



## Performance of two meteorological pre-processors for dispersion models

Sevdalin Geshev, Orlin Georgiev, Dimiter Atanassov\*

*National Institute of Meteorology and Hydrology  
Tsarigradsko Shose 66, 1784 Sofia, Bulgaria*

**Abstract:** The main task of meteorological pre-processors is to provide the all necessary meteorological information for a given dispersion model, including parameters that are usually not part of the standard meteorological observations. The article examines the performance of two meteorological pre-processors. Each of them provides input meteorological information for two popular dispersion models - AUSTAL2000 and AERMOD. A comparative analysis of the main turbulent characteristics calculated by the two pre-processors is made. The height of the mixing layer is compared with that determined by aerological soundings in Sofia.

Keywords: meteorological pre-processors, air pollution dispersion, mixing layer, aerological soundings

---

## Анализ на работата на два метеорологични пре-процесора за дисперсионни модели

Севдалин Гешев, Орлин Георгиев, Димитър Атанасов\*

*Национален институт по метеорология и хидрология  
Цариградско шосе 66, 1784 София*

**Резюме:** Основната задача на метеорологичните пре-процесори е предварителна обработка на налични метеорологични данни с цел да се осигурят всички параметри необходими за работа на даден дисперсионен модел, в т.ч. и параметри, които по правило не са част от стандартните метеорологични наблюдения. В статията се

---

\* [dimiter.atanassov@meteo.bg](mailto:dimiter.atanassov@meteo.bg)

разглежда работата на два метеорологични пре-процесора, всеки един от които осигурява входна метеорологична информация за два популярни дисперсионни модела - AUSTAL2000 и AERMOD. Направен е сравнителен анализ на основни турбулентни характеристики изчислявани от двата пре-процесора, като височината на слоя на смесване е сравнена с тази, определена от аерологични сондажи в София.

**Ключови думи:** метеорологични пре-процесори, дисперсионно моделиране, слой на смесване, аерологичен сондаж

---

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Две групи входна информация са определящи за адекватна работа на числените модели описващи разпространението на замърсители в атмосферния въздух – информация за емисиите и метеорологична информация. Настоящата работа дискутира въпроси свързани с метеорологичната информация, необходима за дисперсионното моделиране. Стандартните метеорологични измервания не включват редица параметри, които са необходими за работа на дисперсионните модели. Това налага първичната метеорологична информация да се преработва и допълва с параметри, повечето от които са свързани с турбулентността в атмосферата и рядко се измерват в метеорологичните станции. Често се налага и интерполация на данните във времето. Терминът, който се използва за процедурите извършващи тези преобразования е метеорологични пре-процесори (МПП). Използва се и за процедури, които са свързващо звено между метеорологичен модел и по-сложен химически транспортен модел.

Различните дисперсионни модели изискват различни входни метеорологични параметри и съответно различни пре-процесори. Тук ще разгледаме два метеорологични пре-процесора. Всеки от тях осигурява входна метеорологична информация за два дисперсионни модела AUSTAL2000 (2014) и AERMOD (2024). Това са модели препоръчани за използване за регулаторни цели от германската (German Environment Agency) и американската ([United States Environmental Protection Agency](#)) агенции за опазване на околната среда. Използват се съществено и в България от общините при разработване на програми за подобряване на Качеството на Атмосферния Въздух (КАВ) и при изготвяне на общи устройствени планове на населените места, както и от индустриални предприятия за оценки на въздействието на върху околната среда. Ангажиментът на НИМХ към тези активности е да осигурява изпълнителите на дисперсионното моделиране с метеорологична информация, за която цел са разработени споменатите два метеорологични пре-процесора.

Предмет на настоящата работа е сравнителен анализ на резултатите получавани от двата МПП за основни дисперсионни параметри, а за един от най-важните параметри – височина на слоя на смесване – сравнение на резултатите от пре-процесорите с височината определена от аерологичен сондаж.

Входна информация за метеорологичните пре-процесори може да са данни измерени в станциите от синоптичната мрежа, данни от ре-анализ или обективен анализ на метеорологична информация. В настоящото изследване входната информация за двата пре-процесора са измерените през 2022 г. в централна метеорологична станция „София“ - скорост и посока на вятъра на височина 10м, влажност и температура – на 2м и обща облачност.

## **2. ОПИСАНИЕ НА РАЗГЛЕЖДАНИТЕ МЕТЕОРОЛОГИЧНИ ПРЕ-ПРОЦЕСОРИ**

Теоретичната основа на метеорологичните пре-процесори са параметризации на основните процеси в атмосферния граничен слой (АГС), като се отчитат условия на неутрална, устойчива стратификация и на конвективен режим. Характерни за даден МПП са формулите за параметри, които обикновено не се измерват пряко, а се определят чрез на теорията на подобие на АГС като мащаби на процесите, или като параметри, които са функция на споменатите мащаби (Finardi et al, 1998, Fisher et al, 2006). Някои параметри на АГС, като посоката и скоростта на вятъра са резултат от преки измервания.

### **2.1. МПП-1**

Първият метеорологичен пре-процесор МПП-1 е софтуер, създаден в НИМХ преди повече от 10 години във връзка с необходимостта от предоставяне на общините в страната на метеорологични данни за моделиране дисперсията на замърсители при изготвяне на общинските програми за подобряване на КАВ. МПП-1 използва един подход за пресмятане на основните параметри на АГС, базиран на моделите YORDAN и YORCON, описани в статиите на Yordanov et al. (2003a; 2003b; 2005). В основата на подхода са полу-емпирични изрази, представени в обобщен вид в Yordanov et al. (2003) и Zannetti (1990).

Първата стъпка в МПП–1 е *определяне на класа на устойчивост.*

Съществуват няколко различни дефиниции на класове на устойчивост, различаващи се в детайли, но всички използващи аналогичен подход. В МПП-1 се използва следната дефиниция на класове на устойчивост (по Пасквил) в зависимост от скоростта на приземния вятър, облачността и слънчевото греене, определено съгласно височината на слънцето (Таблица 1). Клас А е силна неустойчивост, клас В - средна неустойчивост, клас С - слаба неустойчивост, клас D - неутрална стратификация, клас Е - слаба устойчивост, клас F - силна устойчивост.

**Таблица 1.** Класове на устойчивост използвани в МПП-1

**Table 1.** Pasquill Stability Classes used in МПП-1

Приземен вятър m/s	Слънчево греене			Нощна облачност	
	силно	умерено	слабо	>5 бала	<5 бала
< 2	A	A-B	B	F	F
от 2 до 3	A-B	B	C	E	F
от 3 до 5	B	B-C	C	D	E
от 5 до 6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Следваща стъпка е

*определяне мащаба на Монин-Обухов L.*

Използва се следният емпиричен израз в зависимост от класа на устойчивост и грапавостта на подложната повърхност (по кривите на Golder (1972)):

$$\frac{1}{L} = az_0^b, \quad (1)$$

с коефициенти  $a$  и  $b$  от Таблица 2;  $z_0$  е параметър на грапавост, представителен за района.

**Таблица 2.** Коефициенти във формула (1) съгласно Yordanov et al. (2003a)

**Table 2.** Coefficients in formula (1) according to Yordanov et al. (2003a)

Клас на стабилност	a	b
A	-0.0875	-0.1029
B	-0.003849	-0.1714
C	-0.00807	-0.3049
D	0	0
E	0.00807	-0.03049
F	0.03849	-0.1714

Останалите параметри на АГС се дефинират с определената по този начин стойност на  $L$  за конвективен и за не-конвективен граничен слой (Yordanov et al., 2003a; 2003b).

• **Параметри в не-конвективен граничен слой**

Динамичната скорост  $u_*$  се определя по Yordanov et al. (2003a; 2003b) от следната формула за профила на вятъра в приземния слой:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \Phi_u \left( \frac{z}{L} \right) \right] \quad (2)$$

където:  $k$  е von Karman constant = 0.4,  $\Phi_u\left(\frac{z}{L}\right) = 10\frac{z}{L}$  е универсална функция. Височината на слоя на смесване  $h_m$  се определя по формулата:

$$h_m = \frac{ku_*}{f},$$

където  $f$  е параметърът на Кориолис, а турбулентният поток топлина при земята  $H$  се изчислява по формулата:

$$H = -\rho c_p \overline{w'\theta'}$$

където:  $\overline{w'\theta'} = \frac{u_*^3}{k\beta L}$ ,  $\beta = \frac{g}{\theta}$  е параметър на конвекция = 0.035,  $\rho$  и  $c_p$  - плътност и специфична топлоемкост на въздуха,  $\bar{\theta}$  е средна за слоя потенциална температура,  $g$  е земното ускорение.

