

УДК : 551.51

О СТРУКТУРЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖНЕГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ НАЛИЧИИ НИЗКОЙ ОБЛАЧНОСТИ

О. Н. Грушевский, канд. геогр. наук, нач. каф. военной подготовки
А. Е. Ешану, зав. научно-исследовательской лаборатории каф. военной подготовки
Н. М. Мищенко, канд. геогр. наук, доц. каф. метеорологии и климатологии

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, ogrush@ukr.net*

На примере погодных условий, приведших к нарушению движения воздушных судов в международном аэропорту «Одесса», в статье рассмотрена пространственно-временная структура динамических характеристик нижнего слоя атмосферы при формировании низкой облачности и её деградации. Комплексное использование данных модели GFS с высоким разрешением и данных фактических наблюдений за нижней границей облачности позволило получить выводы о характере циркуляционных условий в процессе её эволюции.

В частности, использование временных рядов данных позволило установить, что вихрь скорости и его характеристики не оказывают значимого влияния на формирование низкой облачности в отличие от дивергенции и её вертикального градиента. Полученные выводы подтверждены построением пространственных вертикальных разрезов через области с минимальными значениями нижней границы облачности.

Ключевые слова: низкая облачность, динамические характеристики, адвекция, дивергенция, вихрь скорости, эволюция облачности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос увеличения точности прогнозирования характеристик низкой облачности не является новым, но его актуальность длительное время остается стабильно высокой. Объяснением этому является постоянное развитие авиации, для деятельности которой низкая облачность является одним из важнейших факторов летно-метеорологической обстановки. В последние десятилетия отмечается определенное снижение интереса авиационных метеорологов к указанной теме. Наиболее вероятной причиной этого представляется оснащение ряда аэропортов инструментальными системами автоматической посадки, использующимися как средство наведения (например, ILS, PAR, RMS), и системами автоматического управления или приземления (например, FCS / FGS).

Однако при более детальном рассмотрении проблема не выглядит полностью решенной. В качестве примера рассмотрим государственное предприятие «Международный аэропорт «Борисполь», являющееся крупнейшим и единственным аэропортом Украины, обеспечивающим дальнемагистральные рейсы.

Напомним, что категоризованные минимумы ICAO для обеспечения полётов в сложных метеоусловиях подразумевают, что посадочная система должна обеспечивать полуавтоматическое снижение до высоты 60 м (CAT I), автоматическое снижение до высоты предпосадочного

выравнивания (CAT II), автоматическое снижение и предпосадочное выравнивание (CAT III A), автоматическое снижение, выравнивание и парирование сноса (CAT III B), автоматическое снижение, выравнивание, посадку и руление по ВПП (CAT III C).

Комиссией Госавиаслужбы по сертификации и регистрации аэродромов и допуска к эксплуатации постоянных взлетно-посадочных площадок установлено, что аэропорт «Борисполь» способен обеспечить бесперебойную круглосуточную эксплуатацию по III A категории посадки ICAO с курсом 36П и I категории с курсом 18П [1].

Приведенные характеристики свидетельствуют о том, что даже в наиболее технически оснащенном аэропорту Украины возможность «слепой посадки» в полной мере нереализуема. Кроме того, указанные выше системы автоматической посадки, строго говоря, выполняют лишь вертикальное наведение, выводя воздушное судно по курсу на торец ВПП, а выравнивание и посадка выполняются вручную.

Осуществление же приземления без визуального контакта летчика с ВПП, исключительно в режиме «слепой посадки», для всех аэропортов Украины является пока нереализуемым. Таким образом, установление визуального контакта с ВПП на уровне не ниже высоты принятия решения (отождествляемой с высотой нижней границы облачности) на сегодняшний день является обязательным элементом безопасной посадки, в

противном случае осуществляется уход воздушного судна на второй круг, в зону ожидания или на запасной аэродром.

Другие аэропорты Украины имеют сертификаты соответствия аэродромного комплекса I категории посадки ИКАО (например, международный аэропорт «Одесса», международный аэропорт «Львов» им. Даниила Галицкого) или II категории посадки (международный аэропорт «Киев» (Жуляны)). Подавляющее большинство военных аэродромов Украины имеют посадочные минимумы $100 \times 1,0$, что еще больше актуализирует вопрос увеличения точности прогноза низкой облачности.

