



## **Breeze circulation classification in the coastal zone of the town of Ahtopol based on data from ground based acoustic sounding and ultrasonic anemometer**

**Damyan Barantiev<sup>\*a</sup>, Ekaterina Batchvarova<sup>a</sup>, Mikhael Novitsky<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>National Institute of Meteorology and Hydrology - BAS (NIMH - BAS),  
66, Tsarigradsko Shose blvd., Sofia 1784, Bulgaria*

*<sup>b</sup>Scientific-Production Association "Typhoon" Roshydromet, 4, Pobedy str., Obninsk, Kaluga region  
249038, Russia*

**Abstract:** This paper presents the results of a study of the vertical structure and evolution of the Atmospheric Boundary Layer (ABL) under sea breeze conditions obtained from ground based measurements with a three-dimensional ultrasonic anemometer and remote sensing with SCINTEC MFAS sodar in Ahtopol for a period of more than 4 years. The high spatial and temporal resolution of the acoustic measurements allows more detailed analysis of the atmospheric processes and possibility for innovative study of the meteorological processes at the Black-sea coast of Bulgaria. Three main classes of breeze circulation are defined, characterized with typical changes in the values of the measured meteorological parameters and result of the interaction between local and mesoscale processes in the studied region. The proposed classification is focused on the presence of local fronts at the beginning and/or at the end of the recorded sea breeze circulation. The relation between surface values and vertical profiles of the measured meteorological parameters is studied as well.

**Keywords:** Atmospheric boundary layer (ABL), Breeze circulation, Remote sensing, Sodar, Classification of breeze circulation.

---

---

\* Damyan.Barantiev@meteo.bg

# Класификация на бризова циркуляция в крайбрежната зона на град Ахтопол на основата на данни от наземно базирано акустично сондиране и ултразвуков анемометър

Дамян Барантиев<sup>\*а</sup>, Екатерина Бъчварова<sup>а</sup>, Михаил Новицкий<sup>б</sup>

*<sup>а</sup>Национален институт по метеорология и хидрология - БАН (НИМХ-БАН),  
бул. „Цариградско шосе” 66, 1784 София, България*

*<sup>б</sup>Научно-производственое объединение (НПО) „Тайфун“, Росгидромет,  
Россия, 249038, Калужская область, г.Обнинск, ул. Победы, 4*

**Резюме:** В тази статия са представени резултати от изследване на вертикалната структурата и развитието на Атмосферен Граничен Слой (АГС) в условията на бризова циркуляция, получени от приземни измервания с тримерен ултразвуков анемометър и от дистанционни сондираня на атмосферата със содар SCINTEC MFAS в гр. Ахтопол за период от над 4 години. Високата пространствена и времева резолюция на акустичните измервания позволява по-детайлен анализ на протичащите процеси в атмосферата и възможност за иновативно изучаване на метеорологичните условия по Черноморското крайбрежие на България. Определени са три основни класа бризова циркуляция, характеризиращи се с типични изменения в стойностите на измерваните метеорологични параметри, обусловени от взаимодействието между локални и мезометеорологични процеси в изследвания район. Предложената класификация е фокусирана върху наличието на локални фронтове в началото и/или в края на регистрирана бризова циркуляция. Изучена е и връзката между приземните стойности и вертикалните профили на измерваните метеорологични параметри.

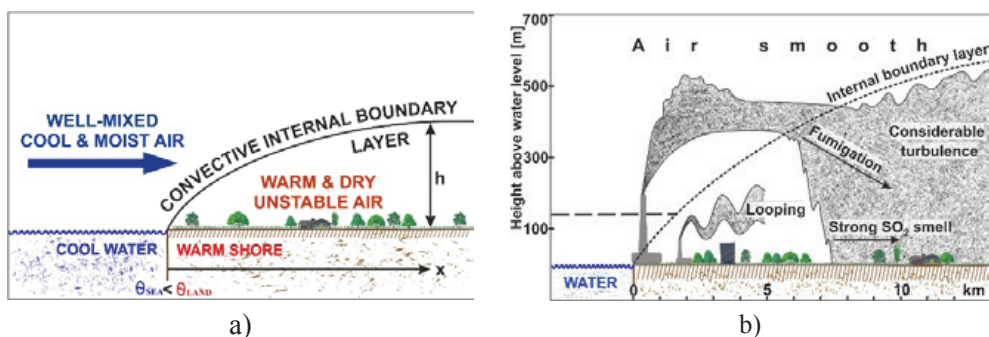
**Ключови думи:** Атмосферен граничен слой (АГС), Бризова циркуляция, Дистанционни измервания, Содар, Класификация на бризова циркуляция.

---

## 1. УВОД

Наблюденията и теоретичното описание на метеорологичните процеси протичащи в крайбрежните зони са важна изследователска задача поради наличието на различни дифузионни характеристики и сложни процеси на разпространение на замърсители в крайбрежен АГС, определени от трансформацията на въздушните маси (ВМ) при прехода им от една над нова подложна повърхност с различни физични характеристики (Бъчварова, 2006). Трансформацията на по-хладните морски ВМ над нагрятата суша (лятно време, през деня) води до формирането на конвективен вътрешен граничен слой (КВГС) с височина нарастваща с разстоянието от брега, Фиг. 1а според Hsu (1986) и зависеща от скоростта на вятъра и турбулентния обмен. При емисията или проникването на замърсители на

въздуха в КВГС се наблюдава явлението „задимяване“ (fumigation), Фиг. 1b според Simpson (1994). КВГС ограничава обема въздух за разреждане на замърсяването, като ограничава височината, до която се разпространяват замърсителите. Образуваният конвективен слой е недостатъчно висок за самоочистване на атмосферния въздух от разпространили се в него замърсители и това води до тяхното акумулиране в крайбрежни зони, особено в случаи със сложна орография в крайбрежната зона (Batchvarova and Gryning, 1998). В комбинация с локалната циркулация (затворени дневни и нощни бризови клетки) формирането на КВГС може да доведе до по-дългосрочни неблагоприятни условия за самоочистване на атмосферата и съответно до неколkokратна рецикулация на замърсителя в атмосферата над крайбрежния район. Изучаването на спецификите и развитието на този слой, чрез провеждането на детайлни метеорологични измервания в крайбрежни райони, е важен елемент от научна и практическа гледна точка. Съвременните мезометеорологични модели се нуждаят от усъвършенстване на използваните параметризационни схеми (особено в крайбрежни райони), което е възможно само на основата на модерни измервания с висока времева и пространствена резолюция. Постигането на по-надеждни прогнози на времето в крайбрежните райони е условие за подобряване и на дейностите свързани с опазване на качеството на атмосферния въздух.



**Фиг. 1.** Схематично представяне на: а) конвективен вътрешен граничен слой (КВГС) при преход на относително по-хладни морски въздушни маси над сравнително по-топла земна повърхност; б) задимяване в резултат на разпространяване на замърсител от източник в крайбрежен КВГС и извън него

**Fig. 1.** Schematic representation of: a) Convective Internal Boundary Layer (CIBL) in the transition of relatively cooler marine air masses over a comparatively hotter land surface; b) Fumigation as a result of the emission of a pollutant from a source within a coastal CIBL and above it upwind

Структурата на АГС в крайбрежни райони е обект на изследване в много страни поради факта, че много градове и индустриални дейности са разположени на бреговете на морета, океани или големи езера. Концепцията за трансформация

на въздушните маси е приложима и за други граници между различни постилащи повърхности, като поле-град, поле-гора, пустиня-град и други, но процесите при прехода море-суша през топлите сезони са най-интензивни. От друга страна модерната апаратура за дистанционно измерване на вертикални профили на основни атмосферни физически параметри дава възможност за сканиране в непрекъснат режим, осигурявайки данни с висока резолюция в пространството и времето. Значителното технологично развитие на наземно базираните уреди за дистанционни измервания на атмосферните характеристики през последните 10 години ги поставя сред надеждните и незаменими прибори при редица иновативни научни методи за изследване на основните метеорологични параметри и на турбулентността в АГС (Coulter and Kallistratova, 2004; Dirk, 2009; Cimini, 2010; Emeis, 2010; Illingworth et al., 2013; Peña et al., 2016).

Дистанционното акустично сондиране на атмосферата започва в най-южната морска синоптична станция от системата на НИМХ - Метеорологична обсерватория (МО) Ахтопол през юли 2008 г. в рамките на сътрудничество между НИМХ-БАН и Научно-производствено обединение (НПО) «Тайфун»-Росгидромет. Акустичният локатор (содар) е със среден обхват и производство на немската компания SCINTEC, а автоматизираната метеорологична станция с тримерен ултразвуков анемометър е произведена от НПО «Тайфун». Така се поставя и начало на непрекъснати измервания с висока времева и вертикална резолюция на профилите на стандартни метеорологични параметри и турбулентни характеристики в крайбрежен район в България.