- **Параметри в конвективен граничен слой**

Динамичната скорост  $u_*$  се определя от формула (2), съгласно Yordanov et al. (2003b):

$$\Phi_u\left(\frac{z}{L}\right) = \ln(x) + 3y^{1/3} + 3, \quad x = c_1\frac{z}{L}, \quad y = c_2L, \quad c_1 = 0.07, \quad c_2 = 0.007$$

Височина на конвективния граничен слой  $h_c$  се определя от уравнението:

$$\frac{\partial h_c}{\partial t} = (1 + 2A)\frac{\overline{w'\theta'}}{\gamma h_c} + B\frac{u_*^3}{\gamma\beta h_c^2},$$

където:  $A = 0.2$ ,  $B = 2.5$ ,  $\gamma = 0.006 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$  е градиент на температурата.

Мащабът за конвективна скорост се дава с формулата:

$$w_* = \left(\beta h_c \overline{w'\theta'}\right)^{1/3}.$$

## 2.2. МПП-2

МПП-2 е видоизменен вариант на метеорологичния пре-процесор на AERMOD - AERMET. Параметризационната схема на AERMET е различна от тази в МПП-1. Първа стъпка е определяне на енергийния баланс при земята и определяне на потока топлина. Следва изчисление на мащаба на Монин-Обухов  $L$  и на останалите параметри на АГС. В AERMOD (2024) е дадено изчерпателно описание на процедурата вкл. и съответните формули, поради което последните не се привеждат тук.

В AERMET ясно се разграничават два механизма отговорни за генериране на слой на смесване. Първият отчита, че градиентите на скоростта на вятъра в

АГС причинени от триенето с подложната повърхност водят до турбулентност и съответно до слой на смесване. Очевидно, този механизъм води до смесване и при отсъствие на конвекция. Дори когато през дневните часове е налице конвективна дейност, в AERMET този механизъм се разглежда независимо от конвекцията и за слоя на смесване причинен от него е използван термина „механичен“ слой на смесване, чиято височина тук означаваме с  $hPBLm$ . Отделно и независимо от него се разглежда генерирането на слой на смесване по конвективни причини, което се случва в дневните часове и се дефинира втори, наричан конвективен слой на смесване, с височина  $hPBLc$ . Сред изходните параметри на AERMET се дават и двете височини -  $hPBLm$  и  $hPBLc$ . При моделиране на дисперсията от AERMOD, като височина на слоя на смесване се приема по-голямата от двете -  $hPBLm$  и  $hPBLc$ .

За параметризиране на процеса на конвекция, AERMET се нуждае от данни от сутрешен аерологичен сондаж, преди изгрев слънце. Всъщност, сондажът е необходим за определяне градиента на потенциалната температура, който контролира развитието на конвективните движения след изгрев слънце. Ако във входните данни на AERMET липсват данни от аерологичен сондаж, височината  $hPBLc$  и мащаба на конвективната скорост не се определят, но се определят останалите параметри на АГС, вкл.  $hPBLm$  и моделирането на дисперсията с AERMOD е възможно.

По замисъла на системата AERMET-AERMOD вертикалните профили на метеорологичните елементи се изчисляват в AERMOD. Същността на модификацията МПП-2 на AERMET е блокът за изчисление на профила на потенциалната температура, от AERMOD да се „пренесе“ в AERMET. По този начин, МПП-2 изчислява височината на конвективния слой на смесване и при отсъствие на сутрешен аерологичен сондаж, наред с всички останали параметри, които AERMET изчислява. Процедурата се изпълнява в 2 стъпки. Първо се стартира AERMET без данни от сондаж, при което AERMET изчислява всички параметри, с изключение на градиента на потенциалната температура, и  $hPBLc$ . С останалите изчислени параметри, използвайки формулите в AERMOD, се изчислява профила на потенциалната температура. Следва повторно стартиране на AERMET, като сред входната информация вече се задава и определеният профил на потенциалната температура. При тези условия AERMET вече изчислява всички параметри, вкл. и  $hPBLc$ . Настоящата работа може да се разглежда като една оценка на работата на така модифицирания AERMET.

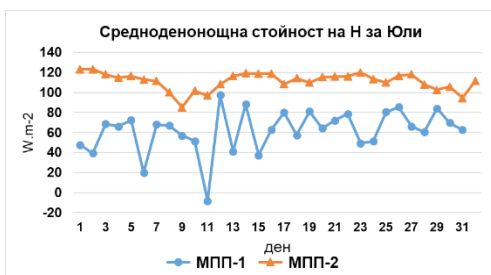
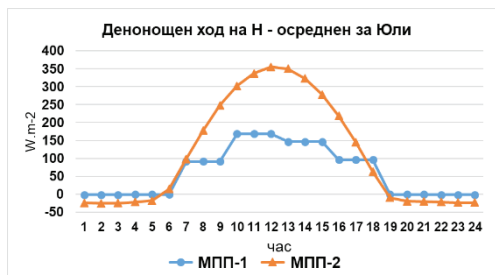
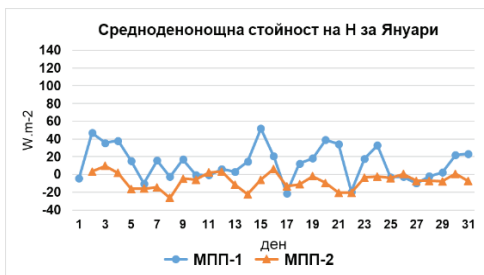
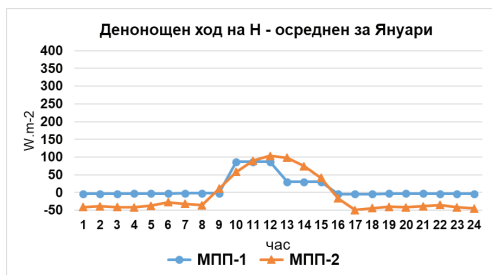
### 3. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИ ОТ ДВАТА МПП

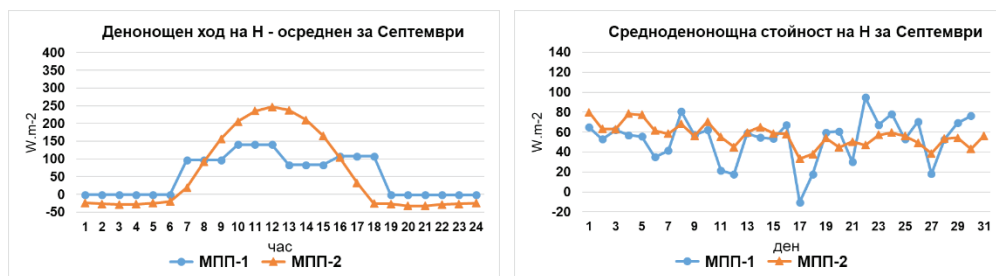
Изходен резултат от работата на двата пре-процесора е набор от параметри, достатъчен за работата на повечето регулаторни дисперсионни модели, вкл. и за AERMOD и AUSTAL2000. Някои параметри, като албедо, параметър на Боуен/Bowen, температурата, скоростта и посоката на вятъра се задават, като при необходимост се интерполират във времето, други се изчисляват по дискутираните по-горе подходи. Интерес представляват последните и такива са обект на разглеждане в настоящия параграф. Статистически оценки са правени за два зимни месеца (Януари и Декември), два летни месеца (Юли и Август) и два месеца през преходните сезони (Април и Септември). На фигурите са представени резултатите от един месец от трите годишни периода – Януари, Юли и Септември.

#### 3.1. Приземен поток топлина $H$

На Фигура 1, вляво е представен денонощният ход на потока топлина  $H$ , като стойностите за даден час от денонощието са осреднени за един месец; вдясно са показани средноденонощните стойности на  $H$  за същия месец. Разгледани са един зимен (Януари), един летен (Юли) и един преходен месец (Септември). На Фигура 2, вляво е даден денонощният ход на  $H$  осреднен за 2022 г., а вдясно - средномесечните стойности на  $H$  за 2022 г.

