Annuaire de l'Université de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculté de Physique, 96, 2003

НЯКОИ ВРЪЗКИ МЕЖДУ КРИТЕРИИТЕ НА УСТОЙЧИВОСТ НА ПРИЗЕМНИЯ И ГРАНИЧЕН АТМОСФЕРЕН СЛОЙ

ЕВГЕНИ СИРАКОВ, ЙОРДАНКА МИХАЙЛОВА, СИЛВИЯ ПЕТРОВА

Катедра „Метеорология и геофизика"

Евгени Сираков, Йорданка Михайлова, Силвия Петрова. НЯКОИ ВРЪЗКИ МЕЖДУ КРИТЕРИИТЕ НА УСТОЙЧИВОСТ В ПРИЗЕМНИЯ И ГРАНИЧЕН АТМОСФЕРЕН СЛОЙ

Въз основа на съвместно разглеждане на законите на съпротивление в планетарния граничен слой (ПГС) и интегралния R_{ib}-метод за параметризация в приземния слой (ПС) са установени връзки и критерии за съгласуваност между критериите за стабилност в тези два слоя.

Evgeni Syrakov, Yordanka Mihaylova, Silviya Petrova. SOME RELATIONS BETWEEN SURFACE LAYER'S AND PBL'S CRITERIA OF STABILITY

According to the joint studies of resistance laws in the planetary boundary layer (PBL) and integral R_{ib}-approach for parametrization in the surface layer and found relations and criteria for co-ordination between criteria of stability in the both layers.
Keywords: turbulent flux, Richardson number, resistance laws, criteria of stability
PACS number: 92.10.Lq

УВОД

Планетарният граничен слой (ПГС) на атмосферата, независимо от относително малката си дебелина (от стотици метри до 1–1,5 km) спрямо височината на тропосферата, играе основна и определяща роля в процесите на обмен на количеството движение, топлината и другите субстанции между земната повърхност и свободната атмосфера. Основните параметри на това взаимодействие са различните вертикални потоци. Също индикатор на взаимодействието е ъгълът на пълно завъртане на вятъра в ПГС между приземния и геострофния вятър. За определяне на степента и режимите на взаимодействие се използват набор параметри и критерии на устойчивост.

Споменатите характеристики могат да бъдат определени при използване на различни входни параметри. Най-голям интерес в това отношение представляват рутинните (регулярно получавани в оперативната практика) данни – приземни или височинни, аерологосиноптични. На тази основа в работата са реализирани няколко параметризационни подхода (схеми). Свързващото звено в тях е, че се използва интегралното число на Ричардсън във вариант за приземен слой или целия ПГС.

Целта на работата е чрез подходяща комбинация на тези подходи да се получат взаимни връзки и съгласуваност между резултатите и параметрите, съответстващи на приземните и аерологосиноптичните данни.

За всички изброени случаи, в крайна сметка, са получени съответни номограми, позволяващи определяне на основните характеристики при различни режими и условия на взаимодействие на атмосферата със земната повърхност.

ПРОФИЛИ НА МЕТЕОРОЛОГИЧНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ В ПРИЗЕМНИЯ СЛОЙ И ТЯХНОТО СЪГЛАСУВАНЕ

Съгласно теорията на Монин–Обухов в приземния слой (ПС) са в сила формулите

$$\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}z} &= \frac{u_*}{\chi z}\varphi_u(\xi), \\ \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}z} &= \frac{T_*}{\chi z}\varphi_\theta(\xi), \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} K_z &= \frac{\chi u_* z}{\varphi_u}, \\ K_{z\theta} &= \frac{\chi u_* z}{\varphi_\theta}, \\ \alpha(\xi) &= \frac{K_{z\theta}}{K_z} = \frac{\varphi_u}{\varphi_\theta}, \end{aligned} \tag{2}$$

където u и θ са скоростта и потенциалната температура, K_z и $K_{z\theta}$ – коефициентите на вертикален турбулентен обмен за количеството движение и топлина, $\xi = \dfrac{z}{L}$, $L = \dfrac{u_*^3}{\chi\beta q}$ – мащаб на Монин–Обухов, $\chi = 0{,}4$ – константа на Карман, $T_* = -\dfrac{u_*}{\chi q}$ – мащаб на температурата, $\varphi_\theta(\xi)$ и $\varphi_u(\xi)$ – универсални функции, u_* – динамична скорост, $q = \dfrac{H}{\rho C_p}$ – нормиран топлинен поток.

На определянето (теоретично и експериментално) вида на φ_u и φ_θ са посветени много изследвания [1, 2]. В това отношение се различават главно две техни разновидности. Станалият вече класически вариант, базиращ се на теоретичните асимптоти на теорията на подобието, има вида [3]

$$\varphi_u = \begin{cases} \begin{cases} 1+B_u\xi\ , & \xi \le \xi_k \\ \left(\dfrac{1}{R_{fk}}\right)\xi\ , & \xi \ge \xi_k \end{cases}\ , & \xi > 0 \\ \\ \begin{cases} 1-b|\xi|\ , & |\xi| \le \xi_i \\ c|\xi|^{-1/3}\ , & |\xi| \ge \xi_i \end{cases}\ , & \xi < 0 \end{cases}\ ,$$

$$\varphi_\theta = \begin{cases} \begin{cases} 1+B_\theta\xi, & \xi \le \xi_k \\ \left(\dfrac{1}{dR_{fk}}\right)\xi\ , & \xi \ge \xi_k \end{cases}\ , & \xi > 0 \\ \\ \begin{cases} 1-b_\theta|\xi|\ , & |\xi| \le \xi_i \\ C_\theta|\xi|^{-1/3}\ , & |\xi| \ge \xi_i \end{cases}\ , & \xi < 0 \end{cases}\ . \tag{3}$$

