

ВЛИЯНИЕ НА ОРОГРАФСКИТЕ И ТЕРМИЧНИТЕ ХОРИЗОНТАЛНИ НЕЕДНОРОДНОСТИ В ПГС ВЪРХУ ОТКЛОНЕНИЕТО НА СИНОПТИЧНИТЕ ВИХРИ ОТ ВОДЕЩИЯ ПОТОК

ЙЕНС БОНЕВИЦ, ЕВГЕНИ СИРАКОВ, СТИЛИЯН ЕВТИМОВ

Катедра „Метеорология и геофизика”

Йенс Боневитц, Евгени Сираков Стилиян Евтимов. ВЛИЯНИЕ НА ОРОГРАФСКИТЕ И ТЕРМИЧНИТЕ ХОРИЗОНТАЛНИ НЕЕДНОРОДНОСТИ В ПГС ВЪРХУ ОТКЛОНЕНИЕТО НА СИНОПТИЧНИТЕ ВИХРИ ОТ ВОДЕЩИЯ ПОТОК

Предложени са прости, качествени правила за отклоненията на приземните траектории на синоптичните вихри от водещия поток. Правилата са базирани на някои теоретични резултати относно отклоняващото влияние на орографско-термичните хоризонтални нееднородности в ПГС. Верификацията на правилата е върху реалните траектории на 28 синоптични вихъра през периода 01/01/2004–12/12/2013, преминаващи главно през Балканския полуостров. За тази цел са използвани дескриптивни и тестови статистически методи. Убедително е подкрепен изводът, че отклонението на един вихър надясно, наляво или без отклонение от водещия поток се определя от отклоняващото влияние на орографско-термичните нееднородности в същата посока, или, докато единият от двата фактора (орографския или термичния) отклонява в същата посока, то другият е неутрален.

Jens Bonewitz, Evgeni Syrakov, Stilian Evtimov. ON THE INFLUENCE OF OROGRAPHIC AND THERMAL HORIZONTALLY NONHOMOGENITIES IN THE PBL ON DEVIATION OF BARIC FORMATIONS FROM THE LEADING FLOW

Simple qualitative rules for the deviation of surface trajectory of the synoptic vortices from the leading flow are proposed. The rules are based on some theoretical results about the deviate influence of the orographically and thermally non-homogeneous PBL. The verification of the rules is based on real trajectories of 28 synoptic vortices, that mostly passes over Balkans during 01/01/2004–12/12/2013 period. Descriptive and test statistical methods are used for this purpose. It is convincingly sustained the conclusion that a leftward, right or missing deviation of one eddy from the leading flow corresponds to an influence of both orographic and thermal factors in the same direction, or as a factor deviates in the same direction, the other is neutral.

Keywords: synoptic vortices, rule of the leading flow, orographically and thermally non-homogeneous PBL

PACS number: 92.60 ± e

За контакти: Йенс Боневитц, Катедра „Метеорология и геофизика“, Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучър“ 5, 1164 София, тел.: +49 1573/ 29 66 539, E-mail: jensbonewitz@abv.bg

1. УВОД

В синоптичната практика е добре известно така нареченото правило на водещия поток. А именно, приземните барични системи се преместват в направлението на устойчивия слабозавихрен поток на височина 4–6 km [1]. До известна степен това правило е теоретично обосновано в работата на Кибель [2] при определени предположения. Практиката обаче показва, че прогнозите за преместването на вихрите с правилото на водещия поток са непълни, а в редица случаи даже и неудовлетворителни, дори и за ниските циклони и антициклони [1]. Причините за това са от различно естество, но поне една от тях е очевидна. А именно, неотчитането на влиянието на приземния граничен слой (ПГС) [3].

В настоящата работа ние разглеждаме влиянието на хоризонталните нееднородности в ПГС върху отклонението на приземните траектории на синоптичните вихри от правилото на водещия поток. Конкретната цел е качествена верификация на простите и нагледни правила за тези отклонения, произтичащи от теоретичните резултати на [4, 5]. Анализирани нееднородности са два типа – орографски и термични. Термичните отчитат локалната стратификация на ПГС и са представени с полето на дефекта на потенциалната температура между върха на ПГС и земята. В работата този параметър е наречен за краткост $\delta\theta$ -топография.

Верификацията се провежда чрез сравняване между действителното и очакваното отклонение на вихъра от водещия поток според формулираните в работата правила. За целта ние използваме статистически методи. На базата на обширен картов материал се проследяват приземните траектории на 28 синоптични вихъра от средиземноморски тип през периода 01/01/2004–12/12/2013. За всеки от последователните основни синоптични срокове се определя наличието или посоката на действителните отклонения на центъра на вихъра от водещия поток и наличието или очакваната посока на отклонения поради влиянието на орографията и $\delta\theta$ -топографията. В крайна сметка ние формираме един масив от данни, чиито редове са отделните наблюдения, а стълбовете са действителните и очакваните отклонения, поотделно от орографията и от $\delta\theta$ -топографията, кодирани в три нива: без отклонение, отклонение надясно и отклонение наляво. Самата верификация се провежда със специфични за случая дескриптивни и тестови статистически техники за изследване на зависимостите между нивата на споменатите по-горе три факторни променливи.

Съдържанието на работата е, както следва. В секция 2 се привежда теоретичната основа и се формулират правилата за отклоненията на вихрите от водещия поток поради влиянието на орографията и $\delta\theta$ -

топографията. В секция 3 се описват използваните данни и тяхната предварителна обработка. В секция 4 използваната методология на обработката се илюстрира с два конкретни примера. Самият статистически анализ, а с това и верификацията на нашите правила, са изложени в секция 5. Обсъждането на получените резултати е в заключителната секция 6.

2. ОТКЛОНЕНИЕ НА СИНОПТИЧНИТЕ ВИХРИ ОТ ВОДЕЩИЯ ПОТОК ПОРАДИ ОРОГРАФСКО-ТЕРМИЧНИТЕ НЕЕДНОРОДНОСТИ В ПГС

Сираков [4, 5] предлага аналитичен израз за отклоненията на траекториите на приземните центрове на синоптичните вихри поради влиянието на орографско-термичните и адвективно-бароклини хоризонтални нееднородности в ПГС. Самата формула се базира върху кинематичното условие за екстремален геопотенциал в центъра на вихъра, връзката между геопотенциалната тенденция и индуцираните от ПГС вертикални скорости [6] и интегрална параметризация на генерираните вертикални скорости на върха на хоризонтално нееднородния ПГС [4, 5, 7]. В случая само на орография и $\delta\theta$ -топография опростените за синоптични мащаби формули са

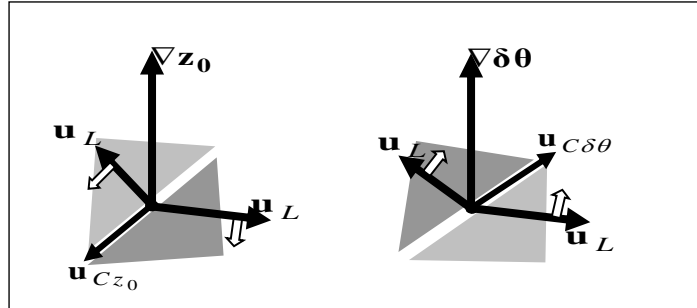
$$\mathbf{u}_C = \mathbf{u}_L + \mathbf{u}_{Cz_0} + \mathbf{u}_{C\delta\theta} \quad (1)$$

