

**Г.П. Ивус**, к.геогр.н., **А.Б. Семергей–Чумаченко**, к.геогр.н.,

**Э.В. Агайар**, ассист., **А.П. Дмитренко**, инж.

*Одесский государственный экологический университет*

## **ВЛИЯНИЕ АДВЕКЦИИ ТЕПЛА НА ОБРАЗОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ НИЖНИХ УРОВНЕЙ**

*Выполнен краткий обзор теоретических исследований о роли адвекции тепла в образовании струй нижних уровней. На примере формирования низкотропосферных струй над Украиной показано влияние температурной стратификации на возникновение низкой струи.*

**Ключевые слова:** адвекция, струйное течение нижних уровней.

**Введение.** Струйные течения нижних уровней (СТНУ), являющиеся мезомасштабными составляющими процессов синоптического масштаба, привлекают внимание исследователей по ряду причин. В первую очередь это связано с необходимостью детализации синоптических процессов и уточнений краткосрочных прогнозов погоды на небольшие (3-6 часов) сроки. Действительно, наличие СТНУ и сопутствующих им мезомасштабных горизонтальных и вертикальных градиентов метеорологических параметров, их различия по величине и знаку может обусловить мезомасштабные перемещения воздушных масс, особенности их циркуляции и связанные с этим разнообразия погодных условий (приземный циклогенез, мезофронты, мезомасштабные конвективные системы и др.). Под воздействием СТНУ изменяются турбулентный обмен, влажность и стратификация нижних слоев атмосферы, что, в свою очередь, может привести к заметному отклонению значений метеорологических величин от их привычного хода, определяемого либо временем суток, либо макромасштабными синоптическими процессами. Во-вторых, с детальным изучением СТНУ связано решение ряда прикладных задач. Это исследование закономерностей переноса примесей в атмосфере, определение начальных условий запуска ракет, оценка погодных условий при взлете и посадке воздушных судов, изучение флуктуационных явлений распределения звуковых и электромагнитных волн, проведение авиационных работ и др.

**Современное состояние проблемы.** Все вышеперечисленное вызывает интерес к исследованию самой физической природы возникновения низкотропосферных струйных течений. Необходимо отметить, что результаты изучения данной проблемы не сводятся к какому-либо одному мнению. С одной стороны, это объясняется тем, что сами СТНУ подразделяются на несколько типов, и потому механизмы формирования, присущие одному из них, оказываются неприемлемыми для других [1-3, 5-7]. С другой стороны, время существования струй определяется несколькими часами, протяженность - десятками и сотнями километров, поэтому их исследование по имеющейся аэрологической сети с 12 или 24-часовым временным разрешением и погрешностями в измерении температуры с помощью радиозондов в нижнем 500-метровом слое атмосферы вносит определенные проблемы в раскрытие физики СТНУ. Видимый прогресс в этом вопросе на сегодняшний день достигнут американскими учеными за счет применения сети доплеровских радаров, учащенных измерений ветра (интервал порядка нескольких минут), а также построений вертикальных разрезов атмосферы, вместо изучения отдельно взятой вертикали [10]. Вкратце суть их исследований сводится к тому, что наличие струй обуславливается процессами как макро-, так и мезомасштаба, которые могут действовать вместе и раздельно, определяя все дальнейшие характеристик струй.

**Цель исследования** - выявление некоторых физических моментов возникновения и развития общециркуляционных СТНУ над Украиной, не затрагивая такие явления, как ночные инерционные колебания скорости ветра, порождающие при инверсионном распределении температуры струйные профили ветра, и термические струи, зависящие от величины угла между термическим и горизонтальным градиентом давления.

**Материалы и методы исследования.** В качестве исходной информации использовались данные радиозондирования (срок 00 UTC) над Украиной за теплое полугодие (с апреля по сентябрь) 2001-2005 гг., комплект синоптических карт и результаты реанализа из архива Национального центра прогноза окружающей среды (NCEP) и Национального центра исследования атмосферы США (NCAR) [8] за 7-8 апреля 2005 г.

**Результаты исследования.** Рассматривая физику образования СТНУ, следует иметь в виду, по крайней мере, две группы факторов, имеющих отношение к изучаемому феномену. Это, прежде всего, динамические и термические причины, влияние которых на формирование низких струй наиболее очевидно.