В Таблица 3 се дават някои статистически характеристики за от двата МПП.





Фиг.1. Денонощен ход на потока топлина  $H$ , осреднен за съответния месец (вляво) и средноденонощни стойности на  $H$  за съответния месец от 2022г. (вдясно) според МПП-1 и МПП-2

**Fig.1.** Diurnal variation of the surface sensible heat flux  $H$  averaged for the corresponding month (left) and mean daily values of  $H$  for the corresponding month of 2022 (right) according to МПП-1 and МПП-2

При МПП-2 денонощният ход на приземният поток топлина е по-ясно изразен, отколкото при МПП-1. През деня,  $H$  според МПП-2 достига по-високи максимални стойности от тези, изчислени от МПП-1. През нощта, потокът според МПП-1 има близки до нула отрицателни стойности, докато тези от МПП-2 са значително по-ниски и достигат до  $-40\text{Wm}^{-2}$ . В резултат на това, средноденонощната стойност на  $H$  остава положителна според МПП-1, докато според МПП-2 е отрицателна. През лятото, средноденонощните стойности на  $H$  са значително по-високи според МПП-2, отколкото според МПП-1.



Фиг.2. Денонощен ход на потока топлина  $H$ , осреднен за 2022г. (вляво) и средномесечни стойности на потока топлина  $H$  за 2022 г. (вдясно), според МПП-1 и МПП-2

**Fig.2.** Mean diurnal variation of the surface sensible heat flux  $H$  for 2022 (left) and mean monthly values of  $H$  for 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2

**Таблица 3.** Средномесечни стойности на  $H$  корелация на средноденоношните (СД) и на средночасовите (СЧ) стойности на  $H$ , изчислени от МПП-1 и МПП-2

**Table 3.** Mean monthly values of  $H$  correlation of mean daily values (СД) and mean hourly values (СЧ) of  $H$  calculated by МПП-1 and МПП-2

		I	II	VII	VIII	IV	IX	Год.
Средномесечна стойност	МПП-1	12.2	21.6	62.2	38.3	39.5	52.8	38.8
	МПП-2	-7.03	-7.19	111.5	98.2	52.3	56.6	49.3
Коефициент на корелация на СД стойности		0.346	0.613	0.073	0.324	0.503	0.437	0.604
Коефициент на корелация на СЧ стойности		0.868	0.925	0.965	0.855	0.865	0.806	0.639

Корелациите могат да бъдат определени по резултатите от МПП-1 и МПП-2 за всеки час и за всеки ден от годината и след това получените корелационни коефициенти да бъдат осреднени за месец. Друг начин е резултатите от МПП-1 и МПП-2 да бъдат първо осреднени за месец и след това да се изчислят корелациите между тях. Тъй като някои параметри не са дефинирани за всеки час и ден от годината, тук за всички параметри се работи по втория начин.

За  $H$ , коефициентът на корелацията между средночасовите стойности на МПП-1 и МПП-2 е над 0.85. Коефициентът на корелация между средноденоношните стойности варира за различните месеци от 0.08 до 0.613.

### 3.2 Мащаб на Монин-Обухов $L$

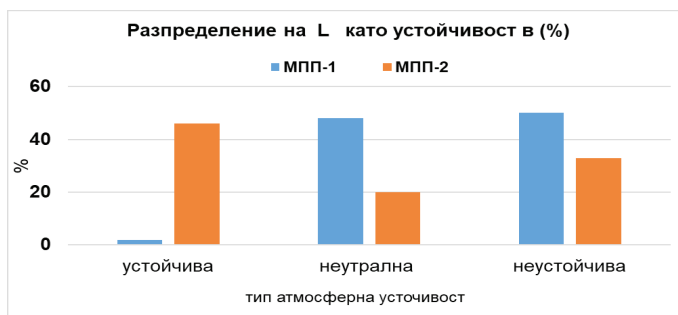
За анализ на резултатите за  $L$  от двата МПП, часовите стойности на  $L$  за 2022 г. са разпределени в 3 групи: устойчива, неутрална и неустойчива стратификация, съгласно интервалите дадени в Таблица 4.

**Таблица 4.** Атмосферна стратификация съгласно стойностите на  $L$

**Table 4.** Atmospheric stratification according to  $L$

Тип атмосферна устойчивост	Стойности на [m]
Устойчива стратификация	$0 < L \leq 240$
Неутрална стратификация	$L > 240$ или $L \leq -240$
Неустойчива стратификация	$0 > L \geq -240$

На Фигура 3 е дадено разпределението на случаите на устойчива, неутрална и неустойчива стратификация според двата МПП.



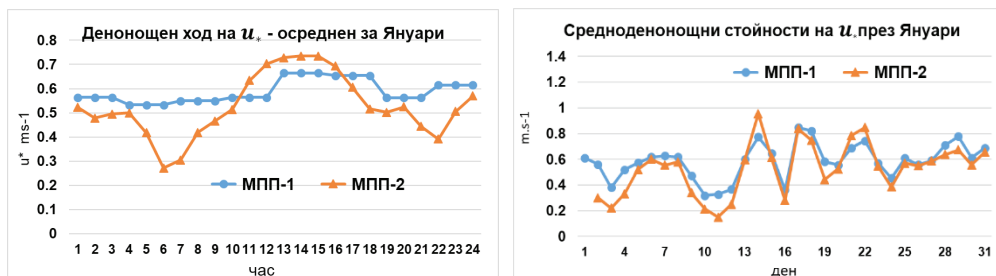
**Фиг. 3.** Часове (% от 8760 часа през 2022г.) попадащи в съответната група на атмосферна стратификация съгласно Таблица 4

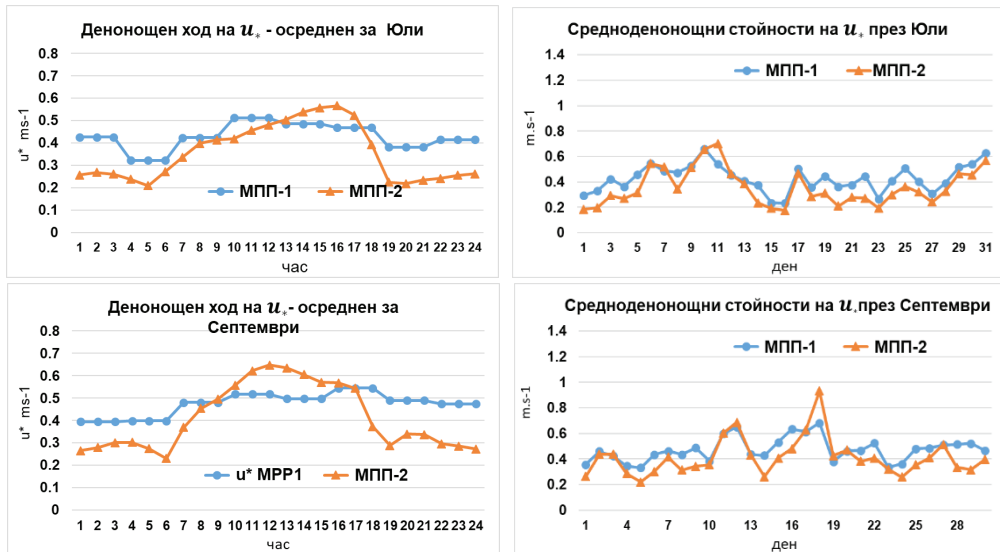
**Fig. 3.** Hours (% of 8760 hours in 2022) falling into the respective atmospheric stratification group according to Table 4

Според МПП-1 стратификация в диапазона  $0 < L = < 240$  се наблюдава значително по-рядко, отколкото според МПП-2 и значително по-често в другите два диапазона. Съществените различия се обясняват с различните подходи за определяне на  $L$ . Докато подходът в МПП-1 се основава на класовете на устойчивост и параметъра на грапавост, подходът в МПП-2 се основава на енергийният баланс при земната повърхност. Мащабът на Монин-Обухов  $L$  участва във формулите, по които се определят останалите турбулентни параметри на АГС. Може да се очаква, че различията между двата МПП по отношение на  $L$  са една от основните причини за различията в стойностите на останалите турбулентни параметри определяни от двата МПП.

