

НЯКОИ ИНТЕГРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА АТМОСФЕРНИЯ ГРАНИЧЕН СЛОЙ ПРИ РАЗЛИЧНИ ПО ТИП ЗЕМНИ ПОВЪРХНОСТИ

ЕВГЕНИ СИРАКОВ, ЙЕНС БОНЕВИЦ

*Катедра „Метеорология и геофизика”, Физически факултет,
Софийски университет “Св. Климент Охридски”*

Евгени Сираков, Йенс Боневитц. НЯКОИ ИНТЕГРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА АТМОСФЕРНИЯ ГРАНИЧЕН СЛОЙ ПРИ РАЗЛИЧНИ ПО ТИП
ЗЕМНИ ПОВЪРХНОСТИ

Изследвани са базови характеристики на ПГС – среден по височината коефициент на вертикален турбулентен обмен, височина, коефициент на съпротивление, коефициент на турбулентно триене над различни по тип земни повърхности – суша, море, орография. Определена е тяхната зависимост от геострофното или планинското число на Росби, външният параметър на стратификация и особеностите на подложната повърхност. Дадени са сравнения с експериментални данни.

Evgeni Syrakov, Jens Bonewitz. SOME INTEGRAL CHARACTERISTICS OF INTERAC-
TION IN THE ATMOSPHERE BOUNDARY LAYER AT DIFFERENT IN DEPENDANCE OF
EARTH PROFILES

Researched were basic characteristics of PBL – medial for height coefficient of vertical turbulence exchange, height, coefficient of resistance, coefficient of turbulent friction over different earth profiles – land, sea, orographic. It is defined their dependence from the geostrophic or mountain number of Rossby, the external parameter of stratification and the specialty of the ground profile. Comparisons with experimental data are given also.

Keywords: vertical exchange coefficient, height of PBL, resistance coefficient, friction coefficient, resistance laws, mountain Rossby number

PACS number: 92.60 ± e

За контакти: Евгени Сираков, Катедра „Метеорология и геофизика”, Физически факултет, Софийски университет “Св. Климент Охридски”, бул. „Джеймс Баучър“ 5, София 1164, тел.: +359 2 8161-312, E-mail: esyrakov@phys.uni-sofia.bg

1. УВОД

В настоящата работа се разглеждат основни интегрални характеристики на обменните турбулентни процеси в планетарния граничен слой (ПГС).

Ще започнем с осреднения по височина коефициент на вертикален турбулентен обмен $\bar{k} = (1/H) \int_0^H k_z dz$ и височината H на ПГС.

Въз основа на метод на интегрална параметризация, базиран на уравнението на турбулентната кинетична енергия, явният вид на \bar{k} и H на стратифициран, баротропен ПГС се определя в [1–3]:

$$\bar{k} = k_0 \Phi^2, H = H_0 \Phi, \Phi = \frac{1}{\sqrt{mS} + \sqrt{mS^2 + 1}}, \quad (1)$$

където

$$k_0 = 2m \frac{G_0^2}{f}, \sqrt{m} = P_1 c_{g_0}; H_0 = 2\pi \sqrt{m} \frac{G_0}{f} \quad (2)$$

са стойностите на \bar{k} , H и коефициента на съпротивление $c_g = u_* / G_0$ при безразлична стратификация ($S = 0$), $P_1 = 0,4$. Тук $S = \beta \delta \theta / f G_0$ е интегрален външен параметър на температурна стратификация, $\delta \theta = \theta_H - \theta_0$ е дефект на температурата в ПГС, β и f са съответно параметър на конвекция и параметър на Кориолис, k_z – коефициент на вертикален турбулентен обмен в ПГС, $G_0 = (u_{g_0}^2 + v_{g_0}^2)^{1/2}$ – модул на геострофния вятър при земята, θ_0 – приземна стойност на потенциалната температура θ .

Тук трябва да се различават два вида турбулентни режими в ПГС. При хоризонтално еднородна турбулентност (над равна земна повърхност – суша, море) k_z зависи само от вертикалната координата z , а \bar{k} и H са постоянни величини. Тези условия се нарушават над орографско и термично нееднородна земна повърхност, когато k_z освен от z зависи и от хоризонталните координати x, y , съответно \bar{k} и H зависят също от x, y .