Динамические факторы можно разделить на три составляющие:

- горизонтальный и вертикальный перенос количества движения;
- процессы конвергенции потоков, благоприятствующие образованию СТНУ, а также процессы дивергенции, направленные на ослабление струй;
- вертикальный и горизонтальный перенос вихря скорости.

Все три вида динамического фактора генезиса СТНУ тесно между собой связаны, действуя, как правило, одновременно и взаимно влияя друг на друга, хотя, наиболее резкие и сильные изменения вносит вторая составляющая, определяя саму энергетику процесса [2-4, 9].

Как известно, термические контрасты в зонах атмосферных фронтов обуславливают заметную термическую компоненту ветра, параллельную фронту и интегрально нарастающую с высотой [5, 11]. Кроме того, под действием радиационных и адвективных факторов в пограничном слое могут возникать аномальные вертикальные термические (и барические) градиенты между выше расположенными холодными и ниже лежащими теплыми слоями воздуха [2], что, по-видимому, способствует притоку количества движения к зоне наибольшего сгущения изотерм.

Таким образом, характер адвекции в области нахождения будущей низкотропосферной струи совсем не безразличен для ее образования, а взаимодействие термического и динамического факторов обуславливает специфические процессы в пограничном слое атмосферы (ПСА): конвергенция вызывает сгущение изотерм и усиление термической компоненты, дивергенция – противоположные действия.

Анализ струйных течений в пограничном слое атмосферы над Украиной за период с 1975 по 1995 гг. [3], показывает, что 50–60% их количества приходится на переходные периоды года (осень, весна) и еще 20–30 % на зиму. Следовательно, именно в эти сезоны наиболее часто встречаются те синоптические процессы и та структура ПСА, которые будут наиболее благоприятны для генезиса струй. Не трудно заметить, что около 60 % случаев СТНУ приходится на такие части барических образований как передняя часть циклона и ложбины, тыловая часть (южная и юго-западная периферии) антициклона и гребня. Еще 15–20 % от общего количества струй отмечается на оси гребня и ложбины, а также в теплом секторе циклона. В 60–70 % случаев струи связаны с фронтальными разделами, от 50 до 70 % фронтальных струй возникает в зоне теплых фронтов [4].

Большинство СТНУ наблюдается при синоптических ситуациях, которые потенциально обуславливают наличие адвекции тепла. Процесс адвекции тепла в ПСА характеризуется тем, что выраженный максимум в профиле ветра, особенно на высотах

500-800 м, хорошо совпадает со слоем наиболее интенсивных адвективных изменений температуры и точки росы. Они увеличиваются с высотой до уровня максимальной скорости переноса и являются небольшими на всех вышележащих уровнях, даже в тех случаях, когда, снова возрастая от уровня 900-1500 м, скорость воздушного потока значительно превышает таковую на уровне нижнего максимума. Косвенным доказательством этого процесса может служить тот факт, что максимум скорости ветра перед теплым фронтом расположен вблизи верхней границы инверсии. Кроме того, адвекция тепла создает условия либо для новообразования инверсии, либо для усиления уже существующей (например, ночной радиационной), что крайне важно для формирования струйного профиля ветра, так как именно инверсия является препятствием, ослабляющим турбулентный обмен с выше- и нижележащими слоями воздуха. В [5] отмечается, что в случаях адвекции тепла (в передней и южной частях циклонов и смежных с ними периферийных частях антициклонов) максимум скорости находится на более высоком уровне по сравнению с синоптическими ситуациями, когда адвекция тепла отсутствует. Максимумы ветра наиболее часто располагаются на высоте 600 м, их повторяемость на высоте 300 м меньше, а на высоте 800 м соответственно, больше, чем при всех других положениях. Эти цифры довольно хорошо совпадают с высотами, на которых преимущественно расположены оси СТНУ (рис.1).