и

$$\mathbf{u}_C = \mathbf{u}_L + \mathbf{u}_{Cz_0} + \mathbf{u}_{C\delta\theta} \quad (2)$$

където \mathbf{u}_C е сумарната скорост на отместването на центъра на вихъра, а \mathbf{u}_{Cz_0} и $\mathbf{u}_{C\delta\theta}$ са скоростите поради влиянието на орографията $z = z_0(x,y)$ и $\delta\theta$ -топографията, съответно. В (1) и (2) $c_0 \approx 0.3$, f е параметърът на Кориолис, g – ускорението на силата на тежестта, \mathbf{e}_z – единичният вектор в локалния зенит, константите a и b са строго положителни, а a_1 и b_1 – строго отрицателни.

Тъй като засега конкретните стойности на константите a , b , a_1 и b_1 не са известни, то директното оперативно прилагане на теоретичните резултати (1) и (2) е силно затруднено. На тази основа може обаче да се предложат прости качествени правила за отклоненията на вихрите от водещия поток. Тези правила са илюстрирани на фиг. 1. Левият и десният панел визуализират влиянието на орографията и $\delta\theta$ -топографията. Помасивните черни стрелки са водещият поток \mathbf{u}_L , по-тънките са допълнителните скорости \mathbf{u}_{Cz_0} и $\mathbf{u}_{C\delta\theta}$, дължащи се съответно на орография-



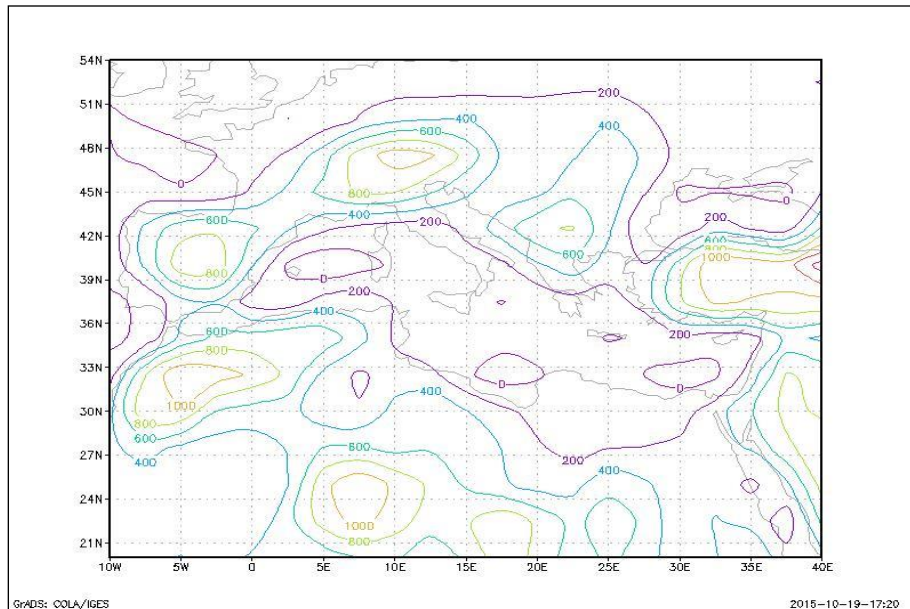
Фиг. 1. Влияние на орографията (ляво) и $\delta\theta$ -топографията (дясно) върху движението на приземните центрове на синоптичните вихри

та и $\delta\theta$ -топографията. По-дългите незапълнени стрелки са градиентите, а по-широките и по-късите, дават посоката на отклонението на действителната скорост на центъра на вихъра C от водещия поток. В съответствие с (1) и (2) и знаците на параметрите a , b , a_1 и b_1 , \mathbf{u}_{Cz_0} е задължително наляво, в противоположна посока на градиента на орографията, а $\mathbf{u}_{C\delta\theta}$ – надясно и по посока на градиента на $\delta\theta$ -топографията. Освен това, докато носещата права на \mathbf{u}_{Cz_0} е по-близо до изолиниите, отколкото до градиента на орографията, то теоретичният ъгъл между носещата права на $\mathbf{u}_{C\delta\theta}$ и градиента на $\delta\theta$ -топография е $\pi/4$.

От фиг. 1 лесно можем да формулираме следните правила. И в двата случая имаме по една разделителна линия, а именно линията на орографската скорост и линията на $\mathbf{u}_{C\delta\theta}$. При орографията, ако водещият поток е надясно от разделителната линия, т.е. в по-тъмната половина, отклонението на траекторията от водещия поток е също надясно, ако потокът е наляво, в по-светлата област, то и отклонението е наляво. При $\delta\theta$ -топографията е обратно, когато водещият поток е надясно от разделителната линия, отклонението е наляво и обратно.

3. ДАННИ И МЕТОДОЛОГИЯ

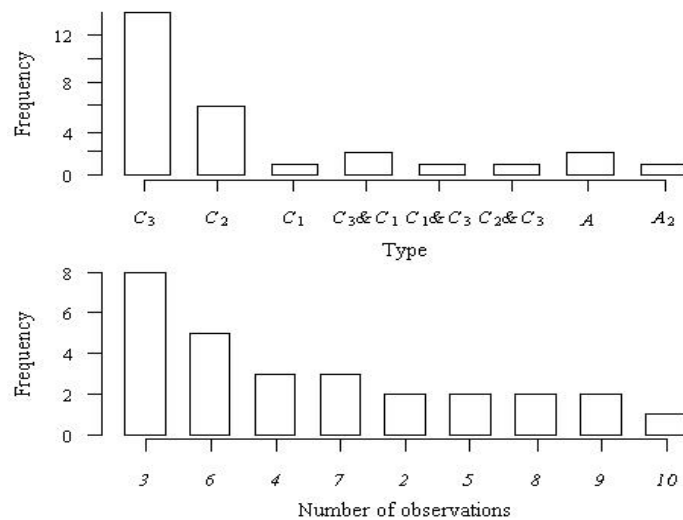
В работата са използвани следните данни за релефа: (i) географска карта на Европа в мащаб 1:19500000 и (ii) карта на геопотенциалната височина на орографията [8]. Фигура 2 представя полето на орографията в



Фиг. 2. Поле на орографията в района 21°N – 54°N и 10°W – 40°E

района 21°N – 54°N и 10°W – 40°E . Дискретизацията е $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$. Контурните линии са приземните изохипси. Единицата е [gpdm]. Ясно очертани са Пиринейте, Алпите и планинските масиви на Балканския полуостров.