### 3.3 Динамична скорост $u_*$

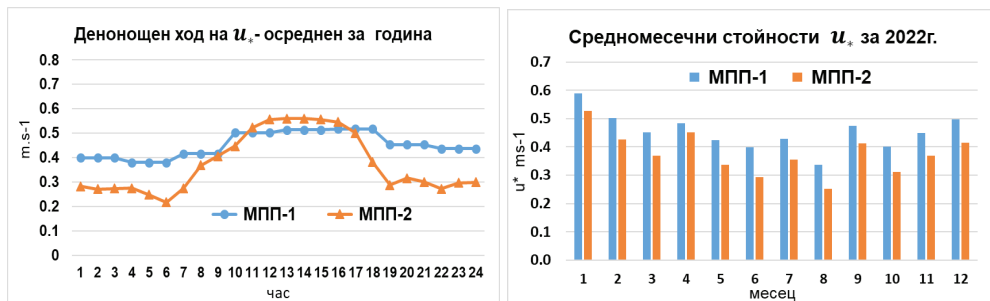
На Фигура 4 са представени графики на денонощния ход на динамичната скорост  $u_*$  осреднен за един месец и средноденонощните стойности на  $u_*$  за съответния месец. На Фигура 5 е даден денонощния ход на  $u_*$ , осреднен за 2022 г. и средномесечните стойности на  $u_*$  за същата година. В Таблица 5 се дават някои статистически характеристики, които обобщават резултатите за  $u_*$  от двата МПП.





**Фиг. 4.** Денонощен ход на динамичната скорост  $u_*$  осреднен за съответния месец (вляво) и средноденонощни стойности на  $u_*$  за съответния месец от 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 4.** Diurnal variation of the friction velocity  $u_*$  averaged for the corresponding month (left) and mean daily values of  $u_*$  for the corresponding month of 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2



**Фиг. 5.** Денонощен ход на динамичната скорост  $u_*$  осреднен за 2022 г. (вляво) и средномесечни стойности на  $u_*$  за 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 5.** Mean diurnal variation of the friction velocity  $u_*$  for 2022 (left) and mean monthly values of  $u_*$  for 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2

**Таблица 5.** Средномесечни стойности на  $u_*$  корелация на средноденоношните (СД) и на средночасовите (СЧ) стойности на  $u_*$ , изчислени от МПП-1 и МПП-2

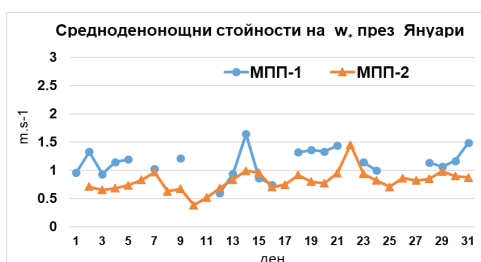
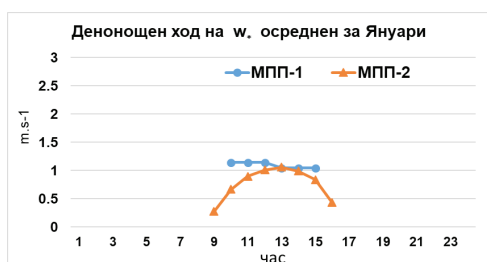
**Table 5.** Mean monthly values of  $u_*$  correlation of mean daily values (СД) and mean hourly values (СЧ) of  $u_*$ , calculated by МПП-1 and МПП-2

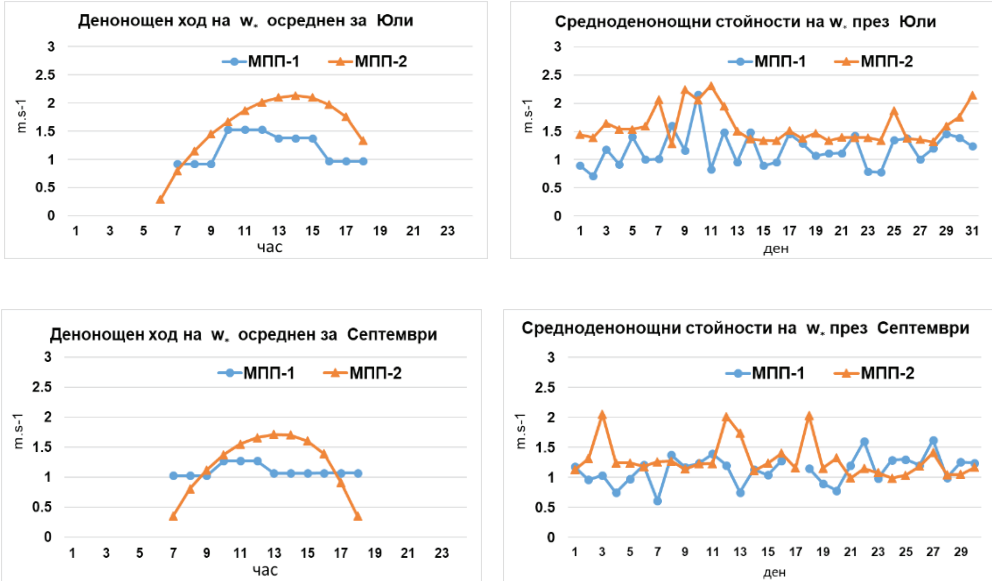
		I	XII	VII	VIII	IV	IX	Год.
Средномесечна стойност	МПП-1	0.59	0.50	0.43	0.34	0.48	0.47	0.45
	МПП-2	0.53	0.42	0.36	0.25	0.45	0.42	0.38
Коефициент на корелация на СД стойности		0.930	0.860	0.891	0.840	0.903	0.807	0.891
Коефициент на корелация на СЧ стойности*		0.677	0.730	0.793	0.623	0.775	0.693	0.713

Средноденоношните стойности, изчислени от двата пре-процесора имат близки стойности и корелацията между тях е висока. Средноденоношните стойности на  $u_*$  според МПП-1 са по-високи, което е видно и от средномесечните стойности. Денонощният ход на  $u_*$  е по-силно изразен според МПП-2 и по-слабо изразен според МПП-1, което води и до по-ниска корелация между средночасовите стойности отколкото корелацията между среднодневните стойности.

### 3.4 Мащаб на конвективната скорост $w_*$

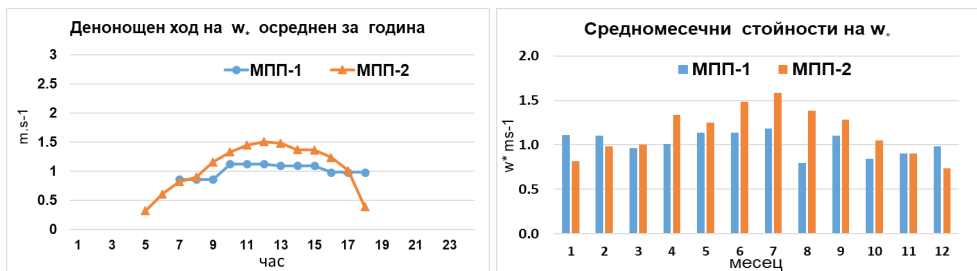
Един от параметрите характеризиращи конвективните движения е мащабът  $w_*$ . Такъв се дефинира само в часовете когато приземният поток топлина  $H$  е положителен и има условия за конвективна дейност. На Фигура 6 вляво е представен денонощния ход на  $w_*$ , като стойностите за даден час от денонощието са осреднени за един месец; вдясно са показани средноденоношните стойности на  $w_*$  за същия месец. На Фигура 7 е даден денонощния ход на  $w_*$  осреднен за 2022г. и средномесечните стойности на  $w_*$  за 2022 г. В Таблица 6 се дават някои статистически характеристики за  $w_*$  за двата МПП.