Целта на настоящата работа е конкретизиране на вида и анализ на свойствата на \bar{k} и H (и производни от тях интегрални характеристики) над различна по тип земна повърхност както еднородна – суша, море, така и при наличие на орография и хоризонтални термични нееднородности, а също сравнение на резултатите с експериментални данни.

2. КОЕФИЦИЕНТ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕ В ПГС

В (1) и (2) фигурира коефициентът на съпротивление c_{g_0} , описващ процесите на взаимодействие в ПГС при безразлична стратификация ($S = 0$). Важна задача е определянето вида на c_{g_0} над изброените по-горе различни по тип земни повърхности.

Ще започнем със случая на хоризонтално еднородна повърхност – суша, където $c_{g_0} = c_{g_0}(R_0)$ е функция на геострофното число на Росби: $R_0 = \frac{G_0}{fz_0}$, тук z_0 е параметър на микрогрападост. За определяне на явната зависимост на c_{g_0} от R_0 ще използваме законите на съпротивление при безразлична стратификация ($S = 0$), получени чрез двуслоен модел на ПГС: приземен слой (ПС) при $z \leq h_{S_0}$ и Екманов слой над него $z \geq h_{S_0}$ (вж. [3, 4]):

$$\chi \frac{\cos \alpha_0}{c_{g_0}} = \ln(R_0 c_{g_0}) - A_0, -\chi \frac{\sin \alpha_0}{c_{g_0}} = B_0, B_0 = 1/\sqrt{2k_{s_0}}, \quad (3)$$

където $\chi = 0,4$ е константа на фон Карман, A_0 и B_0 , $k_{s_0} = \chi u_* h_{S_0}$ и h_{S_0} са съответно стойности на универсалните функции, вертикалният коефициент на турбулентен обмен и височината на ПС при безразлична стратификация, $\alpha_0 = \alpha_0(R_0)$ е ъгълът между приземния геострофен вятър при безразлична стратификация в ПГС, u_* – динамична скорост.

Определянето на параметрите A_0, B_0 се базира на съвместно разглеждане на законите на съпротивление (3) с височината на ПС [3]. В общия случай на стратифициран ПС

$$H_s = \frac{\eta}{B(\mu)}, \quad (4)$$

където $H_s = \frac{h_s}{\lambda}$, $\lambda = \frac{\chi u_*}{f}$ – Екманов мащаб за дължина, h_s – височина на стратифициран ПС, μ – вътрешен параметър на стратификация в ПГС, $B(\mu)$ – универсална функция в законите на съпротивление в стратифициран ПГС, $\eta = 0,1$. В нашия случай на безразлична стратификация (при $\mu = 0$, $B = B_0$) и (4) приема вида

$$H_{S_0} = \eta/B_0, \quad (5)$$

където H_{S_0} е безразмерната височина на приземния слой при безразлична стратификация.

Комбинирайки сега (5) с (3), определяме вида на параметрите A_0, B_0 и H_{S_0} :

$$A_0 = -1/2\eta - \ln(2\chi\eta^2), B_0 = 1/2\eta, H_{s0} = 2\eta^2 \quad (6)$$

При така определените стойности за A_0 и B_0 законите на съпротивление (3) представляват система от две нелинейни, трансцедентни уравнения за определяне зависимостта на неизвестните величини c_{g0} и α_0 от R_0 .

Горните резултати касаят параметризация на ПГС над суша. При параметризация над море трябва да се отчете, че z_0 не е независим външен параметър и съгласно формулата на Чарнок се изразява във вида

$$z_0 = c_m u_*^2 / g, \quad (7)$$

поради което числото на R_0 се заменя с числото на Летау $L_e = g/fG_0$, като връзката между тях е

$$R_0 = L_e / c_m c_d^2, \quad (8)$$

където g е земното ускорение, $c_m = 0,011$ (вж. [5]).