Използваните синоптични карти са на American service for meteorology forecasts (GFS) през метеорологичните интернет страници [9] и [10]. Самите карти са, както следва: (i) карти на приземното барично поле за Северното полукълбо, (ii) карти на абсолютната топография с токови линии и скорост на вятъра на нивото 500 hPa за Северното полукълбо, (iii) карти на абсолютната топография и температурата на нивото 850 hPa за Северното полукълбо. От [9] са използвани данните за полето на приземната потенциална температура в основните синоптични срокове. С помощта на тези данни ние анализираме 28 синоптични вихъра – 25 циклона и 3 антициклона през периода 01/01/2004–12/12/2013. Разглежданата област е между 30°N – 54°N и 10°W – 40°E . Броят на наблюденията върху всичките вихри е 145. Анализираните барични образувания са от средиземноморски тип, като зоната от особен интерес е Балканският полуостров, през който минават повечето вихри.



Фиг. 3. Класификация на вихрите по подтипове (горе) и брой на наблюденията върху тях (долу)

Следвайки [11], ние класифицираме вихрите по подтипове, като за всеки вихър даваме и броя на наблюденията върху него. Резултатите от тази класификация са представени на фиг. 3. По хоризонталните оси са категориите, а по вертикалните – броят на вихрите. Както се вижда от горния панел, най-много – 14, са средиземноморските циклони от подтип C₃, следвани от подтип C₂. Категориите с две букви са за случаите, в които вихърът променя своя подтип. При двата антициклона, означени с A, бяхме затруднени да определим техния подтип. От долния панел на фиг. 3 се вижда, че най-много – 8, са вихрите с три последователни наблюдения, следвани от петте вихъра с 6 наблюдения. Имаме и един вихър с 10 последователни наблюдения.

Методиката на обработка и анализ на описания базов материал е, както следва:

(i) По приземните и височинните синоптични карти се идентифицира съответният синоптичен вихър и се проследява движението на неговия приземен център в основните синоптични срокове, т.е. през 6 h.

(ii) Върху географската и топографската карта се нанасят последователните положения на приземния център на вихъра и точките се свързват с начупена линия, визуализираща неговата приземна траектория.

(iii) От височинните карти се определя водещият поток на ниво 500 hPa и се нанася в точките на последователните положения на центъра на вихъра върху географската и топографската карта.

(iv) Всяко от последователните наблюдения се класифицира с факторната променлива с три нива: отклонение на траекторията от водещия поток надясно, наляво и без отклонение.

(v) Изчислява се потенциалната температура на ниво 850 hPa по формулата $\theta_{850} = T_{850}(1000/850)^{0.291}$, където T_{850} е абсолютната температура на ниво 850 hPa, и се определя полето на $\delta\theta$ -топографията по формулата $\delta\theta = \theta_{850} - \theta_{2m}$, където θ_{2m} е приземната потенциална температура, взета от [9].

(vi) Изолиниите на орографията и $\delta\theta$ -топографията се нанасят върху картите в района около последователните положения на центъра на вихъра, т.е. през 6 h. Мрежата е $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

(vii) Всяко от последователните наблюдения се класифицира по още две факторни променливи с по три нива. Те са свързани с очакваните отклонения поради влияние на орографията и $\delta\theta$ -топографията на центровете на вихрите съгласно правилата, илюстрирани с фиг. 1. Нивата са: очаквано отклонение надясно, наляво и без отклонение.

По описаната методика ние формираме един 145×3 масив от данни. Редовете са отделните наблюдения, а стълбовете са въведените три факторни променливи.

4. ДВА ИЛЮСТРАТИВНИ ПРИМЕРА

Тук ще приведем два конкретни примера на циклон и антициклон, за да илюстрираме описаната по-горе методика. Целта е да се демонстрират условията, при които влиянието на орографията или $\delta\theta$ -топографията може да се пренебрегне или трябва да се отчете.

Първият пример е средиземноморският циклон на 27–29/12/2009. Фиг. 4 представя неговата приземна траектория. Водещият поток е на нивото 500 hPa. Траекторията е проследена около 54 h. Генезисът на циклона е в адриатическото крайбрежие на Италия. Първоначално той се движи през Балканския полуостров, но между точките t_4 и t_5 , вместо да продължи с водещия поток на североизток към Стара планина, циклонът се отклонява на юг към полуостров Халкидики, Гърция. По-нататък циклонът вече е с водещия поток на североизток към Черно море, край западния бряг на Черно море и на североизток към Русия, където се запълва. Ние фокусираме нашето внимание върху срока 28/12/2009 00 UTC. На фиг. 4 това е точката t_5 . В тази точка циклонът се премества с водещия поток.

Синоптичната обстановка на 28/12/2009 00 UTC е показана на фиг. 5. Тази фигура представя абсолютната топография на нивото 500 hPa, относителната топография за нивата 1000 hPa и 500 hPa и приземното налягане. В черно е абсолютната топография, белите криви са приземното налягане. В полето на относителната топография зоните с адвекция на топлина или студ са в скалата на сивото.

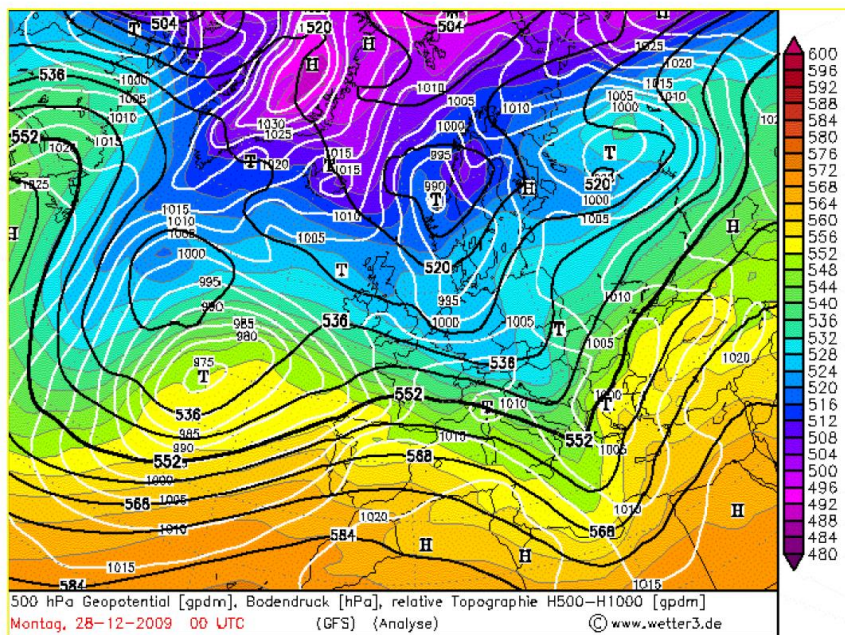


**Траектория циклон,
27.-29.12.09**

- t1=27.12.09 / 00 UTC
- t2=27.12.09 / 06 UTC
- t3=27.12.09 / 12 UTC
- t4=27.12.09 / 18 UTC
- t5=28.12.09 / 00 UTC
- t6=28.12.09 / 06 UTC
- t7=28.12.09 / 12 UTC
- t8=28.12.09 / 18 UTC
- t9=29.12.09 / 00 UTC
- t10=29.12.09 / 06 UTC

