ГОДИШНИК НА СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ" ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

Том 108

ANNUAL OF SOFIA UNIVERSITY "ST. KLIMENT OHRIDSKI" FACULTY OF PHYSICS

Volume 108

МЪГЛАТА В СОФИЯ 03–10/01/2014: АНАЛИЗ ЧРЕЗ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛНАТА ТЕМПЕРАТУРА

АНАСТАСИЯ СТОЙЧЕВА^{1, 2}, СТИЛИЯН ЕВТИМОВ²

¹ Национален институт по метеорология и хидрология, БАН ² Катедра "Метеорология и геофизика"

Анастасия Стойчева, Стилиян Евтимов. МЪГЛАТА В СОФИЯ 03–10/01/2014: АНАЛИЗ ЧРЕЗ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛНАТА ТЕМПЕРАТУРА

Проведено е детайлно изследване на продължителната мъгла в Синоптична станция София, Младост, през периода 03–10/01/2014. Псевдопотенциалната температура е използвана като основно средство за анализ на приземните и аерологичните данни. Използвани са също и ред приземни и височинни синоптични карти за изследвания период. Времевите редици на приземната псевдопотенциална температура и редуцираното към морско ниво приземно налягане са статистически моделирани. Установени са точките на структурните им промени. По аерологичните данни са локализирани покриващите мъглата слоеве на силно устойчива стратификация. Предложеният сценарий за появата, фазите на развитие и разсейването на мъглата е верифициран чрез детайлно проведен синоптичен анализ на обстановката. Установено е, че тази продължителна мъгла е съставена от една радиационна мъгла.

За контакти: Стилиян Евтимов, Катедра "Метеорология и геофизика", Физически факултет, Софийски университет "Св. Климент Охридски", бул. Дж. Баучер 5, 1164 София, тел.: +359 2 8161 413, E-mail: evtimov@phys.uni-sofia.bg

Anastasiya Stoycheva, Stilian Evtimov. SOFIA'S FOG DURIND 03–10/01/2014: ANALYSIS BY EQUIVALENT POTENTIAL TEMPERATURE

A detailed case-study investigation of the prolonged fog at meteorological station Sofia, Mladost, during the period 03-10/01/2014 is carried out. The equivalent potential temperature is used as base tool to analyze surface and radiosounde data. A number of surface and upper level synoptic charts for the period under consideration are also used. Time series of surface equivalent potential temperature and sea level pressure are statistically modeled. Their structural chance breakpoints are established. The capping layers of strongly stable stratification are localized using radiosounde data. The suggested scenario for appearance, phase of evolution and disappearance of the fog under consideration is verified by detailed synoptic analysis. It is established that the prolonged fog under investigation is consisted of two sequences of fogs – first, a radiation fog and next one – an advection-radiation fog.

Keywords: regional climate, statistics, fog, Sofia *PACS* numbers: 92.60.Ry

1. УВОД

През периода 03–10/01/2014 в района на град София (България) се задържаха продължителни мъгли. Това доведе до затруднения в наземния транспорт и въздушния трафик и повишаване на общата, и особено респираторната заболеваемост. В този контекст прогнозирането на подобни епизоди на продължителна и интензивна мъгла са от безспорен интерес. За съжаление на този етап има още какво да се желае по отношение на надеждността на тези прогнози. За това има ред причини, но видимо една от основните е недостатъчно изяснените връзки между конкретната синоптична обстановка, нейната динамика и специфичните мъгли в района на Софийското поле. От несъмнен интерес са също така алтернативни на суровите данни параметри за по-ефективен анализ на обстановките с мъгла.

Особеностите на облачността над Софийското поле са разгледани от Мартинов и Габракова [1], а температурният режим от Мартинов и Богачев [2]. Климатичният режим на мъглата над летище София е изследван от Годев и Корчев [3], които предлагат и статистически метод за нейното прогнозиране. Христов и Танев [4] в рамките на едно по-общо проучване на климата на София отбелязват, че по данните за периода 1955–1963 г. типичната продължителност на мъглите в София е 3–6 часа, като регистрираната максимална продължителност е 6–7 дни. В монографията на Bluskova et al. [5], в рамките на по-обща характеристика на климата в София и околностите, като продължителност на най-честите мъгли отново се посочват 3–6 часа. Тези автори отбелязват и случая на мъглата с начало 23/12/1957 и времетраене около 188 часа, или приблизително 8 дни, като типичен пример на трайна радиационна мъгла при антициклонално време. Трябва да се отбележи, че тези изследвания са за периоди до около края на 70-те години на миналия век. Latinov et al. [6], наред с две други метеорологични станции, разглеждат и специфичните особености за появата на мъгла в София през последното тримесечие на 2004. Стойчева и Евтимов [7], провеждайки подробна статистическа диагностика на мъглите в Синоптична станция София, Младост, за периода 1992–2012, разглеждат също така и разпределението на мъглите по тяхната продължителност.

В настоящата работа се изследва продължителната мъгла в София през периода 03–10/01/2014. Целта е да се разкрият условията и синоптичната обстановка в тяхната динамика за възникването и поддържането на тази трайна мъгла. Нашият анализ се базира на данните от приземните метеорологични наблюдения в основните и междинните синоптични срокове и аерологичните сондажи в Станция София, Младост. Използват се също и редица приземни и височинни карти за синоптичната обстановка над Европа и Балканския полуостров през разглеждания период. Методите на изследване са статистическо моделиране на времеви редици и синоптичен анализ. Основно средство в нашето разглеждане е т. нар. псевдопотенциална температура [8], известна в литературата още като equivalent potential temperature [9]. Възниква въпросът, защо именно псевдопотенциалната температура.

Псевдопотенциалната температура е консервативна характеристика при сухоадиабатно и влажноадиабатно издигане или спускане, а също и псевдоадиабатно издигане. Тя е приблизително константа при изенталпно изпарение, при изобарно нагряване се повишава, а при изобарно охлаждане намалява [8]. Затова псевдопотенциалната температура може да се използва за идентификация на въздушните маси [8]. Sanders [10] предлага нов метод за приземен анализ, който използва приземната потенциална температура за различаването на фронтовете, бароклинните долини и нефронталните бароклинни зони. Hoffman [11] анализира средната годишна и сезонната приземна потенциална температура в континенталната част на САЩ, Южна Канада и Северно Мексико с прилежащите крайбрежни води и идентифицира силните и по-умерените бароклинни зони. Turton and Broun [12], а също Bergot and Guedalia [13] демонстрират важността на адвекцията при формирането и еволюцията на мъглите и нейното значение за повишаването на успеваемостта при моделното прогнозиране на мъглата. Ето защо ние използваме псевдопотенциалната температура, от една страна, за приземен анализ, а от друга, като индикатор за евентуална смяна на въздушните маси.