Представените в тази статия резултати по дългогодишни данни са в синхрон с наблюденията в световната и европейска практика преход от експериментални изследвания в ограничени периоди от време (Kerman et al., 1982; Portelli, 1982; Wilczak et al., 1991) към продължителни/оперативни измервания с прибори даващи данни с висока пространствена и времева резолюция - радари, лидари, содари, микровълнови радиометри (Floors et al., 2013; Gryning et al., 2016).

## **2. ДОСЕГАШНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ПО БЪЛГАРСКОТО ЧЕРНО-МОРИЕ**

През 50-те години на ХХ век в НИМХ се реализират редица изследвания на базата на климатични, синоптични и експериментални наблюдения по българското крайбрежие. В този период е публикувана студията за климатично райониране на България (Събев, 1963). Редица специализирани експериментални изследвания са осъществени от учените в НИМХ през 70-те и 80-те години на ХХ век във връзка с началото на дейностите по мониторинг на околната среда и моделиране на разпространението на примеси в атмосферата. Такива са експериментите във Варна (1973) и Бургас (1976 и 1990), резултати от които са публикувани в Бъчварова & Донев, 1983; Бъчварова, 1984а; Бъчварова, 1984б; Бъчварова, 1985;

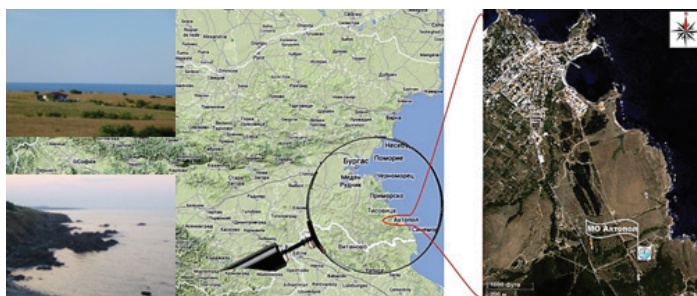
Йорданов & Бъчварова, 1985а; Йорданов & Бъчварова, 1985б; Бъчварова, 2006. С по-широка климатична тематика и международно участие са изследванията в Шкорпиловци (1978-1980, 1982-1983), отразени в Belberov et al., 1980; Belberov et al., 1982; Belberov et al., 1983; Корчев & Манолов, 1983. В района на Ахтопол през 90-те години са организирани наблюдения на аерозолния състав на атмосферата в рамките на проекти по международно сътрудничество. Направеният анализ на обратните траектории на въздушния пренос обяснява наблюдавания аерозолен състав (Wiman et al., 2002).

Липсата на финансиране за научни изследвания и приватизацията на големи индустриални обекти, като ЛУКОЙЛ Нефтохим Бургас, доведоха до многогодишен застой в НИМХ както по отношение на експерименталните изследвания, така и в модернизацията на измерванията както в страната, така и по черноморското крайбрежие.

През 2014 г. успешно се проведе съвместен българо-турски научен проект (SAAP4FUTURE), изследващ антропогенното замърсяване на въздуха в трансграничния район на Бургас-Къркларели и влиянието му върху населението и околната среда (Georgieva et al., 2015).

### 3. РАЙОН НА ИЗСЛЕДВАНЕ И АПАРАТУРА

Метеорологична обсерватория (МО) Ахтопол е разположена в югоизточна България на около 2 km в югоизточна посока от гр. Ахтопол. Обсерваторията попада в континентално - средиземноморската климатична област, Черноморска климатична подобласт, климатичен район на Странджанското Черноморие (Събев, 1963). Разположена е върху равнинен тревист терен на около 400 m навътре в сушата и е на 30 m над морското равнище. Брегът в близост до обсерваторията е стръмен с височина от около 10 метра, а разположението на бреговата ивица е с приблизителна посока от северозапад към югоизток (Фиг. 2.).



**Фиг. 2.** Местоположение на МО Ахтопол в югоизточна България и сателитна снимка на района (google map)

**Fig. 2.** Location of MO Ahtopol in southeastern Bulgaria and satellite image of the region (google map)

За изучаване на профилите на вятъра и турбулентността в крайбрежен АГС се използва акустична моно статична Доплерова система за сондиране на атмосферата – SCINTEC Flat Array Sodar MFAS с честотен обхват 1650 – 2750 Hz, 9 ъгъла на излъчване/приемане ( $0^\circ, \pm 9.3^\circ, \pm 15.6^\circ, \pm 22.1^\circ, \pm 29^\circ$ ), вертикален обхват от 150 m до 1000 m и вертикална резолюция от 10 m. Точността при измерване на скоростта на вятъра е 0.1 - 0.3 ms<sup>-1</sup>, за посоката на вятъра е 2 - 3 Deg. Содарната система е монтирана на покрива на административната сграда на МО Ахтопол (Фиг. 3. - дясно) на приблизителна височина 4.5 m и осъществява запис на всеки 10 минути, а периодът на осреднение е 20 минути. Първото ниво на измерване е 30 m, а максималният вертикален обхват при тези настройки достига до 720 m. Едновременно с измерванията на содара започва и изследването на турбулентните характеристики при земята чрез измервания от автоматична метеорологична станция (АМС) МК-15 (производство - НПО «Гайфун») с тримерен ултразвуков анемометър (соник) монтиран на метеорологична мачта на височина 4.5 m (Фиг. 3. – ляво горе). Честотата на измерванията на МК-15 е 0.5 Hz, а останалите ѝ елементите са: сензор за температура и влажност на атмосферния въздух (Фиг. 3 – ляво долу), сензор за валеж (количество и интензитет на валежа), сензор за атмосферно налягане, сензор за слънчева радиация, централно устройство и захранване.



**Фиг. 3.** Налична апаратура: тримерен акустичен анемометър (горе ляво), сензор за температура и влажност на атмосферния въздух (долу ляво), Содарна система върху покрива на административната сграда на МО Ахтопол (дясно)

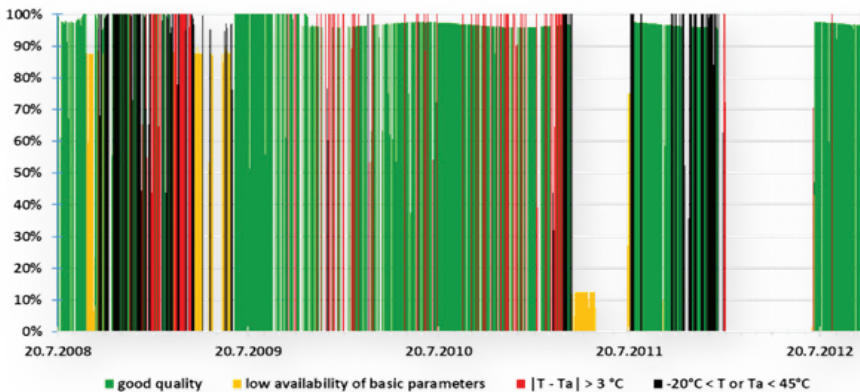
**Fig. 3.** Available equipment: three-dimensional acoustic anemometer (top left), air temperature and humidity sensor (bottom left), sodar system on the roof of the administrative building of MO Ahtopol (right)

Записът на данни до 20.06.2009 г. се извършва на всеки 10 s и от тях са калкулирани 20 минутни пълзящи осреднени стойности на всеки 10 минути

при наличност на записани данни по-висока от 60% в 20 минутния период на осредняване. След тази дата суровите данни от сензорите на АМС МК-15 са на всеки 2 s.

Подбраният период за анализи е от 20 юни 2008 г. до 10 октомври 2012 г. Непрекъснатостта на оперативния режим на инсталираната апаратура в началото е нарушавана от чести аварии на основното електрическо захранване на територията на МО, а в летните месеци на 2008 г. и 2009 г., работата на содара е била ограничавана през нощните часове. Същевременно, дистанционният контрол и техническата поддръжка на инсталираната апаратура са били практически затруднени поради липсата на достъп до интернет в МО Ахтопол до 2011 г. и от невъзможността на представителите от НПО «Тайфун» да осъществяват пътувания при възникване на проблеми в работата на АМС МК-15.

Оперативният режим на АМС МК-15 е търпял редица смущения през годините, които в определена степен са причинени от горе изложените факти и наложиха прилагането на прости процедури за проверката на качеството на изходящите данни (поради различни технически проблеми със сензорите) преди те да бъдат използвани за анализ. За целта са използвани три критерия за оценка на качеството на приземните данни, резултатите от които са изложени на Фиг. 4.



**Фиг. 4.** Денонощна наличност на данни с приложен критерии за качество на данните на АМС МК-15 в МО Ахтопол през периода 20.07.2008 г. – 10.10.2012 г.

