

ОСІННІ НИЗЬКІ СТРУМЕНІ НАД ПІВНІЧНО-ЗАХІДНИМ ПРИЧОРНОМОР'ЯМ

На основі даних радіозондування за десятирічний період охарактеризоване формування струминних течій нижніх рівнів восени 2001-2010 рр., їх структурні параметри та зв'язок зі стратифікацією температури, виявлені переважаючі синоптичні процеси утворення низьких течій та оцінений вплив адвекції температури на виникнення інтенсивного струменя у нижніх шарах тропосфери.

Ключові слова: струминна течія нижніх рівнів, інверсія температури.

Вступ. Вимоги безпеки економічної та іншої діяльності сучасного суспільства в нижньому двокілометровому шарі атмосфери, необхідність моніторингу рівня забруднення повітря і організації захисту населення у випадках техногенних і природних катастроф роблять актуальною проблему дослідження режиму температурно-вітрових аномалій. Однією з вказаних аномалій є струминна течія нижніх рівнів (СТНР), тобто пік швидкості вітру більший або рівний $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у межах граничного шару атмосфери (ГША), якщо зменшення швидкості вітру в 300-метрових шарах вище та нижче рівня максимуму не менше ніж на $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ [1]. Як відомо [1, 2], низькі струмені утворюються у різноманітних аеросиноптичних умовах, тому ретельний аналіз фізичних механізмів їх виникнення та погодних явищ, що супроводжують СТНР, є одним з важливих етапів вивчення цього феномена.

Мета дослідження – характеристика процесів виникнення струминних течій нижніх рівнів восени 2001-2010 рр. над Північно-Західним Причорномор'ям на прикладі ст. Одеса-ГМО та метеорологічних та циркуляційних умов утворення явища.

Для досягнення цієї мети розв'язані такі задачі:

- зроблена оцінка забезпеченості аерологічною інформацією ст. Одеса-ГМО;
- охарактеризована повторюваність та структура СТНР над Одесою;
- виявлено ступінь впливу характеру температурної стратифікації та синоптичних ситуацій на формування низько тропосферних течій;
- досліджений випадок формування інтенсивного фронтального СТНР.

Матеріали дослідження та отримані результати. Для дослідження режиму формування осінніх низькотропосферних течій над Одесою використані дані радіозондування ст. Одеса-ГМО у вересні, жовтні та листопаді 2001–2010 рр. у строк 00 UTC та синоптичні карти (приземна, АТ-925, 850, 700) з архіву пакета АРМСин. Протягом вказаного десятиріччя восени виконано 513 радіозондувань, що становило лише 56 % від нормативної кількості аерологічних спостережень (табл. 1). Аналіз аерологічної інформації за десятирічний період дозволяє зробити висновки щодо зміни забезпеченості даними з року в рік. Як видно з рис. 1, найкращою за осінній період у 2001-2010 рр. вона виявлялася протягом всіх місяців у 2001-2002 рр. - радіозонди випускалися у 80–90 % днів, а максимум припадав на листопад – 87 і 97 %. Також якісне інформаційне забезпечення відзначалося у листопаді 2009-2010 рр. - 90-93 %.

Профілі вітру 513 радіозондів виявили 120 випадків (табл. 1), коли швидкість вітру у нижній тропосфері досягала та перевищувала $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, з них 90 можна віднести до низькотропосферних течій, при яких вертикальний профіль швидкості вітру відповідав визначенню явища [1, 2]. Таким чином, повторюваність СТНР восени 2001-2010 рр. становила в середньому 18 %, коливаючись від 11 до 23 %, з максимумом у листопаді (23 %), що перевищує її багаторічне нічне значення – 7 % [1].

Таблиця 1 – Забезпеченість вихідною аерологічною інформацією ст. Одеса-ГМО та повторюваність наявності в ГША швидкості вітру $\geq 15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ та низьких течій восени 2001-2010 рр.

| Період | Кількість | | | | | |
|----------|-------------|----|---|----|------|----|
| | радіозондів | | $V \geq 15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ | | СТНР | |
| | к.в. | % | к.в. | % | к.в. | % |
| вересень | 142 | 47 | 24 | 17 | 17 | 12 |
| жовтень | 168 | 54 | 38 | 23 | 27 | 16 |
| листопад | 203 | 68 | 65 | 32 | 46 | 23 |
| осінь | 513 | 56 | 120 | 23 | 90 | 18 |

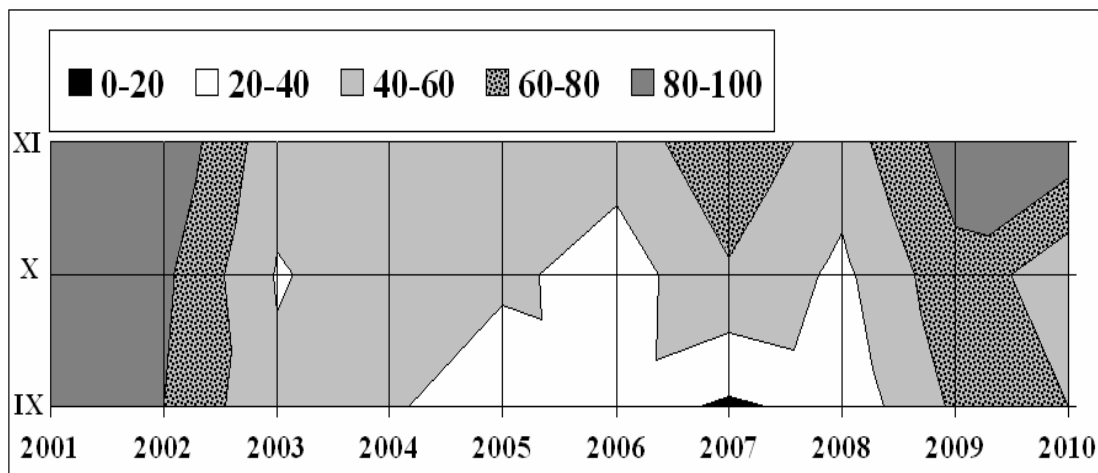


Рис. 1. Забезпеченість (%) даними радіозондування на ст. Одеса-ГМО восени 2001-2010 рр. з року у рік.