- Приземна траектория
- Водещ поток на 500 hPa

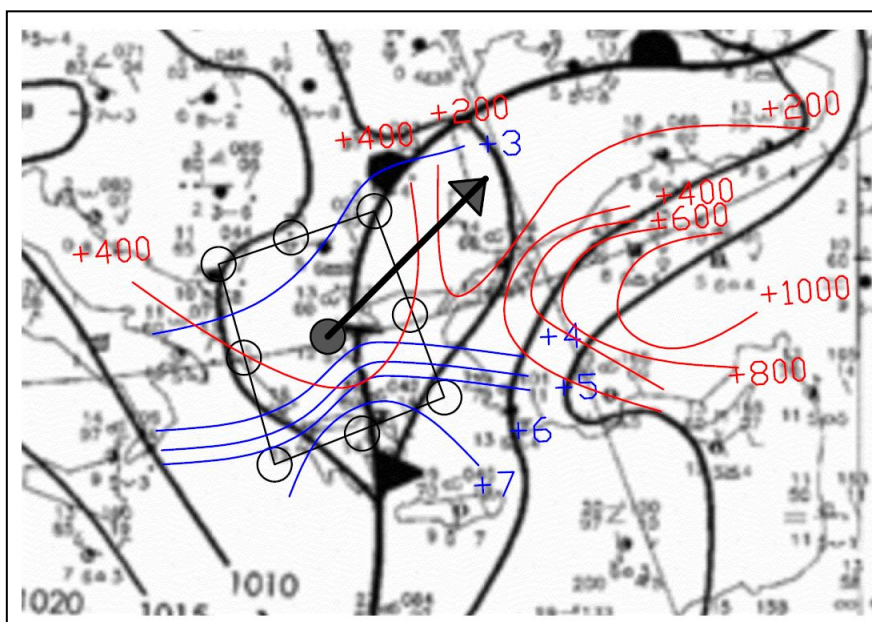
Фиг. 4. Приземна траектория на средиземноморския циклон 27–29/12/2009



Фиг. 5. Карта на абсолютната топография на ниво 500 hPa , относителната топография за нивата 1000 hPa и 500 hPa и приземното налягане на 28/12/2009 00 UTC

Както се вижда от полето на приземното налягане и полето на абсолютната топография, на ниво 500 hPa имаме добре изразен циклон над Балканския полуостров с център в точката (22.5°E, 40°N). Водещият поток на това ниво е на североизток. Вижда се също така и разположението на околните фронтове.

Фиг. 6 представя полетата на орографията и $\delta\theta$ -топографията върху картата за приземното налягане на 28/12/2009 00 UTC. Плътните линии са орографията и $\delta\theta$ -топографията. Единиците са [gpdm] и [K]. Запълненият кръг е центърът на вихъра, а плътната черна стрелка показва посоката на водещия поток. По-тънките линии маркират центрирания във вихъра $5^\circ \times 5^\circ$ квадрант и по данните от него се пресмятат градиентите на орографията и $\delta\theta$ -топографията. Тук този квадрант е с върхове в точките (20°E, 37.5°N), (25°E, 37.5°N), (25°E, 42.5°N) и (20°E, 42.5°N).

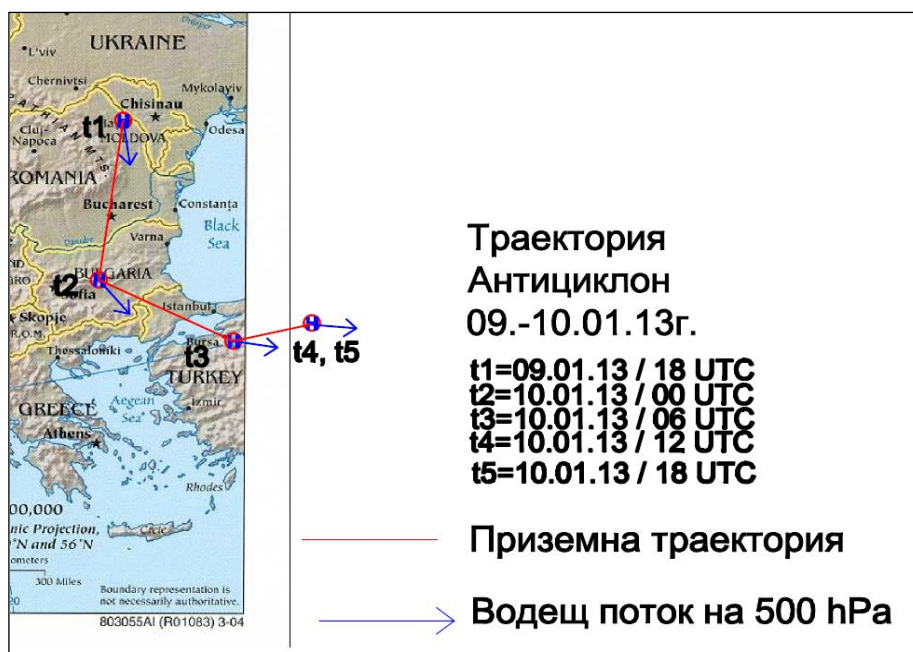


Фиг. 6. Полета на орографията и $\delta\theta$ -топографията върху картата на приземното барично поле в района на циклона на 28/12/2009 00 UTC

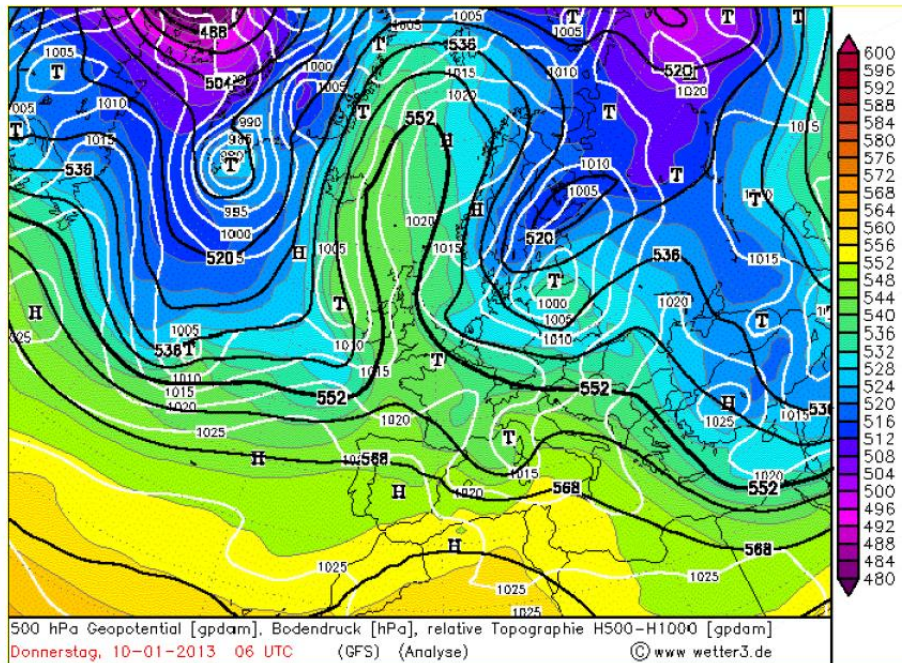
В настоящото изследване ние фиксираме долни прагове от 100 gpdm / 100 km за градиента на орографията и 1 K / 250 km за градиента на $\delta\theta$ -топографията, под които влиянието на тези два фактора върху траекторията на синоптичния вихър може да се пренебрегне. Завръщането към фиг. 6 показва, че в случая градиентите на орографията и $\delta\theta$ -топографията са под праговите стойности и ефектът от тях е пренебрежим.