Вижда се, че φ_u и φ_θ зависят от универсалните константи

$$d, R_{fk}, c, C_\theta, \xi_i, \xi_k, \alpha_0 = \alpha(\xi = 0), \tag{4}$$

като всички останали се изразяват чрез тях от условието за непрекъснатост на (3)

$$B_k = \frac{1}{R_{fk}} - \frac{1}{\xi_k},\ B_\theta = \frac{1}{dR_{fk}} - \frac{1}{\alpha_0\xi_k},$$
$$b = \frac{c}{\xi_i} - \frac{1}{\xi_i^{1/3}},\ b_\theta = \frac{1}{\alpha_0\xi_i} - \frac{C_\theta}{\xi_i^{1/3}}\ . \tag{5}$$

Тук R_{fk} е критично число на Ричардсън, ξ_i и ξ_k – безразмерни височини на динамичните подслоеве при устойчива и неустойчива стратификация в ПС. Един модифициран вариант на (3) се базира на предположението $\varphi_u \equiv \varphi_\theta$ и някои опростявания:

$$\varphi_u = \varphi_\theta = \begin{cases} 1+B_u\xi, & \xi > 0 \\ 1, & |\xi| \le \xi_i \\ c|\xi|^{1/3}, & |\xi| \ge \xi_i, \end{cases} \tag{6}$$

В (3), както и в (6), константите (4) са определени по експериментални данни от 60-те години на XX в.:

$$\begin{aligned} &\alpha = 1,\ d = 1,\ R_{fk} = 0{,}08 \\ &c = C_\theta = 0{,}36,\ \xi_i = 0{,}07,\ \xi_k = 0{,}4. \end{aligned} \tag{7}$$

В съответствие с по-нови експериментални данни [4] се предлагат следните емпирични изрази за φ_u и φ_θ:

$$\varphi_u = \begin{cases} (1-b'\xi)^{1/4} \\ (1-B'\xi) \end{cases}\ , \tag{8}$$

$$\varphi_\theta = \begin{cases} \dfrac{1}{\alpha_0}(1 - b'_\theta \xi)^{-1/2}, \ \xi < 0 \\ \dfrac{1}{\alpha_0}(1 - B'_\theta \xi), \ \xi > 0 \end{cases}, \tag{9}$$

където $\alpha_0 = 1{,}35$, $b' = 9$, $b'_\theta = 15$, $B' = 4{,}7$, $B'_\theta = 6{,}35$.

Ще отбележим, че формули (8) не се съгласуват с теоретичните асимптотични резултати за свободна конвекция. Независимо от известна дискусионност асимптотите при неустойчива стратификация „$-1/4$" и „$-1/2$" не могат да се обосноват в рамките на теорията на подобието [5]. Освен това във връзка с развитието на теорията на конвективния ПГС потвърждение и масово разпространение получи класическата асимптота „$-1/3$". Поради това в редица работи при $\xi < 0$ (8) се коригират и модифицират във вида [6–8]

$$\varphi_u(\xi) = (1 - P_u \xi)^{-1/3}, \quad \varphi_\theta(\xi) = \frac{1}{\alpha_0}(1 - P_\theta \xi)^{-1/3}, \quad \xi < 0. \tag{10}$$

В работите [8] са въведени и използвани универсалните функции φ_u и φ_θ при неустойчива стратификация, описани с формули (10), при устойчива – (9), за следните стойности на фигуриращите в тях константи

$$\alpha_0 = 1, \quad P_u = 7, \quad P_\theta = 60, \tag{11}$$

$$B' = 5{,}5, \quad B'_\theta = 7{,}5. \tag{12}$$

Този избор на константите се потвърждава като оптимален и в по-късната обзорна работа за универсалните функции [9].

Интересен е също въпросът за съгласуване (съвпадение) на $\varphi_u(\xi)$ и $\varphi_\theta(\xi)$, зададени съответно чрез (3, 8–10). Функции (10) при отчитане на (11) практически съвпадат с (8). Що се касае до (3), то те също се оказват много близки до (10) и (9) при отчитане на (11) и (12), но при следната промяна (актуализация) на константите (4) [8]:

$$\begin{aligned} &\alpha_0 = 1 \\ &\alpha = 0{,}75 \\ &R_{fk} = 0{,}18 \\ &\xi_k = 0{,}8 \\ &c = 0{,}5 \\ &c_0 = 0{,}25 \\ &\xi_i = 0{,}16. \end{aligned} \tag{13}$$

По-долу в работата се използват универсалните функции φ_u и φ_θ, зададени чрез (9) и (10), при отчитане на (11) и (12), които, както подчертахме вече, са в много добро съгласие с последните обработки и анализи на експерименталните данни [9].

След интегриране на изразите (1) за градиентите на скоростта и температурата по z, съответно от z_3 до z_4 (ξ_3 до ξ_4) и z_1 до z_2 (ξ_1 до ξ_2), получаваме

$$\begin{aligned} u_3 - u_4 &= \frac{u_*}{\chi}\left[\ln\frac{\xi_4}{\xi_3} - \Psi_u(\xi_4) - \Psi_u(\xi_3)\right], \\ \theta_2 - \theta_1 &= \frac{T_*}{\chi}\left[\ln\frac{\xi_2}{\xi_1} - \Psi_\theta(\xi_2) - \Psi_\theta(\xi_1)\right], \end{aligned} \tag{14}$$