Таким образом, целью данного исследования является определение возможности идентификации и пространственно-временной эволюции облакосодержащего слоя в поле динамических характеристик атмосферы.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Необходимо отметить, что количество исследований, связанных с диагнозом и прогнозом конвективной облачности, несравнимо больше посвященных низкой облачности. Соответственно, количество параметров и критериев, при помощи которых осуществляется прогноз конвективной облачности, также больше. Это легко видеть либо на сайтах, специализирующихся на предоставлении и обработке данных температурно-ветрового зондирования атмосферы [например, 2], либо ознакомившись с перечнем количественных характеристик атмосферы, предлагаемых специализированным программным обеспечением (например, RAOB) или на специализированных сайтах [3].

Сильно обобщая исследования, имеющие отношение к условиям образования и развития низкой облачности, попытаемся выделить наиболее значимые результаты. В [4-13] описаны общие условия развития низкой облачности и характерное для них распределение метеовеличин в нижней тропосфере, которое формируется под действием синоптических процессов в условиях сравнительно однородной подстилающей поверхности.

В ряде работ проведена типизация процессов, ведущих к образованию и развитию низкой облачности, из которых можно выделить анализ [14], базирующийся на количественных характеристиках атмосферы, а также рассмотрены временные разрезы поля температуры, точки росы, ветра, турбулентности и упорядоченных вертикальных движений в периоды с низкой облачно-

стью для каждой из групп процессов. В результате было выявлено, что повышение точности прогноза низкой облачности связано с разделением признаков и приемов по выделенным группам процессов, с учетом наиболее информативных.

Общей чертой большинства работ является то, что полученные выводы имеют отношение к одному пункту, что существенно обедняет значимость полученных результатов и не дает возможность дополнить анализ условий развития явления в данном пункте анализом условий его развития над некоторой территорией. Для конвективной облачности подобное исследование (с позиций гидродинамической неустойчивости) было проведено в [15], и дало возможность прийти к выводу о том, что характеристики облачности определяются не локальными значениями параметров в зоне её расположения, а средними их значениями в зоне шириной несколько сот километров.

Сравнительно редки случаи использования в научных публикациях дифференциальных характеристик поля скорости ветра для исследования низкой облачности, при этом чаще всего оценивают величину дивергенции. В частности, в исследовании [16], посвященном улучшению методов прогнозирования на авиабазе ВВС США Ванденберг (штат Калифорния), рассматривался вопрос динамического взаимодействия средних уровней атмосферы и пограничного слоя и влияние этого взаимодействия на эволюцию слоистообразной облачности над морем, а также проводился сбор статистических данных об очагах конвергенции и дивергенции (без учета их интенсивности) у земной поверхности в сроки наблюдения, характеризовавшиеся наличием низкой облачности. При этом анализировалось количество случаев конвергенции и дивергенции в сопоставлении с направлением ветра и высотой нижней границы облачности (далее – НГО). Американскими исследователями [17] изучалось влияние дивергенции на суточный ход характеристик слоистообразной облачности вдоль побережья Калифорнии в июне 1996 г. В результате установлено, что структура поля дивергенции играет важную роль в их эволюции.

Подводя итог, отметим, что в большинстве работ внимание уделяется описанию количественных характеристик адвекции, обуславливающей формирование низкой облачности. Динамическая же структура атмосферы при этом является недостаточно освещенным вопросом, что приводит к дефициту количественных критериев прогноза низкой облачности, учитываю-

щих особенности циркуляционных механизмов в зоне её формирования. Имеющиеся зарубежные исследования по указанной тематике хотя и частично проливают свет на этот вопрос, но носят преимущественно региональный характер.