Псевдопотенциалната температура се използва като критерий за статична устойчивост на атмосферата и при влажен въздух с наситена водна пара [8, 9]. Големите положителни вертикални градиенти на псевдопотенциалната температура в даден слой означава силна устойчивост на стратификацията в него. Мъглите в Софийско поле се характеризират с покриваща температурна инверсия. Тази инверсия съвместно с разпределението на влажността създават един силно устойчиво стратифициран, покриващ мъглата, задържащ слой. Естествено, този слой би трябвало да се идентифицира ясно във вертикалния профил на псевдопотенциалната температура, а с това и вертикалната мощност на мъглата.

Съдържанието на работа е, както следва. В раздел 2 се дава описание на използваните данни и методиката на пресмятане на псевдопотенциалната температура. Раздел 3 представя анализа на приземните и аерологичните данни. В параграф 3.1 се описва предварителният анализ на времевите редици на приземната псевдопотенциална температура и редуцираното към морско равнище приземно налягане. В параграф 3.2 се излага статистическият анализ и моделирането на тези две времеви редици. Анализът на аерологичните сондажи се дава в параграф 3.3. Раздел 4 представя синоптичния анализ на разглежданата обстановка. Параграфите на този раздел описват подготовката, различните фази на развитие и финала на изследваната обстановка. Получените резултати и изводи се резюмират в заключението на работата.

2. ДАННИТЕ И ТЯХНАТА ПРЕДВАРИТЕЛНА ОБРАБОТКА

В този раздел ще се спрем на източниците, съдържанието и предварителната обработка на използваните в настоящата работа данни. Обработката на данните включва категоризация на интензивността на мъглата и изчисляване на псевдопотенциалната температура в основните и междинните синоптични срокове за приземните наблюдения и височините до 2500 m за аерологичните сондажи. В работата се използва общоприетата дефиниция за мъгла – хоризонтална видимост до 1000 m включително. Продължителността на една мъгла се дефинира съгласно Стойчева и Евтимов [7] в часове, а именно: максималният брой последователни във времето синоптични срокове с регистрирана мъгла, умножен по 3.

2.1. ДАННИТЕ

Използваните в работата данни са от приземни наблюдения, аерологични сондажи и приземни и височинни синоптични карти. Приземните данни са от декодираните телеграми в архива на НИМХ-БАН от приземните наблюдения в Метеорологична станция София, Младост. Наблюденията са в основните 00, 06, 12 и 18 GMT и междинните 03, 09, 15 и 21 GMT синоптични срокове за периода 01–12/01/2014. Аерологичните данни са от оперативните сондажи на ЦАО на НИМХ-БАН в София, Младост. Сондажите са еднократни в 12 GMT за периода 02–11/01/2014. Приземните карти са от синоптичния архив на НИМХ-БАН и са за основните синоптични срокове 00, 06, 12 и 18 GMT.

От този архив, но за 00 и 12 GMT, са и височинните карти. Използвани са също и карти от Global Forecast System, поддържана от National Center for Environmental Prediction (http://www.wetterzentrale.de; www.wetter3.de).

От приземните данни за Станция София, Младост, ние използваме времевите редици за температурата, относителната влажност, налягането, редуцираното за морско ниво налягане, скоростта на вятъра, хоризонталната видимост и кодираната група за явленията, характеризиращи времето в момента на наблюдението. От аерологичните сондажи ние извличаме времевите редици за височината на измерването, налягането, температурата и относителната влажност. Приземните карти от синоптичния архив на НИМХ-БАН са за баричното поле на приведеното към морско ниво налягане над Европа с нанесените фронтални системи, а височинните – за абсолютната барична топография на нива 850 hPa и 500 hPa и картите на относителна барична топография 500–1000 hPa.

2.2. ПРЕДВАРИТЕЛНА ОБРАБОТКА

Съгласно международния код за приземните синоптични наблюдения ние класифицираме по хоризонталната видимост интензивността на мъглата в четири категории. Те са, както следва: хоризонтална видимост до 50 m – много гъста мъгла (Very dense fog), 50–200 m – гъста мъгла (Dense fog), 200–500 m – умерена мъгла (Moderate fog), и видимост в интервала 500–1000 m – слаба мъгла (Light fog). Фазата на развитие, вертикалната видимост и някои особености на мъглата се определят от кодираната група за явленията, характеризиращи времето в момента на наблюдението.

Псевдопотенциалната температура $\theta_{_e}$ ще изчисляваме, следвайки [8, 9] по формулата

$$\theta_{e} = T [1000/(p - e_{w})]^{R_{d}/c_{pd}} \exp[Lr / cpdT_{c}],$$

където *p* е абсолютната температура на въздуха, *p* – налягането, *r* – парциалното налягане на водната пара, *r* – отношението на сместа, *T_c* – абсолютната температура на ниво на кондензация, *L_c* – скритата топлина на изпарение на водата на ниво на кондензация, *R_d* = 287,04 J/kg K е специфичната газова константа на сухия въздух и *c_{pd}* = 1005,7 J/kg K е специфичният топлинен капацитет на сухия въздух при постоянно налягане. Парциалното налягане на водните пари се изчислява по температура на въздуха *t* в °C, а относителната влажност *U* по формулата

$$e_w = 6,112 (U/100) \exp[17,62 t/(t+243.12)]$$

след което определяме и отношението на сместа:

 $r = 0,62198 e_w / (p - e_w)$.

Температурата на ниво на кондензация ние изчисляваме, решавайки числено приведеното в [8] уравнение на адиабата за ненаситен влажен въздух:

$$c_p \ln(T_c / T) + 0.622 L (1 / T_c - 1 / T) + R \ln U = 0,$$

където $R \approx R_d (1 + 0.605 r)$ и $c_p \approx c_{pd} (1 + 0.9 r)$ са съответно специфичната газова константа и специфичният топлинен капацитет при постоянно налягане на влажния въздух. Скритата топлина на изпарение на водата на ниво на кондензация се определя по формулата

$$L = (2,501 - 0,00237 t_{c}) \times 10^{6} \text{ J/kg},$$

където t_c е температура на ниво на кондензация в °C.