където $\xi_1 = \dfrac{z_1}{L}$, $\xi_2 = \dfrac{z_2}{L}$, $\xi_3 = \dfrac{z_3}{L}$, а функциите Ψ_u и Ψ_θ се определят по формулите

$$\begin{aligned} \Psi_u(\xi_i) &= \int_{\xi_0}^{\xi_i}[1-\varphi_u(\xi)]\frac{\mathrm{d}\xi}{\xi},\ i = 3, 4, \\ \Psi_\theta(\xi_i) &= \int_{\xi_0}^{\xi_i}[1-\varphi_u(\xi)]\frac{\mathrm{d}\xi}{\xi},\ i = 1, 2, \end{aligned} \tag{15}$$

Като заместим в (15) изразите за φ_u и φ_θ, лесно определяме явния аналитичен вид на Ψ_u и Ψ_θ от ξ за всеки от разгледаните в предния раздел случаи. При използване на приземни градиентни данни е целесъобразно да се въведе следния обобщен интегрален параметър на устойчивост в ПС

$$R_{ib} = \frac{\beta(\theta_2-\theta_1)\Delta z_u^2}{(u_4-u_3)^2\Delta z_\theta}, \tag{16}$$

където $\Delta z_u = z_4 - z_3$, а $\Delta z_\theta = z_2 - z_1$.

С помощта на (14) и (15) горният израз се записва във вида

$$R_{ib} = \frac{\ln\left(\dfrac{\xi_2}{\xi_1}\right) - \Psi_\theta(\xi_2) + \Psi_\theta(\xi_1)}{\alpha_0\left[\ln\left(\dfrac{\xi_4}{\xi_3}\right) - \Psi_u(\xi_4) + \Psi_u(\xi_3)\right]}\frac{(\xi_4-\xi_3)^2}{(\xi_2-\xi_1)}. \tag{17}$$

В частния случай $z_4 = z_2$, $z_3 = z_1$ R_{ib} съвпада с интегралното число на Ричардсън за слоя $z_2 - z_1$

$$R_{ib} = \frac{\ln\left(\dfrac{\xi_2}{\xi_1}\right) - \Psi_\theta(\xi_2) + \Psi_\theta(\xi_1)}{\alpha_0\left[\ln\left(\dfrac{\xi_2}{\xi_1}\right) - \Psi_u(\xi_2) + \Psi_u(\xi_1)\right]}(\xi_2-\xi_1). \tag{18}$$

Ако долното ниво не се отнесе към земната повърхност $z_1 = z_0$ (т. е. $\xi_1 = z_0/L$) и $z_2 = z$ ($\xi_2 = \xi$) се приеме за текущо ниво в ПС, то (18) се модифицира във вида

$$R_{ib} = \frac{\ln\left(\dfrac{\xi}{\xi_0}\right) - \Psi_\theta(\xi)}{\alpha_0\left[\ln\left(\dfrac{\xi}{\xi_0}\right) - \Psi_u(\xi)\right]}\xi, \qquad (19)$$

като в този случай R_{ib} зависи и от грапавостта на земната повърхност посредством $\xi_0 = z_0/L$.

При висока растителност (19) може да се модифицира, като се отчете съответната поправка в логаритмичния закон

$$R_{ib} = \frac{\ln\left(\dfrac{z-d_0}{z_0}\right) - \Psi_\theta(\xi')}{\alpha_0\left[\ln\left(\dfrac{z-d_0}{z_0}\right) - \Psi_u(\xi')\right]}\xi', \qquad \xi' = (z-d_0)/L, \qquad (20)$$

където d_0 е т. нар. височина на отместване, чрез която в дадения случай се постига анулиране на скоростта на ниво $z = z_0 + d_0$.

В зависимост от целите на конкретната задача от (17) могат да се получат и други модифицирани варианти.

Във всички случаи при зададени нива z_1, z_2, z_3 и z_4 R_{ib} представлява известна еднозначна функция само на L и ξ_0 (и още $D_0 = d_0/L$ при висока растителност). След процедура на обръщане на тази функция определяме $L = L(R_{ib}, \xi_0, D_0)$. Като заместим последната в (14) и (15) (записани за същите нива, както и R_{ib}), определяме лесно потока на импулс (u_*) и потока на топлина (q) в ПС чрез споменатите параметри R_{ib}, ξ_0, D_0. При избрано z_1, различно от приземното ниво z_0 и $D_0 = 0$, остава само зависимостта от R_{ib}. По този начин могат да се определят не само потоците, а и редица други, производни от тях величини.

Ще започнем със стандартен избор на нивата за градиентни измервания

$$z_2 = 22, \qquad z_1 = 0{,}5, \qquad (21)$$

когато съгласно с (16) R_{ib} приема вида

$$R_{ib} = \frac{\beta\Delta\theta}{(\Delta u)^2}\Delta z. \qquad (22)$$

Тук $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_{0,5}$, $\Delta u = u_2 = u_0$, $\Delta z = 1{,}5$ m.

При избор на нивата

$$z_2 = 10, \qquad z_1 = z_0 \qquad (23)$$

се използва отново израза (22) за R_{ib}, но сега $\Delta u = u_{10}$, $z_1 = 0{,}5$, $\Delta\theta = \theta_{10} - \theta_0$.