По роках формування СТНР розподілялося нерівномірно (рис. 2), найчастіше низькі струмені спостерігалися у вересні 2008 р. – 50 % від кількості зондувань, але в цьому місяці було випущено лише 8 радіозондів, тому цей максимум не є інформативним. Також 33 % випадків у вересні 2006 р. склалися лише з трьох течій. У вересні та жовтні у деякі роки спостерігалося лише по одному випадку СТНР: у вересні 2002, 2004 і 2007 рр. та у жовтні 2003, 2006 і 2010 рр. Низькі струмені взагалі не спостерігалися у вересні 2003, 2005 і 2009 рр., що, можливо, пов'язано з відсутністю щоденних радіозондувань та меншою активністю формування СТНР у тепле півріччя. В цілому за осінній сезон 2001-2010 рр. низькі струмені переважно утворювалися у листопаді – 46 випадків або 56 % від загального числа осінніх СТНР. Активність формування явища у вересні та жовтні практично однакова – 11 і 12 % від загального числа радіозондувань за місяць або 17 і 19 випадків відповідно.

Інтенсивність низькотропосферних струменів восени (рис. 3а) знизилася у порівнянні з 1975-1995 рр. [1] - з 20 до 18-19 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, але значення швидкості вітру на осі струменя 6 листопада 2009 р. перевищувало на 2 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ багаторічні дані (33 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) і досягало 35 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$. В середньому, восени 2001-2010 рр. інтенсивність СТНР становила 18-19 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, з незначним її зменшенням у жовтні, імовірно, за рахунок значної кількості антициклонічної циркуляції (табл. 2). По роках більш інтенсивні СТНР виявилися у листопаді.

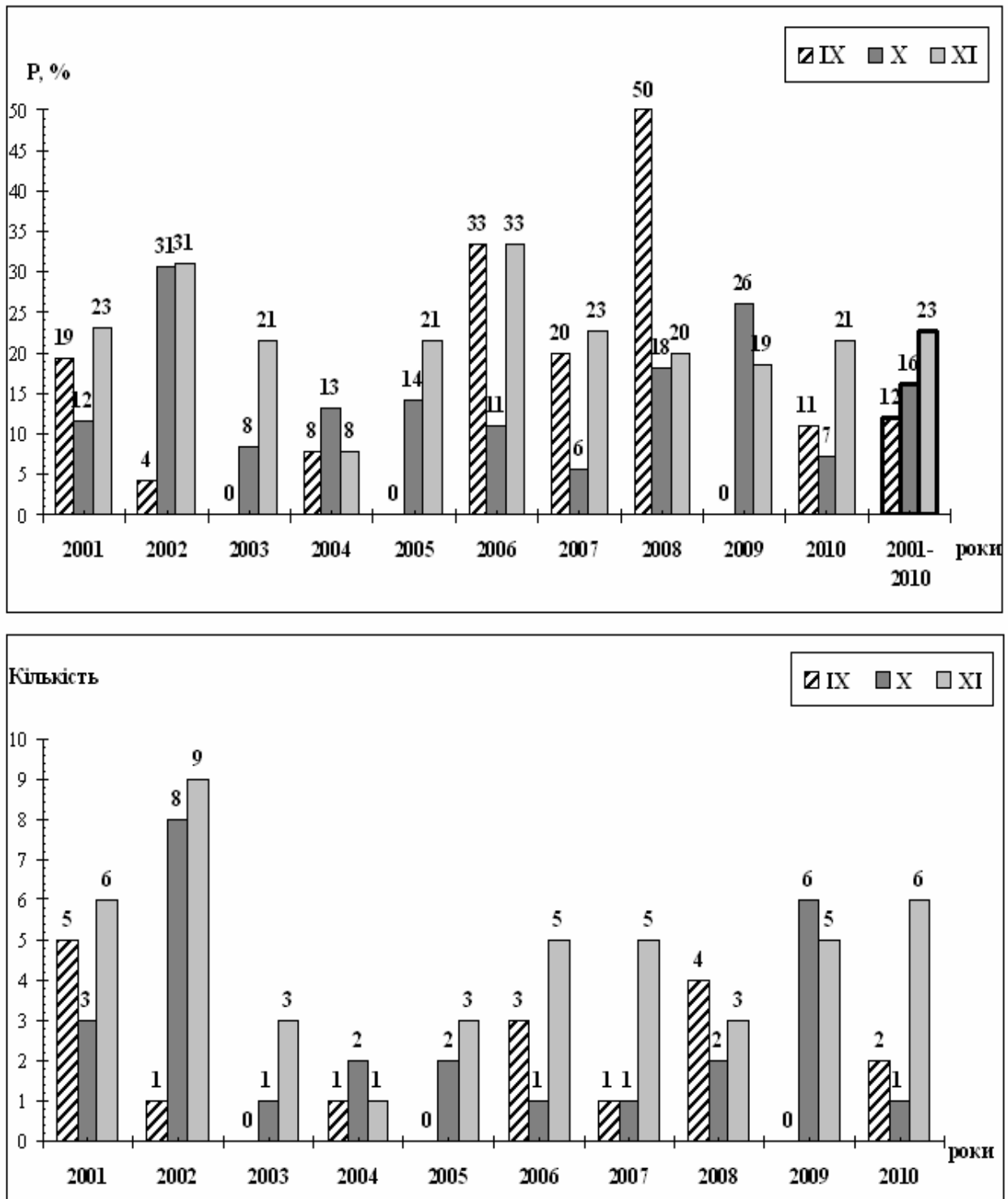


Рис. 2. Повторюваність струминних течій нижніх рівнів над Одесою восени

Відносно просторового розташування СТНР над Одесою виявлено, що вони у 2001-2010 рр. (рис. 3б) спостерігалися вище на 200-300 м, ніж у 1975-1995 рр. З року у рік висота осі струменя змінювалася від 820 до 2400 м, складаючи в середньому за сезон 960 м. Більш високими були низькі течії у вересні (1000 м). Незначно нижче розташовувалися жовтневі СТНР, особливо з 2001 по 2004 рр. Струмені, що утворювалися у листопаді, практично не демонстрували різких стрибків у висоті по роках.