**Фиг. 6.** Денонощен ход на конвективната скорост  $w_*$  осреднен за съответния месец (вляво) и средноденонощни стойности на  $w_*$  за съответния месец на 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 6.** Diurnal variation of the convective velocity  $w_*$  averaged for the corresponding month (left) and mean daily values of  $w_*$  for the corresponding month of 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2



**Фиг. 7.** Денонощен ход на конвективната скорост  $w_*$  осреднен за 2022 г. (вляво) и средномесечни стойности на  $w_*$  за 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 7.** Mean diurnal variation of the convective velocity  $w_*$  for 2022 (left) and mean monthly values of  $w_*$  for 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2

**Таблица 6.** Средномесечни стойности на  $w_*$ ; корелация на средноденоношните (СД) стойности на  $w_*$ , изчислени от МПП-1 и МПП-2

**Table 6.** Mean monthly values of  $w_*$  correlation of mean daily values(СД) of  $w_*$ , calculated by МПП-1 and МПП-2

		I	II	VI	VII	IV	IX	Год.
Средномесечна стойност	МПП-1	1.14	0.99	1.18	0.80	1.02	1.13	1.03
	МПП-2	0.81	0.74	1.59	1.38	1.34	1.29	1.15
Коефициент на корелация на СД стойности		0.338	0.142	0.192	0.301	0.066	-0.125	0.278

В някои дни, според МПП-1,  $H$  остава отрицателен през цялото денонощие и за такъв ден  $w_*$  не се изчислява, което е причина за прекъсвания в съответната графика. Стойностите на  $w_*$  според МПП-2 са по-високи от тези изчислени от МПП-1 през летните месеци и през повечето дни на преходните месеци и са пониски през зимните месеци. Денонощният ход според МПП-1 е слабо изразен, особено през зимата, докато според МПП-2, денонощният ход е ясно изразен през всички сезони, с максимум около обедните часове.

Корелациите на средноденоношните стойности са ниски и дори има отрицателна такава за месец Септември. Изчисление на корелации между средночасови стойности не е правено, тъй като последните са дефинирани в едни часове за единия и в други часове за другия МПП и не за всички часове на денонощието. Качествена представа за корелацията на средночасовите стойности дават съответните фигури.

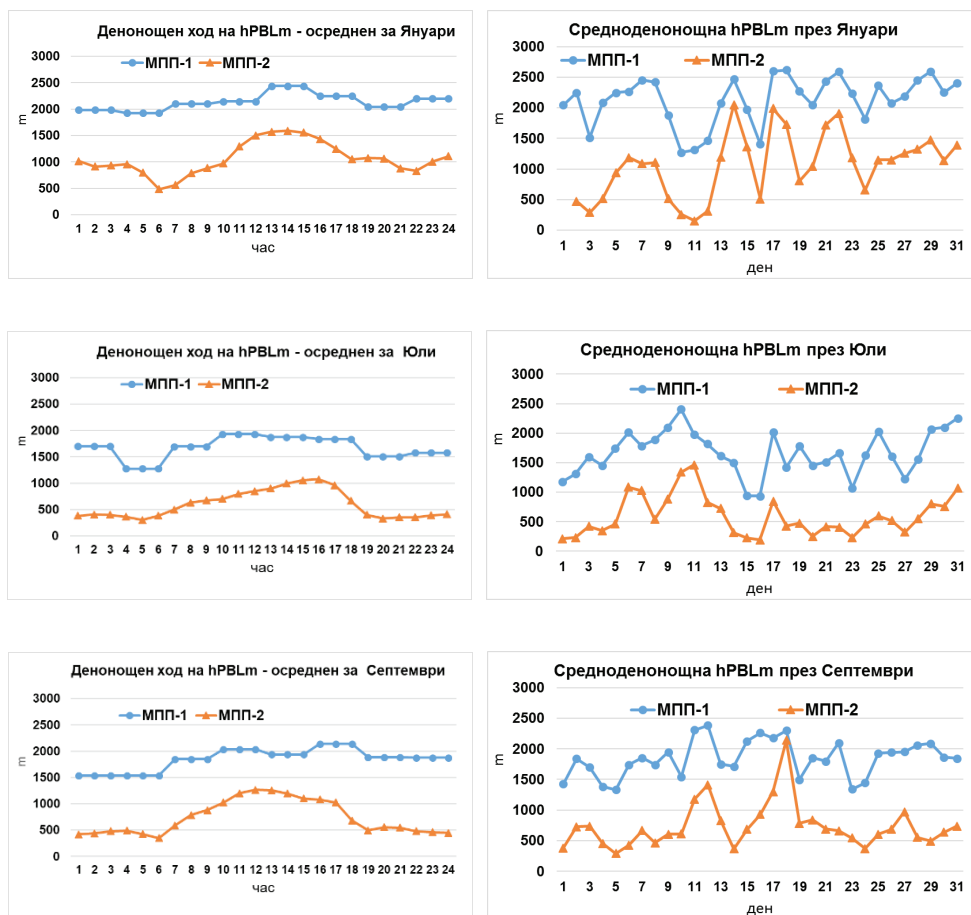
#### 4. СЛОЙ НА СМЕСВАНЕ

И двата пре-процесора изчисляват поотделно височината на механичния слой на смесване  $hPBLm$  и височината на конвективния слой на смесване  $hPBLc$ . Разликата между двата слоя на смесване е в механизма, който причинява смесването, което беше изяснено по-горе, в параграф 2.2. В настоящия параграф се прави сравнение на резултатите, които двата пре-процесора МПП-1 и МПП-2 дават за  $hPBLm$  и за  $hPBLc$ , както и за слоя дефиниран от по-голямата от двете височини  $hPBL$ , който се приема за слой на смесване в дисперсионния модел.

#### Височина на механичния слой на смесване $hPBLm$

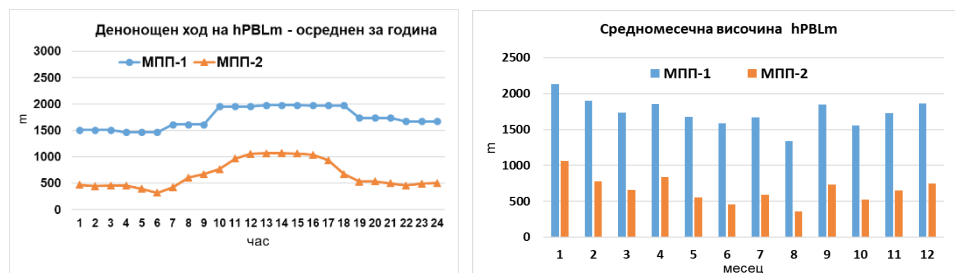
На Фигура 8, вляво е представен денонощният ход на  $hPBLm$ , като стойностите за даден час от денонощието са осреднени за един месец; вдясно са показани средноденоношните стойности на  $hPBLm$  за същия месец. На Фигура 9 е даден денонощният ход на  $hPBLm$  за 2022 г. и средномесечните стойности на  $hPBLm$  за

2022 г. В Таблица 7 се дават някои статистически характеристики, които обобщават резултатите за hPBLm от двата МПП.



Фиг. 8. Денонощен ход на механичния слой на смесване hPBLm осреднен за съответния месец (вляво) и средноденонощни стойности на hPBLm за съответния месец на 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

Fig. 8. Diurnal variation of the mechanical mixing layer hPBLm averaged for the corresponding month (left) and mean daily values of hPBLm for the corresponding month of 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2



Фиг. 9. Денонощен ход на механичния слой на смесване hPBLm, осреднен за 2022г. (вляво) и средномесечни стойности на hPBLm за 2022г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 9.** Mean diurnal variation of mechanical mixing layer hPBLm for 2022 (left) and mean monthly values of hPBLm for 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2

Височината на механичния слой на смесване hPBLm е системно и значително по-висока според МПП-1 в сравнение със съответната според МПП-2. Това се наблюдава през всички месеци, както в денонощния ход, така и при средноденонощните стойности.

Корелацията, както при средноденонощните, така и при средночасовите стойности е висока. Тези констатации се обясняват с факта, че в основата на параметризациите на hPBLm стои скоростта на вятъра, която се измерва. Все пак, поради различните подходи за параметризация, разлика в резултатите от МПП-1 и МПП-2 се получава, но тези разлики са функция на един и същ за двата пре-процесора определящ параметър – скоростта на вятъра.