В крайна сметка анализираното наблюдение се кодира като: отклонение от водещия поток – без отклонение, очаквано отклонение вследствие на орографията – без отклонение, и отклонение от $\delta\theta$ -топографията – без отклонение.

Като втори илюстративен пример ще разгледаме антициклона 09–11/01/2013. Фиг. 7 представя неговата приземната траектория. Траекторията е проследена около 30 h. В началото антициклонът е с два центъра – над Румъния и България, минава през Балканския полуостров на юг, след това на югоизток, пресичайки съответните планински масиви. Понататък антициклонът се движи от Босфора към Мала Азия през планинските масиви на вътрешната част на Турция. Към края на периода той вече е почти стационарен. През цялото време движението е със сравнително малки отклонения от водещия поток. Ние ще фокусираме нашето внимание върху срока 10/01/2013 06 UTC. На фиг. 7 това е точката t_3 . В тази точка антициклонът леко се отклонява наляво от водещия поток.



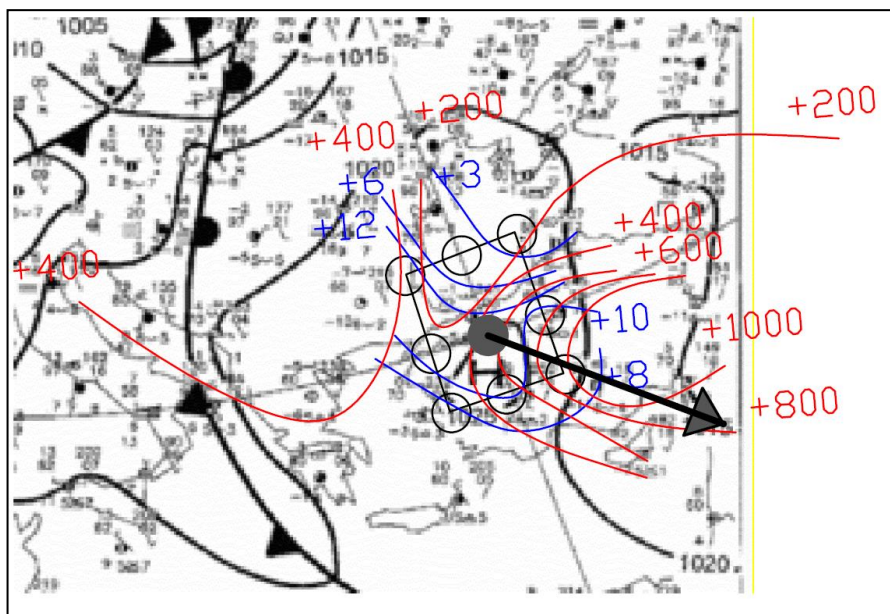
Фиг. 7. Приземна траектория на антициклона 09–10/01/2013



Фиг. 8. Карта на абсолютната топография на ниво 500 hPa, относителната топография за нивата 1000 hPa и 500 hPa и приземното налягане на 10/01/2013 06 UTC

Синоптичната обстановка на 10/01/2013 00 UTC е илюстрирана на фиг. 8, която представя абсолютната топография на ниво 500 hPa, относителната топография за нивата 1000 hPa и 500 hPa и приземното налягане. В черно е абсолютната топография, белите криви са приземното налягане. В полето на относителната топография в скалата на сивото са визуализирани зоните с адвекция на топлина или студ. Както се вижда, над западна Турция имаме добре изразен антициклон с център в (30°E, 40°N). Водещият поток е на югоизток.

Фиг. 9 представя полетата на орографията и $\delta\theta$ -топографията върху картата за приземното налягане на 28/12/2009 00 UTC. В случая квадрантът, по данните в който се пресмятат градиентите, е с върхове в точките (27.5°E, 37.5°N), (32.5°E, 37.5°N), (32.5°E, 42.5°N) и (27.5°E, 42.5°N).



Фиг. 9. Полета на орографията и $\delta\theta$ -топографията върху картата на приземното барично поле и района на антициклона на 10/01/2013 06 UTC

Оценките за големината на градиентите на орографията и $\delta\theta$ -топографията са съответно 300 gpdm /100 km и 2 K / 250 km. Двата градиента са над праговите стойности и следователно и двата фактора действат едновременно. Като направление градиентът на орографията е на изток-югоизток и съгласно левия панел на фиг.1 орографията отклонява приземния център на антициклона наляво от водещия поток. Градиентът на $\delta\theta$ -топографията е на север-северозапад и съгласно десния панел на фиг.1 центърът на вихъра се отклонява наляво. Анализираното наблюдение се кодира като: отклонение на вихъра от водещия поток – наляво, очаквано отклонение вследствие на орографията – наляво, и отклонение от $\delta\theta$ -топографията – наляво.

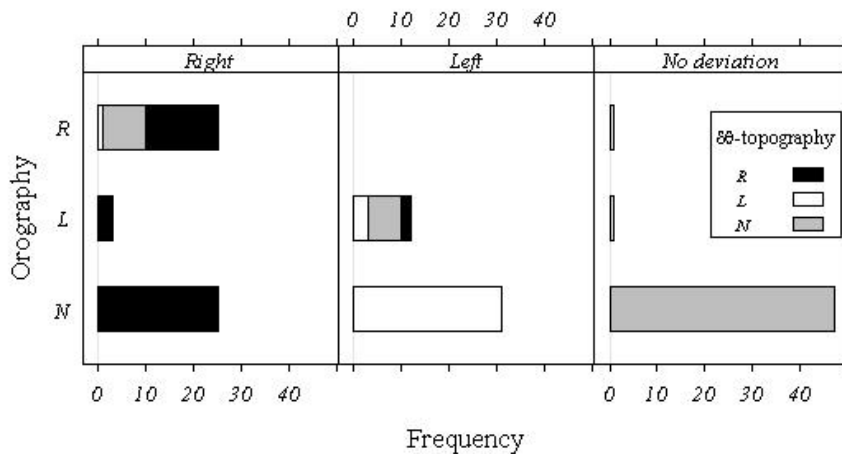
5. СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ

В секция 3 бе формирана една 145×3 матрица от данни. Редовете на матрицата дават информацията за всяко от 145-те наблюдения върху вихрите. Стълбовете са трите факторни променливи. Първата променлива е наблюдаваното отклонение на траекторията на вихъра от посоката на водещия поток, категоризирано в три нива: отклонение надясно, отклонение наляво и без отклонение. Другите две променливи са свързани с очакваните отклонения на центровете на вихрите поради влияние съответно на орографията и $\delta\theta$ -топографията, оценени по правилата, илюстрирани на фиг. 1. Категоризацията отново е на три нива: отклонение от водещия поток надясно, наляво и без отклонение.