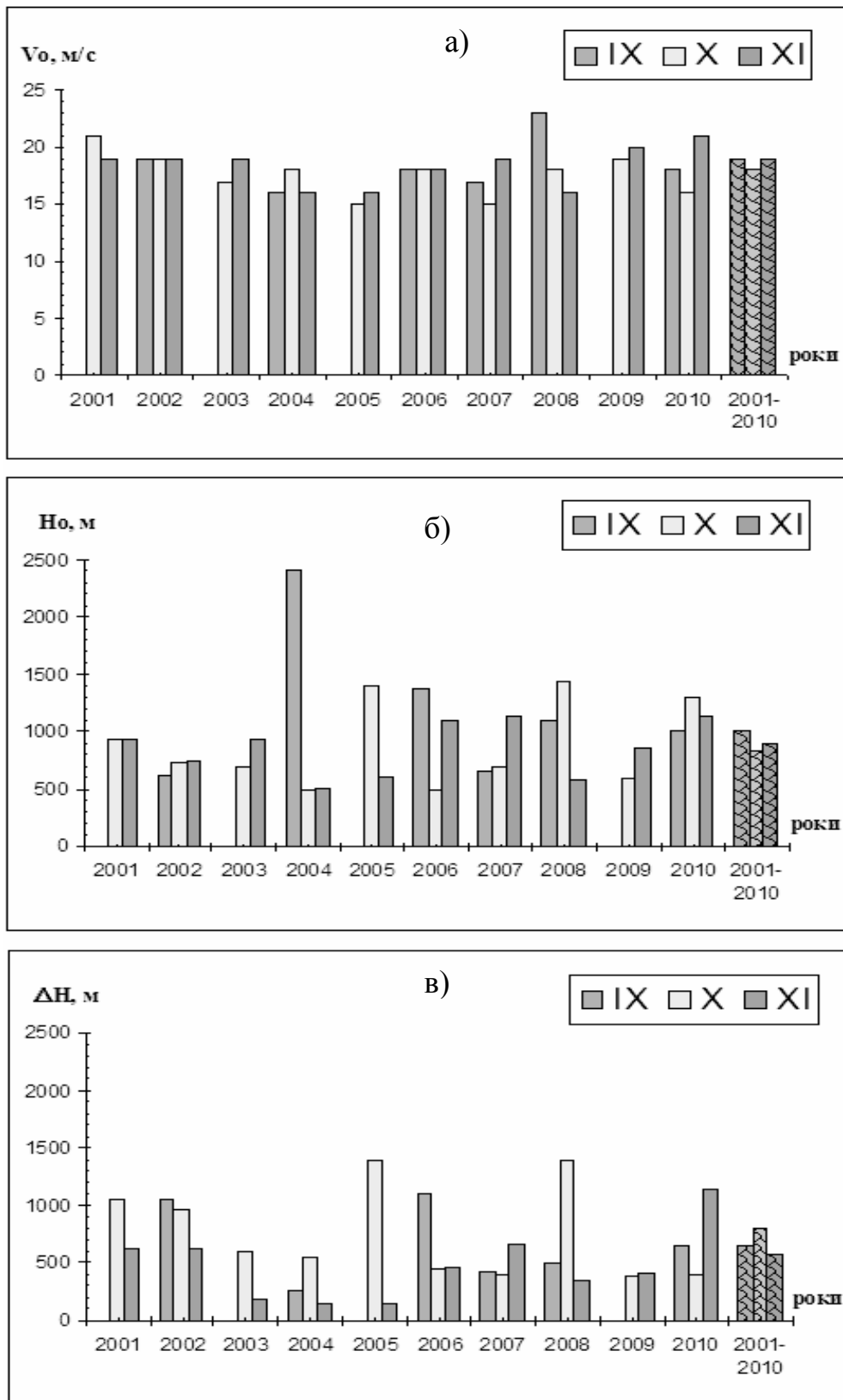


Рис. 3. Середні значення інтенсивності ($V_0, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$), висоти осі ($H_0, \text{ м}$) і потужності ($\Delta H, \text{ м}$) низькотропосферних струменів над Одесою восени 2001-2010 рр.

Середня потужність СТНР восени (670 м) також перевищувала багаторічні показники (540 м): її середньомісячні величини набирали значень від 250 до 1100 м (рис. 3в), але найчастіше змінювалися у межах 520-900 м; лише у 11 випадках потужність низьких струменів складала більш ніж 1000 м. У листопаді середня потужність СТНР практично не відрізнялася від багаторічних значень і становила 570 м.

Враховуючи відмінність розподілу параметрів СТНР від нормального [1], доцільно використовувати поряд із середніми значеннями модальні. Так, якщо в середньому швидкість вітру на осі струменя над Одесою становила $18-19 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, то її найбільш імовірні значення становили $16 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ протягом всього сезону, тобто менш інтенсивні струмені формувалися частіше. Така ж закономірність характерна для потужності та інтенсивності явища.

Виходячи із загально-фізичної залежності між швидкістю потоку та його потужністю, яка виражена у рівнянні Бернуллі, слід очікувати наявність зворотного лінійного зв'язку між V_0 та ΔH . Але, як показано на рис.4, у вересні та листопаді при СТНР виявлена незначна пряма залежність інтенсивності від потужності внаслідок того, що підвищення інтенсивності та потужності часто визначені однаковими синоптичними процесами. Інакше кажучи, потужні струмені характеризувалися відносно значною інтенсивністю. У жовтні ця залежність була меншою (лінія тренда практично паралельна горизонтальній осі).