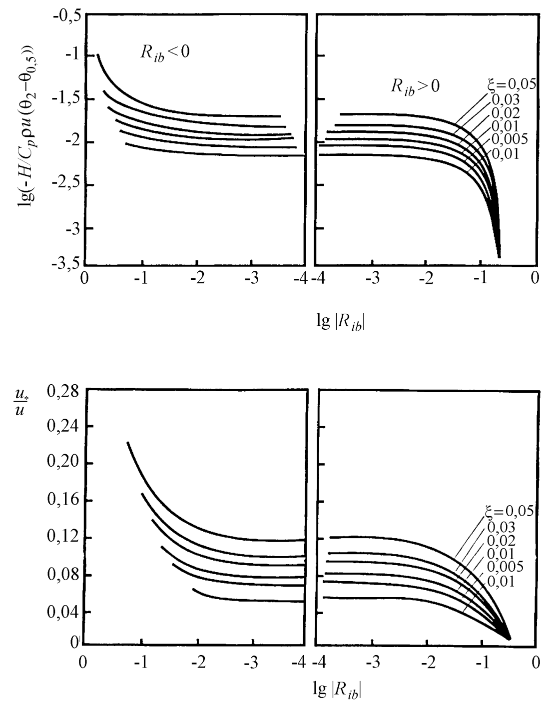
Един друг, широко използван избор на нивата е следният

$$z_2 = 2 \text{ m}, \qquad \mathrm{z}_1 = 0,5 \text{ m}, \qquad \mathrm{z}_4 = \mathrm{h_m} = 1 \text{ m}, \tag{24}$$

при който величините $C_d = \dfrac{u_*}{u}$ и $C_H = -\dfrac{H}{\rho C_p u(\theta_2 - \theta_{0,5})}$ зависят от параметрите

$$R_{ib} = \frac{\beta \Delta\theta}{u^2} h_m, \qquad \xi_0 = \frac{z_0}{h_m} \tag{25}$$

където $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_{0,5}$, $u = u(z = 1\ )$.



Фиг. 1. Номограми за определяне на обезразмерения поток топлина $-H/\rho C_p U(\theta_2 - \theta_{0,5})$ и обезразмерения поток на импулс u_*/u по R_{ib} и ξ_0

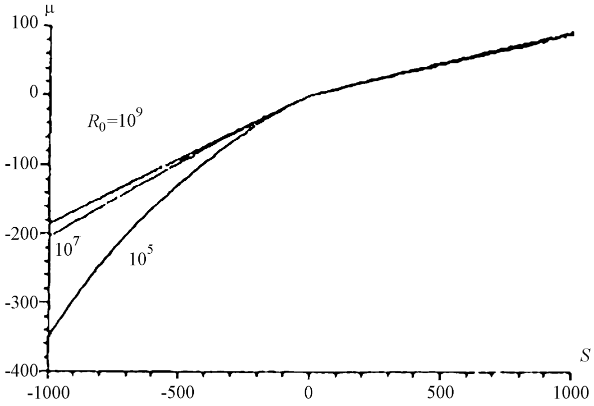
В качеството на конкретен пример на фиг. 1 са показани номограми за определяне на коефициентите на съпротивление c_d и топлообмен c_H в зависимост от интегралното число на Ричардсон R_{ib} и параметъра ξ_0, зададени чрез (25). При получаване на тези номограми е използвана постановка (14, 24 и 25) при отчитане на универсалните функции φ_u и φ_θ съгласно (9–12).

ВРЪЗКИ МЕЖДУ НЯКОИ ПАРАМЕТРИ НА УСТОЙЧИВОСТ

В теоретичните и приложните изследвания на ПС и ПГС се използват различни параметри (критерии на устойчивост). Значителен интерес представляват връзките

$$\begin{aligned} &\mu = \mu(R_0, S), \\ &\widetilde{L} = \widetilde{L}(R_0, S), \\ &\mu = \mu_{R_0}(\widetilde{L}), \end{aligned} \tag{26}$$

където $\mu = \chi(u_8/f)/L$ е вътрешен параметър на стратификация, $S = \beta\delta\theta/fG_0$ – външен параметър на стратификация, $R_0 = G_0/fz_0$ – повърхнинно число на Росби, $\widetilde{L} = L/(G_0/f)$, G_0 – модул на геострофния вятър, f_0 – параметър на Кориолис. На фиг. 2 е показана например зависимостта $\mu(R_0, S)$, взета от [8].



Фиг. 2. Зависимост на μ от R_0 и S.

Подобни номограми позволяват при използване на външни аерологосиноптични параметри (за които се провеждат рутинни измервания и след това се нанасят върху синоптичните карти) да се определят вътрешните за ПГС параметри на устойчивост μ и L.

В ПС при използване на приземни данни от градиентни измервания е известен интегралният параметър на стратификация R_{ib} и неговите модификации (22, 25) в зависимост от избора на нивата на приземните измервания (означени като долни индекси във формули (25, 27, 28)).

Основна задача, която възниква тук, е определяне на μ и L при зададен входен параметър R_{ib} (играещ роля на външен параметър на стратификация за дадения слой в ПС, за който е дефиниран). В качеството на конкретен параметър ще разгледаме случая на избор на нивата (24), при които R_{ib} съвпада с (25). Търсените зависимости имат вида

$$\frac{L}{h_m} = \varphi(R_{ib}, \xi_0), \quad R_{ib} = \frac{\beta\Delta\theta}{u^2} h_m, \quad \xi_0 = \frac{z_0}{h_m}, \tag{27}$$

$$\mu = m u_*(R_{ib}, \xi_0)\chi \widetilde{R}_{0i}, \quad \widetilde{R}_{0i} = \frac{u}{f h_m}, \tag{28}$$

където

$$\begin{aligned} \varphi &= -\frac{1}{\chi} \frac{(u_*/u)^3}{-H/\rho C_p u \Delta\theta} \frac{1}{R_{ib}}, \\ \mu_* &= \frac{u_*/u}{L/h_m}. \end{aligned} \tag{29}$$

Тук $u = u(z = 1 \text{ m})$, $\Delta\theta = \theta_{1,5} - \theta_0$, $h_m = 1$ m, а u_*/u и $-H/\rho C_p u \Delta\theta$ са определените вече по-горе функции на R_{ib} и ξ_0, показани на фиг. 1, така че видът на φ и μ_* също е определен.