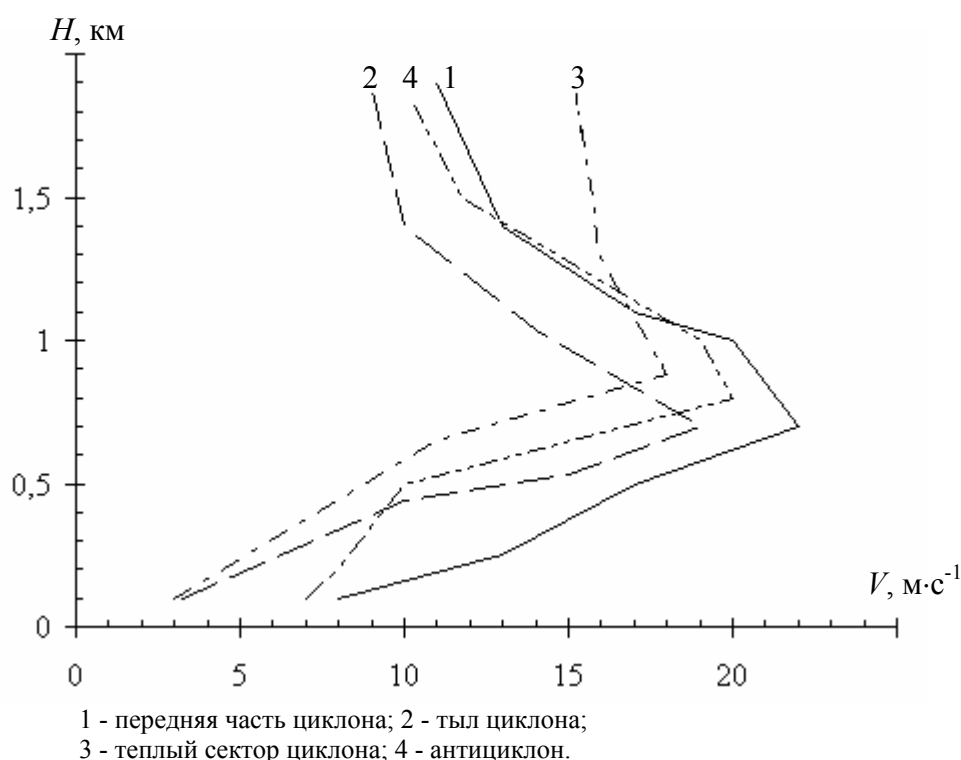


Рис. 1 - Средние профили ветра при СТНУ над Киевом.

Анализ структуры пограничного слоя показывает, что распределение адвективных изменений температуры, когда их максимальные значения приходятся на ось струй, обуславливает различную стратификацию распределения скорости ветра в нижележащем слое воздуха. Так, при адвекции холода будет увеличиваться неустойчивость под струей, особенно выше 200 м. Интенсивный рост скорости ветра чаще наблюдается до высот 200-400 м, а выше, в результате турбулентного обмена,

увеличение скорости ветра существенно замедляется. В случае адвекции тепла, наоборот, повысится устойчивость слоя, что приведет к уменьшению турбулентного обмена, а, следовательно, формированию слоистой структуры ПСА, которая и является наиболее благоприятной для образования струйного профиля ветра.

Исследование формирования низких струй над территорией Украины с апреля по сентябрь 2001-2005 гг. обнаруживает 222 случая струи, т.е. в 4,9 % радиозондирований. Повторяемость явления существенно не отличается от частоты их появления в 1975-1995 гг. и не превышает 5-6 % по станциям Украины в теплое полугодие.

Для изучения влияния адвективных процессов на возникновение низкотропосферных струй целесообразно привлекать случаи образования СТНУ над несколькими пунктами одновременно. В течение выбранного периода случай одновременного формирования низких струйных течений над тремя станциями Украины (Киев, Чернигов и Одесса) приходится на 8 апреля 2005 г. Как видно из построенного по данным радиозондирования вертикального разреза полей скорости ветра и температуры вдоль линии Линденберг-Брест-Шепетовка-Киев-Одесса (рис. 2), указанные СТНУ не отличаются значительной интенсивностью, которая составляет 16-17 м·с<sup>-1</sup>, и располагаются на высотах 800-1000 м. Мощность слоя повышенных скоростей над Шепетовкой и Одессой равна 100-300 м, а над Киевом - 800 м. Над Брестом профиль скорости ветра принимает струеобразный вид с интенсивностью до 15 м·с<sup>-1</sup>, а над Линденбергом примерно с высоты 1500 м скорость ветра превышает этот критерий. Над этим пунктом СТНУ переходит с высотой в арктическое струйное течение верхней тропосферы с интенсивностью 43 м·с<sup>-1</sup>. Вертикальный разрез по температуре, а особенно в сочетании со скоростью ветра (рис. 2), наглядно показывает,