Ние класифицираме наблюденията по нивата на трите факторни променливи: фактическо отклонение на центъра на вихъра от направлението на водещия поток, очаквано отклонение вследствие на орографията и очаквано отклонение вследствие на $\delta\theta$ -топографията. Тъй като всяка от променливите е с три нива, резултатът е една $3 \times 3 \times 3$ честотна таблица. По осите на този тримерен масив са трите факторни променливи, а във всяка от 27-те клетки е броят на съответните наблюдения.

Фиг. 10 представя категоризираната стълбична диаграма на честотната таблица. Трите панела на диаграмата съответстват на нива на фактора наблюдавано отклонение на вихъра – отклонение надясно (*Right*), отклонение наляво (*Left*) и без отклонение (*No deviation*). По хоризонталните оси е броят на вихрите. По вертикалните оси са нивата на фактора отклонение вследствие на орографията – отклонение от водещия поток надясно (*R*), отклонение наляво (*L*) и без отклонение (*N*). Натрупванията в стълбовете на диаграмата в черно, бяло и сиво визуализират нивата на фактора отклонение вследствие на $\delta\theta$ -топографията, а именно: отклонение от водещия поток надясно (*R*), отклонение наляво (*L*) и без отклонение (*N*).

Прегледът на диаграмата води до следните заключения. При реално отклонение на вихъра надясно по отношение на влиянието на орографията всичките случаи практически се разпределят почти поравно между очаквано отклонение надясно и без отклонение. Както се вижда обаче, при липсата на орографско въздействие отклонението от $\delta\theta$ -топографията е изцяло надясно. Това са главно ситуациите, в които вихрите са над морето.



Фиг. 10. Класификация на наблюденията по нивата на факторите отклонение на вихъра, отклонения вследствие на орографията или $\delta\theta$ -топографията

При орографско отклонение надясно в повече от половината случаи $\delta\theta$ -топографията също отклонява надясно, а в останалата половина тя не оказва влияние с изключение на единствения случай, когато действа наляво. Що се отнася до трите случая на орографско отклонение наляво, то отклонението от $\delta\theta$ -топографията е изцяло надясно.

При реално отклонение на вихъра наляво нещата са сравнително по-прости. В извадката няма нито един случай на орографско отклонение надясно, а при липсата на орографско въздействие $\delta\theta$ -топографията винаги отклонява наляво. Ще отбележим отново, че това са главно ситуациите, в които вихрите са над морето. Що се отнася до орографското отклонение наляво, то $\delta\theta$ -топографията или не въздейства, или отклонява наляво и само в два от случаите – надясно.

С изключение само на два случая при движение на вихъра заедно с водещия поток влиянието както на орографията, така и на $\delta\theta$ -топографията, липсва. Що се отнася до изключенията, то в единия от случаите орографията отклонява надясно, а $\delta\theta$ -топографията – наляво, а в другия и двете отклонения са в една посока – наляво.

Да дадем още едно, в известен смисъл алтернативно представяне на нашите данни. За целта ние обединяваме очакваните отклонения от орографията и $\delta\theta$ -топографията в една нова факторна променлива – съвместно влияние, която кодираме с две букви – комбинациите на първоначалните нива: *R* – отклонение от водещия поток надясно, *L* – наляво, и *N* – без отклонение. Първата позиция е за отклонението

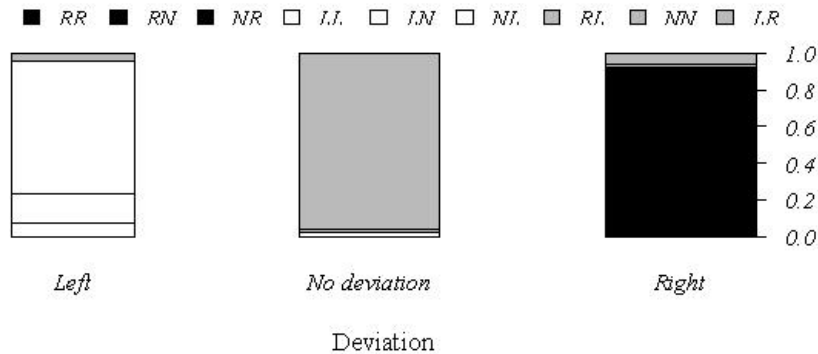
вследствие на орографията, втората – вследствие на $\delta\theta$ -топографията. Например *LL* означава, че както орографията, така и $\delta\theta$ -топографията отклоняват наляво. Ние класифицираме наблюденията по деветте нива на новата факторна променлива и нивата на фактора действително отклонение на вихъра от водещия поток с трите нива отклонение надясно (*Right*), отклонение наляво (*Left*) и без отклонение (*No deviation*).

Резултатите са сумирани в честотната таблица 1. В една клетка на таблицата е броят на наблюденията, които попадат едновременно в съответната двойка нива на двата фактора. В най-десния стълб и най-долния ред са сумите по редовете и стълбовете на таблицата.

Таблица 1. Класификация на наблюденията по факторите реално отклонение и съвместно влияние на орографията и $\delta\theta$ -топографията

	Deviation			<i>Total</i>
	<i>Right</i>	<i>Left</i>	<i>No deviation</i>	
<i>RR</i>	15	0	0	15
<i>RN</i>	9	0	0	9
<i>NR</i>	25	0	0	25
<i>LL</i>	0	3	1	4
<i>LN</i>	0	7	0	7
<i>NL</i>	0	31	0	31
<i>RL</i>	1	0	1	2
<i>NN</i>	0	0	47	47
<i>LR</i>	3	2	0	5
<i>Total</i>	53	43	49	145

Ние представяме табл. 1 графично със стълбичната диаграма на фиг. 11. По хоризонталната ос на фигурата са трите категории на фактора реално отклонение на вихъра. По вертикалната ос са числата от 0 до 1. Както виждаме, трите стълба са с еднаква единична височина. Всеки от тях е разделен на сектори, чиято височина е равна на относителния брой на наблюденията от съответната категория на фактора съвместно влияние на орографията и $\delta\theta$ -топографията, нормирани с дадения в последния ред брой наблюдения от съответната категория на фактора реално отклонение на вихъра.



Фиг. 11. Връзка на наблюдаваните отклонения на вихъра с нивата на фактора съвместно влияние на орографията и $\delta\theta$ -топографията

Следователно височината на един сегмент е оценка на условната относителна честота за реализация на дадена категория на фактора съвместно влияние при дадено действително отклонение на вихъра. Широчината на даден стълб е пропорционална на относителния брой случаи в съответната категория на фактора реално отклонение, като нормировката е с общия брой наблюдения – 145. Следователно широчината на един стълб визуализира относителната честота за реализация на дадена категория на фактора реално отклонение. И накрая, ние допълнително прегрупираме цветово нивата на фактора съвместно влияние. Категориите *RR*, *RN* и *NR* са в черно *LL*, *LN* и *NL* – в бяло, и *RL*, *NN* и *LR* – в сиво.