Формули (27–29) се получават чрез стандартна нормировка с h_m, u и $\Delta\theta$ на дефиниционните формули за μ – $\mu = \chi u_*/fL$ и L – $L = -u_*^3/\chi\beta q$.

На фиг. 3 са показани определените по този начин зависимости (27) и (28). Те позволяват по известни данни само от градиентните измервания h_m, u, $\Delta\theta$, т. е. по R_{ib} и параметъра на грапавост Z_0 (чрез ξ_0), да се определят параметрите на устойчивост μ и L.

С помощта на подходяща комбинация от зависимостите (27) и (28) се получава и директната връзка между μ_* и L

$$\frac{L}{h_m} = \Psi(\mu_*, \xi_0), \tag{30}$$

която е показана също на фиг. 3.

Ще отбележим още, че въз основа на изложените по-горе резултати може да се определи и връзката между известните критерии (класове) на устойчивост на Пасквил–Търнър (KL)

$$KL = A, B, C, D, E, F$$

и външните за ПГС параметри R_0, S [10]

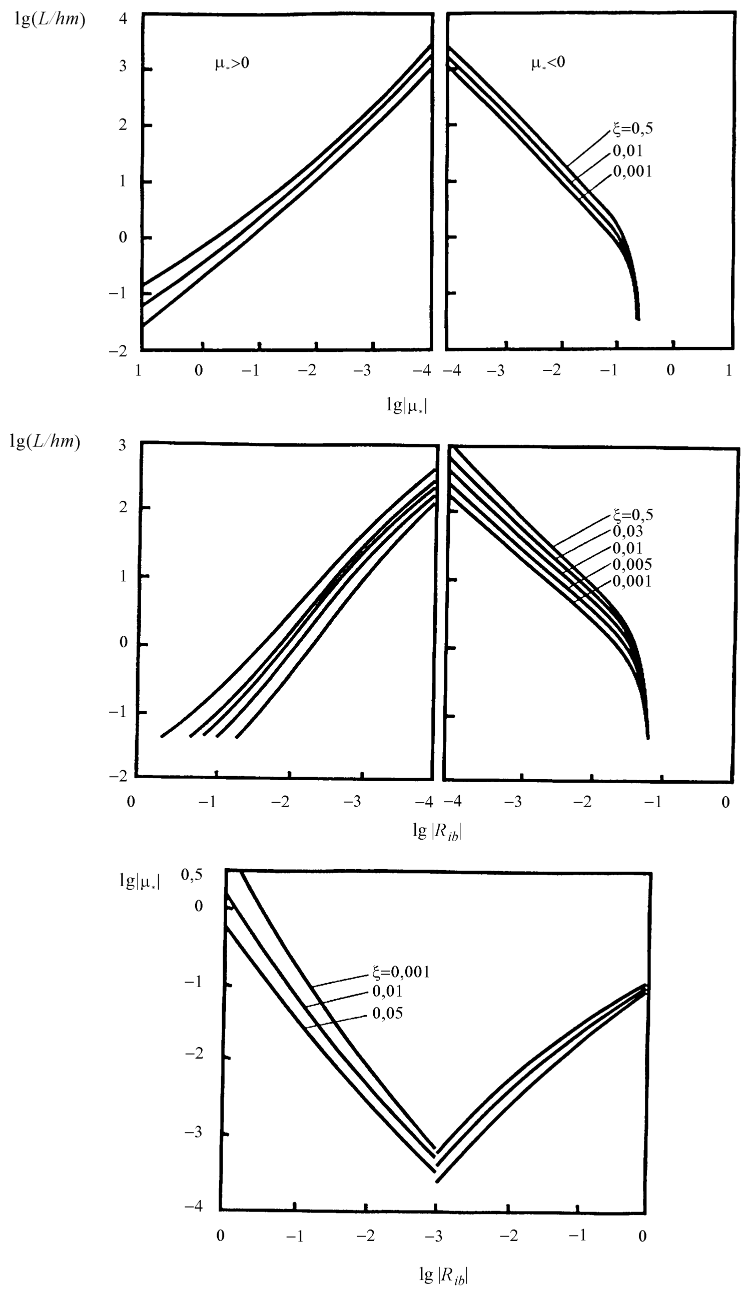
$$KL = KL(R_0, S), \tag{31}$$

или съответните такива за приземния слой R_{ib}, ξ_0

$$KL = KL(R_{ib}, \xi_0).$$

Известно е, че класовете варират в определен диапазон [11]. Ако за определеност се избере всеки клас да има типична стойност, съотвестваща на центъра на дадения интервал, и се използват резултатите от [11] и [12], където

$$KL = KL_{z_0}(L), \qquad KL = KL_{z_0}(\mu), \tag{32}$$



Фиг. 3. Номограми за определяне на L/hm по R_{ib} и μ_* при различни ξ_0 и номограма за определяне на μ_* по R_{ib} и xi_0

може да се определи и зависимостта на класовете от R_0, S или R_{ib}, ξ_0. Това става, като в (32) L с μ се изразят съответно чрез формулите (26) или (27) и (28).

СЪГЛАСУВАНОСТ НА ВЪНШНИТЕ ЗА ПГС И ПРИЗЕМНИТЕ ПАРАМЕТРИ И СВЪРЗАНИТЕ С ТЯХ КРИТЕРИИ НА УСТОЙЧИВОСТ

В предния раздел бяха показани поотделно зависимостите на параметрите на устойчивост от външните аерологосиноптични параметри (R_0, S) и приземните (R_{ib}, ξ_0).