3. АНАЛИЗ НА ПРИЗЕМНИТЕ И АЕРОЛОГИЧНИТЕ ДАННИ

В този раздел ще анализираме приземните и аерологичните данни от Станция София, Младост. За приземните данни това са времевите редици на псевдопотенциалната температура и редуцираното към морско ниво налягане. За сондажите се изследва редицата от ежедневните вертикални профили на псевдопотенциалната температура в 12 GMT до височини 2500 m. И в двата случая се използва още информацията за интензивността на мъглата, а само за приземните данни и информацията в кодираната група за явленията, характеризиращи времето в момента на наблюдението, а също и скоростта на вятъра.

3.1. ПРЕДВАРИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ПРИЗЕМНИТЕ ДАННИ

Фиг. 1 представя времевите редици за псевдопотенциалната температура и редуцираното към морско ниво налягане за периода 01 00 –12 21/01/2014. На горния панел е температурата, а на долния – налягането. Интензивността на мъглата е кодирана по скалата на сивия цвят според легендата към фигурата. Останалите символи в легендата са за кодираната група за явленията, характеризиращи времето в момента на наблюдението. През разглеждания период се регистрират следните, свързани с мъглата, кодове: 43.. – отслабваща мъгла, небето не се вижда, 45.. – мъгла без промяна, небето не се вижда, 47.. – мъглата започва или се усилва, небето не се вижда, и 49.. – мъгла с отлагане на скреж, небето не се вижда. Най-светли сиви линии без символ в основата са димките с хоризонтална видимост 1000 m. Хоризонталните стрелки индикират наличието на вятър. Прегледът на фиг. 1 показва, че мъглата през разглежданата обстановка се състои от два епизода. Първият е от 03 06/01 GMT до 05 09/01 GMT с продължителност 54 часа, вторият – от 07 03/01 GMT до 10 12/01 GMT с продължителност 84 часа. Двата епизода се разделят от 39 часов период с подобрена видимост – от 05 12/01 GMT до 07 00/01 GMT. Това прекъсване се характеризира с димки и хоризонтална видимост от 2000–8000 m с изключение на 06 15/01 GMT и 06 18/01 GMT, когато видимостта достига 10 000 m.



Фиг. 1. Времеви редици за псевдопотенциалната температура, налягането на морско ниво, вятъра и фазата за развитие на мъглата в Синоптична станция София, Младост, за периода 01–12/01/2014

31

Веднага след началото на първия епизод на 03 09/01 GMT се регистрира мъгла с отлагане на скреж, следва подобрение на видимостта на 03 12/01 GMT, след което мъглата отново започва, усилва се и остава стабилна до димката на 04 12/01 GMT, когато хоризонталната видимост нараства на 1000 m. След това имаме ново усилване и последващо стабилизиране на мъглата до началото на разсейването ѝ около 05 03/01 GMT. Този епизод се характеризира с ясно изразен денонощен ход на псевдопотенциалната температура на фона на слабото нейно общо понижение. Освен това наблюдаваме и отчетлив локален максимум на налягането с размах около 8 hPa. Разглежданият период се характеризира с безветрие с изключение на подобрението на видимостта на 03 12/01 GMT и около началото на разсейване на мъглата на 05 06/01 GMT, когато се регистрират скорости на вятъра от 1 m/s.

Вторият епизод стартира с димка, следвана от денонощие на усилване, отслабване и стабилизация на мъглата, през което хоризонталната видимост се понижава до 100–200 m. Следва сравнително продължителен период на стабилизация на мъглата при видимости 100 m. Това продължава до димката на 08 12/01 с видимост 1000 m, след което до началото на окончателното разсейване на мъглата се установява нов продължителен период на стабилизация при видимости 100–300 m. Както се вижда от фиг. 1, този епизод се характеризира с по-висока псевдопотенциална температура в сравнение с първия, понижаваща се слабо с напредването на времето. Денонощният ход отново е очевиден и в редицата на налягането пак наблюдаваме ясно изразен локален максимум с размах около 10 hPa. Епизодът е практически при пълно безветрие. Скорост от 1 m/s се регистрира единствено при окочателното разсейване на мъглата на 10 15/01 GMT.

От фиг. 1 се вижда, че още в самото начало на периода на прекъсване на мъглата псевдопотенциалната температура претърпява сравнително рязък скок до по-високо средно ниво от това на втория епизод на мъглата. Последното практически става за 1–2 синоптични срока. През този период налягането е в локален минимум около 1022 hPa. Безветрието е пълно. Началото и краят на обстановката се характеризират със слаб вятър от 1–2 m/s. В началото имаме сравнително по-ниско средно ниво на псевдопотенциалната температура и по-малка амплитуда на денонощния ѝ ход, а в края – най-високото за целия разглеждан период ниво и най-широкия размах на денонощния ход. Наляганията в началото и края на обстановката са видимо на по-ниски нива в сравнение с двата епизода на мъглата.

Да резюмираме: анализираната мъгла е съставена фактически от два епизода, разделени от период на изясняване с димки. Първият епизод се характеризира със сравнително по-ниско средно ниво на псевдопотенциалната температура и добре изразен локален максимум на налягането. Вторият епизод е с по-високо средно ниво на псевдопотенциалната температура и нов, по-продължителен локален максимум на налягането. Началото на периода на проясняване съвпада с рязък скок в средното нивото на псевдопотенциалната температура и през този период налягането е в локален минимум. С подобен скок на нивото на псевдопотенциалната температура завършва и вторият епизод. Началото и краят на разглежданата обстановка се характеризират съответно с ниско и високо средно ниво на температурата и сравнително по-ниски налягания. През целия период се наблюдава ясно изразен денонощен ход на псевдопотенциалната температура, като неговата амплитуда също търпи резки промени. През по-голямата част на обстановката и особено през двата епизода на мъгла имаме фактическо безветрие.

3.2. СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ПРИЗЕМНИТЕ ДАННИ

В този параграф ще проведем статистическо изследване на времевите редици на псевдопотенциалната температура и редуцираното за морско ниво атмосферно налягане. За целта ще използваме някои съвременни методи за статистически анализ и моделиране на времеви редици. Първият въпрос, възникващ при подобно разглеждане, е изборът на подходящ стохастичен модел, който адекватно отразява специфичните особености на еволюцията на изследваните редици. Това става по формално-статистически, а в случая, естествено, и физични съображения.