Формула (7) описва режима на развито (интензивно) вълнение. В по-общия случай при отчитане както на развито вълнение, така и при вискозно обтичане

$$z_0 = \frac{u_*^2}{g} f_0\left(\frac{v_g}{u_*}\right). \quad (9)$$

където v_g е коефициент на молекулен вискозитет на въздуха. След разлагане на $f_0(x)$ в ред на Маклорен при неголеми значения на аргумента в околността на точка $x = 0$ (съответстваща на режима на развито вълнение), като се ограничим с линейно приближение, получаваме интерполационна формула, валидна както за режима на гладко (вискозно) обтичане, така и на развито вълнение:

$$z_0 = c_m u_*^2 / g + m_1 v / u_*, \quad (10)$$

където съгласно експериментални данни константата на Никурадзе има стойност $m_1 \approx 0,11$. Така вместо (8) се получава по-общата връзка

$$R_0 = L_e / c_m c_d^2 [1 + (m_1 / c_m)]. \quad (11)$$

Съгласно (8) и (11) над морска повърхност числото на Росби R_0 се заменя с това на Летау L_e .

В този случай законите на съпротивление (3) представляват система от две нелинейни, трансцедентни уравнения за определяне зависимостта на неизвестните величини c_{g0} и α_0 от L_e .

И в двата случая – над суша или морска повърхност, съответните системи от трансцедентни уравнения се решават числено по итерационния метод

на Нютон. Определените по този начин функции $c_{g_0}(R_0)$ и $c_g(L_e)$, $\alpha(L_e)$ имат плавен характер на изменение и с достатъчна точност могат да се апроксимират с параболични. Така например c_{g_0} се апроксимира с формулите

$$\begin{aligned} c_{g_0} &= a_1 + a_2 \log R_0 + a_3 (\log R_0)^2 - \text{над суша}; \\ c_{g_0} &= b_1 + b_2 \log L_e + b_3 (\log L_e)^2 - \text{над море}, \end{aligned} \quad (12)$$

където $a_1 = 0,0954$, $a_2 = 0,0137$, $a_3 = 6,28 \cdot 10^{-4}$, $b_1 = 0,042$, $b_2 = 0,006$, $b_3 = 0,0035$.

Предвидените по-горе резултати се отнасят за случай на неголеми неравности (примерно при $\log R_0 > 4,5$) със средна височина h . Връзката между микрограпавостта z_0 и h се дава чрез дефиниционното съотношение

$$z_0 = ah. \quad (13)$$

при типично значение $\alpha \approx 1/10$ (вж. [6]).

Над орографски райони, когато в (13) h трябва да се замени с осреднената орография Z_0 (т.е. $h = Z_0$), параметрите c_{g_0} и α_0 зависят от планинското число на Росби $\tilde{R}_0 = \frac{G_0}{fZ_0}$. Между \tilde{R}_0 и R_0 има проста връзка:

$$\tilde{R}_0 = \alpha R_0, \quad (14)$$

което позволява c_{g_0} и α_0 да се изразят както като функция на \tilde{R}_0 , така и на R_0 .

Определяне вида на зависимостите $c_{g_0} = c_{g_0}(\tilde{R}_0)$ и $\alpha_0 = \alpha_0(\tilde{R}_0)$ е важна и не докрай изследвана задача. Най-често за целта се използват различни емпирични зависимости.

За да избегнем произволността на различните емпирични подходи, тук ще определим тези зависимости отново въз основа на законите на съпротивление при безразлична стратификация (3).

Системата от двете трансцедентни уравнения (3) сега се решава числено при типични стойности на параметрите $A_0 = 1$, $B_0 = 1,75$ (близки до препоръчаните в [7]), получени от (6) при $\eta = 0,28$ (ще припомним, че над еднородна повърхност – суша, море – $\eta = 0,1$).

Ще отбележим, че типичният диапазон на изменение на R_0 над еднородна повърхност съответства на $\log R_0 > 4 \div 4,5$, докато над орографска повърхност – на $\log R_0 \leq 4$.

