

ТЕРМОДИНАМИЧНИ УСЛОВИЯ ПРИ РАЗВИТИЕ
НА ГРЪМОТЕВИЧНИ ОБЛАЦИ НАД СЕВЕРОЗАПАДНА
И ЮГОЗАПАДНА БЪЛГАРИЯ

БОРЯНА МАРКОВА¹, БОРИС ЯНАКИЕВ², РУМЯНА МИЦЕВА³

¹*Национален институт по метеорология и хидрология, София*

²*38-ми Батальон за ядрена, химическа и биологична защита и екология, Мусачево*

³*Физически факултет*

Боряна Маркова, Борис Янакиев, Румяна Мицева. ТЕРМОДИНАМИЧНИ УСЛОВИЯ ПРИ РАЗВИТИЕ НА ГРЪМОТЕВИЧНИ ОБЛАЦИ НАД СЕВЕРОЗАПАДНА И ЮГОЗАПАДНА БЪЛГАРИЯ

Анализирани са статистическите параметри на разпределението на три приземни метеоелемента (температура, максимална температура и относителна влажност), на температурата на ниво 850 hPa и на два индекса на неустойчивост (*K* и *Hi*) поотделно при развитие на гръмотевични (*th*) и негръмотевични (*or*) купесто-дъждовни облаци над Северозападна (NW) и над Югозападна (SW) България. С помощта на дискриминантен анализ са определени праговите им стойности за разграничаване на *th* от *or* облаци над двата района. Анализът показва, че няма разлика в температурите при развитие на купесто-дъждовни облаци над NW и SW България.

Boryana Markova, Boris Yanakiev, Rumjana Mitzeva. THERMODAINAMYC CONDITIONS AT THE DEVELOPMENT OF THUNDERSTORMS OVER NORTHWESTERN AND SOUTHWESTERN BULGARIA

Statistical parameters of the distribution of three surface meteorological parameters (temperature, maximum temperature, and relative humidity), and temperature at 850 hPa, and two instability indices (*K* and *Hi*) are analyzed separately for ordinary (without lightning *or*) and thunderstorms (*th*) cumulonimbus, developed over the northwest (NW) and southwest (SW) Bulgaria. Using general

discriminant analysis the threshold values of parameters, which are able to discriminate between *th* and *or* clouds are determined over the two regions. The results indicate that the cumulonimbus develop at similar temperature over NW and SW Bulgaria.

Keywords: instability indices, thunderstorms, discriminant analyses

PACS numbers: 92.60.Pw, 92.60.Qx

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години в Европа се наблюдава развитието на все по-мощни и опустошителни бури, свързани с интензивна гръмотевична дейност и валежи [1–4]. Известно е, че тяхното формиране и по-нататъшно развитие съществено зависят от условията в околната среда. При установяване на подходящи предиктори за развитието на гръмотевични облаци могат да се подобрят както прогнозата им, така и предупрежденията за опасни и особено опасни явления, свързани с тях.

Това е основателна причина да бъдат изследвани условията в околната среда при развитието на купесто-дъждовните облаци. В литературата много автори (например [5–9] и др.) пресмятат и разглеждат различни индекси на неустойчивост като основни характеристики на термодинамичните условия в околната среда. Обикновено се определят прагови стойности на анализирани характеристики (метеоеlementи, индекси на неустойчивост), които разграничават условията за образуване на гръмотевичните от негръмотевичните облаци за даден район, като е установено, че намерените прагове са различни в зависимост от района и сезона на разглеждане.

В България от 60-те години на миналия век в продължение на 20 години въз основа на синоптичен анализ и анализ на термодинамични характеристики на атмосферата се търсят критерии за прогноза на гръмотевична дейност и градушки [10–16]. През последните години са направени нови изследвания на условията в околната среда, при които се развиват купесто-дъждовни облаци. В [17] е предложен метод за прогноза на вероятността за развитие на гръмотевични облаци над България през летния период. Резултатите от детайлен анализ на условията, при които се развиват гръмотевичните облаци над Източна България, е представен в [18].