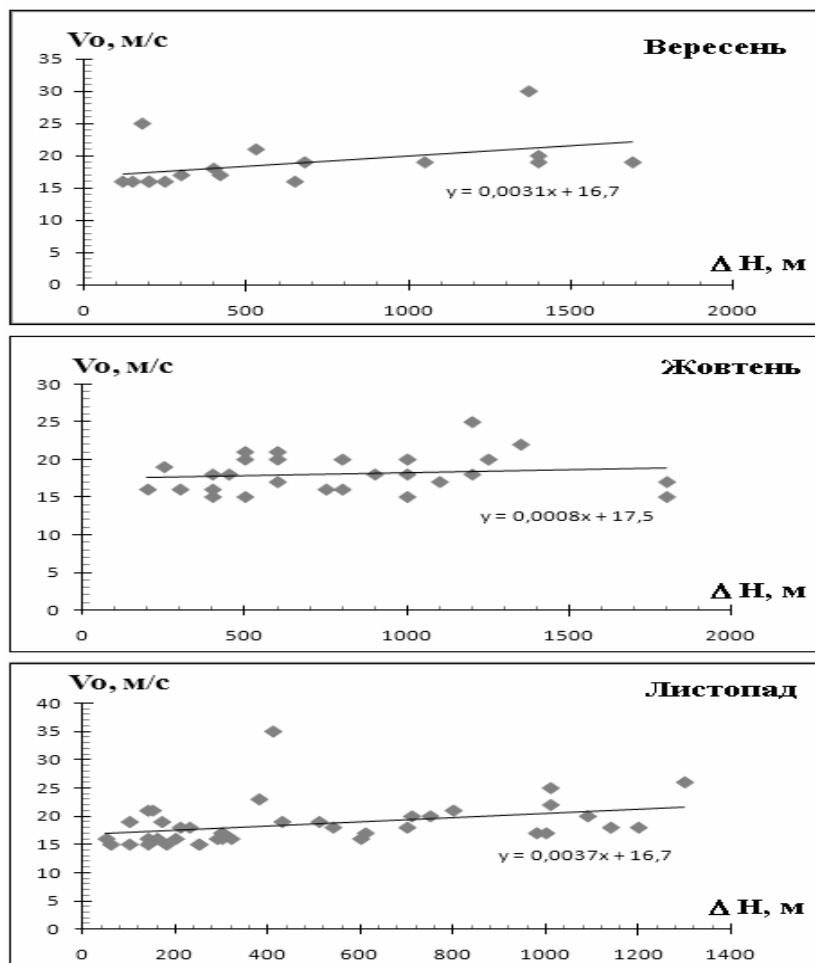


Рис. 4. Залежність між інтенсивністю СТНР та її потужністю над Одесою восени 2001-2010 рр.

Напрямок вітру також є важливою характеристикою вітрових аномалій. Так, над рівнинною частиною України переважають струмені західних напрямків [1]. Як видно з рис. 5, над Одесою восени 2001-2010 рр. переважали південно-західні та північно-західні течії - 30 та 23 % відповідно. В цілому, на західні румби (ПдЗх і ПнЗх) припадало 64 %, тобто більше половини СТНР за сезон, незважаючи на відносно невелику частку саме західного напрямку (11 %). Менш за все струмені набували південно-східного напрямку (4 %). Взагалі за сезон розподіл вітру за румбами на осі СТНР практично співпадав з розподілом на рівні 850 гПа.