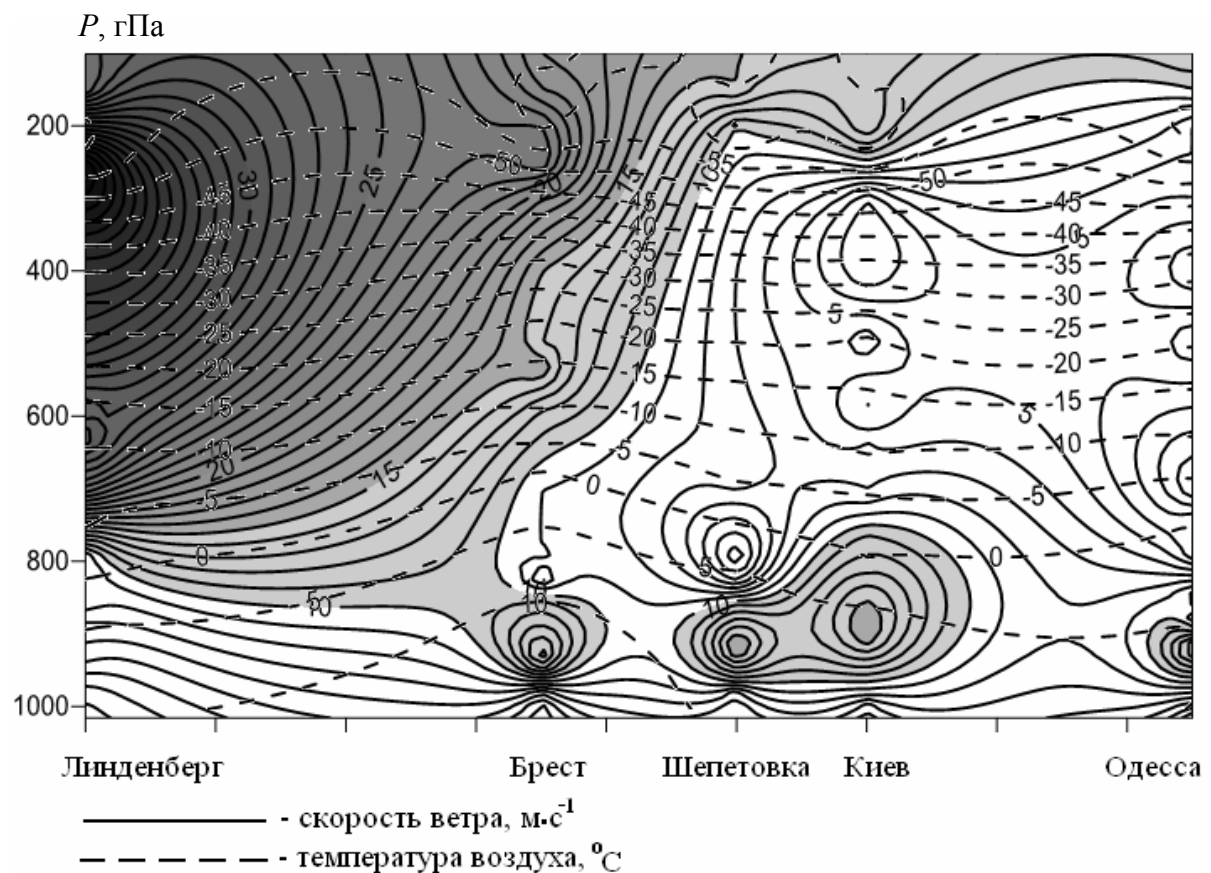


Рис. 2 - Вертикальный разрез скорости ветра и температуры 8 апреля 2005 г., 00 UTC.

что СТНУ над Одессой представляет собой поток относительно холодного воздуха, а над Киевом и Шепетовкой - теплого. Самой теплой струей можно считать течение над Брестом с интенсивностью  $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , по-видимому, сказывается её расположение на оси гребня тепла.