Целта на настоящата работа е да се намерят прагови стойности на различни метеоеlementи и индекси на неустойчивост, които да послужат като индикатори за развитието на гръмотевични облаци над Западна България. Предвид разликата в релефа, климатичните особености и др. между Северозападна и Югозападна България една от задачите в работата е да се установи и дали има разлика в условията в околната среда при развитието на гръмотевични и съответно негръмотевични облаци в двата района на България.

2. ИЗПОЛЗВАНИ ДАННИ И МЕТОДОЛОГИЯ

В работата са изследвани условията в околната среда, при които се развиват купесто-дъждовни облаци с и без мълни поотделно над Северозападна (NW) и Югозападна (SW) България. Случаите на гръмотевичните облаци (*thunderstorm*) са означени с *th*, а на дъждовните негръмотевични облаци (обикновени) (*ordinary*) – са означени с *or*.

Използваните данни са за 732 дни и са разгледани 1197 случая на купесто-дъждовни облаци, развили се в следобедните часове в месеците между април и септември през периода 2006–2009 г. Случаите на негръмотевични облаци *or* са 187 в Северозападна и 300 в Югозападна България. Броят случаи на развили се гръмотевични облаци *th* е съответно 282 в NW и 428 в SW България. За да се установи при какви условия в околната среда се развиват конвективни облаци, е необходимо да се познава профилът на температурата и влажността в атмосферата. По подобен начин, както е проведен анализът в [19] за разграничаване на условията при развитие на купесто-дъждовни облаци, развили се над Североизточна и Югоизточна България, и тук са използвани апроксимирани сондажи от GFS модел [20] за 1200 UTC. От тях са взети данни за температура и влажност на въздуха на различни атмосферни нива. Приземните метеорологични данни (налягане, относителна влажност на въздуха, температура и максимална температура на въздуха) са от измервания в 6 синоптични станции на Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ), разположени на територията на Западна България. Три от синоптичните станции са разположени в Северозападна България – Видин, Монтана и Враца, и три – в Югозападна България – София, Кюстендил и Сандански.

Известно е, че развитието на купесто-дъждовна облачност зависи от температурата при земята и от температурите на различни нива, от неустойчивостта и влажността на атмосферата. Във връзка с това в работата са изследвани приземната температура T , относителната влажност на въздуха RH , максималната приземна температура T_{\max} и температурата на ниво 850 hPa T_{850} . Пресметнати са два термодинамични индекса: K [21] и Humidity Index Hi [22], които се използват за характеризиране неустойчивостта на атмосферата, вероятност за гръмотевична дейност и значителни валежи. Начинът им на пресмятане е показан в табл. 1.

Направен е t -тест с ниво на значимост $\alpha = 0.05$, с помощта на който е проверено дали има статистически значима разлика между средните стойности на анализирани характеристики на околната среда в Северозападна и Югозападна България при развитието както на гръмотевични, така и на негръмотевични облаци.

За всеки един район са пресметнати статистически параметри на разпределението на съответните величини (средна стойност, медиана, долен и горен

квартил), като резултатите са представени и в таблици, и са илюстрирани с квартална диаграма.

Таблица 1. Формули за пресмятане на K и Hi , формули за пресмятане на POD и FAR : T_{850} , T_{700} и T_{500} са температури [°C] на ниво 850 hPa, 700 hPa и 500 hPa съответно; T_{d850} , T_{d700} и T_{d500} са точки на оросяване [°C] на ниво съответно 850 hPa, 700 hPa и 500 hPa; x – брой на коректно класифицираните гръмотевични случаи, y – брой на некоректно класифицираните гръмотевични случаи, w – брой на некоректно класифицираните негръмотевични случаи