**Fig. 4.** Twenty-four hours data availability with applied data quality criteria to AWS MK-15 at MO Ahtopol for the period 20.07.2008 - 10.10.2012

Данните в жълт цвят (Фиг. 4) показват денонощна наличност по-ниска от 25% на едновременно 8 основни параметъра използвани при изследването на крайбрежния АГС (посока и скорост на вятъра –  $Dir$  и  $WS$ ; температура на атмосферния въздух –  $T$ ; акустична температура –  $Ta$ ; вертикална скорост –  $W$ ; дисперсия на акустичната температура -  $\sigma Ta$ ; дисперсия на посоката на вятъра

–  $\sigma_{Dir}$ ; дисперсия на вертикалната скорост –  $\sigma_W$ ). Първият критерий изисква наличност над 25% на 8-те параметъра. Вторият критерий изисква разлика под 3 °C между сензора за температура и акустичния анемометър намиращи се на отстояние 10 m в хоризонтално и 2.5 m във вертикално направление (при данните в червено е нарушен). Третият критерий изисква данните да са в температурен диапазон от – 20 °C до 45 °C, определен съобразно месечните стойности на абсолютната минимална и абсолютната максимална температура за периода от 1931 г. до 1970 г. за метеорологични станции Царево и Резово (Кючукова, 1983). Данните, които не изпълняват този критерий са дадени в черно. В Таблица 1 са представени месечните наличности на данни от АМС МК-15 с добро качество през анализирания период, преминали през контрола на трите критерия за качество. Допълнително, данните с наличност над 70 % са дадени в зелен код, между 40 и 70 % с оранжев, а под 40 % - в червен.

Посочените наличности през първия и последен месец на периода са отнесени към броя на дните с измервания (12 дни през юли 2008 и 10 дни през октомври 2012). Месеците, през които се наблюдава рязко повишаване на наличността на данни с добро качество, са свързани с периодичните ежегодни гостувания на представителите от НПО «Тайфун», при които се осъществяваше поддръжка на АМС МК-15 и въвеждането ѝ в изправност.

**Таблица 1.** Месечна наличност на данни с добро качество от оперативния режим на АМС МК-15 в МО Ахтопол през периода 20.07.2008 г. – 10.10.2012 г.

**Table 1.** Monthly availability of good quality data from the operating regime of AMS MK-15 at the MO Ahtopol for the period 20.07.2008 - 10.10.2012

	I	II	III	IV	V	VI
2009	21.1%	28.4%	5.1%	0.0%	0.0%	23.3%
2010	15.5%	51.6%	42.4%	64.3%	85.3%	68.3%
2011	49.5%	44.7%	34.1%	0.0%	0.0%	0.0%
2012	9.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2008	67.8%	77.4%	42.1%	28.7%	31.7%	28.2%
2009	94.2%	98.6%	61.9%	54.8%	64.8%	15.5%
2010	76.7%	87.7%	74.2%	49.7%	58.8%	34.0%
2011	9.4%	90.0%	84.4%	61.4%	38.4%	36.1%
2012	61.3%	89.6%	87.1%	74.8%	-	-

Наличността на данни от содара е по-висока от тази при АМС МК-15 и е представена в Таблица 2. Ниската наличност на данни (жълти и червени обозначения) през лятото на 2008 г. и 2009 г. се дължи основно на поставените ограничения в нощния режим на работа, докато през зимните месеци, тя е вследствие на настъпили усложнения от прекъсване на електричеството в МО Ахтопол. Данните с наличност над 70 % са дадени в зелен, между 40 и 70 % в оранжев, а под 40 % - в червен код. Обхвата на содара също е представен графично, със запълване на един бар при височина над 510 m, 2 бара над 560 m, 3 бара над 610 m и 4 бара над 660 m.



Наред с месечната наличност в Таблица 2 е оказана и максималната ефективна височина, до която са достигнали измерванията на содара. Контролът за качество на данните при акустичното сондиране на атмосферата е стриктен и е заложен в софтуера на содара. За периода на анализ са използвани зададените по подразбиране от производителя настройки на содара.

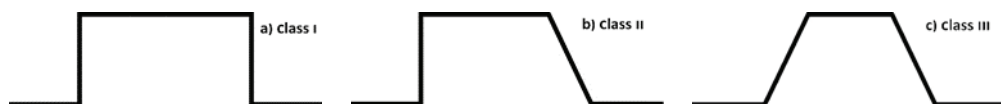
**Таблица 2.** Месечна наличност на данни и максимално достигната ефективна височина от оперативния режим на содара за периода 20.07.2008 г. – 10.10.2012 г.

**Table 2.** Monthly data availability and maximum effective height reached by the sodar operating mode for the period 20.07.2008 - 10.10.2012

	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2008	34.7%	45.2%	40.3%	57.7%	59.5%	88.4%
max range [m]	500	520	520	520	520	520
2009	94.6%	57.5%	59.9%	58.4%	96.7%	96.0%
max range [m]	680	680	680	680	680	680
2010	99.9%	98.3%	99.9%	92.6%	99.6%	99.8%
max range [m]	560	510	490	510	510	510
2011	92.2%	99.9%	38.8%	78.8%	99.2%	81.3%
max range [m]	510	510	560	620	620	620
2012	99.1%	31.9%	96.6%	30.6%	-	-
max range [m]	700	620	720	670	-	-
	I	II	III	IV	V	VI
2009	99.9%	99.6%	99.2%	96.7%	98.3%	99.3%
max range [m]	520	520	680	680	680	680
2010	97.5%	98.3%	89.0%	68.5%	96.8%	86.4%
max range [m]	680	680	680	680	680	680
2011	96.8%	94.8%	99.8%	96.7%	96.8%	96.2%
max range [m]	510	460	510	510	510	510
2012	75.3%	95.8%	99.7%	96.7%	99.3%	93.3%
max range [m]	620	620	620	620	620	620

#### 4. КЛАСИФИКАЦИЯ НА БРИЗОВА ЦИРКУЛАЦИЯ

Систематичните наблюдения с висока времева резолюция на метеорологичните параметри в района, позволяват схематично да се представят три основни типа бризова циркулация в МО Ахтопол (Фиг. 5), класифицирани според начина на преминаване на бризовия фронт (Барантиев, 2016).

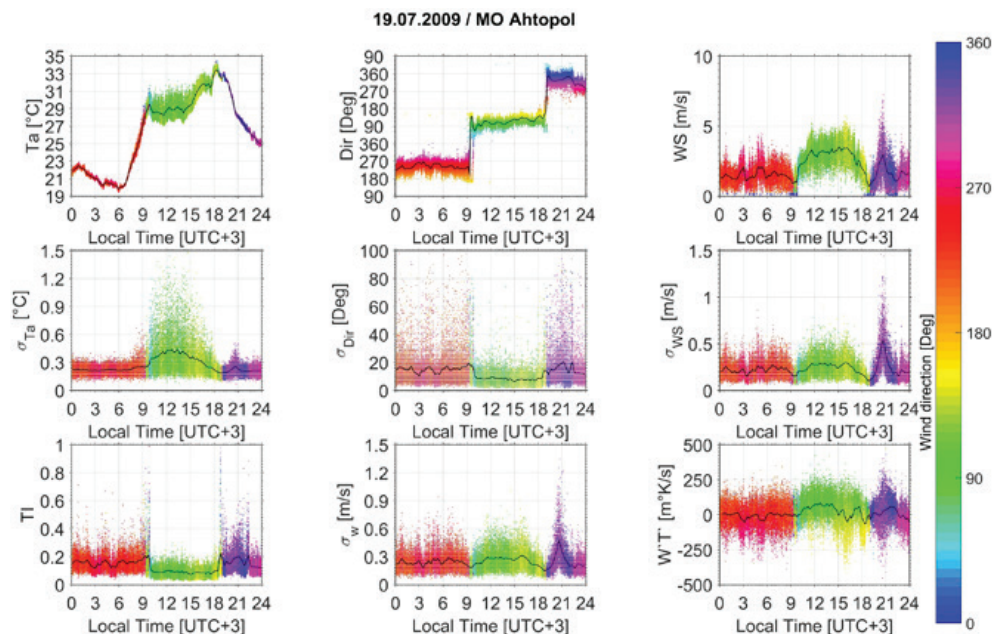


**Фиг.5.** Схематично представяне на трите основни типа бризова циркулация наблюдавани в МО Ахтопол: а) Клас I; б) Клас II; в) Клас III

**Fig.5.** Schematic representation of three main types of breeze circulation observed in the MO Ahtopol: a) Class I; b) Class II; c) Class III

## 4.1. Бризови циркуляции от Клас I

Бризовите циркуляции от Клас I се характеризират с бързи преминаващи фронтове в началото и в края на дневния морски бриз, придружени с рязка промяна в посоката на вятъра, Фиг. 5а. Този тип бриз е свързан с ясно изразена локална крайбрежна циркуляция, която се развива при слаби барични полета и големи температурни разлики между морето и сушата през лятото, но понякога се наблюдава и през студеното полугодие.