Кратко представим синоптическую ситуацию, которая создала термодинамические условия, явившиеся благоприятными для формирования СТНУ над несколькими пунктами Восточной и Западной Европы. Погодные условия 8 апреля 2005 г. над территорией Европы определяет циклон (рис. 3), располагавшийся над западной и северо-западной частью Европы, и двухцентровый антициклон с центрами над северо-восточной частью Каспийского моря и Монголией. Один из его гребней формирует малооблачную погоду и слабый ветер у поверхности земли над юго-востоком Украины, в том числе и над Одессой. В результате чего над югом и востоком Украины отмечается заток холодного воздуха, а над северо-востоком Украины - высотный гребень тепла. Сложный характер адвекции тепла приводит к тому, что над Одессой низкая струя имеет западное направление ( $165^\circ$ ), а над Киевом и Шепетовкой наблюдается южный поток, что соответствует направлению основного потока на периферии циклона.

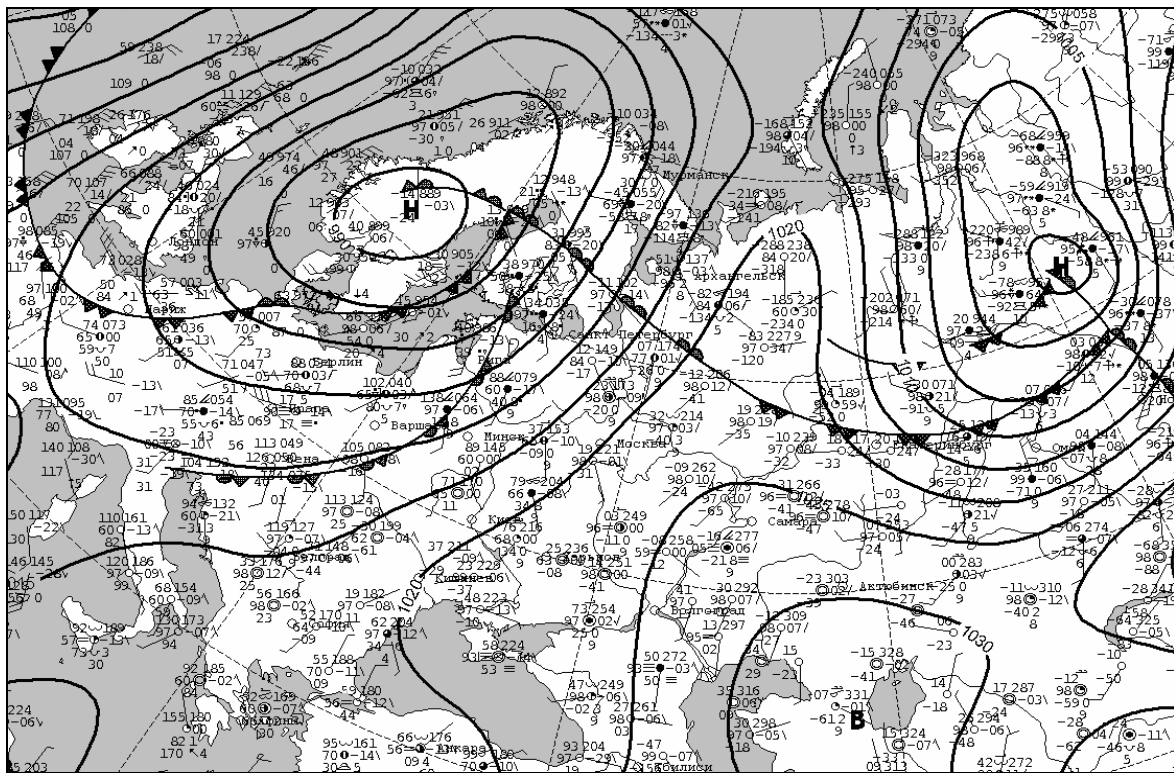


Рис. 3 - Приземный анализ за 8 апреля 2005 г.