Параметър	Знак и мерна единица	Уравнение
K -Index	K [deg]	$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$
Humidity Index	Hi	$Hi = (T - T_{d})_{850} + (T - T_{d})_{700} + (T - T_{d})_{500}$
Probability of detection	POD	$POD = \frac{x}{x + y}$
False alarm ratio	FAR	$FAR = \frac{w}{x + w}$

С помощта на обикновен дискриминантен анализ [23] са определени прагови стойности на изследваните характеристики на околната среда, над/под които има голяма вероятност за развитие на гръмотевични облаци над Северозападна и Югозападна България. В работата е направена оценка на успеваемостта на получените прагови стойности за разграничаване на гръмотевични от негръмотевични облаци, като са пресметнати POD (probability of detection) и FAR (false alarm ratio) [24]. Начинът им на пресмятане е показан в табл. 1.

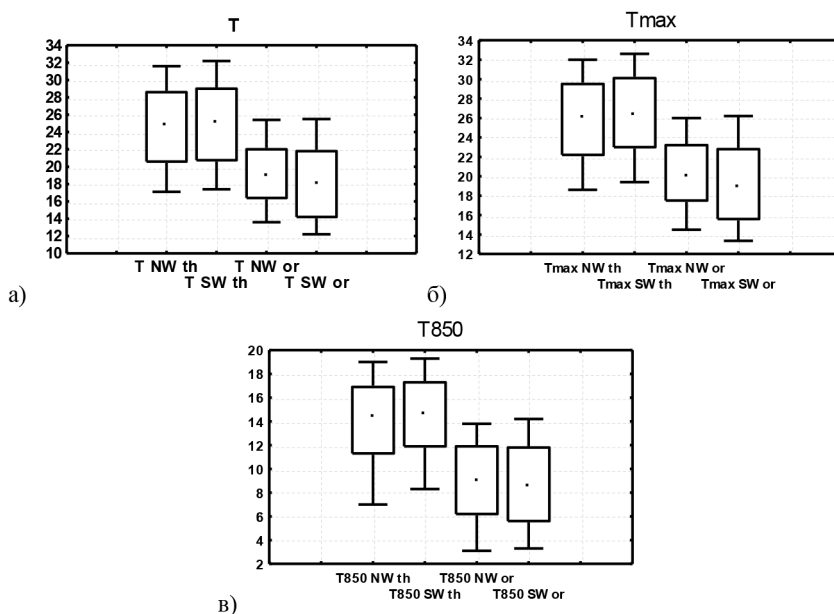
3. РЕЗУЛТАТИ

От информацията, представена в табл. 2, се вижда, че разликата в средната стойност на температурата при земята при развитието на гръмотевични облаци th над NW и SW България са много малки. Средната стойност на T в NW България е 24.5 °C, а в SW България е 24.9 °C. Такава малка разлика, под 1 °C, се наблюдава и при останалите температури, които са изследвани. Този извод е валиден и за съответните стойности на медианата, долния и горния квартал. Аналогичен резултат се наблюдава и при параметрите на разпределение за случаите на негръмотевични облаци or , развили се над двата района.

Представените резултати показват, че средните стойности на температурата при земята и във височина при развитие на гръмотевични облаци th са забележимо по-високи от съответните температури при развитие на негръмотевични валежни облаци or както в Северозападна, така и в Югозападна България. Така например, средната стойност на T при гръмотевичните облаци и в двата района е над 24 °C, а средната стойност за съответните температури при развитие на негръмотевични облаци е с 5–6 °C по-ниска (табл. 2).

