph^2 \frac{C_H}{C_d} S. \quad (14)$$

Замествайки (14) в A, B, C лесно се вижда, че законите на съпротивление (4–6) представляват система от три трансцедентни уравнения за определяне зависимостта на трите неизвестни величини C_d, C_H (или μ) и α от външните за ПГС параметри (R_0, S, μ_N), т.е.

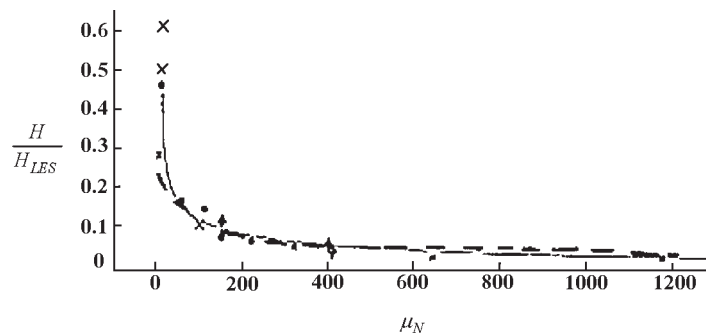
$$C_d = C_d(R_0, S, \mu_N), \quad (15)$$

$$C_H = C_H(R_0, S, \mu_N), \quad (16)$$

$$\alpha = \alpha(R_0, S, \mu_N). \quad (17)$$

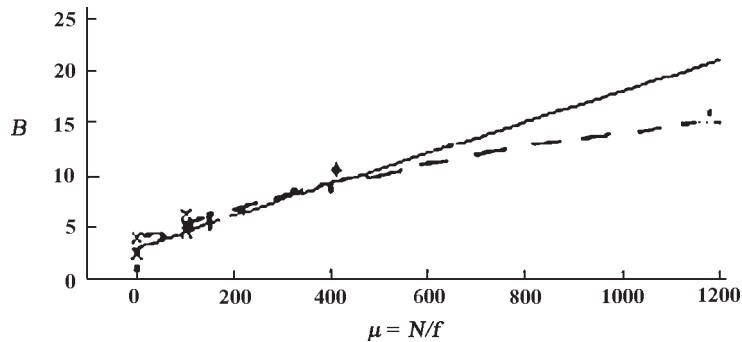
Система (4–6) е решена числено (по итерационен метод на Нютон), въз основа на което са определени параметрите (15–17), характеризиращи важните ефекти на взаимодействие на атмосферата със земната повърхност. При $\mu_N = 0$ получаваме известните класически резултати за устойчив ПГС при нощни условия. В по-общия случай на дълго съществуващ ПГС тези ефекти се усложняват поради нелокалните взаимодействия между свободната атмосфера и ПГС, характеризиращи се чрез параметъра μ_N .

Тук ще се ограничим само с някои резултати, показани на Фиг. 1–3 и демонстриращи влиянието на μ_N върху безразмерната височина на ПГС (13), универсалната функция (8) и ъгъла на пълно завъртане на вятъра в ПГС α (17), като при това се дава и тяхно сравнение с други резултати, сумирани в [10], включително „моделиране по метода на големите вихри“ (LES-моделиране).



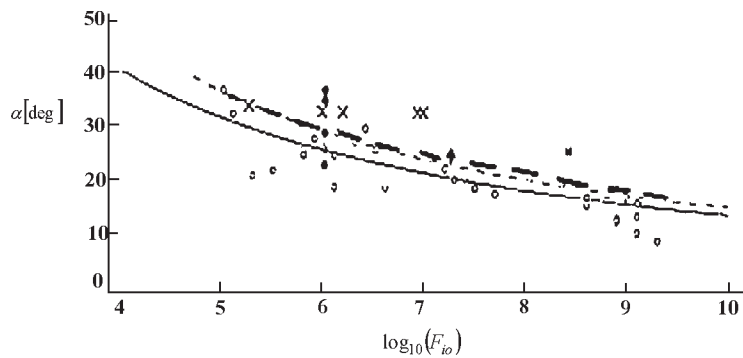
Фиг. 1. Зависимост на H от μ_N при режим на условно неутрално стратифициран ПГС. Плътната линия и дискретните символи се отнасят за резултати от LES-моделиране, сумирани в [10], пунктираната линия е получена по формула (13)