3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования в качестве исходных использовались данные численной модели GFS (глобальная версия). В частности, производился отбор данных зональной и меридиональной составляющих скорости ветра у земли и на основных изобарических поверхностях (1000, 925, 850 и 700 гПа) с горизонтальным разрешением регулярной сетки точек (РСТ) $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Источником данных являлся оперативный сервер NOMADS Национальной метеорологической службы США. За основные сроки 00, 06, 12, 18 СГВ использовались данные объективного анализа соответствующих прогонов модели, за промежуточные сроки 03, 09, 15, 21 СГВ – прогностические данные от прогонов модели за 00, 06, 12, 18 СГВ соответственно (рис. 1).

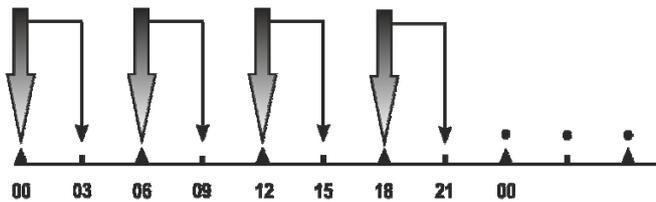


Рис. 1 – Схема получения исходных данных с американского сервера NOMADS в масштабе 1 суток.

Большими стрелками показана периодичность обновления данных модели GFS (анализ), тонкими стрелками показаны сроки, в которые использовались прогностические данные.

Расчет и визуализация дифференциальных характеристик поля скорости (вертикальной составляющей вихря скорости Ω_z и дивергенции D) проводились с помощью алгоритмов и графических процедур АРМ синоптика (версия 7.20 от 04. 05. 2015 г.), любезно предоставленных разработчиком В. В. Михайловским и модифицированных авторами для настоящего исследования.

Для получения представления о пространственно-временной структуре динамических характеристик нижнего (от уровня земли до уровня 700 гПа) слоя атмосферы при формировании низкой облачности рассмотрен случай выхода на территорию Украины циклона с юго-запада в период с 05. 01. 2016 г. по 09. 01. 2016 г. При этом главное внимание уделялось тем проме-

жуткам времени, в течение которых значения НГО находились ниже отметки 100 м. Выбор этого значения объясняется тем, что именно с данной высотой НГО связаны наиболее существенные ограничения на посадку воздушных судов. Именно по этой причине 07. 01. 2016 г. в «Международном аэропорту Одесса» не смогли в соответствии с расписанием совершить посадку три самолета: первый из которых – регистрационный код UR-GAS – был отправлен в аэропорт «Борисполь», второй – авиакомпании LOT – вернулся в аэропорт вылета («Варшавский международный аэропорт им. Фредерика Шопена»), третий – регистрационный код TNY7MU – был отправлен в зону ожидания.

В качестве динамических характеристик атмосферы, используемых для анализа, помимо вихря скорости Ω_z и дивергенции D , рассмотрим также их вертикальный градиент ($d\Omega_z/dz$ и dD/dz) и локальную производную ($\partial\Omega_z/\partial t$ и $\partial D/\partial t$). Этот набор параметров рассчитывался каждые 3 часа, с 00 СГВ 05. 01. 2016 г. по 09. 01. 2016 г., на уровне земли и на изобарических поверхностях 925, 850 и 700 гПа, что позволило сформировать их временные ряды на указанных высотах.

4. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ временного хода нижней границы облачности, представленный на рис. 2, показывает, что в течение указанного периода наблюдались три отрезка времени (38 - 40 ч, 46 - 51 ч и 59 - 70 ч), в течение которых НГО опускалась ниже отметки 100 м.

Для проведения дальнейших расчетов целесообразно ограничиться временным отрезком до 81 часа, когда рост НГО становится устойчивым, а её значения не представляют практического значения для деятельности авиации. Поскольку дискретность наблюдений за НГО не совпадает с временной дискретностью параметров, выбранных в качестве динамических характеристик, приведем временной ряд НГО к требуемой периодичности (3 часа).

Воспользовавшись методом скользящего среднего и реализуя его с помощью встроенного алгоритма программного обеспечения Origin Laboratory 8.0 (функция Smooth), получим ряд (рис. 3) НГО, отвечающий указанной периодичности.