Както се вижда от фиг. 11, стълбът *Left* е по-тесен от останалите два стълба, които от своя страна са с приблизително еднаква широчина. Това е в съответствие с последния ред на табл. 1, от който се вижда, че броят на отклоненията на вихрите наляво са с около 20% по-малко от тези в останалите две категории.

Прегледът на фиг. 11 показва, че стълбът *Right* е запълнен почти изцяло в черно, т.е. с категориите *RR*, *RN* и *NR*. Те заемат около 92% от неговата площ. Сивият цвят на категориите *LR* и *RL* запълва останалите 8%. Останалите четири категории липсват. Налице са достатъчно основания за извода, че отклоненията на вихъра надясно от водещия поток са свързани с очаквани отклонения от орографията и $\delta\theta$ -топографията или и двете надясно или с едно отклонение надясно при липса на въздействие на другия фактор. Почти пренебрежимият брой изключения, при които орографията и $\delta\theta$ -топографията действат в различни посоки, може да бъде обяснен като доминиране на фактора, отклоняващ надясно.

Както се вижда, стълбът *Left* е запълнен почти изцяло в бяло, т.е. с категориите *LL*, *LN* и *NL*. Площта, съответстваща на тях, е около 95%. Сивият сектор от 5% е на категорията *LR*. Останалите пет категории липсват. Имаме достатъчно основания за извода, че отклоненията на вихъра наляво от водещия поток са свързани с очаквани отклонения от орографията и $\delta\theta$ -топографията или и двете наляво или с едно отклонение наляво при липса на въздействие на другия фактор. Що се отнася до двата случая *LR*, то те се обясняват с доминиращото влияние на орографията наляво в сравнение с отклонението надясно на $\delta\theta$ -топографията.

И накрая, стълбът *No deviation* е практически в сиво. Категорията *NN* запълва 96% от цялата площ. Останалите 4% се разделят между *RL* и *LL*. Всички други категории липсват. Можем да заключим, че вихърът се премества с водещия поток основно при липса на въздействие както на орографията, така и на $\delta\theta$ -топографията. Едното изключение *RL*, когато орографията и $\delta\theta$ -топографията действат в различни посоки, намира своето обяснение като компенсиране на ефектите от двете противоположни въздействия. Що се отнася до единствения случай *LL*, то ще напомним, че освен орографията и $\delta\theta$ -топографията върху траекториите на синоптичните вихри оказва влияние и адвективно-бароклинната хоризонтална нееднородност на ПГС. В тази работа този ефект не се разглежда, защото той обикновено е значително по-слаб от другите два. Именно с него обаче ние свързваме случая *LL*, когато той би трябвало да компенсира отклоняващото влияние на орографията и $\delta\theta$ -топографията.

Да резюмираме. От всичките 145 случая в 94% от тях орографията и $\delta\theta$ -топографията действат в посоката на наблюдаваното отклонение на вихъра или, ако единият от тези фактори не оказва влияние, то другият е в посока на действителното отклонение. Останалите 6% от случаите са до известна степен проблематични. При тях имаме отклонение на вихъра, но орографията и $\delta\theta$ -топографията действат в различни посоки. Те обаче имат своето обяснение като компенсиране на двете въздействия или доминация на едното от тях в посока на наблюдаваното отклонение на вихъра. И накрая, имаме едно-единствено наблюдение, за чийто анализ трябва евентуално да се привлече адвективно-бароклинната хоризонтална нееднородност.

Основната цел на тази секция е да се оцени доколко действителното отклонение на вихъра от водещия поток се обуславя от влиянието на орографията и $\delta\theta$ -топографията. За целта ние разполагаме с извадка от 145 синхронни наблюдения върху трите факторни променливи: фактическо отклонение на центъра на вихъра от направлението на водещия поток, очаквано отклонение вследствие на орографията и отклонение вследствие на $\delta\theta$ -топографията. Проведеният досега дескриптивен анализ даде убедителни основания за положителен отговор на поставения въпрос. Да продължим с по-строг, формално-статистически анализ.

Ако орографията и $\delta\theta$ -топографията не оказваха влияние върху траекторията на вихъра, то това би трябвало да означава, че променливата действително отклонение, от една страна, и двумерната променлива отклонения вследствие на орографията и $\delta\theta$ -топографията, от друга, са статистически независими случайни величини. Формулиран така, този проблем може да се третира с подходяща статистическа техника. От не по-малък интерес са и причините за евентуална статистическа зависимост.

И така, ние имаме хипотезата за независимост на действително отклонение от отклоненията вследствие на орографията и $\delta\theta$ -топографията. Да тестваме глобално тази хипотеза като нулева. За целта, следвайки Hothorn *et al.* [12] и Hothorn *et al.* [13], ние ще използваме техниката на т. нар. пермутационни тестове за независимост. Резултатите от процедурата са, както следва. Стойността на χ^2 -статистиката е 273.1774 при 16 степени на свобода и p -стойност – 2.2×10^{-16} . При тази p -стойност имаме повече от достатъчно основания да отхвърлим глобалната нулева хипотеза за независимост. Налице е значително нарушение на независимостта на действителното отклонение на вихъра и отклоненията вследствие на комбинираните орографията и $\delta\theta$ -топографията.

В светлината на проведените вече дескриптивни разглеждания може да се очаква, че значителните отклонения от независимост са обусловени от сравнително малък брой клетки в честотната табл. 1. Следвайки рекомендациите в Hothorn *et al.* [12], ние използваме т. нар. многомерни линеаризирани статистики \mathbf{T} , за да анализираме вътрешната структура на връзките между нивата на факторите действително отклонение на вихъра и отклонения вследствие на комбинираните орография и $\delta\theta$ -топография.

Таблица 2. Стойности на линейната стандартизирана статистика \mathbf{T} при $maxT$ -тест за независимост

	Deviation		
	<i>Right</i>	<i>Left</i>	<i>No deviation</i>
<i>RR</i>	5.3705	-2.6466	-2.9122
<i>RN</i>	4.0671	-2.0043	-2.2054
<i>NR</i>	7.2163	-3.5563	-3.9131
<i>LL</i>	-1.5341	2.0066	-0.3757
<i>LN</i>	-2.0513	4.1625	-1.9309
<i>NL</i>	-4.7495	9.6377	-4.4707
<i>RL</i>	0.3963	-0.9214	0.4863
<i>NN</i>	-6.3076	-5.3957	11.6320
<i>LR</i>	1.1042	0.5136	-1.6202

Както трябваше да се очаква, нулевата хипотеза за глобална независимост отново се отхвърля убедително при стойност на статистиката $maxT = 11.632$ и съответната p -стойност – 2.2×10^{-16} .