**Таблица 7.** Средномесечни стойности на hPBLm; корелация на средноденонощните (СД) и на средночасовите (СЧ) стойности на hPBLm, изчислени от МПП-1 и МПП-2

**Table 7.** Mean monthly values of hPBLm correlation of mean daily values (СД) and mean hourly values (СЧ) of hPBLm, calculated by МПП-1 and МПП-2

		I	XII	VII	VIII	IV	IX	Год.
Средномесечна стойност	МПП-1	2131	1863	1666	1344	1850	1847	1739
	МПП-2	1063	752	595	361	841	735	662
Коефициент на корелация на СД стойности		0.832	0.787	0.828	0.781	0.844	0.673	0.822
Коефициент на корелация на СЧ стойности		0.748	0.686	0.789	0.638	0.784	0.696	0.89

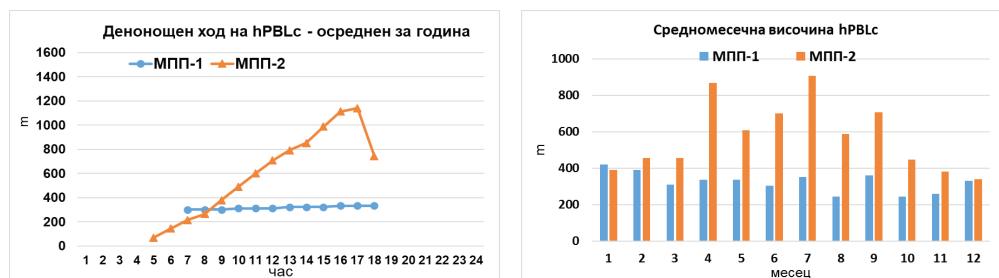
## Височина на конвективния слой на смесване hPBLc

На Фигура 10 е представен денонощния ход на височината на конвективният слой на смесване hPBLc, осреднен за един месец и средноденонощните стойности на hPBLc за същия месец. На Фигура 11 е даден денонощния ход на hPBLc, осреднен за 2022г. и средномесечните стойности на hPBLc за 2022г. В Таблица 8 се дават някои статистически характеристики, които обобщават резултатите за hPBLc от двата МПП.



**Фиг. 10.** Денонощен ход на конвективния слой на смесване hPBLc осреднен за съответния месец (вляво) и средноденонощни стойности на hPBLc за съответния месец на 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 10.** Diurnal variation of the convective mixing layer hPBLc averaged for the corresponding month (left) and mean daily values of hPBLc for the corresponding month of 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2



**Фиг. 11.** Денонощен ход на конвективния слой на смесване hPBLc, осреднен за 2022г. (вляво) и средномесечни стойности на hPBLc за 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 11.** Mean diurnal variation of the convective mixing layer hPBLc for 2022 (left) and mean monthly values of hPBLc for 2022 (right), according to МПП-1 and МПП-2

Налице е очаквано съответствие между резултатите за конвективния слой на смесване hPBLc и за мащаба на конвективната скорост  $w_*$ . Според МПП-1 височината hPBLc има слабо изразен денонощен ход, докато според МПП-2 тя нараства от нула до стойности, чийто максимум е значително по-висок от стойностите изчислени с МПП-1. През преходните сезони и през лятото средноденонощните стойности на hPBLc според МПП-2 са по-високи от тези изчислени от МПП-1, докато през зимата са съизмерими.

Корелациите на средноденонощните стойности са ниски и дори има отрицателна такава за месец септември. Корелации между средночасови стойности не се разглеждат по причина коментирана по-горе в раздела за  $w_*$ .

**Таблица 8.** Средномесечни стойности на hPBLc; корелация на средноденонощните (СД) стойности на hPBLc, изчислени от МПП-1 и МПП-2

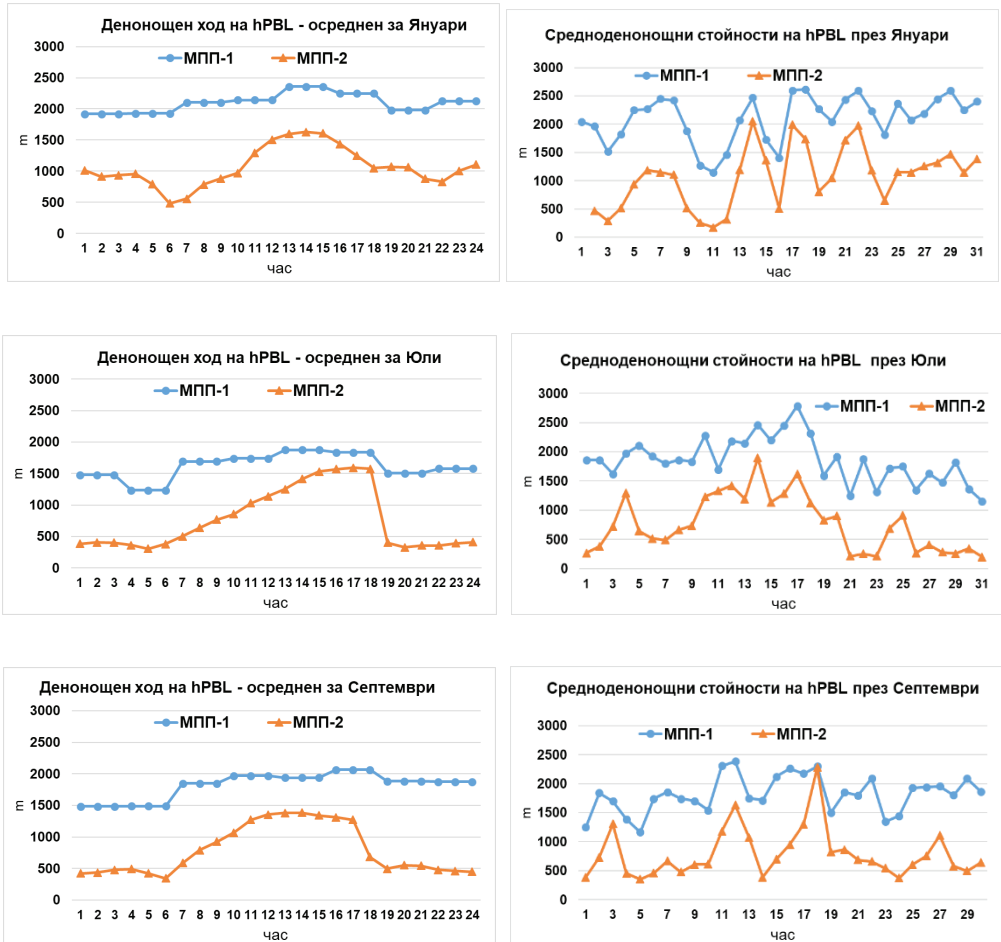
**Table 8.** Mean monthly values of hPBLc correlation of mean daily values of hPBLc (СД) calculated by МПП-1 and МПП-2

		I	II	VI	VIII	IV	IX	Год.
Средномесечна стойност	МПП-1	433	338	353	248	341	370	323
	МПП-2	390	338	908	586	877	707	571
Коефициент на корелация на СД стойности		0.416	0.464	0.114	0.445	0.07	-0.23	0.098

### Височина на ( резултатния) слой на смесване hPBL

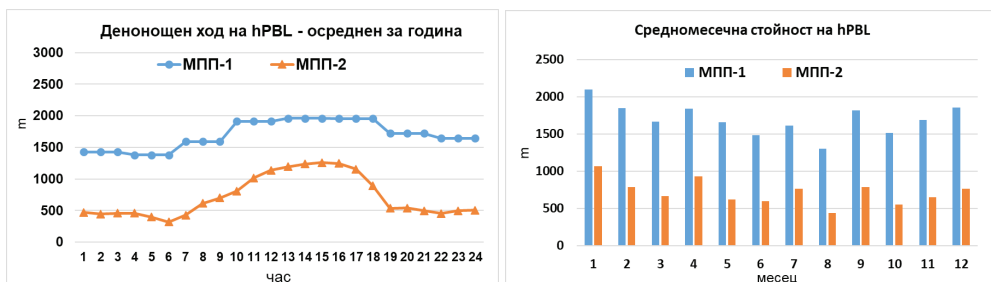
На Фигура 12 е представен денонощният ход на височината на резултатния слой на смесване hPBL, осреднен за един месец и средноденонощните стойности на hPBL за същия месец. На Фигура 13 е даден денонощният ход на hPBL осреднен

за 2022 г. и средномесечните стойности на hPBL за 2022 г. В Таблица 9 се дават някои статистически характеристики, които обобщават резултатите за hPBL от двата МПП.