Для определения характеристик, находящихся в наиболее тесной связи с эволюцией НГО, рассчитаем циклическую корреляцию между соответствующими по времени значениями НГО

и исследуемыми величинами, принимая их изменения во времени как периодические функции. Анализ полученных графиков циклической корреляции для характеристик вихря скорости, представленных на рис. 4, свидетельствует, что корреляционная связь близкая к значимой наблюдается между значениями НГО и вертикальной составляющей вихря скорости на изобариче-

ской поверхности 925 гПа (рис. 4, а). Характерно, что момент времени, когда корреляционная связь приближается к значимой ($r > 0,5$), совпадает с моментом понижения НГО ниже 100 м.

Два другие характеристики вихря скорости ($d\Omega_z/dz$ и $\partial\Omega_z/\partial t$) не демонстрируют значимой корреляционной связи ни на одном из рассматриваемых уровней (рис. 4 б, в).

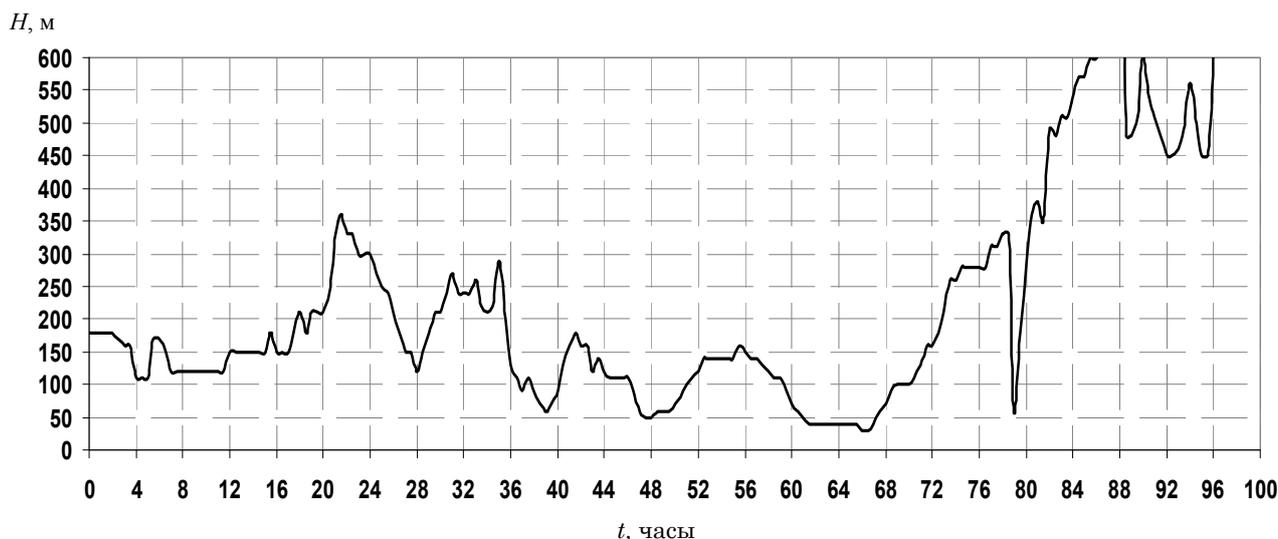


Рис. 2 – Временной ход НГО (с разделением в 0,5 ч) в период с 05. 01. 2016 г. по 09. 01. 2016 г. по данным аэродрома Одесса. Отметка 0 ч соответствует сроку 00 СГВ 05. 01. 2016 г., соответственно отметки 24, 48 и 72 ч показывают границы суток по СГВ в течение рассматриваемого периода.