Таблица 2. Параметри на разпределение на T , T_{\max} и T_{850} при развитие на негръмотевични облаци *or* и гръмотевични облаци *th* над Северзападна (NW) и Югозападна (SW) България

Параметър	Район	Средна стойност	Медиана	Долен квантил	Горен квантил
T_{th}	NW	24.5	24.0	0.6	28.6
	SW	24.9	25.0	20.7	29.0
T_{or}	NW	19.1	19.0	16.4	22.0
	SW	18.4	18.0	14.2	21.8
$T_{\max th}$	NW	25.6	26.0	22.2	29.5
	SW	26.3	26.4	23.0	30.1
$T_{\max or}$	NW	20.1	20.0	17.5	23.2
	SW	19.3	18.9	15.6	22.8
$T_{850 th}$	NW	13.7	14.3	11.3	16.9
	SW	14.4	14.7	11.9	1.3
$T_{850 or}$	NW	8.9	9.0	6.2	11.9
	SW	8.8	8.5	5.6	11.8



Фиг. 1. Квартилна диаграма за: а) приземна температура T ; б) максимална приземна температура T_{\max} ; в) температура на височина 850 hPa T_{850} при развитие на негръмотевични облаци *or* и гръмотевични облаци *th* над Северозападна (NW) и Югозападна (SW) България. Показани са 10-ти, 25-ти, 50-ти (точка), 75-ти и 90-ти процентил

Освен това както медианите, така и стойностите на долните и горните квантили на приземната температурата, на максималната температура и на

температурата на ниво 850 hPa са забележимо по-високи при развитие на гръмотевични облаци, отколкото съответните стойности при развитие на негръмотевични облаци. Това добре се вижда и от фиг. 1. От направения анализ може да се каже, че гръмотевични облаци **th** над NW и над SW България се развиват при приблизително еднакви температури при земята и във височина. Същото е валидно и за средните стойности на температурите, при които се развиват негръмотевични облаци над двата района, но те са забележимо по-ниски от температурите, при които се развиват гръмотевичните облаци.

Резултатите от *t*-тест показват, че разликата между средните стойности на T , T_{\max} и T_{850} , при които се развиват купесто-дъждовни облаци над NW и SW, не е статистически значима – с ниво на значимост $\alpha = 0.05$ (вж. табл. 3), както при развитието на гръмотевични **th**, така и при негръмотевични **or** облаци. От показаните в табл. 3 *p*-стойности се вижда, че с най-голяма убеденост не може да отхвърлим нулевата хипотеза за еднаквост на средните стойности над NW и SW за T_{850} **or** и с най-малка убеденост – за T_{850} **th**.

Таблица 3. *p*-стойности при *t*-тест за T , T_{\max} , T_{850} , K и Hi при развитие на негръмотевични облаци **or** и гръмотевични облаци **th** над Северзападна и Югозападна България

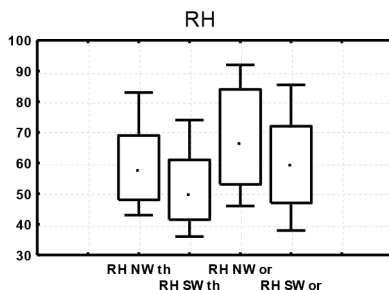
Параметър	<i>p</i> -стойност	Параметър	<i>p</i> -стойност
T or	0.13	RH or	0.71E-06
T th	0.36	RH th	0.63E-10
T_{\max} or	0.11	K or	0.24
T_{\max} th	0.08	K th	0.60
T_{850} or	0.82	Hi or	0.06
T_{850} th	0.05	Hi th	0.17

Относителната влажност на въздуха е друга характеристика на атмосферата, която е от съществено значение при развитието на гръмотевичните и негръмотевичните облаци.

От резултатите, представени в табл. 4 и фиг. 2, се вижда, че има разлика в средните стойности и съответните квартали не само при сравняване на относителната влажност RH при развитие на гръмотевични и негръмотевични облаци поотделно, а и при сравняване на съответните стойности при развитие на **th** и **or**, развили се над NW, спрямо тези над SW. Оказва се, че в NW България при развитието и на гръмотевични облаци **th** и на негръмотевични облаци **or** е необходима с 7–8 % по-висока относителна влажност при земята в сравнение с условията за развитие на съответния вид купесто-дъждовни облаци в SW България. Изключително ниските *p*-стойности (вж. табл. 3) от проведения *t*-тест показват, че тази разлика е статистически значима (при ниво на значимост $\alpha = 0.05$) както при развитието на гръмотевични **th**, така и при развитието на негръмотевични **or** облаци.