Числените решения и сега с достатъчна точност могат да се представят (при $\log R_0 \leq 4$) чрез апроксимационни формули. Така например:

$$c_{g_0} = (n_1 + n_2 R_0^m) \quad (15)$$

$$n_1 = 0,28, \quad n_2 = 5,4, \quad m = -2/3.$$

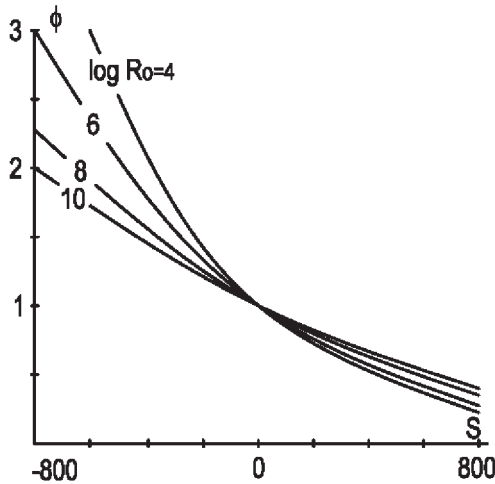
При използване на планинското число на Росби \tilde{R}_0 (при $\log \tilde{R}_0 > 3$) формула (15) се записва във вида

$$c_{g0} = (n_1 + P\tilde{R}_0^m) \quad (16)$$

В съответствие с получените резултати за c_{g0} в (12) и (16) и въз основа на връзката (2) определяме параметъра \sqrt{m} . Това разширява приложимостта на формули (1), (2) над еднородна (суша, море) и орографска земна повърхност.

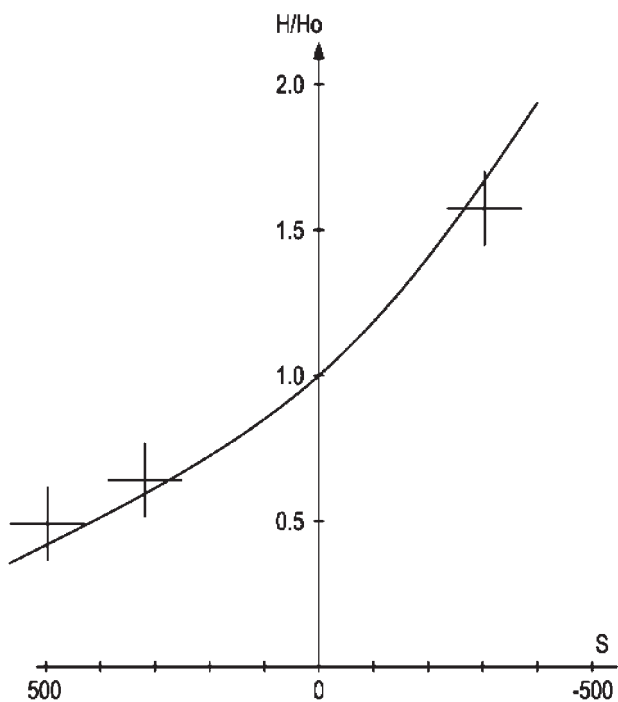
3. СРАВНЕНИЕ С ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ

Тук ще дадем някои графични представяния на получените резултати, както и тяхна съпоставка с експериментални данни. С отчитане на (17) над суша (при $\log R_0 > 4$) на фиг. 1 е показана зависимостта на функцията $H/H_0 = \Phi$ от интегралния параметър на стратификация S в диапазона от силна неустойчивост ($S = -800$) до силна устойчивост ($S = 800$) в ПГС при различни стойности на геострофното число на Росби $R_0 = \frac{G_0}{fz_0}$. Изменението на функцията Φ е значително, като съществено нараства в посока на усилване неустойчивостта в ПГС и увеличаване на параметъра на микрограпавост z_0 (т.е. намаляване на R_0).