**Фиг.6.** Бризова циркуляция от Клас I по данни от акустичен анемометър (малки цветни точки - сурови данни на всеки 2 секунди; черна линия – 20 минутни пълзящи осреднени данни на всеки 10 минути;) От ляво на дясно и от горе на долу:  $T_a$ ,  $Dir$ ,  $WS$ ,  $\sigma T_a$ ,  $\sigma Dir$ ,  $\sigma WS$ ,  $TI$ ,  $\sigma W$  и  $WT$ .

**Fig.6.** Breeze circulation of Class I by acoustic anemometer data (small color dots - raw data every 2 seconds, black line - 20 minute moving averages at every 10 minutes). From left to right and from top to bottom:  $T_a$ ,  $Dir$ ,  $WS$ ,  $\sigma T_a$ ,  $\sigma Dir$ ,  $\sigma WS$ ,  $TI$ ,  $\sigma W$  and  $WT$

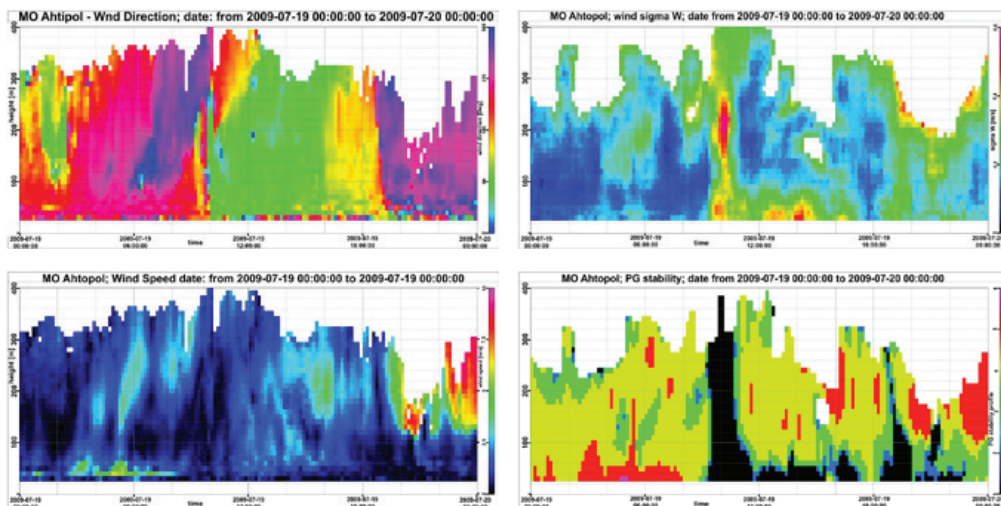
От прегледа на девет параметъра (акустична температура  $/T_a/$ , посока на вятъра  $/Dir/$ , хоризонтална скорост на вятъра  $/WS/$ , стандартно отклонение (дисперсия) на акустичната температура  $/\sigma T_a/$ , дисперсия на посоката на вятъра  $/\sigma Dir/$ , дисперсия на хоризонталната скорост  $/\sigma WS/$ , турбулентна интензивност  $/TI/$ , дисперсия на вертикалната скорост  $/\sigma W/$  и вертикален поток топлина  $/WT/$ ) от приземните метеорологични измервания на 19 юли 2009 г. (Фиг. 6) се установява, че този тип ясно изразена бризова циркуляция се характеризира с:

- типично голяма за сезона денонощна температурна амплитуда (14 °C), която през летните месеци често надвишава 10 °C (горе - ляво);
- ясно изразени и бързо преминаващи фронтови системи в началото и в края на дневния бриз, които рязко изменят посоката на вятъра при земята с близо 180 Deg за около 10 минути (горе - среда);
- забележителни спадове в пулсациите на скоростта на вятъра (горе – дясно), както и при хоризонталната и вертикална турбулентни компоненти (съответно среда – дясно и долу – среда) непосредствено преди преминаването на фронталните системи сутрин и вечер;
- спад на хоризонтална скорост на вятъра, характеризиращ зоната на затишие на бризовата фронтова система (горе – дясно).

Данните от содара за 19 юли 2009 г. разкриват вертикалната структура на бризовата клетка (Фиг.7) и затвърждават изводите базирани на данните от приземните измервания за ясно изразен тип на бризова циркулация (Клас I). При графиката на посоката на вятъра на Фиг. 7 (горе - ляво) се виждат ясно изразени и бързо преминаващи фронтове (в началото и в края на дневния бриз), които рязко изменят посоката на вятъра за 10-20 минути в почти целия вертикален обхват на содара. В зависимост от сезона, поради различните пространствени мащаби на локалната крайбрежна циркулация, е възможно ефективният обхват на содара изцяло да покрие вертикалните пространствени мащаби на бризовата клетка (затворена бризова клетка попаднала в обхвата на содара). Друг характерен признак при вертикалната структура на Клас I е добре обособено ядро в полето на скоростта, където се достигат максималните за бризовата циркулация стойности (Фиг. 7, долу - ляво). Аналогично на приземните измервания, при акустичните сондажи, малко преди преминаването на фронта, както и в началото на неговото преминаване скоростта на вятъра намалява почти до тихо време. Началото на Клас I бризова циркулация е свързано също така със забележимо нарастване на стойностите в полето на дисперсията на вертикалната скорост в почти целия вертикален обхват на содара (Фиг. 7, горе - дясно). Наблюдава се и развитие на добре изразена неустойчива стратификация във височина, свързана отново с преминаването на фронталните системи и зоните на затишие (Фиг. 7, долу - дясно).

Изменението на посоката на вятъра откъм морето е в синхрон с приземните данни, според които това изменение настъпва след 09:20 часа. В този момент за 10 - 20 минути в слоя между 150 - 220 m над земната повърхност, може да се отчете преминаване на първичен фронт на дневния бриз, последван от същинския фронт на бриза в 10:00 часа, който трайно изменя посоката на вятъра във височина откъм морето. Такъв тип кратко и рязко изменение на посоката на вятъра (откъм морето за около 10 мин), при земята и/или във височина, последвано от кратко и рязко изменение на вятъра откъм сушата преди въздушния поток да се стабилизира окончателно откъм морето (т.е. преминаване на първичен фронт на морски бриз) би могло да се регистрира, както при бризови циркулации от Клас I, така и при

Клас II. Възможни са случаи, при които се наблюдава преминаване на вторичен фронт след първичния (Фиг.8), който е последван от същинския фронт на бризовата циркуляция. Този тип бризови циркуляции се случват сравнително рядко и често са повлияни от мезомасщабни процеси. Степента на влияние на синоптичните процеси върху локалната крайбрежна циркуляция обуславя една от съществените разлики между Клас I и Клас II бризова циркуляция.

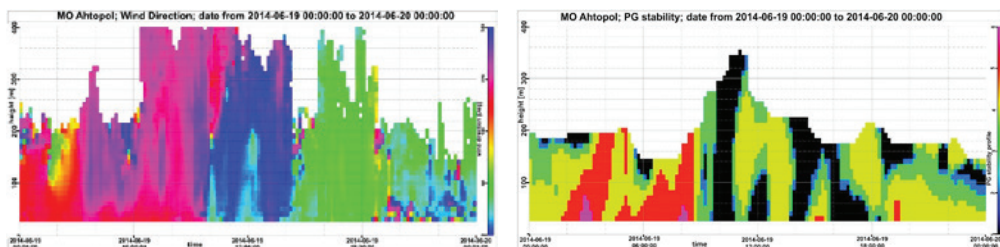


**Фиг. 7.** Пространствено-времени сечения от акустично сондиране на атмосферата, характеризиращи бризова циркуляция от Клас I на дата 19 юли 2009 г. в МО Ахтопол. От горе на долу и от ляво на дясно: посока на вятъра, скорост на вятъра, дисперсия на вертикалната скорост на вятъра, клас на устойчивост по Pasquill-Gifford. Местно време (GMT + 3).

**Fig. 7.** Spatio-temporal cross-sections of acoustic atmospheric sounding characterizing breeze circulation of Class I on 19 July 2009 at the MO Ahtopol. From top to bottom and from left to right: wind direction, wind speed, vertical wind speed dispersion, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3).