Для того, чтобы сделать более уверенные выводы относительно влияния адвекции на образование СТНУ, необходимо исследовать воздействие характера адвекции на скорость ветра на осях низких струй с учетом вертикальной структуры воздушных потоков и количественных характеристик величин адвективных изменений температуры с высотой. В рамках данного исследования по результатам реанализа восстановлены поля геопотенциала и температуры (рис. 4) на уровнях 1000, 925 и 850 гПа с помощью архива NCEP/NCAR [8]. Анализ указанных полей показывает преобладание отрицательной адвекции, то есть адвекции холода над югом и центром Украины, которая севернее Киева сменяется адвекцией тепла. Характер адвекции

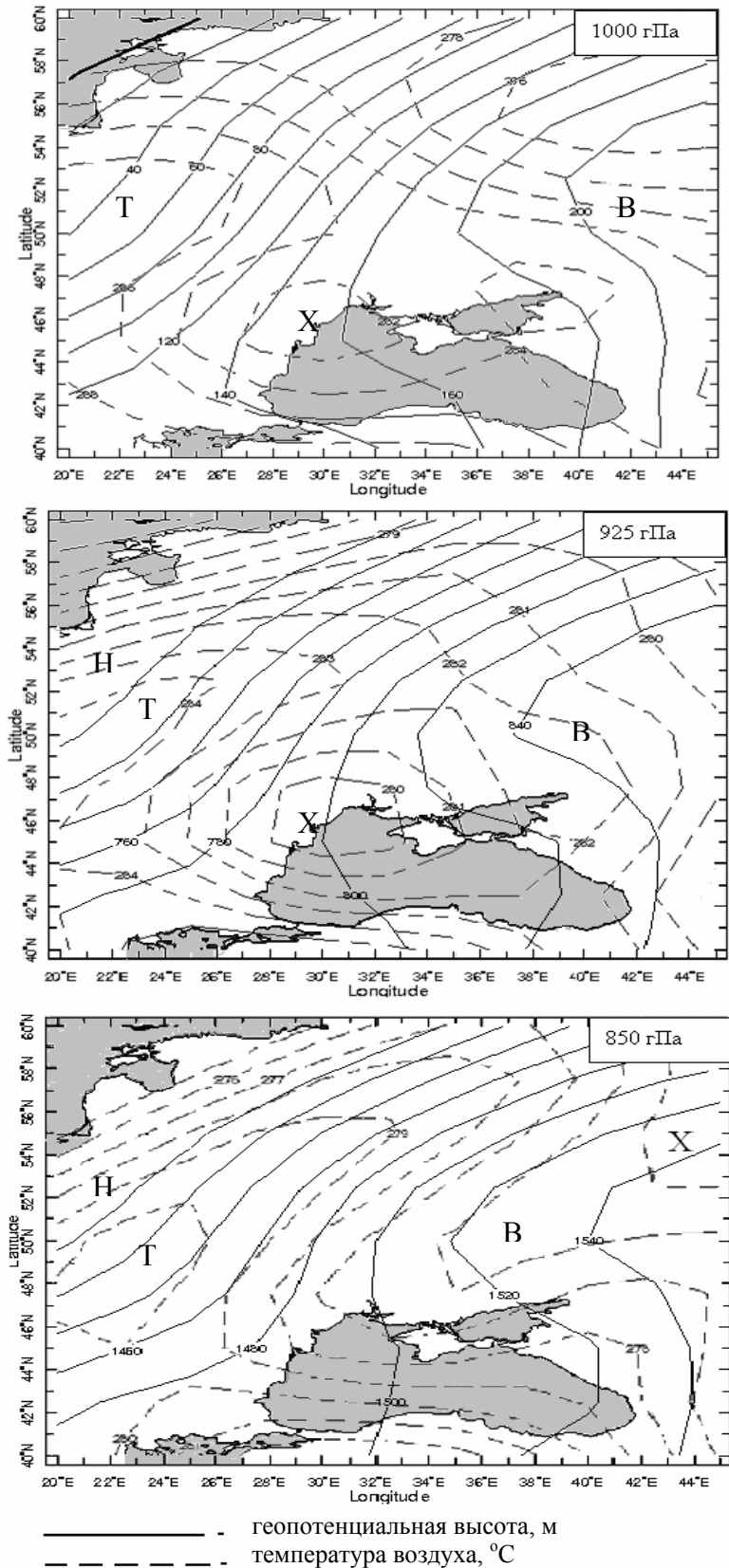


Рис. 4 – Термобарическое поле на уровнях 1000, 925 и 850 гПа 8 апреля 2005г., (00 UTC) построенное по результатам реанализа NCEP/NCAR.