Таблица 4. Параметри на разпределение на относителната влажност RH при развитие на негръмотевични облаци or и гръмотевични облаци th над Северзападна (NW) и Югозападна (SW) България

Параметър	Район	Средна стойност	Медиана	Долен квартил	Горен квартил
RH_{th}	NW	59.8	57.0	48.0	69.0
	SW	52.1	49.0	41.5	61.0
RH_{or}	NW	68.3	66.0	53.0	84.0
	SW	60.3	59.0	47.0	72.0



Фиг. 2. Квартилна диаграма за относителната влажност RH при развитие на негръмотевични облаци or и гръмотевични облаци th над Северозападна (NW) и Югозападна (SW) България. Показани са 10-ти, 25-ти, 50-ти (точка), 75-ти и 90-ти перцентил

От табл. 4 и фиг. 2 също се вижда, че средната стойност на RH при развитие на гръмотевичните облаци е забележимо по-ниска от средната стойност на RH при развитие на негръмотевичните облаци и над двата района. По-ниските са и съответните медиана, горен и долен квартил. По-ниското RH при развитието на гръмотевичните облаци в сравнение с RH при развитие на обикновени (негръмотевични) облаци е индикация, че основата на гръмотевичните облаци (ниво на кондензация) е на по-голяма височина спрямо основата на обикновените дъждовни облаци. Полученият резултат съответства на резултати, получени от други автори [25, 26], според които като показател за развитие на гръмотевични облаци може да се използва височината на основата на облаците.

След като не се наблюдава статистически значима разлика в средните стойности на температурите, отчетени при земята, (T и T_{max}) и T_{850} при развитието на гръмотевични и негръмотевични облаци над NW и над SW, възниква въпросът: съществува ли значима разлика в праговите стойности (определени за съответните температури) за разграничаване на гръмотевични от негръмотевични облаци, развили се над NW и SW България? Също така, като се наблюдава статистически значима разлика в средните стойности на относителната влажност над NW и SW България при развитието на гръмотевични и негръмотевични облаци, запазва ли се тя и в праговите стойности, получени за RH ?

С помощта на обикновен дискриминантен анализ [23] са определени прагови стойности за T , T_{\max} , T_{850} и RH , които да разделят гръмотевичните от негръмотевичните облаци, развили се над Северозападна и Югозападна България.

Таблица 5. Прагови стойности на метеоеlementи при земята и на T_{850} за вида на облаци – гръмотевични **th** или негръмотевични **or** облаци, и успеваемостта POD и FAR на съответния праг за разграничаване на гръмотевичните от негръмотевичните облаци

Параметър	NW			SW		
	Праг	POD	FAR	Праг	POD	FAR
T	> 21.8	0.66	0.21	> 21.6	0.72	0.21
T_{\max}	> 22.9	0.71	0.20	> 22.9	0.76	0.19
T_{850}	> 11.3	0.74	0.22	> 11.6	0.76	0.20
RH	< 64.1	0.69	0.29	< 56.3	0.69	0.32