Резюмирайки резултатите от предварителния анализ в края на предния параграф, ние подчертахме, че времевите редици на псевдопотенциалната температура и налягането демонстрират освен по-плавни, но и резки изменения на средните си нива. Подобни резки изменения се наблюдават и в амплитудата на денонощния ход на псевдопотенциалната температура. От статистическа гледна точка това означава нестационарност и наличие на т.нар. структурни промени във времевата редица. В случая този извод се подкрепя и от физични съображения.

Действително, доколкото псевдопотенциалната температура се запазва за дадена въздушна маса практически дори и при влажноадиабатни процеси, тя може да се разглежда като своеобразен "маркер" на масата. Тогава евентуалната смяна на въздушната маса над Софийското поле естествено ще повлече и промяна на средното ниво в еволюцията на редицата на псевдопотенциалната температура, а също и промяна на амплитудата на денонощния ѝ ход поради новите термо-хигрометрични условия. Що се отнася до налягането, то смяната на синоптичните вихри над София естествено води до по-плавни или по-резки промени в средното за обстановката ниво.

И така, за адекватното статистическо третиране на нашите времеви редици би трябвало да се използват техники, отчитащи евентуални структурни промени в тяхната еволюция. Ние ще приложим техниката на т.нар. линейна регресия със структурни промени [14, 15]. Това е класическият модел на линейна множествена регресия, но с евентуално няколко точки на структурна промяна при преминаването, през които коефициентите на регресията търпят скок, оставайки постоянни в интервалите между тях. Обикновено точките на стуктурната промяна не са известни предварително. Техният брой и локализацията им се определят чрез минимализирането на сумата от квадратите на остатъците от последователно усложняващите се регресионни модели или чрез подходящи статистически критерии.

Да преминем към построяването на съответните линейни регресионни модели. За налягането нещата са сравнително прости. Както се вижда от фиг. 1, в случая могат да се очакват само скокове в средната стойност на редицата, защото на фигурата не се забелязват по-систематични тенденции на повишаване или понижаване на налягането. Този модел е допълнително подкрепен и от физичните съображения, споменати по-горе.

Моделирането на редицата за псевдопотенциалната температура е по-сложна задача. Както бе коментирано, в редицата имаме очевидно присъствие на денонощен ход на температурата. Тъй като периодът на дискретизация е 3 h, това означава, че нашият модел трябва да включва задължително и периодична компонента с период 8. За целта ние въвеждаме 8 индикаторни променливи – по една за всеки синоптичен срок. Всяка от тях се състои от последователни нули и единица само на мястото на съответния синоптичен срок. Например: за срока 00 00 GMT индикаторната променлива е векторът от единица, следвана от седем последователни нули, отново единица, следвана от седем нули, и т.н. Освен денонощен ход в редицата за псевдопотенциалната температура се наблюдават и сравнително по-продължителни участъци на плавно изменение на средното ниво, около което се извършват денонощните осцилации. Този ефект на бавно изменящ се в сравнение с осцилациите тренд, ние моделираме, въвеждайки нова изкуствена променлива. Тя се състои от осем последователни единици, след това осем последователни двойки, осем последователни тройки и т.н.

Фиг. 2 представя времевите редици за псевдопотенциалната температура, редуцираното към морско ниво атмосферно налягане, техните линейни апроксимации и трендове в Станция София, Младост, за периода 01–12/01/2014. Линейните апроксимации и трендове са получени чрез описаните вече линейни регресии със структурни промени за псевдопотенциалната температура върху 9-те променливи, а за налягането – върху описаната по-горе изкуствена променлива. На горния панел е температурата, на долния – налягането, а интензивността на мъглата отново е кодирана по скалата на сивия цвят. Вертикалните прекъснати линии са в точките на структурна промяна, а хоризонталните отсечки в техните основи дават доверителните интервали на нивото 0,95. Останалите означения и символи са пояснени в легендите към фигурата. От наблюденията за вятъра са маркирани само две.

Bayesian Information Criterion дава две точки на структурна промяна във времевата редица за псевдопотенциалната температура и четири в редицата за налягането. За температурата те са 05 06/01 GMT (05 03–05 09/01 GMT) и 10 15/01 GMT (10 12–10 21/01 GMT), като в скобите са съответните доверителни интервали. За налягането точките са 03 03/01 GMT (02 09–03 18/01 GMT), 05 03/01 GMT (05 00–05 09/01 GMT), 06 21/01 GMT (06 18–07 00/01) GMT и 09 12/01 GMT (09 06–09 15/01 GMT).



Фиг. 2. Времеви редици за псевдопотенциалната температура, налягането на морско ниво, техните линейни апроксимации и трендове в Синоптична станция София, Младост, за периода 01–12/01/2014

Табл. 1 обобщава оценките на параметрите на периодичната компонента в линейната регресия за псевдопотенциалната температура и техните скокове

в точките на структурна промяна. Стълбовете *Left, Center* и *Right* съответстват на левия, централния и десния участък на апроксимацията на фиг. 2. Оценките са с точност до десета, а в скобите естандартната грешка. Двата стълба *Break 1* и *Break 2* дават съответно скоковете на параметрите в двете точки на структурна промяна. Стъпаловидното линейно понижаване на псевдопотенциалната температура през първата част е -0,89 (0,24) K/day, през втората: -0,46 (0,17) K/day, а през третата част средното ниво не се променя. Първият скок в стъпаловидния тренд е 5,8 K, вторият: 5,2 K.

Hour GMT	Equivalent potential temperature [K]				
	Left	Break 1	Center	Break 2	Right
00 00	286,8 (1,1)	4,36	291,1 (1,6)	-0,74	290,4 (1,2)
03 00	286,7 (1,1)	2,67	289,3 (1,6)	-2,69	286,6 (1,2)
06 00	286,1 (1,1)	2,48	288,6 (1,6)	-3,75	284,8 (1,2)
09 00	287,3 (1,1)	2,47	289,7 (1,5)	-1,31	288,4 (1,2)
12 00	289,9 (1,1)	3,63	293,5 (1,5)	3,33	296,8 (1,2)
15 00	290,0 (1,1)	4,46	294,4 (1,5)	5,27	299,7 (1,2)
18 00	287,5 (1,1)	5,07	292,6 (1,4)	3,89	296,5 (1,0)
21 00	287,1 (1,1)	4,23	291,4 (1,4)	0,83	292,2 (1,0)

Таблица 1. Параметри на денонощната периодична компонента на времевата редица за псевдопотенциалната температура и техните скокове в точките на структурна промяна

Линейната апроксимация на редицата на налягането започва с хоризонталния участък на ниво 1024,4 (0,3) hPa. Спрямо това ниво скокът в първата точка е 2,1 (0,5) hPa, във втората: –2,0 (0,5) hPa, третата: 3,3 (0,5) hPa и четвъртата: –1,2 (0,5) hPa.