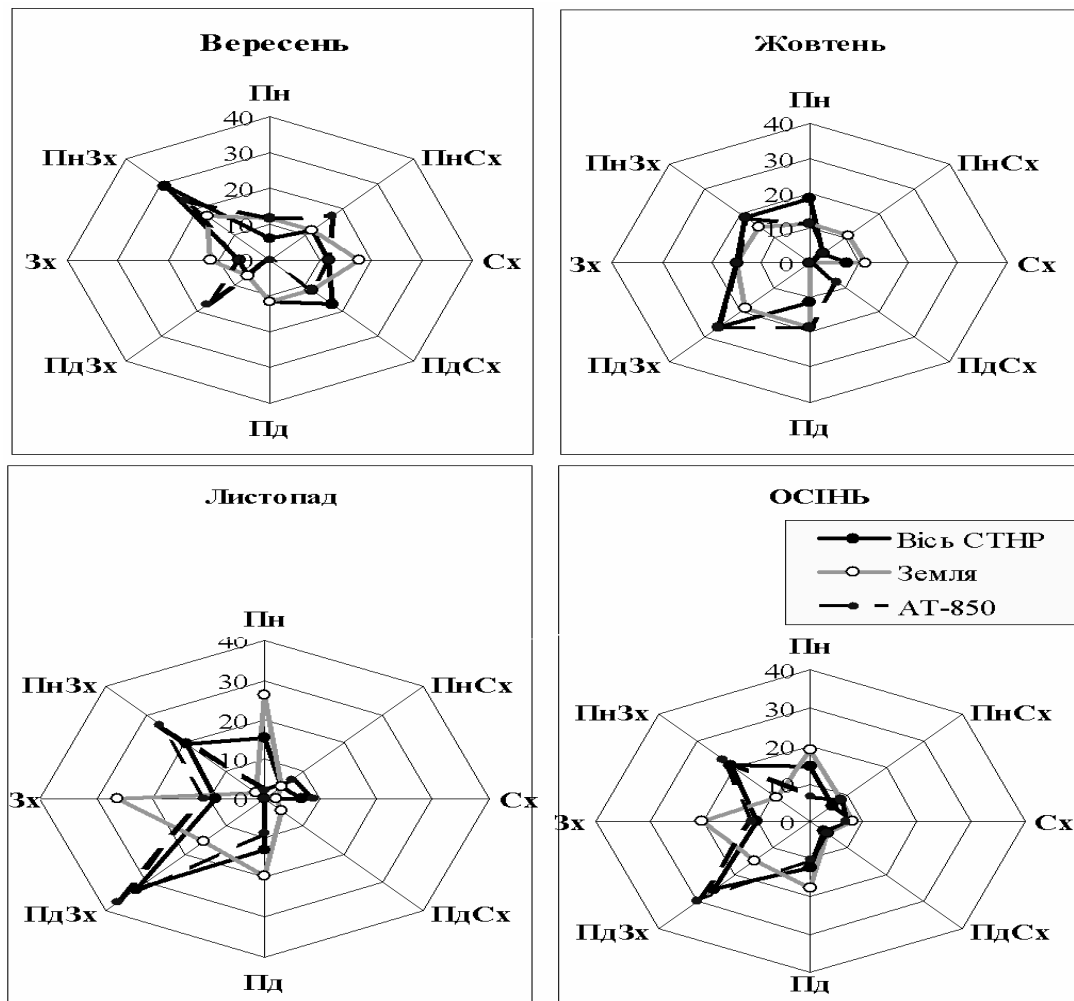


Рис. 5. Напрямок вітру за румбами на осі СТНР, біля землі та на рівні 850 гПа над Одесою восени 2001-2010 рр.

Над Одесою біля землі за кліматичними показниками [4] переважав вітер північно-західних і західних напрямків. За наявності СТНР також мав перевагу західний приземний вітер (20 %), але повторюваність північного та південного напрямків (19 і 18 % відповідно) була однаковою з ним. Взагалі частка західного сектора становила 43 %, тобто менше ніж на осі СТНР. Але по окремих місяцях розподіл вітру за румбами виявився різним, тому що циркуляційні процеси, які визначають режим вітру восени, можуть бути різними, оскільки жовтень та листопад відносяться до холодного півріччя, а вересень – до теплого. Аналіз роз вітру для осінніх місяців над Одесою восени 2001-2010 рр. виявив, що переважно (20-30%) СТНР утворювалися

північно-західних і південно-західних напрямків, але по окремих місяцях є особливості. Як видно з рис. 5, рози вітру для листопаду та всього сезону майже однакові, можливо, через найбільшу повторюваність СТНР саме у цьому місяці, що й формувало конфігурацію рози вітру взагалі.

Для більш повного дослідження стану нижніх шарів атмосфери в період існування СТНР необхідно також брати до уваги зміну з висотою не тільки швидкості, але і напрямку вітру. Від поверхні землі до осі струменя практично завжди (76 %) спостерігався правий поворот вітру.

Як показують численні дослідження, проведені для різних регіонів земної кулі, існує певний взаємозв'язок струминних течій нижніх рівнів і температурних інверсій [1, 3]. Затримуючі шари вносять великий внесок у виникнення низьких струменів, зменшуючи турбулентність певного шару повітря, внаслідок чого порушується обмін кількістю руху по вертикалі, що призводить до деформації вертикального профілю швидкості вітру. В середньому над територією України поєднання низьких струменів і інверсії спостерігається в 65-75% випадків у холодну пору року і не більше 40% випадків - у теплу [1, 3]. Комбінація низькотропосферного струменя і затримуючого шару переважно виявляється вночі незалежно від сезону. Однак у холодне півріччя формування денного струменя, що супроводжується інверсією, не є рідкісним явищем, тоді як у тепле таке практично неможливо (не більше 3% випадків). Над Одесою восени СТНР переважно виникали при відсутності затримуючих шарів – 62 % (рис. 6). Причому найчастіше це спостерігалось у жовтні - 78%, менш за все у вересні – 47 %.

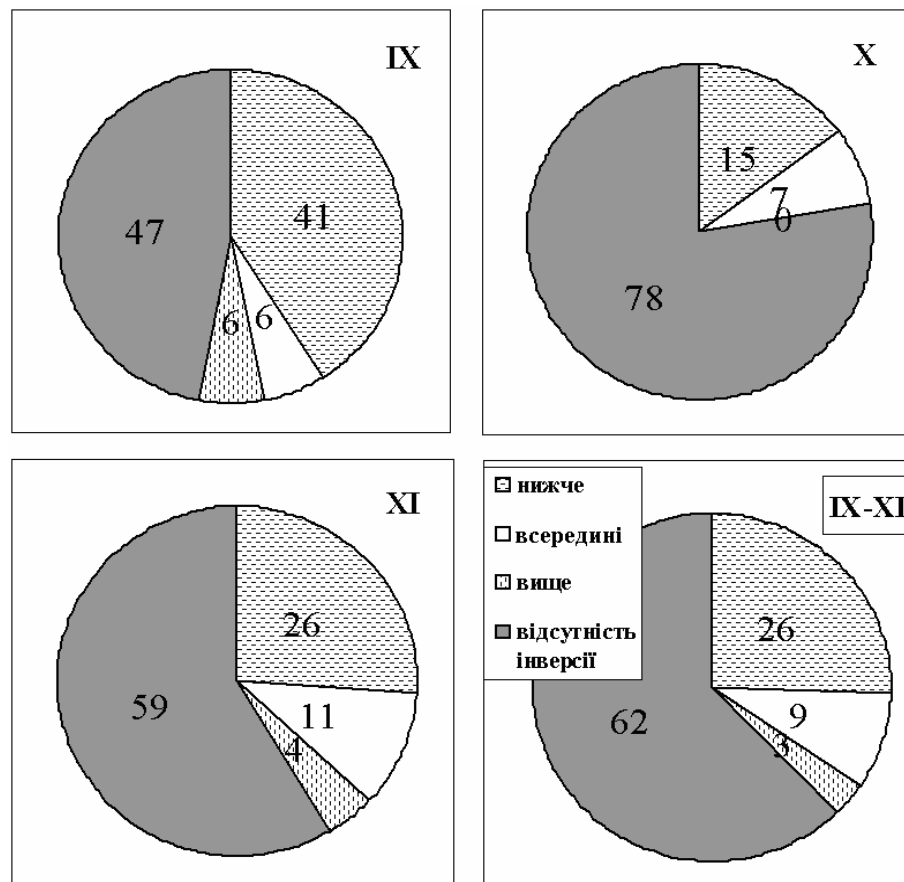


Рис. 6. Повторюваність (P, %) варіантів взаємного розташування затримуючих шарів відносно СТНР та їх відсутності над Одесою восени 2001-2010 рр.