Тук възниква въпросът за съгласуване на тези два типа входни параметри, т. е. определяне връзките между тях.

За целта ще използваме метода, развит от Сираков в [8], който се основава на подходящо нормиране и преработка на законите за съпротивление в ПГС, с приземните параметри

$$-\chi \frac{\nu_{g0}}{u} = f_1, \qquad f_1 = B(\mu)\frac{u_*}{\mu}, \tag{33}$$

$$\chi \frac{u_{g0}}{u} = f_2, \qquad f_2 = \frac{u_*}{u}\left[\ln\left(\frac{u_*}{u}\widetilde{R}_0\right) - A(\mu)\right], \tag{34}$$

$$\chi \frac{\delta\theta}{\Delta\theta} = f_3, \qquad f_3 = \frac{1}{\alpha_0}\frac{T_*}{\Delta\theta}\left[\ln\left(\frac{u_*}{u}\widetilde{R}_0\right) - C(\mu)\right] \tag{35}$$

и към нея трябва да се добави още едно уравнение за определяне на α:

$$\operatorname{tg}\alpha = f_4, \qquad f_4 = \frac{B(\mu)}{\ln\left(\frac{u_*}{u}\widetilde{R}_0 - A(\mu)\right)}, \tag{36}$$

където $A(\mu)$, $B(\mu)$, $C(\mu)$ са универсални функции в закона за съпротивлението в ПГС, $\widetilde{R}_0 = u/fz_0$ – повърхнинно локално число на Росби в ПС (в долния еднометров слой), (u_{g0}, ν_g) – компоненти на геострофния вятър с модул $G_0 = (u_{g0} - \nu_{g0}^2)^{1/2}$, $\delta\theta = (\theta_h - \theta_0)$ – дефект (спад) на температурата в ПГС, α – ъгъл между изобарите и приземния вятър (ъгъл на пълно завъртане на вятъра в ПГС). Останалите означения бяха разяснени вече по-горе. Последната формула (36) е получена въз основа на дефиниционното съотношение за α – $(\operatorname{tg}\alpha = -\nu_{g0}/u_{g0})$, нормирането на u и отчитането на (33) и (34).

Използваните приземни параметри $\delta\theta$, u, h и съответната R_{ib} параметризация на ПС ще считаме съответстващи на случая (24), (25), т. е.

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_{0,5}, \qquad u = u(z = 1\ \mathrm{m}), \qquad h = h_m = 1\ \mathrm{m}.$$

Въз основа на дефиниционните съотношения за $S = \beta\delta\theta/fG_0$ и след $R_0 = G_0/fz_0$ подходящо нормиране и използване на (33) и (35) се получават още следните интересни връзки

$$S = \widetilde{S}F_1, \qquad F_1 = \frac{f_3}{(f_1^2 + f_2^2)^{1/2}}, \qquad \widetilde{S} = \frac{\beta\delta\theta}{fu}, \tag{37}$$

$$R_0 = \frac{1}{\chi}\widetilde{R}_0 F_2, \qquad F_2 = (f_1^2 + f_2^2)^{1/2}, \qquad \widetilde{R}_0 = \frac{u}{fz_0} \tag{38}$$

между външните за ПГС (R_0, S) и съответните приземни такива $(\widetilde{R}_0, \widetilde{S})$ параметри.

Чрез (33) и (34) намираме още

$$G_0 = \frac{1}{\chi}uF_2. \tag{39}$$

За универсалните функции $A(\mu)$, $B(\mu)$ и $C(\mu)$ се използват изразите, получени от Сираков [8] с отчитане на (9–12). Десните части на (33–39), т. е. функциите $f_1 - f_4$, F_1, F_2 зависят от параметрите

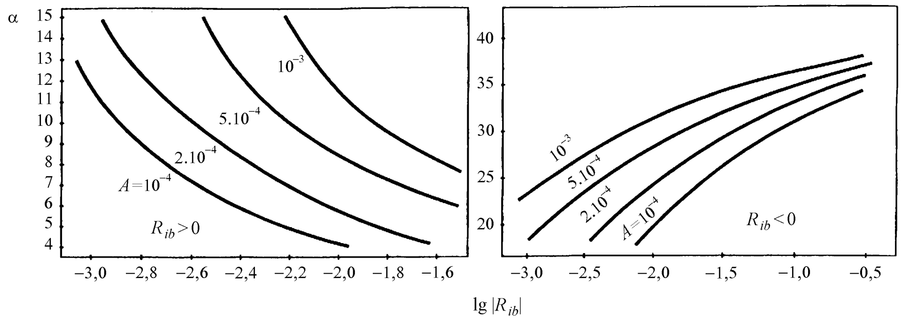
$$\mu, \ \frac{u_*}{u} \tag{40}$$

и $T_*/\Delta\theta$, $\widetilde{R}_0$, които лесно се изразяват във вида

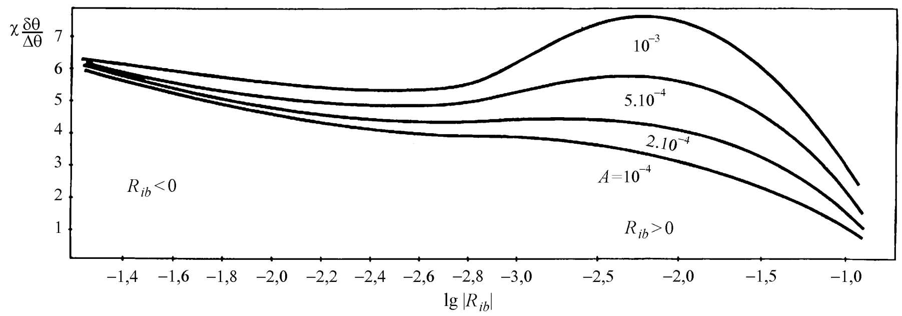
$$\frac{T_*}{\Delta\theta} = \frac{-H/\rho C_p \Delta\theta u}{\chi u_*/u} \tag{41}$$