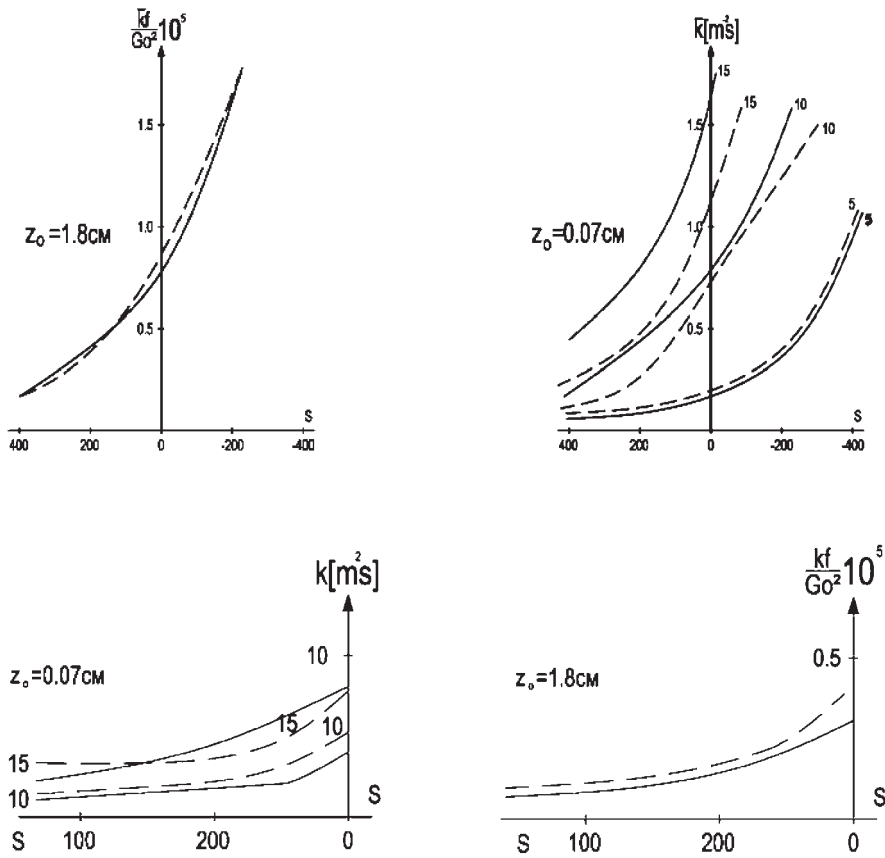
Фиг. 1. Зависимост на функцията Φ от параметъра на стратификация S при различни стойности на $\log R_0$

Сравнение на отношението $H/H_0 = \Phi$ с експериментални данни [8] е представено на фиг. 2, като се наблюдава добро съвпадение.



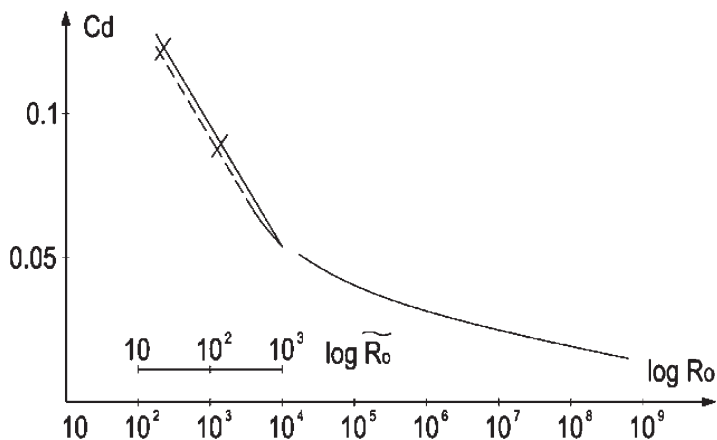
Фиг. 2. Сравнение на H/H_0 с експериментални данни (+) дадени в [8]

Същото може да се каже и за сравнението на \bar{k} с експерименталните данни [8] при $z_0 = 0,07$ cm и различни стойности на геострофния вятър $G_0 = 5; 10$ и $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ и при $z_0 = 1,8$ cm, $G_0 = 7,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (фиг. 3).



Фиг. 3. Сравнение на теоретично определената величина \bar{k} (—) с експерименталните данни (----), сумирани в [8]

Да преминем сега към случая, когато се отчита влиянието на орографията и в съответствие с (16) c_{g0} зависи от планинското число на Росби \tilde{R}_0 .



Фиг. 4. Зависимост на c_{g0} от геострофното число на Росби (R_0) над равна повърхност и от планинското число на Росби (\tilde{R}_0) над орография (надебелената линия) и сравнение с експериментални данни (x)

Комбинирайки формула (12) с (15) и (16), на фиг. 4 е представена зависимостта на c_{g0} при широк диапазон на изменение на R_0 над еднородна земна повърхност с нарастваща микрограпавост ($\log R_0 \geq 4,5$) и над орография (при $\log R_0 < 4$), съответно $\log \tilde{R}_0 < 3$ (вж. също табл. 1).