Проведеното статистическо моделиране очертава следния по-детайлен еволюционен сценарий. До 05 06/01 GMT в района на Станция София, Младост, имаме една еднородна в термохигроскопично отношение въздушна маса. Нейната псевдопотенциална температура бавно се понижава с около 0,9 K/day. На 03 03/01 GMT средното ниво на налягането скокообразно се повишава с 2,1 hPa. В рамките на доверителния интервал на 03 06/01 GMT е и първата регистрация на мъгла. При това средно ниво на налягането, плавен низходящ тренд на псевдопотенциалната температура с наложен върху него денононощен ход и пълно безветрие мъглата продължава с по-ниска или по-висока интензивност до новия скок на налягането на 05 03/01 GMT и първата структурна промяна на температурата на 05 06/01 GMT. Доверителните интервали за тези два момента се препокриват. Първата фаза на епизода завършва на 05 09/01 GMT.

В точката на структурна промяна скокът в тренда на температура е положителен – около 5,8 К. От табл. 1 се вижда, че параметрите на денонощната периодична компонента за всички синоптични срокове също претърпяват положителни скокове, като прави впечатление, че те са по-големи през втората половина на денонощието. Средното ниво на налягането се понижава с около 4,1 hPa. От фиг. 2 се вижда също, че промяната съвпада и с регистрацията на слаб приземен вятър. Тези обстоятелства дават основание да предположим, че около 05 03–05–06/01 настъпва качествена промяна на обстановката. Рязкото покачване на псевдопотенциалната температура, придружено с изменения в нейния денонощен ход, би трябвало да означава нахлуване на по-топла и с по-висока влажност въздушна маса при едновременно рязкото понижаване на средното ниво на налягането.

След 05 06/01 GMT псевдопотенциална температура отново започва плавно да се понижава, но от по-високо първоначално ниво и с по-малка скорост – с около 0,5 K/day. Размахът на денонощния ход също е по-голям. Средното ниво на налягането е около 1022,4 hPa. Хоризонталната видимост е над 1000 m. На 06 21/01 средното ниво на налягането се покачва скокообразно с около 5,3 hPa. Малко по-късно, на 07 03/01, е и първата регистрация на мъгла от втората фаза. За разлика от първата фаза, сега мъглата е с по-висока интензивност.

На 09 12/01 GMT отново имаме скок на средното ниво на налягането. То се понижава с около 4,5 hPa до нивото 1023,2 hPa. Мъглата обаче продължава до 10 15/01 GMT, когато е окончателният финал на епизода. На 10 15/01 GMT е и втората точка на структурна промяна във времевата редица на псевдопотенциалната температура. Малко преди това имаме и регистрация на слаб вятър след сравнително дългото безветрие по време на мъглата. Скокът на средното ниво на температурата е 5,2 K и по-нататък нямаме значим наклон на тренда. Параметрите на денонощната периодична компонента за всичките синоптични срокове също търпят скок като, както се вижда от табл. 1, скоковете са отрицателни за първата половина на денонощието и положителни за втората. Това увеличава амплитудата на денонощния ход. Имаме смяна на въздушната маса, мъглата окончателно се разсейва, епизодът завършва.

3.3. АНАЛИЗ НА АЕРОЛОГИЧНИТЕ ДАННИ

В този параграф ще представим резултатите от анализа на аерологичните сондажи през разглеждания период. Като основно средство ние отново използваме псевдопотенциалната температура. Защо именно нея? Изменението на тази температура с височината е критерий за статичната устойчивост на атмосферата при въздух с наситена водна пара. Ако тя нараства с височината, стратификацията е устойчива, ако намалява – неустойчива, а ако не се изменя, имаме безразлично равновесие [8, 9]. По-силните положителни градиенти на псевдопотенциалната температура в даден слой означават, че той е по-силно устойчиво стратифициран. Ако идеализираме горната граница на мъглата като разделителна повърхност, то при дифузионно равновесие парциалното налягане на водната пара от двете страни на повърхността е едно и също. Температурата обаче трябва да претърпи положителен скок, защото под повърхността парата е в състояние на насищане, над повърхността е ненаситена и равенството на парциалните налягания е възможно само ако температура горе е по-висока. Псевдопотенциалната температура също претърпява скок, защото, както се вижда от дефиниционната ѝ формула, тя, от една страна, е пропорционална на температурата на въздуха, а от друга, поради това че парата не е наситена, температурата на ниво на кондензация в знаменателя на експонентата е по-ниска от тази на височината на измерването.

На практика преходът от мъглата към въздуха над нея е плавен и се извършва в слой с крайна вертикална мощност. В този слой освен температурната инверсия нараства и отношението на сместа, защото в сравнение с по-големите височини на по-ниските нива кондензира повече водна пара. Тези две обстоятелства водят до по-силни положителни вертикални градиенти на псевдопотенциалната температура, или с други думи, над мъглата имаме покриващ силно устойчив слой. Що се отнася до самата мъгла, то стратификацията в нея е близо до безразличната поради изгладените от смесването вертикални градиенти на наситените водни пари.

Фиг. 3 представя времевата редица на вертикалния профил на псевдопотенциалната температура в 12 00 GMT в Синоптична станция София, Младост, за периода 02–11/01/2014. По хоризонталните оси е псевдопотенциалната температура, а по вертикалната ос са височините до 2500 m. Интензивността на мъглата в момента на сондажа отново е кодирана по скалата на сивия цвят според легендата към фиг. 1.