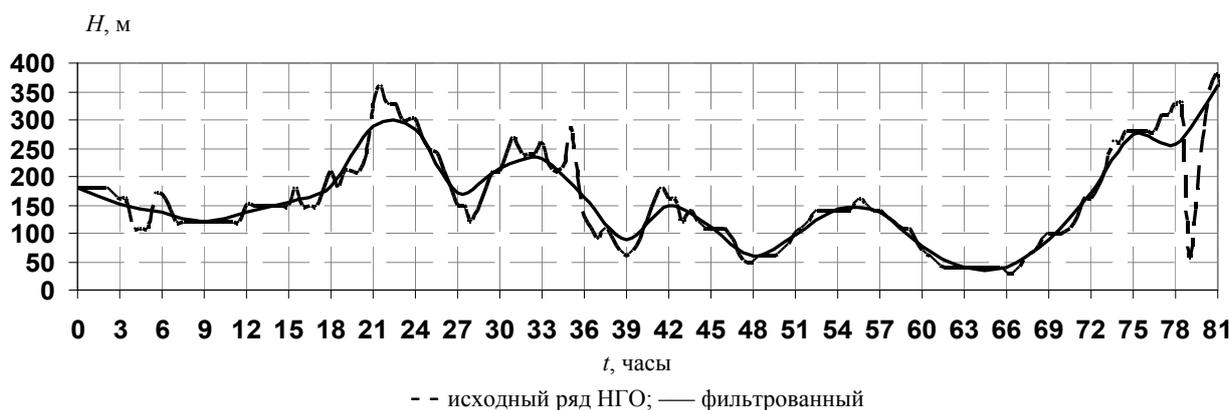


Рис. 3 – Фактический и сглаженный ($n = 6$, где n окно скользящего) ряды НГО на ст. Одесса (узел РСТ с координатами $46^{\circ}30'$ с.ш., $30^{\circ}30'$ в.д.) в период с 00 СГВ 06. 01. 16 по 09 СГВ 08. 01. 16.