Велика кількість СТНР утворювалася при інверсії нижче струменя (26 %), тобто при приземному затримуючому шарі. Більш за все подібна ситуація спостерігалася у вересні – 41 %, менш за все у жовтні – 15 %. Невисока кількість СТНР формувалася при затримуючому шарі всередині струменя (9 %) та менш за все інверсій виявилось вище осі СТНР (3 %). Таким чином, більше половини СТНР (62%) восени 2001-2010 рр. виникали при зниженні температури з висотою та майже третина (26%) при приземних інверсіях.

Низькотропосферні струмені обумовлюються різними макроциркуляційними умовами. В основному СТНР (у середньому по Україні від 65 до 70% випадків) спостерігаються при циклонічному характері циркуляції: в тилівій, передній частинах і теплому секторі циклону, улоговини [1]. У південному напрямку збільшується відсоток антициклонічних струменів. У Сімферополі, найпівденнішому пункті радіозондування в Україні, в гребені відмічено найбільший відсоток СТНР – 20 % випадків протягом року. Крім того, низькі струмені виникають в малоградієнтному полі та перехідній зоні між областями високого і низького тиску (від 4 до 15% випадків). Різноманітність макроциркуляційних умов формування низькотропосферних струменів свідчить про те, що у створенні струменів беруть участь різні фізичні механізми. Це підтверджує залежність структурних параметрів СТНР від синоптичної ситуації. Так, над територією України в циклонах швидкість вітру на осі та потужність струменів у середньому більша, ніж в антициклонах.

Протягом періоду дослідження над Одесою також переважали СТНР, що утворювалися під впливом циклонічної циркуляції – 66 випадків або 73 % від загального числа струменів (табл. 2). Найчастіше циклонічні низькі струмені формувалися в улоговині та теплому секторі – 31 і 29 % відповідно. Найменша кількість СТНР спостерігалася у передній та тилівій частинах циклону – 4 і 9 %. Осінні СТНР, що виникали у полях підвищеного тиску (24 випадки або 27 %), переважно у передній частині антициклону (12 %), менш за все – у його центрі (2 %).

Таблиця 2 - Повторюваність (%) СТНР у різних баричних утвореннях над Одесою восени 2001-2010 рр.

| Місяць | Тип баричного утворення | | | | | | | |
|----------|-------------------------|---------------|-----|------------|----------------|----------------|-----|---------|
| | циклон | | | | антициклон | | | |
| | передня частина | теплий сектор | тил | улого-вина | перед. частина | центр. частина | тил | гребінь |
| Вересень | 6 | 6 | 6 | 29 | 24 | 0 | 12 | 18 |
| Жовтень | 4 | 19 | 7 | 56 | 4 | 7 | 4 | 0 |
| Листопад | 4 | 43 | 11 | 17 | 13 | 0 | 7 | 4 |
| Осінь | 4 | 29 | 9 | 31 | 12 | 2 | 7 | 6 |

Більша частина низькотропосферних струменів восени відмічалася у зоні впливу атмосферних фронтів – 60 %; причому половина з них - на холодному фронті, 40 % – на теплому, і лише 10 % – на фронті оклюзії. У зв'язку з теплими фронтами спостерігалися найбільш інтенсивні течії (від 18 до 30 м/с), а холодними – менш сильні (від 16 до 19 м/с). Отже за синоптичними умовами утворення струменів восени 2001-2010 рр. не відрізнялось від [1], незважаючи на циркуляційні зміни останніх десятиріч (1986-2010 рр.) [5]. Виняток становив вересень через формування практично половини СТНР у антициклонічному полі.

У період дослідження найінтенсивніша осіння СТНР відмічена 6 листопада 2009 р. (рис. 7), яка зумовлена перехідною зоною з великими баричними градієнтами між антициклоном з центром над північчю ЄТР та циклоном із центром над Атлантикою (рис. 8). Інтенсивність течії з максимумом на висоті 690 м досягала $35 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при незначній потужності 400 м та при безінверсійному стані атмосфери.

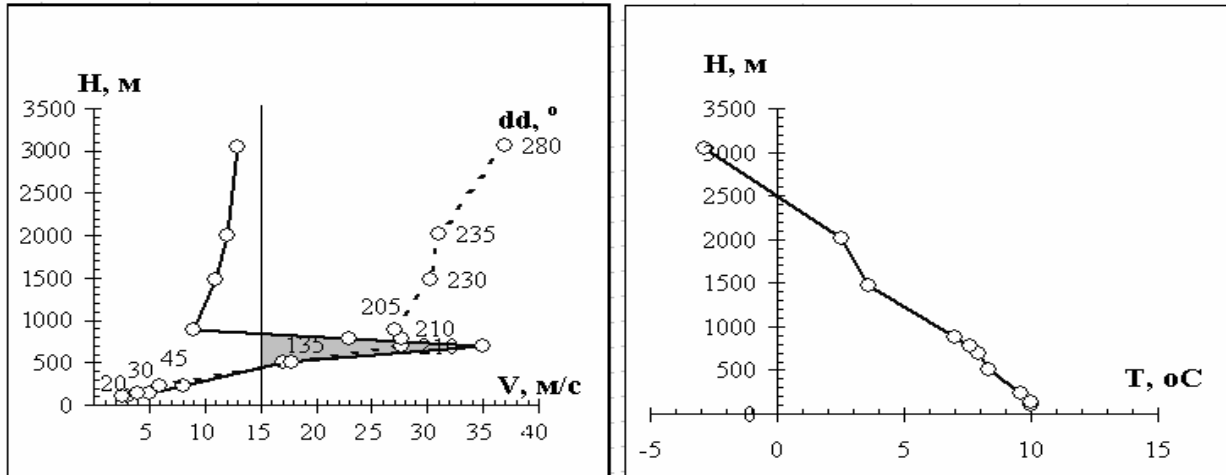


Рис. 7. Вертикальний розподіл швидкості вітру та температури повітря над Одесою 6 листопада 2009 р.