Зверев [16] изтъква, че един от основните симптоми за прогнозирането по аерологични данни на мъгла е формирането във височина на слой с температурна инверсия, в който специфичната влажност също нараства с височината или поне остава постоянна. Във вертикалния профил на псевдопотенциалната температура това означава слой със силни положителни вертикални градиенти или, казано с други думи, формирането и наличието на силно устойчиво стратифициран задържащ слой. От фиг. 3 се вижда, че на 02 12/01 GMT до височина около 1235 m стратификацията е почти безразлична. Следва слой с вертикална мощност около 200 m и сравнително големи вертикални градиенти. По-нагоре стратификацията остава устойчива, но е значително по-слаба. Като се има предвид общата обстановка в тази ситуация, би трябвало да се очаква възникването на мъгла. Действително, вследствие на нощното изстиване на приземния въздух сутринта на 03 06/01 GMT е и първата регистрация на мъгла. На 03 12/01 GMT в ранния следобед имаме временно подобрение на видимостта. Вертикалният профил на псевдопотенциалната температура обаче съответства на условията за мъгла. При земята до около 750 m имаме безразлична стратификация, а в слоя над нея до височини около 820 m псевдопотенциалната температура нараства с почти 10 К.



Фиг. 3. Времева редица от вертикалния профил на псевдопотенциалната температура в 12 00 GMT в Синоптична станция София, Младост, за периода 02–11/01/2014

Ситуацията на 04 12/01 е типична. До височина около 820 m стратификацията е безразлична, следва рязък скок на псевдопотенциалната температура от около 10 K, съответстващ на тънък, силно устойчиво стратифициран слой.

Вертикалните профили на 05 12/01 GMT и 06 12/01 GMT са след прекъсването на първата фаза на мъглата на 05 09/01 GMT. Както се вижда от фиг. 3 на 05 12/01 GMT покриващият силно устойчив слой е изчезнал или поне значително отслабен. На 06 12/01 GMT забелязваме формиране на слой с безразлична стратификация в интервала 650–1060 m и все още недобре изразена инверсия от около 5 K до височина 1140 m. С оглед на общите условия това би трябвало да означава възможност за образуване на мъгла.

На 07 03/01 действително се регистрира мъгла. На 07 12 /01 GMT тя е с интензивност от категорията Very dense fog. При земята до около 720 m имаме слой с безразлична стратификация, а в слоя над нея до височина 770 m псевдопотенциалната температура нараства с около 5 K. В периода 08 12–10 12/01 мъглата е в етап на стабилност. Височината на слоя с безразлична стратификация почти не се променя. От 810 m на 08 12/01 тя слабо намалява до 780 m на 10 12/01. И в трите сондажа имаме рязък скок на псевдопотенциалната температура слой на мъглата, но той намалява от около 10 K на 08 12/01 до около 5 K на 10 12/01.

На 11 12/01 епизодът е завършил. Вертикалният профил на псевдопотенциалната температура е изгладен с почти незабележима остатъчна инверсия.

Да резюмираме, проведеният с помощта на вертикалните профили на псевдопотенциалната температура анализ на аерологичните данни демон-

стрира своята ефективност при изследването на разглежданата обстановка с мъгла. Използването на тази обобщена термохигрометрична характеристика позволява отчетливо да се локализира покриващият мъглата слой със силно устойчива стратификация. Доколкото този слой започва от най-горните слоеве на мъглата, това дава възможност за оценка и на вертикалната ѝ мощност. По напълно определени признаци във вертикалния профил на псевдопотенциалната температура в предходния аерологичен сондаж, а именно, наличието на добре изразен слой с безразлична стратификация при земята и формирането на по-тънък слой със силно устойчива стратификация над него, в случая успешно бе прогнозирано образуването на мъгла. В този смисъл вертикалният профил на псевдопотенциалната температура наред с анализа на останалите специфични условия открива допълнителна възможност за повишаване успешността при прогнозата на мъглата.

4. СИНОПТИЧЕН АНАЛИЗ

За образуването на мъгла от радиационен и адвективно-радиационен тип е необходим богат на влага въздух и допълнително изстиване за настъпването на кондензация [17]. Богат на влага въздух над Балканите може да постъпи главно от запад, югозапад и юг при добре известни синоптични процеси [18]. В този раздел ще се спрем последователно на развитието на синоптичната обстановка в началото и в края на разглеждания период, фазите на развитие на мъглата, както и на причините за краткотрайното подобрение на видимостта около 06/01/2014.

4.1. ПОДГОТОВКА НА ЕПИЗОДА

В периода 25–28/12/2013 разширяващата се на юг и изток обширна циклонална област от Северозападна Европа обхваща Прибалтика, Централна Европа и Западното Средиземноморие. Над Централното Средиземноморие се формира циклонален вихър, чийто център приближава Балканския полуостров. Оформилата се циклонална област се премества на югоизток, преминавайки южно от Балканския полуостров.

На 29–31/12/2013 България попада под влияние на приземен антициклон, чийто център в последния ден от годината се установява на север от Балканите. Оставайки в неговата периферия, в страната прониква студен въздух, който на 01/01/2014 се настанява над нея.

От 01/01 до 03/01 периферията на дълбок и обширен циклон с център южно от Исландия и северозападно от Ирландия обхваща Северозападна Европа. Източната част на континента се намира под влияние на антициклон в приземния слой и баричен гребен във височина. Фиг. 4 представя картата на баричната топография и температурата на ниво 850 hPa на 03 00/01. Плътните

линии са изохипсите, пунктираните – изотермите. Градиентите на 850 hPa са слаби. Нощните температури се понижават и усилват устойчивостта на въздушната маса в антициклоналното приземно поле над Балканите. Облачността се разкъсва и намалява до изясняване през нощта срещу 03/01.



Фиг. 4. Карта на абсолютната барична топографиия за ниво 850 hPa и температурата на 03 00/01/2014 GMT

На 03 06/01 GMT над София се формира мъгла от радиационен тип.

4.2. ФАЗАТА 03 06-05 09/01 GMT

България попада в югозападната периферия на мощен антициклон, чийто център се премества от северните райони на Европейска Русия към Южен Урал. Приземното налягане над Балканите се повишава до 1030 hPa. Слабоградиентното антициклонално поле създава благоприятни условия за възникване и развитие на приземна инверсия в котловинното Софийско поле. Мощният антициклон е в процес на развитие. Низходящите движения на въздуха в него водят до образуване на т.нар. инверсии на слягане. Както се вижда от приземната карта на фиг. 5, над България се откриват и локални центрове на високо налягане. Това води до увеличаване изразеността на радиационната инверсия. Създадени са условия за радиационни мъгли, като с развитието на антициклона тяхната продължителност и интензитет нарастват.