$$\widetilde{R}_0 = \widetilde{R}_{0i}\xi_0^{-1} \tag{42}$$

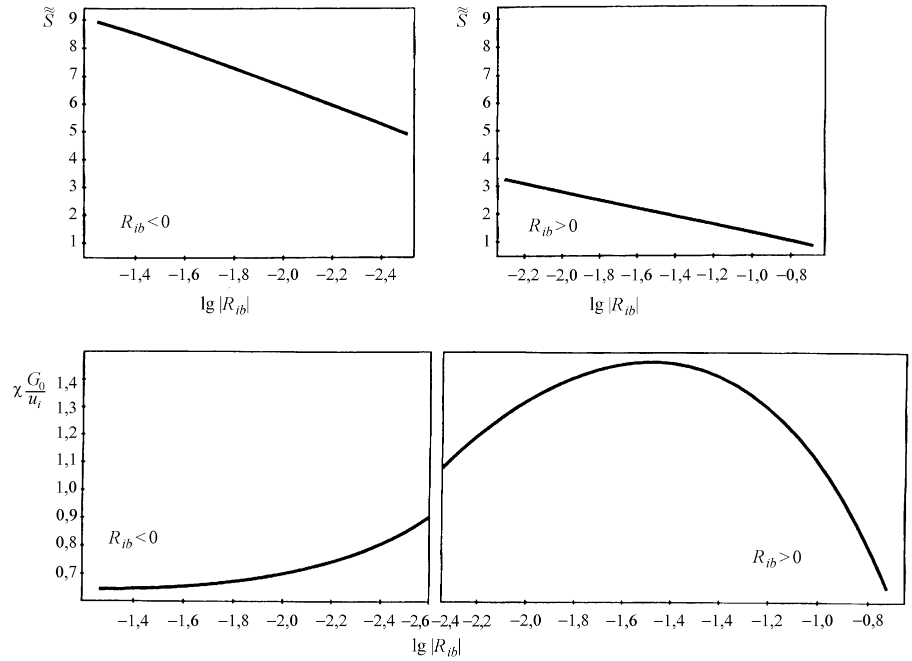
където R_{0i} е приземно, локално инверсионно число на Росби (28).



Фиг. 4. Зависимост на пълния ъгъл на завъртане на вятъра α от R_{ib}



Фиг. 5. Зависимост на отношението на температурния дефект в ПГС $\delta\theta = (\theta_h - \theta_0)$ и $\Delta\theta = \theta_{1,5} - \theta_0$ от R_{ib}



Фиг. 6. Зависимост на $\widetilde{\widetilde{S}}$ и $\chi\dfrac{G_0}{u}$ от R_{ib} при $A = 5.10^{-4}$

Като се поставят в десните части на (33–39) формули (27, 28, 41, 42) и определят u_*/u и $q/u\Delta\theta$ въз основа на номограмите, показани на фиг. 3, определяме вида на функциите f_i и Fi от R_{ib}, ξ_0, $\widetilde{R}_{0i}$:

$$f_i = f_i(R_{ib}, \widetilde{R}_{ib}, \xi_0), \qquad i = 1, 2, 3, 4,$$

$$F_i = F_i(R_{ib}, \widetilde{R}_{ib}, \xi_0), \qquad i = 1, 2.$$

Някои от получените резултати са дадени по-долу. На фиг. 4 е показана зависимостта между ъгъла на пълно завъртане на вятъра в ПГС α и приземното интегрално число на Ричардсън R_{ib} при различни стойности на параметъра $A = 1/\chi^2\widetilde{R}_{0i}$. Аналогична зависимост за отношението на тоталния за ПГС $\delta\theta = \theta_h - \theta_0$ и приземния $\Delta\theta = \theta_{1,5} - \theta_0$ дефект от R_{ib} е дадена на фиг. 5, а за параметрите $\widetilde{\widetilde{S}} = S/\widetilde{S}$ и $\chi G_0/u$ при $A = 5.10^{-4}$ – на фиг.6.

В заключение ще отбележим, че получените връзки (33–38) решават главната задача за съгласуване на входните приземни и аерологосиноптични параметри.

При съблюдаване на тези връзки се получава възможност за съпоставимост на резултатите, получени с различни параметризационни схеми, използващи приземни и външни за ПГС параметри.

НЯКОИ ДОПЪЛНИТЕЛНИ ЕФЕКТИ

Тук ще се спрем на някои допълнителни ефекти, които могат да бъдат отчетени в изложените по-горе параметризационни схеми. Ще започнем със случая на параметризация на потоците над морска повърхност. В този случай схемата на R_{ib}-параметризация следва да се модифицира, като се отчете факта, че параметрите на грапавост не са постоянни и зададени отнапред величини, а се изразяват чрез формулите (13):

$$z_{0u} = 0{,}1\frac{\nu}{u_*} + a\frac{u_*}{g}, \qquad \alpha = \begin{cases} 0{,}015 & \text{за открито море,} \\ 0{,}03 & \text{за крайбрежна зона,} \end{cases}$$

$$z_{0T} = z_{0q} \tag{43}$$

$$\frac{1}{k}\ln\frac{z_{ou}}{z_{oT}} = \begin{cases} -2, & \text{при} \quad \mathrm{Re}_0 \leq 0,1 \\ 4\mathrm{Re}^{1/2} - 4,2, & \text{при} \quad \mathrm{Re}_0 \geq 0,1. \end{cases}$$

където z_{0u}, z_{0T}, z_{0q} са съответно аеродинамична, температурна и влажностна грапавост, $\mathrm{Re}_{ou} = z_0 u_*/\nu$ – число на Рейнолдс за грапавост, ν – коефициент на молекулярно триене, g – земното ускорение.