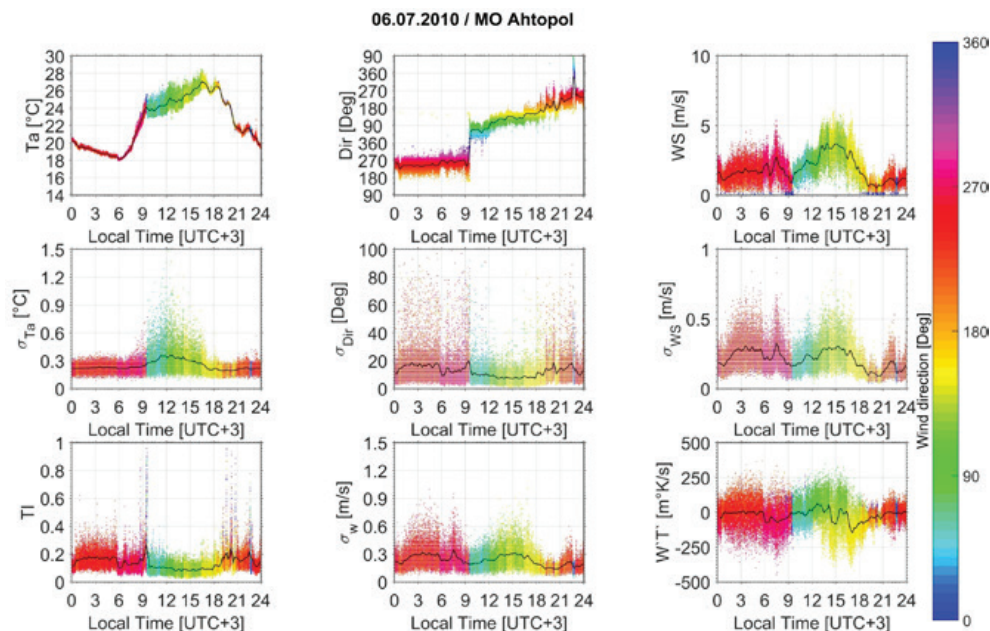
## 4.2. Бризови циркуляции от Клас II

Бризовите циркуляции от Клас II се характеризират с бързо преминаващ фронт на бриза в началото и постепенно изменение на посоката на вятъра в края на бризовата циркуляция (Фиг. 5b). При този тип бризова циркуляция също е възможно да се наблюдава преминаване на първичен и вторичен фронт в началото на бризовата циркуляция, Фиг. 8.



**Фиг. 8.** Пространствено-времени сечения с регистриран вторичен фронт на бризова циркуляция на дата 19 юни 2014 г. в МО Ахтопол. От ляво на дясно: посока на вятъра, клас на устойчивост по *Pasquill-Gifford*. Местно време (GMT + 3)

**Fig. 8.** Spatio - temporal sections with a registered secondary front of breeze circulation on 19 June 2014 at the MO Ahtopol. From left to right: wind direction, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3)

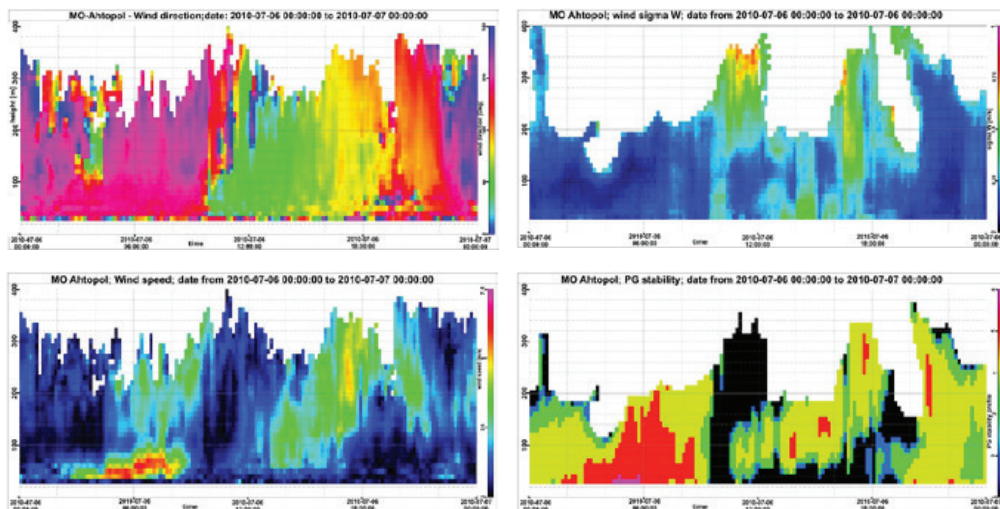


**Фиг.9.** Бризова циркуляция от Клас II (приземни данни представени като на Фиг.6)

**Fig. 9.** Breeze circulation of Class II (surface layer data presented as in Fig. 6)

Чрез акустичните дистанционни измервания в атмосферата също се установяват разлики в полето на вятъра между Клас I и Клас II (виж Фиг. 7 и Фиг. 10). При Клас II следобедният преход в посоката на вятъра е плавен във времето и във височина, а скоростта на вятъра след края на морския бриз е по-голяма в сравнение с Клас

I. Тези разлики са свързани и с различното влияние на синоптични процеси върху бризовия поток във височина в двата случая. По-подробен анализ на взаимодействието между локални и мезометеорологични процеси е представен в Barantiev et al. (2011) и Batchvarova et al. (2012).



**Фиг. 10.** Пространствено - времеви сечения характеризиращи бризова циркулация от Клас II на дата 06 юли 2010 г. От горе на долу и от ляво на дясно: посока на вятъра, скорост на вятъра, дисперсия на вертикалната скорост на вятъра, клас на устойчивост по Pasquill-Gifford. Местно време (GMT + 3).

**Fig. 10.** Spatio-temporal sections characterizing breeze circulation of Class II on 06 July 2010. From top to bottom and from left to right: wind direction, wind speed, vertical wind speed dispersion, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3).

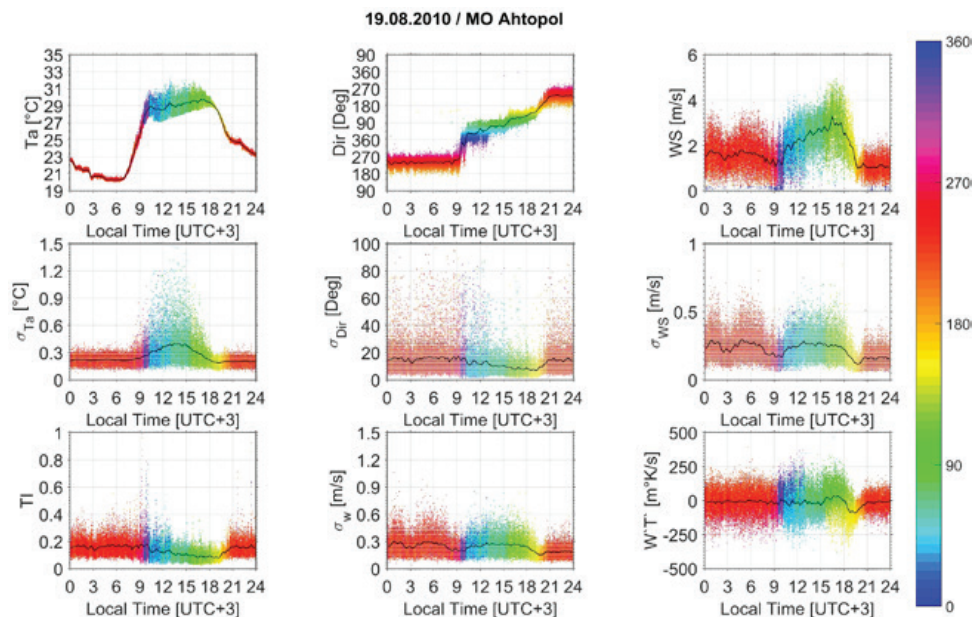
От приземните метеорологични измервания се установява (Фиг. 9), че наблюдаваните изменения на параметрите при този тип бризова циркулация са доста близки до тези на ясно изразения тип бриз (Клас I) с изключение на плавно изменящата се посока на вятъра в края на дневния бриз. Като основни разлики могат да се почертаят стойностите на денонощните температурни амплитуди и дисперсиите на акустичните температури на атмосферният въздух, които са пониски при Клас II (Фиг. 9, горе - ляво) в сравнение с Клас I (Фиг. 6, горе - ляво). Разлики между двата класа се наблюдават и при изменението на посоката на вятъра при преминаването на фронта в началото на бризовата циркулация, като при Клас II изменението рядко надвишава 120 Deg. Разлики има и при квазистационарните условия, свързани с устойчивостта на наблюдаваните метеорологични параметри, характеризиращи въздушния поток откъм морето при дневен бриз. Причината за тези различия може да се асоциира със слабо влияние на мезомасштабни процеси

върху локалната крайбрежна циркулация. При Клас II е възможно преминаването на фронта близо до земната повърхност да протече за по-дълъг период от време в сравнение с този от Клас I. Последвалите след фронта по-слабо квазистационарни условия на дневният бриз от Клас II водят до по-голяма нестабилност при насочеността на въздушния поток откъм морето с изменения достигащи  $\pm 30$  Deg от характерната посока на дневния бриз в района (Фиг. 9, горе - среда), по-ниски стойности на хоризонталната скорост на вятъра и вертикалния топлинен поток в началото на бризовата циркулация, както и по-кратко времетраене на задържане на характерните средни стойности на тези параметри при дневен бриз (Фиг. 9 в сравнение с Фиг. 6).