Левият панел на фиг. 5 представя картата на баричната топография за ниво 500 hPa, приземното налягане и относителната топография за нивата 500–1000 hPa. Черните линии са изохипсите, белите – изобарите, а относителният геопотенциал е в градациите на сивото. Както се вижда, над страната от югозапад наред с израстването на баричния се развива и термичен гребен. С югозападния въздушен поток на 850 hPa температурите се повишават от около 0 °C на 02 00/01 GMT до 5 °C на 05 12/01 GMT. Балканският полуостров се оказва в топла въздушна маса с произход от субтропиците. Притокът на топъл въздух на 850 hPa добавя към вече споменатите по-горе фактори и друг, а именно, адвективното затопляне във височина. Това усилва създадената инверсия. В тази първа част от обстановката затоплянето все още не е толкова значително, за да окаже съществено влияние.



Фиг. 5. Карта на абсолютната барична топографиия за ниво 500 hPa, приземното налягане и относителната топография за нивата 500–1000 hPa (ляво) и приземен синоптичен анализ на баричното поле (дясно) на 04 06/01/2014 GMT

4.3. ПРЕКЪСВАНЕТО 05 12-07 00/01 GMT

Около 06/01 България попада под влияние на средиземноморски циклон с център, преместващ се от Южна Италия на югоизток към най-южните райони на Гърция. Това се илюстрира от лявата карта на фиг. 6, която представя баричната топография за ниво 500 hPa, приземното налягане и относителната топография за нивата 500–1000 hPa. Черните линии отново са изохипсите, белите – изобарите, а относителният геопотенциал е градиран в сивото. Както е известно, при преминаването на средиземноморски циклон през района на Балканите от съществено значение е траекторията на неговия център [18]. В случая циклоналният вихър преминава толкова южно, че влиянието му върху времето в България е слабо. То се изразява само в слабо усилване на атмосферната динамика, което се оказва достатъчно за частично подобрение на видимостта. Тя надхвърля 1000 m, като преобладават димките с хоризонтална видимост предимно 2000–8000 m.

Допълнителен фактор се оказва и спускащата се към Балканския полуостров от север приземна фронтална система, виждаща се на дясната карта на приземния синоптичен анализ на фиг. 6. Не особено добре изразена, тя преминава като размиващ се студен фронт и през България. В приземното барично поле се наблюдава усилване на баричния градиент, което е по-съществено над Западна България. От този югозападен поток в районите, северно от планините, каквото е разположението на София спрямо Витоша, видимостта в приземния слой се подобрява. Центърът на мощния антициклон, който поддържаше антициклонално полето над България в първата част от обстановката, се е оттеглил на изток, към азиатската част на Русия. Приземното налягане над страната ни се понижава до 1020 hPa, а над западните райони на Балканския полуостров – под 1015 hPa.



Фиг. 6. Карта на абсолютната барична топографиия на ниво 500 hPa, приземното налягане и относителната топография за нивата 500–1000 hPa на 06 06/01/2014 GMT (ляво) и приземен синоптичен анализ на баричното поле на 07 00/01/2014 GMT (дясно)

В периода на това временно подобрение на видимостта в полето на температурите на ниво 850 hPa няма особени промени. За кратко прекъсва само югозападият пренос на топъл въздух над страната. Циклоналният център преминава далече и свързаното с него студено ядро не достига до България, за да разруши напълно създадената вече инверсия, а само я отслабва частично.

Израстването на баричния гребен на 300 hPa прекъсва връзката на този циклон със захранващото го със студен стратосферен въздух струйно течение, той се откъсва и бързо се изнася на юг-югоизток.

4.4. ΦΑ3ΑΤΑ 07 03-10 12/01 GMT

След преминаването на високия циклон по споменатата южна траектория над България бързо се възстановява приземното антициклонално барично поле. В полето на геопотенциала на 500 hPa отново израства баричен гребен. В сравнение с първата фаза на обстановката той е по-мощен и като площ много по-обширен, обхващайки цяла Южна Европа. Относителният геопотенциал за слоя 500–1000 hPa също е с по-големи стойности. Това означава по-голяма динамична дебелина на слоя и съответно по-топъл въздух в него. Така с възобновяването на въздушния поток от югозапад отслабналата за кратко приземна инверсия отново се възстановява.

Преминалата през страната влажна въздушна маса внася влага в слоевете на 850 hPa и 700 hPa. Югоизточната половина на Европа се оказва в пояс от високо атмосферно налягане Приземното налягане в България се повишава до 1030 hPa. Високата фронтална зона отново е над по-северните ширини, далече от Балканския полуостров. От лявата карта на фиг. 7, където температурното поле е градирано в сивото, се вижда, че преносът на топъл въздух от югозапад продължава на това ниво и на 10 00/01 GMT, като температурите над страната достигат до 8–10 °C.



Фиг. 7. Карта на температурното поле на ниво 850 hPa на 10 00/01/2014 GMT (ляво), карта на абсолютната барична топография на ниво 500 hPa и приземното налягане на 11 00/01/2014 GMT (в средата) и карта на температурното поле на ниво 850 hPa на 11 00/01/2014 GMT (дясно)

Прекъсване на трайната и стабилна инверсионна обстановка става на 10 15/01 GMT, когато България попада под влияние на спускаща се от север-североизток приземна долина, свързана с циклон с център, преминаващ през Прибалтика. От средната карта на фиг. 7 се вижда, че на 11 00/01 GMT полето на геопотенциала на 500 hPa (бели линии) се е променило съществено. Приближаващата висока фронтална зона достига България, като засяга в по-голяма степен северните райони. На картата в дясно на фиг. 7 на ниво 850 hPa се наблюдава понижение на температурите до 0–5 °C. В следващите дни през страната преминават други атмосферни смущения, които не позволяват възстановяването на трайната обстановка с мъгла над София, въпреки че температурите остават сравнително високи за януари. Втората фаза от адвективно-радиационен тип мъгла е завършила, а с това е финализиран и епизодът с продължителните мъгли в София.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ДИСКУСИЯ

Целта на настоящата работа бе да се разкрият специфичните условията и синоптичната обстановка в тяхната динамика за възникването и поддържането на продължителната мъгла в София през периода 03–10/01/2014. Данните, които ние използвахме, са от приземните метеорологични наблюдения и аерологичните сондажи в Станция София, Младост. Използвани бяха също и редица приземни и височинни карти за синоптичната обстановка над Европа и Балканския полуостров през разглеждания период.

Основното средство за нашия анализ бе псевдопотенциалната температура. Тя се използва като една обобщена термо-хигрометрична характеристика,

служеща, от една страна, за идентификация на сменящите се въздушни маси, а от друга, за установяването на слоевете с различаваща се устойчивост на вертикалната стратификация.