Таблица 2 представя стойностите на многомерната стандартизирана статистика **T**. Числата в нея би трябвало да се интерпретират подобно на остатъците на Pearson спрямо хипотезата за независимост в една честотна таблица. Прегледът на табл. 2 води до следните изводи. Отклоненията от независимост са обусловени от големия, в сравнение с очакваното, брой наблюдения от тип *RR*, *RN* в категорията *Right*. Излишък имаме също така на *LN* в *Left*. Категориите *NR*, *NL* и *NN* имат сходна структура относно нивата на фактора реално отклонение. За *NR* имаме значително превишаване на случаите от категорията *Right* и недостиг в категориите *Left* и *No deviation*. При *NL* превишаването е в *Left*, а недостигът в *Right* и *No deviation*, а при *NN* излишъкът е в *No deviation* и недостигът – в *Right* и *Left*. Що се отнася до категориите *LL*, *RL* и *LR*, то при тях отклоненията от независимост са незначителни.

Съвместното разпределение на елементите на табл. 2 може да се апроксимира с едно 27-мерно гранично нормално разпределение. Това позволява да се пресметнат съответните p -стойности. За целта се използва т. нар. едностъпкова $maxT$ -процедура [12]. Таблица 3 дава тези p -стойности. С по-черен шрифт са маркирани клетките, за които се отхвърля нулевата хипотеза за независимост. Интерпретацията е аналогична на тази на елементите на стандартизираната честотна таблица. А именно, при реално отклонение на вихъра надясно хипотезата за независимост се отхвърля поради превишаването на случаите *RR*, *RN* и *NR* и по-малкото случаи *NL* и *NN*.

Таблица 3. p -Стойности при $maxT$ -тест за независимост

	Deviation		
	<i>Right</i>	<i>Left</i>	<i>No deviation</i>
<i>RR</i>	2.5×10^{-6}	0.18	0.08
<i>RN</i>	0.0013	0.63	0.47
<i>NR</i>	9.5×10^{-12}	0.0098	0.0024
<i>LL</i>	0.93	0.63	0.99
<i>LN</i>	0.59	8.326×10^{-4}	0.69
<i>NL</i>	5.1×10^{-5}	0.0000	0.0002
<i>RL</i>	1.00	0.99	0.99
<i>NN</i>	5.9×10^{-9}	1.5294×10^{-6}	0.0000
<i>LR</i>	0.99	0.99	0.89

При отклонение на вихъра наляво *NR* и *NN* не достигат, а *LN* и *NL* са в излишък. И накрая, при липсата на отклонения от водещия поток категорията *NN* е представена много над очакваното за независимост, а *NR* и *NL* много по-слабо.

Можем да резюмираме. Както дескриптивните разглеждания, така и статистическите тестове убедително подкрепят извода, че отклонението на един вихър надясно, наляво или без отклонение от водещия поток се определя от влиянието на орографията и $\delta\theta$ -топографията в същата посока или, когато единият от двата фактора действа в необходимата посока, то другият е неутрален.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа изследвахме отклонението на движението на центровете на синоптичните вихри от правилото на водещия поток вследствие на хоризонталните нееднородности на орографията и $\delta\theta$ -топографията.

Като начало бяха формулирани прости и нагледни правила за тези отклонения, базирани на общите теоретични резултати. По-нататък бяха описани използваните изходни данни и тяхната предварителна обработка. Данните включваха географски, приземни и височинни метеорологични карти и данни за приземната потенциална температура, свързани с наблюденията върху 28 синоптични вихъра в района 30°N , 54°N и 10°W , 40°E през периода 01/01/2004–12/12/2013. Методиката на обработка се състоеше от седем основни стъпки, които бяха илюстрирани подробно с два конкретни примера. В крайна сметка ние формирахме една масив от данни за наблюденията върху вихрите в главните синоптични срокове. Масивът включваше трите факторни променливи – фактическо отклонение на траекторията на вихъра от посоката на водещия поток и очаквани отклонения поради влиянието на орографията или $\delta\theta$ -топографията, оценени по формулираните вече правила. Категоризацията на факторите е на три нива: отклонение надясно, наляво и без отклонение.

Ние проведохме едно статистическо изследване върху съответствието на очакваните отклонения съгласно предложените правила и действителните отклонения на траекториите на синоптичните вихри от правилото на водещия поток. Процедурата стартира с класификация на наблюденията по нивата на трите факторни променливи. Анализът на графичното представяне на получената тримерна честотна таблица показва, че на дескриптивно ниво имаме удовлетворително съответствие между очакваните според теорията и фактически наблюдаваните отклонения на вихрите. Този резултат бе потвърден и от друго, алтернативно представяне на данните, в което отклоняващото влияние на орографията или $\delta\theta$ -топографията бяха обединени в един фактор.

Работата завърши с формален статистически тест на нулевата хипотеза, че факторните променливи, свързани с орографията и $\delta\theta$ -топографията, и фактическото отклонение на вихрите от водещия поток са статистически независими. За целта ние използвахме техниката на т. нар. пермутационни тестове за независимост. Тестовите показаха, че имаме повече от достатъчно основания да отхвърлим глобалната нулева хипотеза за независимост. Процедурата бе продължена с анализ на вътрешната структура на връзките между нивата на факторите действително отклонение на вихъра и отклоненията вследствие на комбинираните орография и $\delta\theta$ -топография. С помощта на специално конструирани за подобни случаи многомерни статистики ние в крайна сметка статистически убедително подкрепихме извода, че отклонението на един вихър надясно, наляво или без отклонение от водещия поток се определя от влиянието на орографията и $\delta\theta$ -топографията в същата посока или, когато единият от двата фактора отклонява в необходимата посока, а другият е неутрален.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зверев, А. С. Синоптическая метеорология. Ленинград, 1957.
- [2] Кибель, И. А. Применение к метеорологии уравнений механики бароклинной жидкости к метеорологии. *Известии АН СССР, Серия Геогр. и геофиз.*, 1940, **5**.
- [3] Palmen E, Newton C. Atmospheric Circulation Systems. New York, London, 1969.
- [4] Syrakov, E. A Generalized Approach for Studying the Horizontal Inhomogeneities in PBL in synoptic scale. *Zb. Meteorol. i Hidr. Rad.*, 1985, **12**, 200.
- [5] Сираков, Е. Атмосферен граничен слой – структура, параметризация, взаимодействия. София, 2011.
- [6] Марчук, Г. Н. Числены методы в прогнозе погоды. Ленинград, 1967.
- [7] Сираков, Е. О параметризации пограничного слоя атмосферы над орографской и термической нееднородной земной поверхности. В: Доклады на IX-та межд. конф. по метеор., Карпат С, 1979, 281.
- [8] Earth System Research Laboratory: NCEP/NCAR Reanalysis 1: Surface, geopotential height(hgt), www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html
- [9] Wetterzentrale - www.wetterzentrale.de, synoptic charts of American service for meteorology forecasts (GFS).
- [10] Wetter3.de - <http://www1.wetter3.de/>, synoptic analysis charts 2004-2013.
- [11] Типове време над България. *Трудове на Института по хидрология и метеорология*, том VII, 1960.
- [12] Hothorn, T., K. Hornik, M. A. van de Wiel, A. Zeileis. A Lego System for Conditional Inference. *The American Statistician*, 2006, **60**, 3, 257.
- [13] Hothorn, T., K. Hornik, M. A. van de Wiel, A. Zeileis. Implementing a class of permutation tests: The coin package. *Journal of Statistical Software*, 2008, **28**, 8, 1.