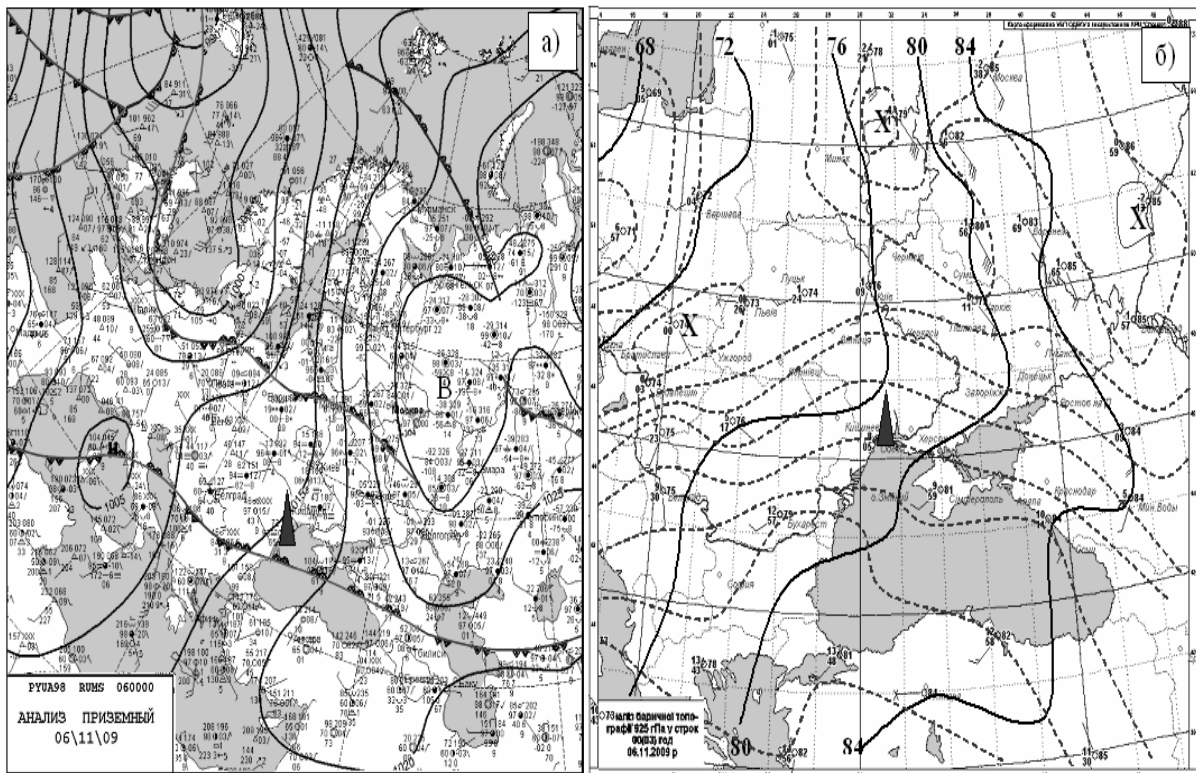


Рис. 8. Приземний аналіз (а) та карта АТ-925 (б) за 6 листопада 2009 р.

Коротко розглянемо вказано баричне поле. В Атлантико-Європейському секторі 6 листопада 2009 р. основними погодоутворюючими процесами були (рис. 8 а):

- улоговина циклону, який розташувався над Ісландією. Вона досягала Італії та півночі Африки;

- низький циклон, що утворився у цій улоговині над о. Корсика та був окреслений лише однією ізобарою з мінімальним тиском 1004,5 гПа. З цим циклоном пов'язана система фронтів, яка проходить по заході Європи в квазімеридіональному, а по півдню Європи - в квазіширотному напрямку;

- антициклон, з центром над Кіровською областю Російської Федерації, вплив якого розповсюджувався від Каспійського до Білого моря, а гребінь формував погодні умови над південним заходом Росії та сходом України, Чорним морем до о. Кіпр.

Термобаричне поле на рівні 925 гПа (рис. 8б) представлено майже перпендикулярними ізотермами та ізогіпсами, що свідчить про значну адвекцію тепла. Вище, на рівнях 850 та 700 гПа, адвекція тепла виявилася менш інтенсивною.

Вертикальний розподіл вітру (рис. 7) демонстрував, що від поверхні землі до рівня 925 гПа (785 м) спостерігався поворот вітру за годинниковою стрілкою на 190° (вправо) та швидкість вітру досягала $23 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, але максимальна швидкість ($35 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) відмічена на 100 м нижче, тобто на висоті 690 м. На рівні 850 гПа (1480 м) над Одесою відзначався незначний правий поворот вітру на 20° і швидкість вітру знизилася до $11 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а на відмітці 700 гПа (3040 м) спостерігався правий поворот вітру на 50° при швидкості вітру $13 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Тобто характер вертикального розподілу вітру за напрямком підтверджував наявність інтенсивної адвекції тепла перед теплим фронтом. З метою кількісної оцінки адвекції температури використано електронний архів Плімутського державного центра погоди (Plymouth State Weather Center) [6]. Як видно з рис. 9, над півднем України перед лінією теплового фронту на рівні 925 гПа виявилася область підвищених значень адвекції тепла з максимумом $3,14\cdot 10^{-4} \text{ К}\cdot\text{с}^{-1}$ в районі Одеси та $2,36\cdot 10^{-4} \text{ К}\cdot\text{с}^{-1}$ над Ізмаїлом. Вище, тобто на рівні 850 гПа спостерігався лише один максимум в біля Ізмаїла з інтенсивністю $1,49\cdot 10^{-4} \text{ К}\cdot\text{с}^{-1}$.