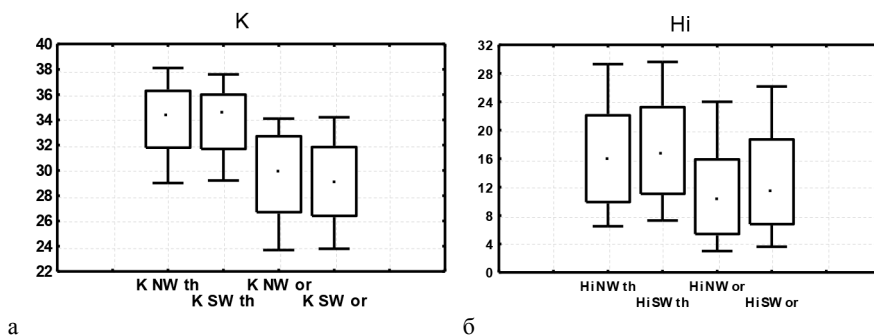
Получените прагови стойности и оценката на тяхната успеваемост посредством POD и FAR са представени в табл. 5. От таблицата се вижда, че определените прагове на температурите, над които се развиват гръмотевични облаци в NW и SW България, са много близки по стойност – най-голямата разлика е $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. По отношение на относителната влажност RH обаче има съществена разлика между двата прага – за Северозападна България той е 64.1% , а за Югозападна – 56.3% . От получените оценки POD и FAR се вижда, че като сравнително добър индикатор за гръмотевичните облаци могат да послужат T_{\max} и T_{850} , които са в състояние да класифицират коректно съответно 71% ($POD = 0.71$) и 74% ($POD = 0.74$) от **th** случаите, развили се над NW България, и 76% ($POD = 0.76$) над SW България. Използването на праговете стойности на тези две температури водят и до сравнително малък процент фалшива тревога, т.е. грешно класифицираните негръмотевични като гръмотевични облаци са $\sim 20\%$.

При развитие на гръмотевични и негръмотевични валежни облаци над Северозападна и Югозападна България са анализирани също K -Index (K) и Humidity Index (Hi). Начинът на пресмятането им е даден в табл. 1.

Таблица 6. Параметри на разпределение на K -index и Humidity index Hi при развитие на негръмотевични облаци or и гръмотевични облаци th над Северозападна България (NW) и над Югозападна България (SW)

Параметър	Район	Средна стойност	Медиана	Долен квантил	Горен квантил
K_{th}	NW	33.8	34.4	31.8	36.3
	SW	33.7	34.5	31.7	36.0
K_{or}	NW	29.3	29.8	26.7	32.7
	SW	28.8	29.0	26.4	31.8
Hi_{th}	NW	16.9	15.9	9.9	22.1
	SW	17.8	16.6	11.0	23.2
Hi_{or}	NW	11.8	10.3	5.4	15.9
	SW	13.3	11.2	6.8	18.7

Резултатите в табл. 6 показват, че средните стойности на K -индекс при развитие на гръмотевични облаци th са забележимо по-високи (с около 5 °C) от съответните стойности на индекса при развитие на негръмотевични валежни облаци or както в Северозападна, така и в Югозападна България. Илюстрация на получения резултат се вижда и на фиг. 3.



Фиг. 3. Квартилна диаграма за индекси на неустойчивост а) K ; б) Hi при развитие на негръмотевични облаци or и гръмотевични облаци th над Северозападна (NW) и Югозападна (SW) България. Показани са 10-ти, 25-ти, 50-ти (точка), 75-ти и 90-ти процентил

Получените p -стойности (вж. табл. 3) също показват, че няма статистически значима разлика между средните стойности за двата анализирани индекса (K и Hi) при развитие както на негръмотевични or , така и на гръмотевични th облаци над NW и SW България.

В табл. 7 са представени праговете стойности на анализиранията два индекса за разграничаване на гръмотевичните th от негръмотевичните or облаци, развили се над Северозападна и Югозападна България, и успеваемостта POD и FAR на всеки един праг. Тези прагови стойности са получени с помощта на обикновен дискриминантен анализ [23].

Резултатите показват, че определените прагови стойности за K за развитие на гръмотевични облаци в NW и SW са доста близки: $K > 31.6$ °C за NW и $K > 31.3$ °C за SW България. Получените стойности на POD и FAR показват, че с помощта на тези прагове процентът на коректно класифицираните гръмотевични облаци е над 76 %, а процентът на фалшиво определени негръмотевични дъждовни облаци като гръмотевични (вж. стойността на FAR) е под 23 %. От табл. 7 се вижда, че намерените прагови стойност на Hi за развитие на гръмотевични облаци е по-ниска за Северозападна България ($Hi > 14.4$) спрямо намерения праг за Югозападна ($Hi > 15.6$). Използването на този праг обаче води до сравнително малък процент коректно класифицирани гръмотевични облаци – 57 % за NW и 53 % за SW България.