сохраняется на всех трёх исследуемых уровнях, но её интенсивность ослабевает с высотой, достигая минимальных значений к уровню 850 гПа, где изогипсы и изотермы практически параллельны.

Таким образом, 8 апреля 2005 г. над Украиной сформировано две струи на высотах 800-1000 м разного происхождения. Низкотропосферное течение над Одессой возникает в гребне антициклона над приземной инверсией, а узкий поток теплого воздуха над Киевом и Шепетовкой обусловил струю в переходной зоне между гребнем и циклоном вблизи фронта окклюзии.

**Выводы.** Большинство СТНУ формируется при синоптических ситуациях, обуславливающих адвекцию тепла, которая создает благоприятные условия для образования или усиления инверсионного профиля температуры, вследствие увеличения адвективных изменений температуры воздуха с высотой. Рост адвективных изменений температуры воздуха с высотой оказывает влияние на стратификацию нижележащих слоев воздуха, увеличивая их устойчивость. Устойчивая стратификация воздуха способствует расслоению пограничного слоя атмосферы, что, в свою очередь, приводит к разнородности слоя по температурной и ветровой структуре и образованию струйного профиля ветра.

#### Список использованных источников

1. Івус Г.П., Белодонова Л.В. Подинверсионные течения и трансформация облачных систем // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып. 39. – С. 132-139.
2. Івус Г.П., Ефимов В.А. Физика антициклогенеза – К.: КНТ, 2005. – 208 с.
3. Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б. Применение уравнений энергии к исследованию СТНУ // Метеорология, климатология и гидрология. – 1996. – Вып. 33. – С. 57-62
4. Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б., Нажмудинова Е. Н. Фронтотенез и струйные течения нижних уровней над Украиной // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып. 39. – С. 101-104.
5. Клинов Ф.Я., Новикова С.М., Бондина А.Г. К вопросу о распределении температуры, скорости и направления ветра в нижнем 500-метровом слое атмосферы // Труды ЦВГМО. – 1975. – Вып. 3. – С. 3-16.
6. Хаджи-Страти Е.Д. Подинверсионные струи в зимних антициклонах // Метеорология, климатология и гидрология. – 2000. – Вып. 41. – С. 137-141.
7. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометиздат, 1985. – 264 с.
8. <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/NOAA/NCEP-NCAR/CDAS-1/DAILY/Intrinsic/>
9. Storm B., Dudhia., Basy S., Swift A., Giammanco I. Evaluation of the weather research and forecasting model on forecasting low-level jets: implications for wind energy // Wind Energy. – 2008. – [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com).
10. Wang Y., Klipp C. L., Garvey D. M., Ligon D. A., Williamson C. C., Chang S. S., Wewson R.K., Calhoun R. Nocturnal low-level jet dominated atmospheric boundary layer observed by a Doppler Lidar over Oklahoma city during IU 2003 // J. App. Met. – 2007. – Vol. 46 (12). – P. 2098 – 2109.
11. Werth D., Kurzeja R., Luis Dias N., Zhang G., Duarte H., Fischer M., Parker M., Leclerc M. The Simulation of the Southern Great Plains Nocturnal Boundary Layer and the Low-Level Jet with a High-Resolution Mesoscale . - Atmospheric Model // J. Appl. Meteor.Climatol. – 2011. – Vol. 50. – P. 1497–1513.

#### **Вплив адвекції тепла на виникнення струминних течій нижніх рівнів.**

**Івус Г. П., Семергей-Чумаченко А. Б., Агайар Е. В., Дмитренко А.П.**

*Виконано стислий огляд теоретичних досліджень щодо ролі адвекції тепла в утворенні струменів нижнього рівня. На прикладі формування низькотропосферних струменів над Україною показано вплив температурної стратифікації на виникнення низького струменя.*

**Ключові слова:** адвекція, струминна течія нижніх рівнів.

#### **Influence of heat advection on the genesis of low level jets.**

**Ivus G., Semergei-Chumachenko A., Agayar E., Dmitrenko A.**

*A brief overview of theoretical research on the role of heat advection in the formation of low-level jets was carried out. On the example of the formation of low tropospheric jets over Ukraine, the influence of temperature stratification on the occurrence of low jet is shown.*

**Keywords:** advection, low-level jet.