Фиг. 12. Денонощен ход на слоя на смесване hPBL осреднен за съответния месец (вляво) и средноденонощни стойности на hPBL за съответния месец на 2022 г. (вдясно) съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 12.** Mean diurnal variation of the mixing layer hPBL averaged for the corresponding month (left) and mean daily values of hPBL for the corresponding month of 2022 (right) according to МПП-1 and МПП-2



**Фиг. 13.** Денонощен ход на слоя на смесване hPBL, осреднен за 2022 г. (вляво) и средномесечни стойности на hPBL за 2022 г. (вдясно), съгласно МПП-1 и МПП-2

**Fig. 13.** Mean diurnal variation of the mixing layer hPBL, for 2022 (left) and mean monthly values of hPBL for 2022 (right), according to MPP-1 and MPP-2

Височината hPBL е по-голямата от hPBL<sub>m</sub> и hPBL<sub>c</sub> през съответния час. При МПП-1 височината на механичния слой на смесване hPBL<sub>m</sub> почти винаги е по-голяма от височината на конвективния слой hPBL<sub>c</sub>, така че височината на резултатния слой на смесване hPBL при МПП-1 почти за всеки час съвпада с височината на механичния слой на смесване hPBL<sub>m</sub>. Това е така и при МПП-2 през зимните месеци, но през преходните и особено през летните месеци, често височината на конвективния слой hPBL<sub>c</sub> е по-голяма от hPBL<sub>m</sub> и hPBL<sub>c</sub> взема стойността на hPBL<sub>c</sub>. Височината на hPBL според МПП-1 почти винаги е значително по-голяма от тази изчислена с МПП-2. Денонощен ход с максимум в следобедните часове се наблюдава и при двата МПП, слабо изразен при МПП-1 и ясно изразен при МПП-2.

**Таблица 9.** Средномесечни стойности на hPBL; корелация на средноденонощните (СД) и на средночасовите (СЧ) стойности на hPBL, изчислени от МПП-1 и МПП-2

**Table 9.** Mean monthly values of hPBL; correlation of mean daily values and mean hourly values of hPBL (СЧ), calculated by МПП-1 and МПП-2

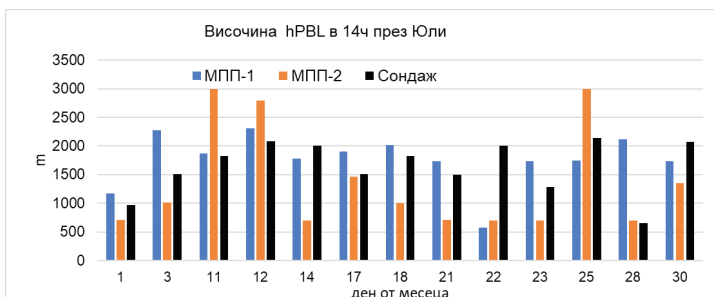
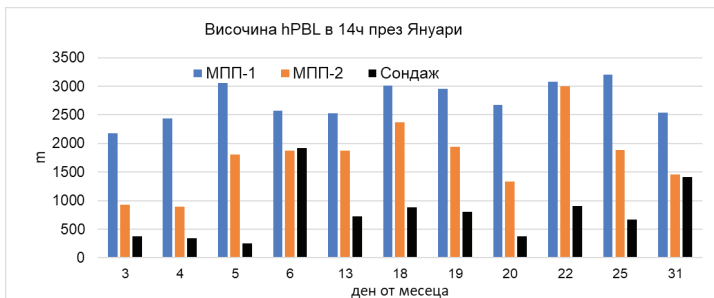
		I	ХІІ	VІІІ	VІІІ	IV	IX	Год.
Средномесечна стойност	МПП-1	2101	1856	1618	1300	1840	1819	1699
	МПП-2	1067	764	764	438	930	789	718
Коефициент на корелация на СД стойности		0.848	0.749	0.806	0.696	0.862	0.699	0.818
Коефициент на корелация на СЧ стойности*		0.721	0.706	0.840	0.631	0.746	0.663	0.881

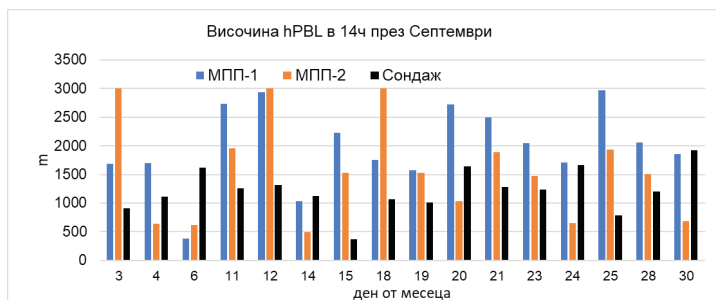
## 5. СРАВНЕНИЕ С ВИСОЧИНАТА НА СЛОЯ НА СМЕСВАНЕ ОПРЕДЕЛЕНА ПО АЕРОЛОГИЧЕН СОНДАЖ

Аерологичните сондажи в ЦАО в София предоставят възможност за сравнение на височината на резултатния слой на смесване hPBL, изчислявана от двата пре-процесора с тази определена от сондажа. В основата на методиката за определяне на hPBL от аерологичния сондаж е експертна оценка, при която водещо значение има вертикалния профил на потенциалната температура. Първата височина на изразен градиент във вертикалния профил на потенциалната температура, често съпроводена с промени във влажността и рязка промяна на посоката на вятъра са индикации за горна граница на слоя на смесване. В първите няколко десетки метра след пускане на балона, влиянието на субективните фактори не е пренебрежимо и поради тази причина такива височини не се приемат за височина на слоя на смесване. Процедурата е приложима в 168 дни от 365-те дни на 2022 г.

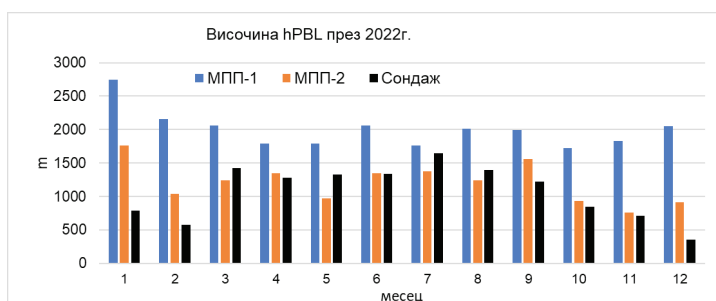
Аерологичното сондиране се извършва в 11:30 UTC. Определената от сондажа височина следва да се отнесе към 14ч зимно часово време. В настоящия параграф, височината hPBL в 14ч изчислена от двата МПП се сравнява с височината на слоя на смесване, определена от сондажа.

На Фигура 14 са показани височините на слоя на смесване hPBL в 14ч през Януари, Юли и Септември 2022 г., а на Фигура 15 – средната за месеците на 2022г височина според МПП-1, МПП-2 и според сондажа. Дните в които не е било възможно определяне на hPBL от сондажа не са включени в тези фигури.





**Фиг. 14.** Височина на резултатния слой на смесване hPBL в 14ч през дни от Януари, Юли и Септември 2022г., определена от МПП-1, МПП-2 и от аерологичния сондаж  
**Fig. 14.** Mixing layer height at 2 p.m. on some days of January, July and September 2022, according to МПП-1, МПП-2 and to the aerological sounding (Сондаж)



**Фиг. 15.** Височина на резултатния слой на смесване hPBL в 14ч, осреднена за месеците през 2022 г, определена от МПП-1, МПП-2 и от аерологичния сондаж  
**Fig. 15.** Mixing layer height at 2 p.m., averaged in the months of 2022, according to МПП-1, МПП-2 and the aerological sounding (Сондаж)

В Таблица 10 са дадени някои статистически оценки за моментните (в 14ч) стойности на hPBL - корелации между резултата от двата пре-процесора и от сондажа, и грешки като процент от средната стойност на hPBL определена от сондажа: нормално отклонение на средните стойности - NMB% (Normal Mean Bias), средна грешка МВЕ% (Mean Bias Error), средна абсолютна грешка МАВЕ% (Mean Absolute Bias Error), дефинирани със следните формули:

$$NMB\% = 100 \frac{\sum_{k=1}^{168} h_k - \sum_{k=1}^{168} h_{S_k}}{\sum_{k=1}^{168} h_{S_k}} \quad (3)$$

$$MBE\% = \frac{100}{168} \sum_{k=1}^{168} \frac{(h_k - h_{S_k})}{h_{S_k}} \quad (4)$$

$$MABE\% = \frac{100}{168} \sum_{k=1}^{168} \frac{|h_k - h_{S_k}|}{h_{S_k}} \quad (5)$$

където  $hS_n$  е височината на hPBL в 14ч на n-тия ден, определена от сондажа;  $h_n$  са височините hPBL в 14ч на n-тия ден, определени от МПП-1 или от МПП-2.