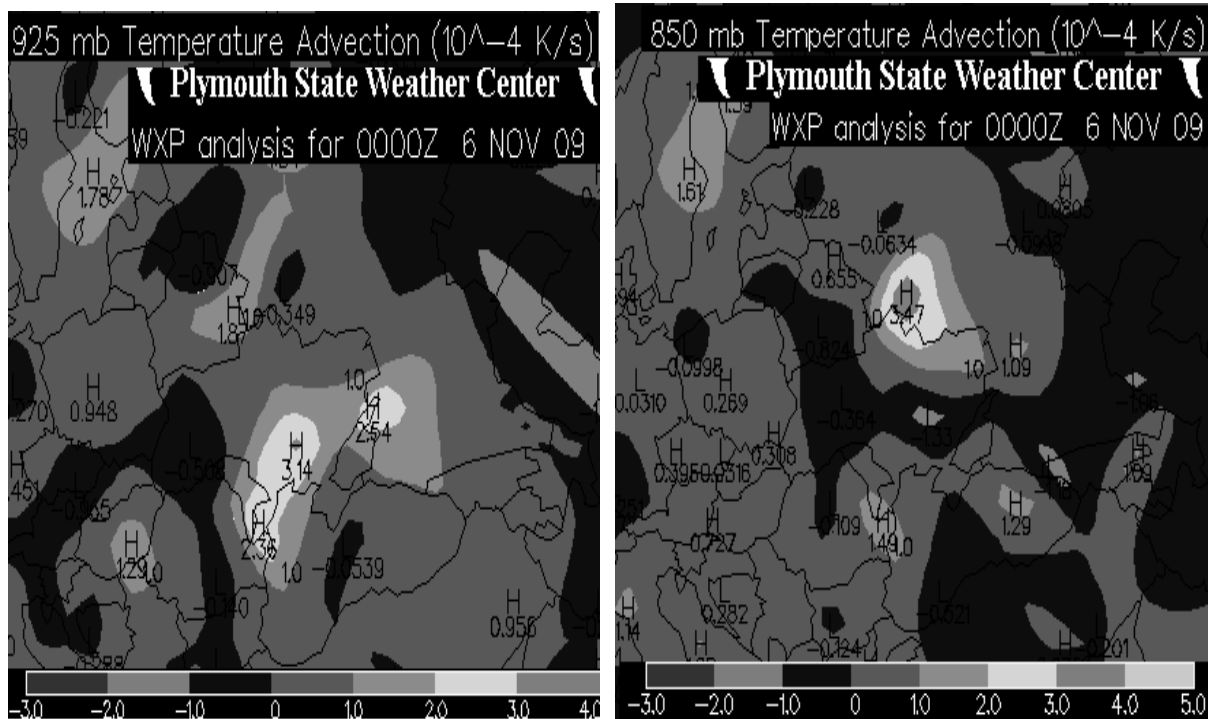


Рис. 9. Розподіл адвекції температури над Європою на рівні 925 гПа 6 листопада 2009 р., строк 00 UTC.

Отже найбільш інтенсивний низький струмінь над Одесою 6 листопада 2009 р. сформувався перед теплим фронтом у зоні сильної адвекції тепла на рівні 925 гПа.

Висновки:

Протягом періоду дослідження восени 2001-2010 рр. над Одесою спостерігалися СТНР, які характеризувалися такими особливостями:

- інтенсивність низькотропосферних струменів практично не змінилася у порівнянні з 1975-1995 рр. та становила $19 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, але максимальне значення швидкості вітру на осі струменя перевищувало 6-го листопада 2009 р. багаторічні дані на $2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ та досягало $35 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$;

- переважали південно-західні та північно-західні течії - 30 та 23 % відповідно, а в цілому, на західні румби припадало 64 %;

- більше половини СТНР (62%) утворювалося при зниженні температури з висотою та майже третина (26%) - за наявності приземних інверсій;

- низькі течії здебільше пов'язані з циклонічною циркуляцією – 66 випадків або 73 % від загального числа струменів; найчастіше циклонічні низькі струмені формувалися в улоговині та теплому секторі – 31 і 29 % відповідно.

Список літератури

1. *Ивус Г.П.* Практикум зі спеціалізованих прогнозів погоди. Навч. посібник. – Одеса: Екологія, 2007. – 328 с.
2. *Ивус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б.* Смерчи и струйные течения низких уровней (обзор литературных источников) // Культура народов Причерноморья. – 2006. - № 73. - С. 156-158.
3. *Ивус Г.П., Савченко Т.С., Семергей-Чумаченко А.Б.* Струйные течения нижних уровней над Украиной // Глобальные и региональные изменения климата. – К.: Ника-Центр, 2011. – С. 102-108.
4. *Клімат України.* - К.: Видавництво Раєвського, 2003. – 343 с.
5. *Мартазинова В.Ф., Иванова Е.К.* Характерные особенности синоптических процессов различной вероятности конца XX – начала XXI столетий // Глобальные и региональные изменения климата. – К.: Ника-Центр, 2011. – С. 86-95.
6. *Електронний архів* Плімутського державного центра погоди (Plymouth State Weather Center). - <http://vortex.plymouth.edu/upcalc-u.html>.

Осенние низкие струи над Северо-Западным Причерноморьем.

Ивус Г. П., Семергей-Чумаченко А. Б.

На основе данных радиозондирования за десятилетний период охарактеризовано формирование струйных течений нижних уровней осенью 2001-2010 гг., их структурные параметры и связь со стратификацией температуры, выявлены синоптические процессы, преобладающие при образовании низких струй, и оценено влияние адвекции температуры на возникновение интенсивного течения в нижних слоях тропосферы.

Ключевые слова: струйное течение нижних уровней, инверсия температуры.

Autumn low jet over the Northwest Black Sea Coast.

Ivus G., Semergei-Chumachenko A.

The formation of low level jet in autumn 2001-2010, the structure and relationship with the stratification of temperature are characterized on the basis of sounding observations for the ten-year period. The synoptic processes prevailing during the formation of low jets are identified. The influence of temperature advection on the case of intense flow in the lower troposphere is estimated.

Keywords: low-level jet, temperature inversion.