Таблица 7. Прагови стойности на K и Humidity index Hi за вида на облаците – гръмотевични **th** или негръмотевични **or**, и успеваемостта POD и FAR на прага за класифициране

Параметър	NW			SW		
	Праг	POD	FAR	Праг	POD	FAR
K	> 31.6	0.76	0.23	> 31.3	0.79	0.20
Hi	> 14.4	0.57	0.26	> 15.6	0.53	0.30

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целта на работата е да се намерят прагови стойности на различни метеоеlementи и индекси на неустойчивост, които да послужат като индикатори за развитието на гръмотевични облаци над Северозападна и Югозападна България. Причината за разглеждане на двата района поотделно е, че двете области попадат в различни климатични райони – умерено-континентален (Северозападна България) и южно-български (Югозападна България).

За целта са сравнени различни статистически параметри (средна стойност, медиана, долен и горен квантил) на температурата T , максималната температура T_{max} , относителната влажност RH при земята и температурата на 850 hPa T_{850} , както и на два от известните в литературата индекси на неустойчивост, K и Hi , при развитие на купесто-дъждовни облаци над Северозападна и Югозападна България. Чрез статистически анализ (t -тест с ниво на значимост $\alpha = 0.05$) е направена оценка на това, дали разликите между средните стойности на гореспоменатите параметри за NW и SW са статистически значими при развитие на гръмотевични **th** и негръмотевични **or** облаци поотделно.

Определени са прагови стойности за класифициране на гръмотевичните облаци поотделно за NW и SW. Оценката за успеваемостта на тези прагове е направена чрез изчисляване на POD (probability of detection) и FAR (false alarm ratio).

Получените резултати показват, че въпреки различните климатични особености на NW и SW България купесто-дъждовните облаци през топлото

полугодие се развиват над двата района при близки приземни температури и температура на ниво 850 hPa. Сравнително близки са и условията, определени чрез K и Humidity index Hi , при развитие както на гръмотевични, така и на негръмотевични облаци над Северозападна и над Югозападна България. Макар и приземните температури при развитие на купесто-дъждовни облаци над NW и SW България да са близки, по всяка вероятност основата на тези облаци е на по-голяма височина над Югозападна България в сравнение на съответните, развили се над Северозападна България, поради установените статистически значими по-ниски стойности на относителната влажност в SW в сравнение с RH в NW България.

По отношение на разликата в развитието на гръмотевични и негръмотевични облаци и над двата района, за развитието на гръмотевичните облаци са необходими по-високи температури, по-ниска относителна влажност и по-неустойчива атмосфера. От определените прагови стойности на отделните термодинамични характеристики за купесто-дъждовни облаци, развили се в следобедните часове, най-добро разграничаване между гръмотевични и негръмотевични облаци, развили се над Северозападна и над Югозападна България, се получава при използване на намерените прагови стойности за T_{\max} , T_{850} и K -индекс. Получените прагове разграничават над 71 % гръмотевичните от негръмотевичните облаци над двата района, а фалшивата тревога е около 20 %. Резултатите показват, че определените прагови стойности за относителната влажност при земята RH и Hi -индекс самостоятелно не са подходящи за използване като индикатор за развитие на гръмотевични облаци.

Поради липсата на статистически значима разлика в средните стойности на температурите и двата индекса на неустойчивост при развитие на купесто-дъждовните облаци над Северозападна и Югозападна България е оправдано намирането на прагови стойности на тези параметри за разграничаване на гръмотевичните от негръмотевични облаци, валидни за цяла Западна България. В бъдеще е необходимо да се потърси класификационна функция, комбинация от метеоеlementи и различните индекси на неустойчивост, която би могла по-добре да разграничава гръмотевични от негръмотевични облаци спрямо определените прагове на всеки един от разглежданите параметри.