Таблица 1. Зависимост на c_{g0} и α_0 от геострофното (R_0) и планинското (\tilde{R}_0) число на Росби над орография

R_0	10^4	10^3	10^2
\tilde{R}_0	10^3	10^2	10
c_{g0}	0,053	0,086	0,145
α_0	25°	36°	57°

На фиг. 4 е дадено също сравнение на резултатите над орография с известните експериментални данни [9]. Представлява интерес изменението на ъгъла α_0 над орографска повърхност от планинското число на Росби \tilde{R}_0 (табл. 1). Вижда се, че с увеличаване височината на орографията Z_0 , т.е. намаляване на \tilde{R}_0 , α_0 расте, достигайки стойност 55° при $\log \tilde{R}_0 = 1$, докато c_{g0} расте, достигайки стойност 0,135 при $\log \tilde{R}_0 = 1$.

4. КОЕФИЦИЕНТ НА ТУРБУЛЕНТНО ТРИЕНЕ В ПГС

Въз основа на формулите (1), (2) могат да бъдат получени редица производни от тях интегрални характеристики. Тук ще се ограничим с една от тях, представляваща основна турбулентна характеристика в ПГС – коефициента на турбулентно триене $c = \sqrt{2\bar{k}/f}$. При отчитане на (1), (2) получаваме следната форма за c в стратифициран ПГС:

$$c = c_0\phi, \quad (18)$$

където

$$c_0 = 0,9\sqrt{c_{g0}} \frac{G_0}{f} \phi \quad (19)$$

е коефициент на триене в ПГС при безразлична стратификация ($S = 0$), а c_{g0} се задава съгласно (17). Отчитайки (1), (2) и (17), определяме явния вид на c над различни по тип земни повърхности.

Ще отбележим също, че при отчитане на съвместното влияние на орографско-термичните хоризонтални нееднородности и триенето за вертикалната скорост w_H на горната граница на ПГС се използва формулата (вж. [3])

$$w_H = w_I + c\Omega_{g0} + \Delta w_{or} + \Delta w_T, \quad (20)$$

където w_I описва идеалното обтичане, Ω_{g0} е геострофен вихър, Δw_{or} , Δw_T са членове, описващи орографски и термични ефекти, чиито явен вид тук няма да конкретизираме.

Ще отбележим, че във формула (20) коефициентът на турбулентно триене фигурира явно във втория член. Освен това в Δw_{or} , Δw_T фигурират също теглови коефициенти от вида $\partial c/\partial \tilde{R}_0$ и $\partial c/\partial S$, определящи тегловия принос на орографските и термичните фактори във формирането на w_H . Важната задача за определяне вида на тези коефициенти може да бъде решена въз основа на получените по-горе изрази (18) и (19) за c при отчитане на (1), (2) и (17).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитият в работата подход позволява разширяване приложимостта на базовите интегрални характеристики \bar{k} , H и c над различни по тип земни повърхности: над еднородна земна повърхност – суша, море, както и при отчитане на орографско-термични хоризонтални нееднородности.

Получените резултати могат да бъдат развивани в няколко посоки: определяне на допълнителни интегрални характеристики на ПГС, представляващи производни от изследваните по-горе; определяне вида на тегловите коефициенти във формулата за w_H ; параметризиране на процесите на взаимодействие на атмосферата със земната повърхност и др. На тези въпроси ще обърнем внимание в следващи изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Syrakov, E. *Compt. Rend. de l'Acad. Bulg. Sci.*, 1984, **37**, 7, 863.
- [2] Сираков, Е. *Zb. Met. i Hidr. Rad.*, 1985, **12**, 200.
- [3] Сираков, Е. Атмосферен граничен слой – структура, параметризация, взаимодействие. София, 2011.
- [4] Йорданов, Д. *Изв. А. М. СССР, ФАО*, 1975, **XI**, 630.
- [5] Монин, А., А. Ягом. Статистические гидромеханика, т. I. Москва, 1965.
- [6] Csanady, G. *Air-sea interaction*. Cambridge, 2001.
- [7] Mason, P. *ECHWF.SPRK.*, V.1, 1985.
- [8] Орляноко, Л. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Ленинград, 1979.
- [9] Gressmann, G. *Mon. Wea. Rev.*, 1960, **88**, 9.

Дата на постъпване: 13.02.2014 г.

Рецензент: проф. дфн Костадин Ганев, НИГГГ – БАН