На фиг. 1 е показана зависимостта на безразмерната височина H от външния параметър μ_N при $\mu = 0$. Този турбулентен режим е наречен в [2,9] условно безразличен (conventional neutral). Това означава, че дори когато класическият вътрешен параметър $\mu = 0$, то в резултат на влиянието на свободната атмосфера, стратификацията като цяло в ПГС е отлична от безразлична. Съответната зависимост на $V(\mu, \mu_N)$ при същия режим ($\mu = 0$) от μ_N е дадена на фиг. 2.



Фиг. 2. Зависимост на B от μ_N при режим на условно неутрално стратифициран ПГС. Плътната линия и дискретните символи се отнасят за резултати от LES-моделиране, сумирани в [10], пунктираната линия е получена по формула (8)

На фиг.3 е представена зависимостта на ъгъла α на пълно завъртане на вятъра в ПГС от геострофното число на Росби R_0 при $\mu = 0$ и $\mu_N = 100$. И в трите случая се вижда, че получените в работата резултати са в добро съвпадение със споменатите данни. Ясно е също, че чисто неутрална стратификация (truly neutral) в ПГС, може да се наблюдава само ако влиянието на свободната атмосфера (като правило устойчиво стратифицирана) е пренебрежимо ($\mu_N = 0$). Както се вижда от фиг.1–3 при $\mu_N \neq 0$ се пораждат значими ефекти, които трябва да се отчитат при теоретично и експериментално изучаване на структурата на дълго съществуващ ПГС в атмосферата.



Фиг. 3. Зависимост на α от геострофното число на Росби R_0 при условно неутрална стратификация. Плътната линия представя резултати от [10], дискретните символи съответстват на различни резултати от LES-моделиране сумирани в [10], пунктираната линия е получена от числено решение на законите на съпротивление – формула (17)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е определена явната зависимост на функциите A , B , C както от μ , така и от външния (характеризиращ свободната атмосфера) параметър μ_N . На тази основа се дава числено решение на законите на съпротивление (4–6), в резултат на което са определени основните параметри C_d , α , C_H , μ , описващи процесите на взаимодействие между атмосферата и земната повърхност в условието на дълго съществуващ ПГС.

Резултатите могат да се използват при различни теоретични и приложни задачи, касаещи структурата на ПГС, параметризация на числени прогностични и климатични модели и описващи транспорта на замърсители модели в атмосферата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zilitinkevich, S., P. Galanca. *QJRM*, **126**, 2000, 1913.
2. Zilitinkevich, S., I. Esau. *QJRM*, **2005** (in press).
3. King, J., W. J. Connolley. *Climate*, **10**, 1997, 1273.
4. Hess, G. *BLM*, **110**, 2004, 319.
5. Soomere, T., S. Zilitinkevich. *OJRM*, **128**, 2002, 1029.
6. Сираков, Е. Дисертация д.ф.н. София, СУ, 1990.
7. Syrakov, E. *Ann. M. A.*, **1**, 2004, EMS-A00371, Nice, Fr.
8. Сираков, Е. *Год. СУ. Физ. фак.*, **98**, 2005, 167.
9. Syrakov, E., E. Cholakov. *Proc. of 3rd Int Symp, Istanbul*, 26–30 Sept, 2005.
10. Zilitinkevich, S. "ARW "A Poll. Pr. in Reg. S.", Greece 2002, 131.

Постъпила декември 2005

Евгени Сираков
Софийски университет „Св. Климент Охридски“
Физически Факултет
Катедра „Метеорология и геофизика“
Бул. „Джеймс Баучър“ 5
1164 София, България
E-mail: esyrakov@phys.uni-sofia.bg