### **4.3. Бризови циркулации от Клас III**

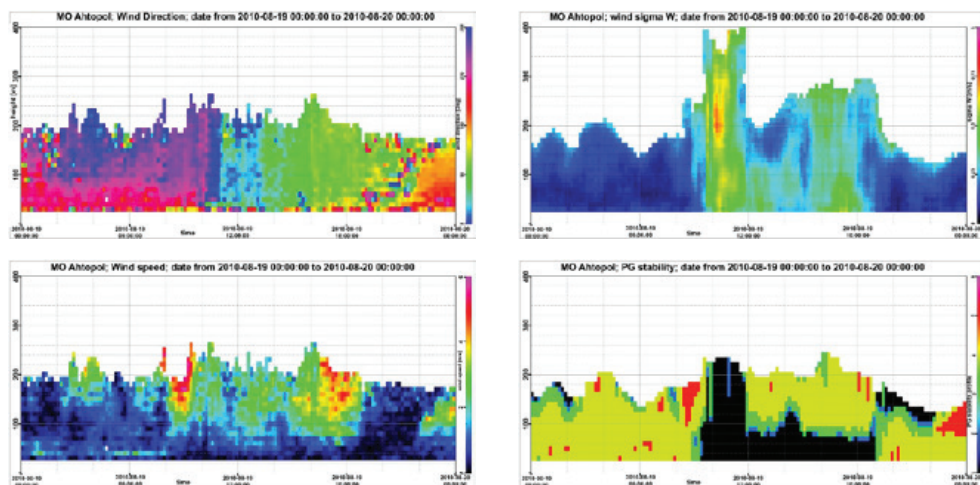
Бризови циркулации от Клас III се характеризират с постепенно изменение на посоката на вятъра, както в началото, така и в края на дневния бриз (Фиг. 5 – с). Такава бризова циркулация се регистрира сравнително често в изследвания район. При този клас в повечето случаи се наблюдава влияние на мезомасщабни процеси, което в голяма степен може да доминира над локалните процеси в крайбрежния район. На Фиг. 11 са представени данни от приземните метеорологични измервания характерни за бризова циркулация от Клас III. Същественото за този клас са наблюдаваните по-големи изменения на посоката на вятъра откъм морето, които изменения могат да достигнат отклонение от  $\pm 45$  Deg от характерната посока на локалната крайбрежна циркулация. Скоростта на вятъра при земята може да варира в доста по-големи граници по време на дневния бриз в сравнение с Клас I и Клас II, в зависимост от това дали синоптичните процеси подсилват или отслабват влиянието на възникналите локални сили. Характерното плавно изменение на посоката на вятъра, в началото и края на бризовата циркулация отнема над 10 мин при земята и над 20 мин във височина. Продължителността и височината, до която могат да достигнат пространствените и времевите мащаби на бризовата циркулация от този клас, зависят от сезона и от степента на влияние на мезомасщабните процеси. При вертикалната структура на бризова циркулация от Клас III се наблюдава нормално изразена бризова клетка в полетата на скоростта и посоката на вятъра (Фиг. 12).

Измененията в хомогенността в полето на посоката на вятъра по време на този дневен тип локална циркулация са ясно изразени в началото и в края на морския бриз. В полето на скоростта на вятъра също се наблюдава не постоянност на потока, като често максималните стойности се достигат малко преди края на дневния бриз. По-слабото въздействие на локалните сили от своя страна, също биха могли да се проявят с преминаване на първичен и вторичен фронт в началото на бризовата циркулация.



**Фиг.11.** Бризова циркуляция от Клас III (приземни данни представени като на Фиг. 6)

**Fig. 11.** Breeze circulation of Class III (surface data presented as in Fig. 6)



**Фиг. 12.** Пространствено-времени сечения характеризиращи бризова циркуляция от Клас III на дата 19 август 2010 г. От горе на долу и от ляво на дясно: посока на вятъра, скорост на вятъра, дисперсия на вертикалната скорост на вятъра, клас на устойчивост по Pasquill-Gifford. Местно време (GMT + 3).

**Fig. 12.** Spatio-temporal sections characterizing breeze circulation of Class III on 19 August 2010. From top to bottom and from left to right: wind direction, wind speed, vertical wind speed dispersion, Pasquill-Gifford stability class. Local time (GMT + 3).



## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРЕДЛОЖЕНАТА КЛАСИФИКАЦИЯ

Класификацията на бризови циркулации, определена схематично на Фиг. 5, ни позволява да сравняваме броя и вида на бризовите клетки отчетени чрез провежданите акустични измервания в МО Ахтопол. В Таблица 3 са представени обработени данни от тримерния ултразвуков анемометър на АМС МК-15 и сондиранията на SCINTEC MFAS Sodar, оказващи броя на дните, в които са се провеждали измервания със съответната апаратура (втора колона), брой на дни с регистрирана бризова циркулация (трета колона), както и тяхното класифициране според начина на преминаване на локалните им фронтове в периода юли-септември на 2009 г (последните три колони). Наличността на данни при содара е малко по-висока, отколкото при ултразвуковия анемометър през разглеждания период, но броят на регистрираните дни с бризова циркулация е по-висок при приземните измервания. Това се дължи на по-силното влияние на подложната повърхност върху измерванията на височина 4.5 m. Влиянието на подложната повърхност може да се отчете и чрез наблюдавания максимум на регистрирани бризови циркулации от Клас II при приземните измервания, който максимум се измества към Клас III при акустичните сондираня на атмосферата.

**Таблица 3.** Анализ на регистрирани дневни бризови циркулации в МО Ахтопол през периода от юли до септември на 2009 г. и класифицирането им в трите основни класа според начините на преминаване на локалните им фронтални системи (тримерен ултразвуков анемометър на АМС МК 15 – червен цвят; SCINTEC MFAS Sodar – син цвят).

**Table 3.** Analysis of registered sea breezes at MO Ahtopol during the period from July to September 2009 and their classification in three basic classes depending on the type of passage of their local frontal systems (three-dimensional ultrasonic anemometer of АМС МК 15 - red colour; SCINTEC MFAS Sodar - blue colour).

2009 Месец	Брой дни със соник и содарни данни	Брой дни с бризова циркулация	Клас I	Клас II	Клас III
Юли	30 / 31	28 / 18	6 / 1	16 / 7	6 / 10
Август	30 / 30	18 / 12	2 / 0	15 / 3	1 / 9
Септември	26 / 29	16 / 11	2 / 0	13 / 4	1 / 7

Броят на регистрираните от содара бризови циркулации и тяхното класифициране през едни и същи месеци варират от година на година в зависимост от броя на създалите се благоприятни условия за развитие на локална циркулация, определена от динамиката на мезометеорологичните процеси над Южното Българско Черноморие. В Таблица 4 са представени статистически данни за над четири годишен период на измерване в МО Ахтопол. Показани са броят на дните с оперативен режим на содара, броят на регистрираните дневни бризови циркулации и съответно тяхното класифициране през различните разглеждани месеци и години. От данните в таблицата се вижда, че най-благоприятната

календарна година за развитие на бризова циркулация през разглеждания период е била 2009 г., а тази с най-нисък брой регистрирани е била 2010 г.