Предварителният анализ на приземните данни в параграф 3.1 показа, че изследваната мъгла се състои фактически от два епизода, разделени от период с подобрена видимост. Първият епизод е от 03 06/01 GMT до 05 09/01 GMT, вторият – от 07 03/01 GMT до 10 12/01 GMT. Докато през първия епизод средното ниво на псевдопотенциалната температура е по-ниско и налягането има локален максимум, то вторият епизод е с по-високо ниво на температурата и нов по-висок максимум на налягането. И двата епизода завършват със сравнително резки промени в средното ниво на псевдопотенциалната температура и нейния денонощен ход.

Тези особености в еволюцията на псевдопотенциалната температура и налягането през разглеждания период дадоха основания техните времеви редици да се моделират със статистическата техника на множествената линейна регресия със структурни промени. За целта в параграф 3.2 бе построен стохастичен модел, отчитащ както плавните изменения на средното ниво на псевдопотенциалната температура, така и нейния денонощен ход. За налягането се оказа достатъчно да се отчетат само измененията на неговото средно ниво.

Като резултат от това моделиране се изясни, че времевата редица на псевдопотенциалната температура претърпява две структурни промени. Те и двете практически съвпадат с края на първия и втория епизод на мъглата. Това даде основание този формален резултат да се интерпретира като смяна на въздушните маси. Проведеният в разд. 4 детайлен синоптичен анализ напълно потвърди тази интерпретация. Оказа се, че при първата структурна промяна с оттеглянето на мощния антициклон на изток България попада в периферията на средиземноморски циклон и за кратко е под влияние на спускащата се към Балканския полуостров от север приземна фронтална система. При втората структурна промяна България попада под влияние на спускаща се от север-североизток приземна долина, свързана с циклона с център, преминаващ през Прибалтика, и фронталната система, достигаща и до Балканския полуостров.

Времевата редица на налягането претърпява четири структурни промени. Първата от тях съвпада с началото на първия епизод от мъглата, а втората – с неговия край. Тъй като в същото време въздушната маса все още не се е сменила, а средното ниво на налягане скокообразно е нараснало, то това предполага една мъгла от чисто радиационен тип. Синоптичният анализ потвърждава тази интерпретация. През този период България попада в югозападната периферия на мощен антициклон. Слабоградиентното антициклонално поле създава благоприятни условия за възникване и развитие на приземна инверсия в котловинното Софийско поле. На приземните карти се откриват и локални центрове на високо налягане. Това създава условия за радиационни мъгли, като с развитието на антициклона тяхната продължителност и интензитет нарастват.

Третата точка на структурна промяна предхожда незначително началото на втория епизод на мъглата, а четвъртата е към неговия край. Средното ниво на налягането отново е претърпяло скокообразно нарастване. Въздушната маса обаче вече е сменена с по-топла и по-влажна. Това предполага една мъгла от смесен, адвективно-радиационен тип. Синоптичният анализ в разд. 4 подкрепи и тази интерпретация. През този период след оттеглянето на циклона бързо се възстановява приземното антициклонално барично поле и приземното налягане се повишава до 1030 hPa. С последвалото изясняване приземната инверсия също се възстановява. Високата фронтална зона е далече от Балканския полуостров. Височиният поток от югозапад бързо се възстановява и на ниво 850 hPa се пренася топъл въздух.

Проведеният в параграф 3.3 анализ на аерологичните данни с помощта на вертикалните профили на псевдопотенциалната температура демонстрира своята ефективност при изследването на разглежданата обстановка с мъгла. Използването на тази обобщена термо-хидрометрична характеристика позволи отчетливо да се локализира покриващият мъглата слой със силно устойчива стратификация, а това даде възможност за оценка и на вертикалната мощност на мъглата. Оказа се, че в случая вертикалният профил на псевдопотенциалната температура наред с анализа на останалите специфични условия дава възможност и за успешно прогнозиране на мъглата.

В заключение можем да кажем, че резултатите от настоящата работа дават основание да се твърди, че съвместното използване на псевдопотенциалната температура, приземното налягане и детайлният синоптичен анализ на обстановката са едно ефективно средство при анализа на образуването, развитието и разсейването на продължителната мъгла в София през периода 03–10/01/2014.

Благодарности. Тази работа е подкрепена от проект BG051 PO001-3.3.06–0057 "Изграждане на съвременна образователна и научно-изследователска среда за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени във Физическия факултет на СУ "Св. Климент Охридски".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мартинов, М., В. Габракова. Хидрология и метеорология, 1965, 3, 15.
- [2] Мартинов, М., А. Богачев. Хидрология и метеорология, 1978, XXVII, 1, 32.
- [3] Годев, Н., Г. Корчев. Хидрология и метеорология, 1971, ХХ, 3, 19.
- [4] Христов, П., Ат. Танев. Климат на София, София, 1970.
- [5] Bluskova, D., L. Zlatkova, St. Lingova, J. Modeva, L. Subev, M. Teneva. Climate and Microclimate of Sofia, Publishing House BAS, Sofia, 1983. (in Bulgarian)

- [6] Latinov, L., A. Stoycheva, V. Katsarska. Workshop Proc., 2005, COST 722, 72-82.
- [7] Стойчва, А., С. Евтимов. Годишник на СУ "Св. Кл. Охридски", Физ. фак., 2014, 107, 132.
- [8] Белинский, В. А. Динамическая Метеорология, ОГИЗ, Москва, Ленинград, 1948.
- [9] Holton, J. R. An introduction to dynamic meteorology, New York and London, 1973.
- [10] Sanders, F. Mon. Wea. Rev., 1999, 127, 945.
- [11] Hoffman, E.G. Meteorological monographs, 2006, 33, 55, 163.
- [12] Turton, J. D., R. Broun. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1987, 113, 37.
- [13] Bergot T., D. Guedalia. Mon. Wea. Rev., 1994, 122, 1218.
- [14] Bai J., P. Perron. Econometrica, 1998, 66, 47.
- [15] Bai, J., P. Perron. Journal of Applied Econometrics, 2003, 18, 1.
- [16] Зверев, А. С. Синоптическая Метеорология, Ленинград, 1957.
- [17] Годев, Н. Синоптична метеорология, София, 1976.
- [18] Стефанов, Ст., Сл. Матеев, Хр.Лаловски, Ас. Писарски, И. Кънчев, К. Дончев. Типове време над България, т. VII, София, 1960.