REFERENCES

- [1] Bocheva, L., T. Marinova. *Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety*, 2016, **10**, 136-144.
- [2] Bocheva, L. 15th *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015*, www.sgem.org, SGEM2015 Conference Proceedings, June 18–24, 2015, **Book 4**, 889-896.
- [3] Enno, S.E., A. Briede, D.Valiukas. *Theor. Appl. Climatol.*, 2012, DOI 10.1007/s00704-012-0666-2.
- [4] Bielec-Bakowska, Z. *Environ. Socio-econ. Stud.*, 2014, **2**, 3, 33-46. DOI: 10.1515/envi-ron-2015-0041.

- [5] Haklander, A. J., A. Van Delden. *Atmospheric Research*, 2003, **67–68**, 273-299.
- [6] Huntrieser, H., H. Schiesser, W. Schmid, A. Waldvogel. *Weath. and Forecas.*, 1997, **12**, 108-125.
- [7] Jacovides, C. P., T. Yonetani. *Weath. and Forecas.*, 1990, **5**, 559-569.
- [8] Bunkers, M. J., J. R. Wetenkamp Jr., and J. J. Schild. *Weath. and Forecas.*, 2010, **25**, 799-814.
- [9] Savvidou, K., A. Orphanou, D. Charalambous, P. Lingis, and S. Michaelides. *Adv. Geosci.*, 2010, **23**, 79-85.
- [10] Stanchev, K. *Proceedings of the Institute of Hydrology and Meteorology*, 1965, **V**, 5-28 (in Bulgarian).
- [11] Stanchev, K. *Proceedings of the Institute of Hydrology and Meteorology*, 1968, **XV** (in Bulgarian).
- [12] Sirakova, M., N. Godev. *Hydrology and Meteorology*, 1970, **No 3**, 39-47 (in Bulgarian).
- [13] Stanchev, K., P. Boev, R. Petrov. *Hydrology and Meteorology*, *XXII*, 1973, **4**, 53-62, (in Bulgarian).
- [14] Boev, P., S. Stoyanov. *II International Conference on Hailstorms and Hail suppression*, Sofia, 1984, pp. 185–191 (in Russian).
- [15] Boev, P., A. Marinov. *Hydrology and Meteorology*, *XXXIII*, 1984, **4**, 10-17 (in Bulgarian).
- [16] Sirakov, D., M Sirakova. *Annual of Sofia University „St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics*, 1986, **79**, 186-191 (in Bulgarian).
- [17] Tsenova, B., A. Bogatchev. In: *Preprints: 16th Inter. Conf. on Clouds and Precipitation, July 30-August 03, 2012*, Leipzig, Germany.
- [18] Markova, B., *PhD Thesis, Sofia University*, 2013, 35-77 (in Bulgarian).
- [19] Markova, B., R. Mitzeva, T. Todorova. *Annual of Sofia University „St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics*, 2015, **10**, 71-82 (in Bulgarian).
- [20] [http://ready.arl.noaa.gov/NOAA Air Resources Laboratory](http://ready.arl.noaa.gov/NOAA_Air_Resources_Laboratory).
- [21] George, J. In: *Weather Forecasting for Aeronautics*, Academic Press. 1960, 407-415.
- [22] Litynska, Z., J. Parfiniewicz, H. Pinkowski. *WMO Bull*, 1976, **450**, 128-130.
- [23] StatSoft, Inc., 2001: STATISTICA (data analysis software system), version 6.1, www.statsoft.com
- [24] Donaldson, R., R. Dyer, M. Krauss. *Preprints: 9th Conf. Severe Local Storms*, Norman, Oklahoma. Amer. Meteor. Soc., 1975, 321-326.
- [25] Kaltenbock, R., G. Diendorfer, N. Dotzek. *Atmos. Res.*, 2009, **93**, 381-396.
- [26] Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowsky. *Wea. Forecasting*, 2003, **18**, 1243-1261.