**Таблица 4.** Брой регистрирани дневни бризови циркулации по данни от акустично сондиране на атмосферата (SCINTEC MFAS Sodar) и тяхното разпределение по класове през различните месеци и години от период на измерване -20 юли 2008 г. до 10 октомври 2012 г. в МО-Ахтопол

**Table 4.** Number of registered sea breezes according data from acoustic atmospheric sounding (SCINTEC MFAS Sodar) and their distribution by classes during the different months and years of the measurement period -20 July 2008 to 10 October 2012 in MO Ahtopol

Класификация на бриз SCINTEC MFAS Sodar (Ахтопол)		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Годишно
2008	дни с измервания	-	-	-	-	-	-	10	29	26	31	30	31	157
	дни с бриз	-	-	-	-	-	-	2	15	11	15	6	2	51
	Клас I	-	-	-	-	-	-	0	1	1	0	0	0	2
	Клас II	-	-	-	-	-	-	1	1	2	2	0	0	6
	Клас III	-	-	-	-	-	-	1	13	8	13	6	2	43
2009	дни с измервания	31	28	31	30	31	30	31	31	30	20	30	31	354
	дни с бриз	6	10	17	15	23	27	18	12	11	5	14	2	160
	Клас I	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3
	Клас II	0	1	0	1	3	6	7	3	4	1	1	0	27
	Клас III	5	9	17	14	20	20	10	9	7	4	13	2	130
2010	дни с измервания	31	28	29	23	31	27	31	31	30	30	30	31	352
	дни с бриз	4	7	10	9	27	15	9	9	10	4	10	3	117
	Клас I	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4
	Клас II	0	3	3	2	3	4	1	2	2	0	0	2	22
	Клас III	4	3	6	7	23	10	8	7	8	4	10	1	91
2011	дни с измервания	31	28	31	30	31	30	29	31	13	25	30	28	337
	дни с бриз	9	7	11	9	12	19	23	18	4	9	11	2	134
	Клас I	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	Клас II	1	2	1	2	1	1	3	0	0	3	2	0	16
	Клас III	8	5	8	7	11	18	20	18	4	6	9	2	116
2012	дни с измервания	24	29	31	30	31	30	31	13	25	10	-	-	254
	дни с бриз	2	9	13	12	18	20	11	5	7	8	-	-	105
	Клас I	0	0	1	1	0	1	0	0	0	2	-	-	5
	Клас II	1	3	2	2	6	4	2	1	2	1	-	-	24
	Клас III	1	6	10	9	12	15	9	4	5	5	-	-	76
Общо	дни с измервания	117	113	122	113	124	117	132	135	124	116	120	121	1454
	дни с бриз	21	33	51	45	80	81	63	59	43	41	41	9	567
	Клас I	1	1	4	1	1	3	1	1	1	2	0	0	16
	Клас II	2	9	6	7	13	15	14	7	10	7	3	2	95
	Клас III	18	23	41	37	66	63	48	51	32	32	38	7	456

Подробен анализ на 2009 година е представен в Novitzky et al. (2012). Увеличаване на бризовите циркулации се наблюдава през топлото полугодие, през месеците от май до август. Рекордна наличност на регистриран бриз се наблюдава през месец юни (малко над 70% от дните с измервания), а като месец с най-нисък регистриран брой може да се отбележи декември, последван от януари и февруари. Броят на локалните крайбрежни циркулации определени като Клас III доминира с един порядък над останалите два класа. Поради често доминиращо влияние на мезометеорологичните процеси над локалните такива в изследвания район най-рядко са регистрирани бризови циркулации описани от Клас I – едва 16 от общо 567 дни, което се равнява на по-малко от 3% от случаите на регистриран бриз.

Крайбрежният АГС е сложно разслоен поради рязкото изменение на физичните свойства на постилащата повърхност и в условията на бриз се създава инверсно разпределение на температурата определено от нахлуването на по-хладна въздушна маса, която като клин измества във височина топлата въздушна маса. Поради тази причина температурата в по-високите слоеве на атмосферата достига по-големи стойности отколкото при земната повърхност, създавайки условия за стабилност в атмосферата. Като резултат от това, в крайбрежните зони през летните месеци, образуването на конвективна облачност и свързаните с нея явления, като валежи и гръмотевични бури намаляват, докато при слънчевото греене се наблюдава увеличаване с близо 10% (Сиракова, 2000). През 2014 г. в рамките на съвместния българо-турски научен проект SAAP4FUTURE (Georgieva et al., 2015), бе проведено изследване на суха, мокра и обща депозиция, за което също бяха използвани данни от акустичното сондиране на атмосферата и се извърши анализ на регистрирани бризови циркулации в изследвания район, указани в Таблица 5.

**Таблица 5.** Максимален обхват и наличност на данни от содара с приложена бризова класификация (Фиг. 5) от юни до ноември на 2014 г.

**Table 5.** Maximum range and sodar data availability with applied breeze classification (Fig. 5) from June to November 2014

SCINTEC MFAS Sodar	(Ахтопол) 2014					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
максимален обхват [m]	720	720	720	630	750	630
наличност на данни	99.8%	90.0%	61.4%	51.7%	98.5%	97.4%
брой профили	4310	4016	2739	2233	4398	4207
дни с измервания	30	28	19	15	31	30
дни с бриз	15	20	14	7	6	7
Клас I	0	1	0	1	0	1
Клас II	5	1	3	2	3	1
Клас III	11	18	11	4	3	5

Първият ред от таблицата показва максималния обхват достигнат от содара, а вторият и третият ред наличността на данни изразени съответно в проценти и брой времеви серии на измерване през различните месеци на проведената кампания. Ниската наличност на данни през август и септември се дължи на сериозен

проблем в основното електрическо захранване на обсерваторията през периода 20.08.2014 - 15.09.2014. Последните четири реда от Таблица 5 показват общия брой на дните с регистрирана бризова циркулация и тяхното разпределение по класове. Най-висок брой на дни с бриз е наблюдаван през юли, а като доминиращ тип бризова циркулация през разглеждания период (отново като в Таблица 3) може да се определи Клас III. Изключение прави единствено месец октомври, при който се наблюдават еднакъв брой на регистрирани дни с бриз от Клас II и Клас III. Най-ниска наличност се наблюдава отново при Клас I. Обособените сухи периоди по време на проведената кампания на проекта SAAP4FUTURE (от юни до ноември 2014 г.) са указани в първата колона на Таблица 6, а във втората броя на дните с измервания в самите сухи периоди, като големината на баровете в тази колона е определена от максималния по времетраене сух период.

**Таблица 6.** От ляво на дясно: определени сухи периоди, брой на дните с измервания от содара, процентно наличие на дневен бриз, разпределение на бризовите циркулации по класове

**Table 6.** From left to right: certain dry periods, number of days with sodar measurements, percentage of sea breeze, distribution of breeze circulations by classes

Сухи периоди (2014)	Дни с измервания	Наличие на бриз	Клас I	Клас II	Клас III
02 - 04 VI	3	66,7%	0,0%	0,0%	66,7%
05 - 14 VI	8	25,0%	0,0%	12,5%	12,5%
16 - 18 VI	3	100,0%	0,0%	66,7%	33,3%
21 VI - 04 VII	14	57,1%	0,0%	7,1%	50,0%
04 - 12 VII	9	77,8%	0,0%	11,1%	66,7%
12 - 16 VII	5	80,0%	0,0%	0,0%	80,0%
16 - 23 VII	8	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%
24 VII - 01 VIII	6	66,7%	16,7%	0,0%	50,0%
01 - 08 VIII	8	75,0%	0,0%	0,0%	75,0%
08 - 17 VIII	10	70,0%	0,0%	30,0%	40,0%
17 - 25 VIII	3	33,3%	0,0%	0,0%	33,3%
25 VIII - 03 IX	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
07 - 14 IX	0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
17 - 23 IX	7	42,9%	14,3%	14,3%	14,3%
23 - 26 IX	4	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%
27 IX - 08 X	12	25,0%	0,0%	8,3%	16,7%
08 - 23 X	16	25,0%	6,3%	6,3%	12,5%
31 X - 13 XI	14	21,4%	0,0%	7,1%	14,3%
16 - 19 XI	4	50,0%	0,0%	0,0%	50,0%
20 - 24 XI	5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
25 - 30 XI	6	16,7%	0,0%	0,0%	16,7%

При всички разглеждани сухи периоди, при които се е осъществявало акустично сондиране на атмосферата, са налични дни с бризова циркулация (Таблица 6 - третата колона). Последните три колони на Таблица 6 оказват процентното разпределение на отчетените дневни бризови циркулации според представената

класификация. Като относително дълги сухи периоди с регистриран висок брой на дни с бризова циркулация (над 70%) могат да бъдат посочени следните периоди: 04-12 юли, 01-08 август и 08 -17 август. При последния от посочените периоди се наблюдава високо наличие на бризови циркулации от Клас II. През един от най-кратките сухи периоди (13-15 юли) са регистрирани бризови циркулации от Клас III през всички му дни.

## **6. ИЗВОДИ**

Предложената класификация на бризовата циркулация в района на Ахтопол систематизира наблюдаваните особености в режима на метеорологичните параметри за дълъг период от непрекъснати наблюдения с висока пространствена и времева резолюция. Бризова циркулация се наблюдава по Българското Южно Черноморие целогодишно. През студеното полугодие честотата е по-ниска, а времевите и пространствени мащаби – по-малки. Това от своя страна води до сезонни и дори месечни изменения в характеристиките на бризовата циркулация във всеки един от класовете. Множество различни ситуации на взаимодействие между локални и синоптични процеси е причина наред с основните класове на бризовата циркулация да се наблюдават и различни частни случаи.