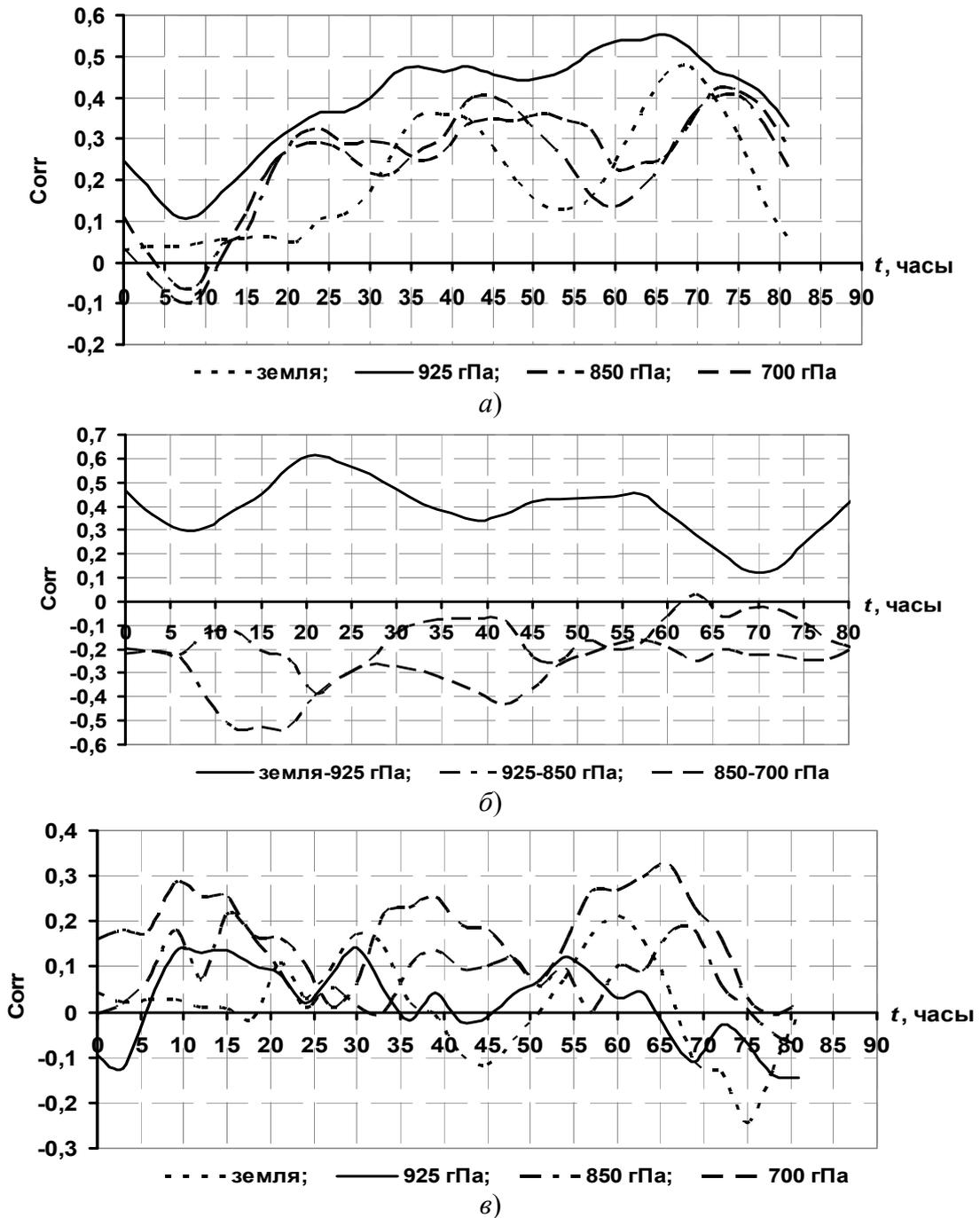


Рис. 4 – Корреляционная зависимость между временным ходом НГО и вихрем скорости (а), его вертикальным градиентом (б) и локальной производной (в) на указанных уровнях.

Отдавая отчет о достаточно слабой корреляционной связи НГО с характеристиками вихря скорости, все же остановимся на анализе отрезка времени, в течение которого было нарушено расписание движения воздушных судов из-за понижения нижней границы облачности.

На рис. 5 представлен временной ход вихря скорости на уровне земли и изобарической поверхности 925 гПа в течение временного интервала от 60 до 72 часов (от 12 СГВ 07. 01. 16 до 00 СГВ 08. 01. 16) из которого видно, что моменту

понижения НГО соответствует уменьшение циклонической завихренности на уровне 925 гПа и его повышение у поверхности земли (период с 60 до 63 часов), что обуславливает смену знака вертикального градиента вихря с положительной на отрицательную (с 63 до 68 часов). Периоду повышения НГО соответствует обратный процесс – уменьшение завихренности у земли и её увеличение на уровне 925 гПа (с 68 часов).

Таким образом, положительная корреляционная связь на уровне 925 гПа говорит о том, что

уменьшение значений завихренности на данной изобарической поверхности с одновременным её увеличением у земли соответствует понижению НГО или, другими словами, понижению НГО сопровождается изменением знака градиента вертикальной составляющей вихря скорости в слое облакообразования.

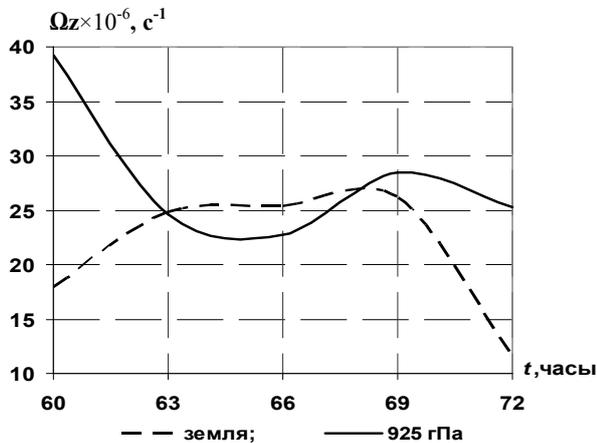


Рис. 5 – Временной ход вертикальной составляющей вихря скорости Ω_z на уровнях земли и 925 гПа в период понижения НГО ниже отметки 100 м.

Корреляционная связь между НГО и характеристиками дивергенции существенно отличается от связи с характеристиками завихренности. В частности, из рис. 6 видно, что в периоды максимального понижения НГО наблюдается значимая ($-0,8 < r < -0,6$) обратная корреляционная связь между дивергенцией у поверхности земли и НГО. Одновременно в этот же период (с 60 до 70 ч) на уровне 850 гПа прослеживается пик слабой положительной корреляционной связи, который говорит о наличии дефицита массы на этом уровне. Соответственно, процесс понижения НГО сопровождается формированием динамических условий, благоприятствующих активному поступлению воздуха в слой облакообразования от поверхности земли и его растеканию выше слоя облакообразования. Дивергенция на уровне 700 гПа значимой корреляционной связи с НГО на протяжении рассматриваемого периода не показывает.