Ще обсъдим още станалия актуален напоследък въпрос за нелокалното взаимодействие на ПГС във високите географски ширини със свободната атмосфера при силна устойчивост [13]. В този случай при параметризационните схеми трябва да се отчетат допълнителни параметри. Така напр. при баротропни условия универсалните функции A, B, C и безразмерната величина $h/(\chi u_*/f)$ на ПГС трябва да зависят освен от μ още и от параметъра на Брант–Вайсала $N + (\beta\, \mathrm{d}\theta/\, \mathrm{d}z)^{1/2}_{z>h}$, отнасящ се за свободната устойчиво стратифицирана атмосфера над ПГС. Ако означим кой да е от изброените параметри с f, то [13]

$$f = f\left(\mu, \frac{N}{f}\right). \tag{44}$$

При бароклинни условия в едно първо приближение се добавя още параметъра R_i, т.е. [14]

$$f = f\left(\mu, \frac{N}{f}, R_i\right), \tag{45}$$

където

$$R_i = \left(\frac{N}{\Gamma}\right)^2 \tag{46}$$

е число на Ричардсон, характеризиращо съвместното влияние на N и бароклинността, $\Gamma = (\Gamma_u^2 + \Gamma_\nu^2)^{1/2}$, $\Gamma_u = \mathrm{d}u_g/\,\mathrm{d}z$, $\Gamma_\nu = \mathrm{d}\nu/\,\mathrm{d}z$ са модул и компоненти на геострофния вятър.

Тук ще се ограничим със следната забележка. За по-прецизно параметризиране на бароклинния ефект само един параметър (R_i) е недостатъчен. Геострофният вятър при бароклинни условия в общия случай се изменя по големина, но също се завърта с височината, което описва адвекцията на студ и топлина. Поради това е необходимо да се използват два параметъра при параметризация на явлението: $R_{iu} = (N/\Gamma_u)^2$, $R_{i\nu} = (N/\Gamma_\nu)^2$ или, което е еквивалентно, но по-удобно, R_i и Φ, където Φ е ъгъл на адвекция на топлина или студ (между термичния вятър и изобарите). В смисъла на казаното (45) трябва да се замени с по-общата формула

$$f = f\left(\mu, \frac{N}{f}, Ri, \Phi\right). \tag{47}$$

Влиянието на тези параметри се проявава (прониква) и в ПС посредством вътрешни гравитационни вълни в бароклинна среда. Поради това градиентите на скоростта и температурата в ПС зависят също от тях, което следва да се отчете при реализация на R_{ib}-подхода за параметризация на потоците.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата от единна гледна точка са разгледани и съпоставени няколко основни параметризационни схеми, базирани на законите на съпротивление (ЗС) и външни аерологосиноптични входни параметри, R_{ib}-интегрален подход, използващ като входни приземните данни и класовете на устойчивост на Пасквил–Търнър (KL-метод).

В първите три раздела на статията са получени редица връзки между параметрите в рамките на всяка една от първите две параметризационни схеми. Като основни могат да се считат резултатите, получени в последния, четвърти раздел, където е реализиран подход за съгласуване на параметризационните схеми, параметрите и критериите за устойчивост, базиращи се на приземни или външни аерологосиноптични данни. Това е важна задача, позволяваща да се получат точни връзки на съответствие между тях.

Една следваща задача се заключава в по-нататъшното обобщение на този подход за случай на ПГС при наличие на инверсии, бароклинност и наклон на терена, включително и при отчитане на нелокалните ефекти (47).

ЛИТЕРАТУРА

1. Yaglom, A. *BLM*, **11**, 1997, 382.
2. Viswanadam, Y. *BLM*, **19**, 1981, 204.
3. Зилитинкиевич, С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометиздат, 1970.
4. Businger, A. K., J. C. Wingard, Y. Izumi, E. F. Bradley. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 2, 1971, 181.
5. Панчев, С., Е. Сираков. *Метеор. и Гидрол.*, **1**, 1977, 87.
6. Казаков А., С. Лазариев. *ФАО*, **14**, 3, 1978, 257.
7. Vachat, R. and L. Musson-Genon. *BLM*, **23**, 1982, 47.
8. Сираков, Е. Процеси на термична конвекция, динамика, параметризация и дифузия при различни мащаби в атмосферата с приложение към опазване на природната среда (дисерт. д.ф.н.) СУ, 1990.
9. Weidinger, T., J. Pinto and L. Horvath. *et. Zeitschrift*, **9**, No 3, 2000, 39.
10. Сираков, Е., Р. Стефанова. *Ann. de l'Univ. de Sofia, Fac. de phys.*, **94**, 2001, 15.
11. Colder, D. *BLM*, 3, 1972, 47.
12. Tagliazucca, M., T. Nanni. *Atm. Env.*, **17**, 3, 1983, 2205.
13. Zilitinkevich, S., A. Baklanov, J. Rost, A. Smedman, V. Lykosov, P. Calanca. *QJRMS*, **128**, 2002, 25.
14. Zilitinkevich, S., I. Esau. *QJRMS*, **129**, 2002, 311.

Постъпила април 2003

Евгени Сираков
Софийски Университет „Св. Климент Охридски"
Физически факултет
Катедра Метеорология и геофизика
Бул. „Джеймс Баучер" 5
1164 София, България
E-mail: esyrakov@phys.uni-sofia.bg