Предложената типизация на бризови клетки по приземни и/или вертикални сондирания е новост, позволяваща да се охарактеризират наблюдаваните процеси по редица признаци в изменението на основни метеорологични елементи и турбулентността, както близо до земната повърхност, така и във височина. Тя е приложена за първи път на Българското Черноморие и разкрива значими детайли в еволюцията и структурата на дневния бриз. Границите на нейната приложимост са с широк обхват от научна и практическа гледна точка. Тя би могла да се използва при бъдещи метеорологични и климатични проучвания в крайбрежни зони, при проверка на резултатите от мезометеорологично моделиране, във връзка с опазването на качеството на атмосферния въздух и редица други научни изследвания, при които локална крайбрежната циркулация е значим фактор.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Тези научни изследвания станаха възможни в резултат от успешното сътрудничество между НПО «Тайфун» – Росгидромет и НИМХ-БАН.

## ЛИТЕРАТУРА

- Barantiev, D., Novitsky, M. and Batchvarova, E., 2011. Meteorological observations of the coastal boundary layer structure at the Bulgarian Black Sea coast. *Advances in Science and Research (ASR)*, (6): 251-259.
- Batchvarova E. and S.-E. Gryning, 1998: Wind climatology, atmospheric turbulence and internal boundary layer development in Athens during the MEDCAPHOT-TRACE experiment. *Atmospheric Environment*, v 32, 2055-2069.
- Batchvarova, E., Barantiev, D. and Novitsky, M., 2012. Coastal Boundary layer wind profile based on SODAR data – Bulgarian contribution to COST Acton ES0702, The 16th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing – ISARS Boulder, Colorado, USA.
- Belberov, Z.K., Zahariev, V.I., Kuznetsov, O.A., Massel, S., Pykhov, N.V., Rojdestvensky, A.V. and Filyushkin, B.N., 1980. Interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the nearshore zone -results of the international experiment „Kamchiya 78“, I. Publishing house of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia.
- Belberov, Z.K., Antsyferov, S.M., Zahariev, V.I., Zats, V.I. and Pykhov, N.V., 1982. Interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the nearshore zone -results of the international experiment „Kamchiya 78“, II. Publishing house of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia.
- Belberov, Z.K., Zahariev, V.I., Kuznetsov, O.A., Pykhov, N.V., Filyushkin, B.N. and Zaslavski, M.M., 1983. Interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the nearshore zone -results of the international experiment „Kamchiya 78“, III. Publishing house of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia.
- Cimini, D., Visconti, G. and Marzano, F.(eds), 2010. Integrated Ground-Based Observing Systems, 10.1007/978-3-642-12968-1\_1. Springer.
- Coulter, R.L. and Kallistratova, M.A., 2004. Two decades of progress in SODAR techniques: a review of 11 ISARS proceedings. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 85: 3-19.
- Dirk, A.M.E.e.a.E., 2009. COST 720 - Final Report: Integrated ground-based remote-sensing stations for atmospheric profiling : . Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg 422 pp.
- Emeis, S., 2010. Surface-based remote sensing of the atmospheric boundary layer. *Atmospheric and oceanographic sciences library*. Springer Berlin Heidelberg, New York.
- Floors, R., Vincent, C.L., Gryning, S.-E., Peña, A. and Batchvarova, E., 2013. The wind profile in the coastal boundary layer: wind lidar measurements and numerical modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 147(3): 469-491.
- Georgieva, E., Oruc, I., Hristova, E., Velchev, K., Kirova, H., Syrakov, D., Prodanova, M., Neikova, R., Veleva, B., Barantiev, D., Petrov, A., Kolarova, M., Nikolov, V., Batchvarova, E. and Branzov, H., 2015. Joint study of anthropogenic air pollution in the Burgas - Kırklareli cross-border area as a step towards future assessments on its impact on the population and the environment. Scientific Report, co-funded by EU through the Bulgaria – Turkey Cross-Border Programme CCI number 2007CB16IPO008.
- Gryning, S.-E., Floors, R., Peña, A., Batchvarova, E. and Brümmer, B., 2016. Weibull wind-speed distribution parameters derived from a combination of wind-lidar and tall-mast measurements over land, coastal and marine sites. *Boundary-Layer Meteorology*, 159(2): 329–348.

- Hsu, S.A., 1986. A note on estimating the height of the convective internal boundary layer near shore. *Boundary-Layer Meteorology*, 35(4): pp 311-316.
- Illingworth, A.J., Ruffieux, D., Cimini, D., Lohnert, U., Haeffelin, M. and Lehmann, V., 2013. COST Action ES0702 Final Report: European Ground-Based Observations of Essential Variables for Climate and Operational Meteorology, COST Office, PUB1062.
- Kerman, B.R., Mickle, R.E., Portelli, R.V., Trivett, N.B. and Misra, P.K., 1982. The Nanticoke shoreline diffusion experiment, June 1978 - II. Internal boundary-layer structure. *Atmospheric Environment*, 16(3): 423-437.
- Novitsky, M., Kulizhnikova, L., Kalinicheva, O., Gaitandjiev, D., Batchvarova, E., Barantiev, D., Krasteva, K., 2012. Characteristics of speed and wind direction in atmospheric boundary layer at southern coast of Bulgaria. In Russian, *Meteorologia i Gydrologia* 37(3): 159-164.
- Peña, A., Floors, R.R., Sathe, A., Gryning, S.-E., Wagner, R., Courtney, M., Larsén, X.G., Hahmann, A.N. and Hasager, C.B., 2016. Ten Years of Boundary-Layer and Wind-Power Meteorology at Høvsøre, Denmark. *Boundary-Layer Meteorology*, 158(1): 1-26.
- Portelli, R.V., 1982. The Nanticoke shoreline diffusion experiment, June 1978—I. Experimental design and program overview. *Atmospheric Environment*, 16(3): 413-421.
- Simpson, J.E., 1994. *Sea breeze and local winds*. Cambridge University Press.
- Wilczak, J.M., Dabberdt, W.F. and Kropfli, R.A., 1991. Observations and Numerical Model Simulations of the Atmospheric Boundary Layer in the Santa Barbara Coastal Region. *Journal of Applied Meteorology*, 30(5): 652–673.
- Wiman, B.L.B., Velchev, K., Gaydarova, P.N., Donev, E.H. and Yurukova, L., 2002. A Note on Aerosol Mass-versus-size Distributions in the South-East Bulgarian Black Sea Coastal Region. *Bulgarian Journal of Meteorology & Hydrology*, 13((1-2)): 26-39.
- Баратиев, Д., 2016. Характеристики на атмосферния граничен слой в крайбрежната зона на град Ахтопол по содарни и моделни данни, Дисертация за получаване на научната и образователна степен Доктор, София, 217 стр.
- Бъчварова, Е. и Донеv, Е., 1983. Спектрални оценки на концентрацията на някои замърсители на атмосферата и някои метеорологични параметри в гр. Бургас. *Хидрология и метеорология*, XXXII(2): 70-72.
- Бъчварова, Е., 1984а. Някои предварителни резултати от микрометеорологичен дифузионен експеримент с трасер. *Хидрология и метеорология*, XXXIII(3): 53-57.
- Бъчварова, Е., 1984б. Някои предварителни резултати от микрометеорологичен дифузионен експеримент с използване на серен шестофлуорид като трасер. *Българско геофизично списание*, X(4): 19-29.
- Бъчварова, Е., 1985. Изследване на развитието на термичен вътрешен граничен слой и разпространението на примеси в него. Автореферат на дисертация за получаване на научната степен “Кандидат на физическите науки”, София: 36 стр..
- Бъчварова, Е., 2006. Теоретични и експериментални изследвания на височината на конвективния граничен слой в атмосферата при различни постилащи повърхности, Дисертация за научната степен Доктор на физическите науки, София, 153 стр.
- Йорданов, Д. и Бъчварова, Е., 1985а. Върху използването на теорията подобие при изучаване на дифузията в условията на бризова циркулация. *Българско геофизично списание*, XI(3): 19-29.

- Йорданов, Д. и Бъчварова, Е., 1985b. Върху височината на вътрешния граничен слой при морска бризова циркулация. Българско геофизично списание, XI(2): 21-28.
- Корчев, Г. и Манолов, Л., 1983. Експеримент за изучаване на бризовата циркулация по Българското Черноморско крайбрежие. Хидрология и метеорология, година XXXII(кн. 2): 72-74.
- Кючукова, М., 1983. Климатичен справочник за НР България - том III. Температура на въздуха, температура на почвата, слана, III. ДИ «Наука и изкуство», София, България, 440 стр.
- Сиракова, М., 2000. Атмосфера и климат. Херон Прес, София, 243 стр.
- Събев, Л.С., Св., 1963. Климатичните райони на България и техния климат. Земиздад, София, България.