**Таблица 10.** Относителни грешки (виж формулите по-горе) и корелации между стойностите на hPBL в 14ч според от МПП-1, МПП-2 и според аерологичния сондаж  
**Table 10.** Mean errors (see formulas above) and correlation between the values of hPBL at 14h calculated by МПП-1, МПП-2 and determined from the aerological sounding (СОНДАЖ)

	NMB%	MBE%	MAVE%	Коефициент на корелация МПП - СОНДАЖ
МПП-1	78	177	189	-0.17
МПП-2	8.6	47	88	0.168

Както се вижда от Таблица 10, пре-процесорите не показват добри резултати при определяне моментната стойност на hPBL в 14ч. Най-чувствителната към отклонение от измерванията средна абсолютна грешка MAVE% достига 189% при МПП-1 и 88% при МПП-2; най-нечувствителната оценка към отклонение от измерванията - нормално отклонение на средните стойности NMB% е 78% при МПП-1 и 8.6% при МПП-2. Коефициентът на корелация между стойностите на hPBL в 14ч определени от пре-процесорите и от сондажа е -0.17 при МПП-1 и 0.168 при МПП-2.

**Таблица 11.** Средномесечни стойности на hPBL според от МПП-1, МПП-2 и според аерологичния сондаж; корелация между моментната в (14ч) височина hPBL, изчислена от МПП-1 и от сондажа и между тази, изчислена от МПП-2 и от сондажа

**Table 11.** Mean monthly values of hPBL calculated by МПП-1, МПП-2 and determined from the aerological sounding (СОНДАЖ); correlation between hPBL, calculated by МПП-1 and and determined from the aerological sounding and between hPBL, calculated by МПП-2 and determined from the aerological sounding

		I	XII	VII	VIII	IV	IX	Год.
Средномесечна стойност	МПП-1	2747	2051	1766	2016	1789	1992	1961
	МПП-2	1760	911	1373	1242	1351	1557	1188
	СОНДАЖ	788	357	1644	1397	1276	1219	1094
Коефициент на корелация МПП-1 - СОНДАЖ		-0.042	0.239	-0.061	0.056	-0.029	-0.173	-0.17
Коефициент на корелация МПП-2 - СОНДАЖ		0.325	0.641	0.513	0.252	-0.55	-0.410	0.163

В Таблица 11 се дават средномесечните стойности на височината на слоя на смесване hPBL, изчислени от МПП-1, МПП-2 и от аерологичния сондаж, за два зимни месеца (Януари и Декември), два летни месеца (Юли и Август) и за два месеца от преходните сезони (Април и Септември) през 2022 г. В долните два

реда на таблицата е корелацията между средно месечната височина hPBL в 14ч, изчислена от МПП-1 и определена от сондажа и корелацията, изчислената от МПП-2 и определена от сондажа.

В Таблица 12 са дадени статистически оценки – корелации и грешки дефинирани с Формули от (3) до (5), аналогични на тези от Таблица 10, но за средномесечните стойности на hPBL, вместо за моментните стойности в 14ч.

**Таблица 12.** Относителни грешки (виж формулите по-горе) и корелации между средномесечните стойности на hPBL според от МПП-1, МПП-2 и според аерологичния сондаж

**Table 12.** Mean errors (see formulas above) and correlation between the monthly mean values of hPBL calculated by МПП-1, МПП-2 and determined from the aerological sounding (СОНДАЖ)

	NMB%	MBE%	MAVE%	Коефициент на корелация МПП - СОНДАЖ
МПП-1	86	9.2	9.2	-0.320
МПП-2	12	2.1	2.9	0.416

Резултатите за средномесечните стойности като цяло са по-добри в сравнение с аналогичните за моментните стойности в 14ч. Най-чувствителната към отклонение от измерванията средна абсолютна грешка MAVE% е 9.2% при МПП-1 и 2.9% при МПП-2. При нормалното отклонение на средните стойности NMB% има незначително влошаване на оценките – 86% при МПП-1 и 12% при МПП-2. Коефициентът на корелация между средномесечните стойности на hPBL определени от пре-процесорите и от сондажа е -0.320 при МПП-1 и 0.416 при МПП-2.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общото впечатление от направения анализ е, че стойности на някои важни за дисперсията на атмосферни замърсители параметри, изчислени от единия и изчислени от другия пре-процесор съществено се различават. Основната причина за различните резултати от двата пре-процесора е в различните параметризационни схеми, които пре-процесорите използват. Резултатите от МПП-2 за приземния поток топлина, мащаба на Монин-Обухов, динамичната скорост и мащаба на конвективната скорост са по-правдоподобни от тези получавани от МПП-1. До известна степен това се дължи на начина на използване на началните данни. Конвенционалните синоптични наблюдения, които са входните данни и за двата пре-процесора са през 3 часов интервал. МПП-1 не ги интерполира, а присвоява стойността от наблюдението в даден час на предишния и на следващия час. Основната причина за разликата в резултатите, обаче, е в различните параметризационни схеми, които пре-процесорите използват.

Усреднената за месец височина на слоя на смесване, изчислена от МПП-2 показва не лошо съвпадение с определената такава от аерологичния сондаж, но

относно моментни дневни стойности и двата пре-процесора не показват добро съвпадение с експерименталните резултати.

Налага се извода, че прости подходи, като тези използвани от разгледаните пре-процесори са приемлива, лесно приложима възможност за решаване на задачи от регулаторен характер, при които с приоритетна тежест са оценки, осреднени за относително по-дълъг интервал от време, като средноденонощни и средногодишни концентрации на атмосферни замърсители. В случаите, когато към дисперсионното моделиране се предявяват по-високи изисквания е препоръчително да се използват по-прецизни и адекватни подходи за определяне на турбулентните параметри, каквато възможност се предоставя от съвременните числени метеорологични модели.

## ЛИТЕРАТУРА

- AERMOD (2024) AERMOD Model Formulation, US EPA (United States Environmental Protection Agency). EPA-454/B-24-010, November 2024, 177 pp. [https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod\\_mfd.pdf](https://gaftp.epa.gov/Air/aqmg/SCRAM/models/preferred/aermod/aermod_mfd.pdf)
- AUSTAL2000N (2014) Program Documentation of Version 2.6 (Federal Environmental Agency (UBA), Dessau-Roßlau (Germany), 2014-06-26, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2008/dokumente/austal2000n\\_en.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2008/dokumente/austal2000n_en.pdf)
- Golder, D. (1972) Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.* 3, 47–58, <https://doi.org/10.1007/BF00769106>.
- Finardi, S., Erbrink, J., Fisher, B. (1998)- COST Action 710 Final report: Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models, Publications Office European Commission - Directorate-General for Research and Innovation.
- Fisher, B., Kukkonen, J., Piringer, M., Rotach, M. W., and Schatzmann, M. (2006) Meteorology applied to urban air pollution problems: concepts from COST 715, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 555–564, <https://doi.org/10.5194/acp-6-555-2006>.
- Yordanov, D., Kolarova, M., Syrakov, D. (2003a) Parameterisation of convective PBL using surface data for the wind and stability classes, *Int. J. Environment and Pollution*, 20, 1-6, 165-176.
- Yordanov, D. L., Syrakov, D. E., Kolarova, M. P. (2003b) Parameterization of PBL from the surface wind and stability class data, In Melas, D. and Syrakov, D. (eds.), *Air Pollution Processes in Regional Scale*. NATO Science Series, Vol. 30, 347-364. Kluwer Acad. Publ., Netherlands, [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1071-9\\_37](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1071-9_37).
- Yordanov, D., Kolarova, M., Syrakov, D. (2005) The ABL Models Yordan and Yorcon — Top-Down and Bottom-Up Approaches for Air Pollution Applications. In: Faragó, I., Georgiev, K., and Havasi, Á. (eds) *Advances in Air Pollution Modeling for Environmental Security*. NATO Science Series, vol 54, 383-393. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3351-6\\_35](https://doi.org/10.1007/1-4020-3351-6_35)
- Zannetti, P. (2003) *Air Quality Modeling – Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software, Volume I – Fundamentals*, ISBN 0-923204-56-3, Published by The EnviroComp Institute and Air & The Waste Management Assoc., 456 pp.