Обратимся к графику временного хода дивергенции (рис. 7), исключив при этом из рассмотрения первый промежуток времени (38 - 40 ч) в силу его непродолжительности.

Видно, что периодам понижения НГО соответствует формирование профицита массы у земли (отрицательные значения дивергенции уменьшаются) и её дефицита (положительные значения дивергенции растут) на уровне

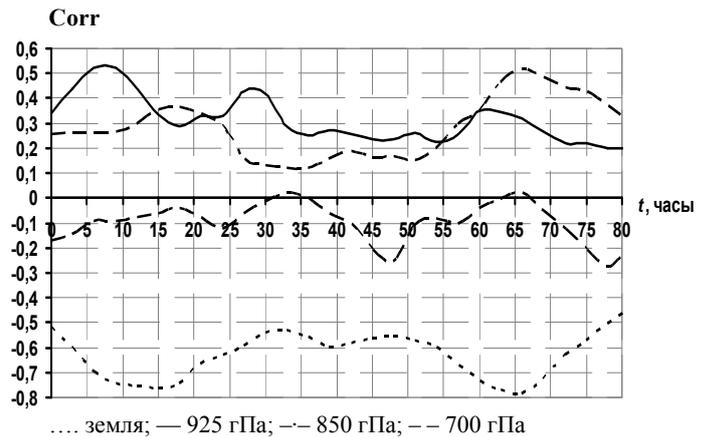


Рис. 6 – Корреляционная зависимость между временным ходом НГО и дивергенцией (для уровня земли $|T_{эмп}| > |t_{кр}|(0,05; 24)$, где $T_{эмп} = r_{xy} \cdot \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}$, $n = 26$ – объем выборки; r_{xy} – коэффициент корреляции).

925 гПа. Такая динамика обеспечивает приток воздуха от поверхности земли к слою облакообразования и его последующий отток с временным сдвигом ≈ 3 часа на уровне близком к поверхности 925 гПа или, что наиболее вероятно, под задерживающим слоем. В то же время, изменение дивергенции на уровне поверхности 850 гПа, аналогичны её изменениям у поверхности земли. При этом, во время максимальных понижений НГО, наблюдаются её большие, чем на уровне земли, но меньшие, чем на уровне 925 гПа, значения.

Характерно, что временным промежуткам с минимальными значениями НГО соответствуют наибольшие пики отрицательной дивергенции, указывающие на её значительные градиенты в подоблачном слое, и, как следствие, на преобладающее поступление воздуха в слой облакообразования от поверхности земли.

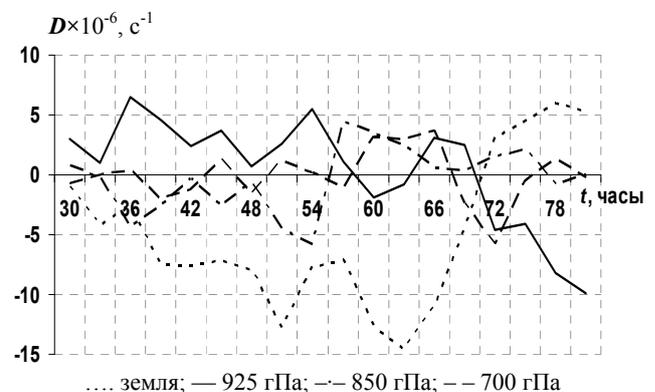


Рис. 7 – Временной ход дивергенции на ст. Одесса (узел РСТ с координатами 46°30' с. ш., 30°30' в. д.) в период с 06 СГВ 06. 01. 16 до 06 СГВ 08. 01. 16

Переходя к анализу влияния вертикального градиента дивергенции на эволюцию низкой облачности и отмечая значимую корреляционную связь между этими двумя характеристиками ($r > 0,6$) на протяжении периода максимального понижения НГО (рис. 8) в слое от земли до уровня 925 гПа, остановимся на следующем.

Сравнивая на рис. 9 временной ход вертикального градиента дивергенции в слое земля-925 гПа и 925-850 гПа, несложно увидеть, что периоды понижения НГО ниже отметки 100 м (38-40 ч, 46-51 ч и 59-70 ч) характеризуются наличием разнонаправленных пиков с неким временным смещением.

А именно, при понижении НГО увеличению положительных значений вертикального градиента дивергенции в слое земля -925 гПа соответ-

ствует уменьшение его отрицательных значений в слое 925-850 гПа.

В то же время, в слое 925 - 850 гПа с уже указанным временным сдвигом в 3 часа происходит уменьшение вертикального градиента дивергенции – на уровне 850 гПа формируется либо избыток массы, либо её меньший, чем на уровне 925 гПа, дефицит.

Процесс повышения НГО сопровождается обратным процессом, что позволяет динамику процессов понижения и повышения НГО представить в виде схемы (рис. 10).

Локальные изменения дивергенции (рис. 11) значимого влияния на изменения НГО ни на одном из рассматриваемых уровней не оказывают.

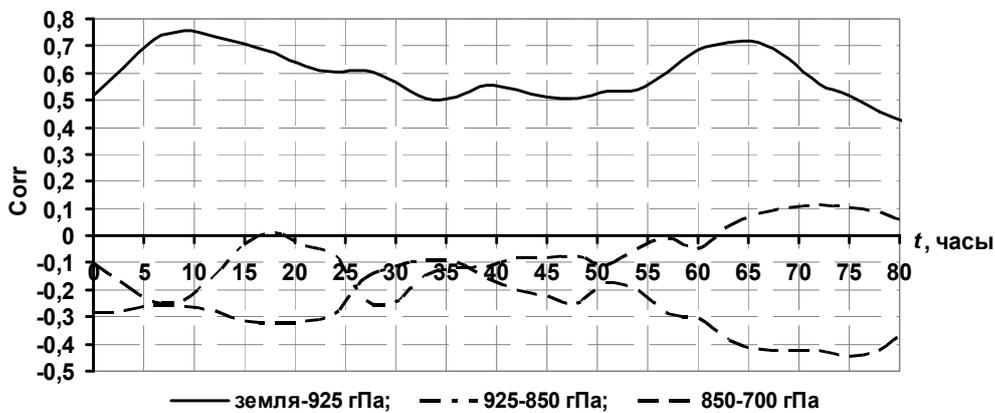


Рис. 8 – Корреляционная зависимость между временным ходом НГО и вертикальным градиентом дивергенции для указанных слоев (для слоя земля-925 гПа $|T_{эмп}| > |t_{кр}|(0,05; 24)$, где $T_{эмп} = r_{xy} \cdot \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}$, $n = 26$ – объем выборки; r_{xy} – коэффициент корреляции).

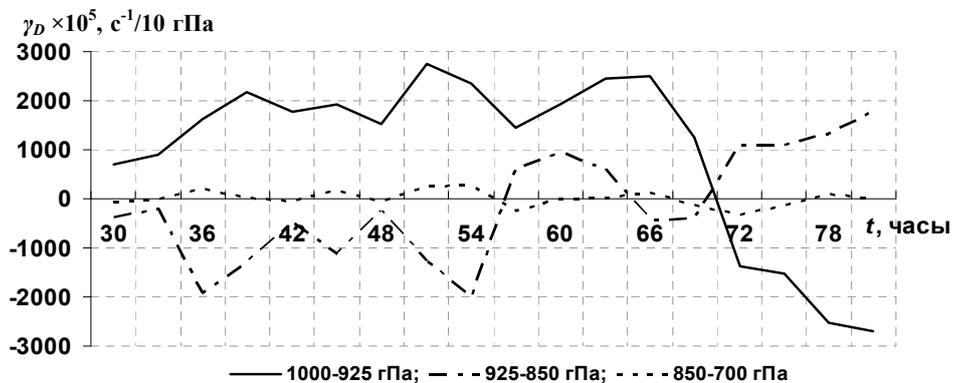


Рис. 9 – Временной ход вертикального градиента дивергенции на ст. Одесса (узел РСТ с координатами 46°30' с. ш., 30°30' в. д.) в период с 06 СГВ 06. 01. 16 до 06 СГВ 08. 01. 16.

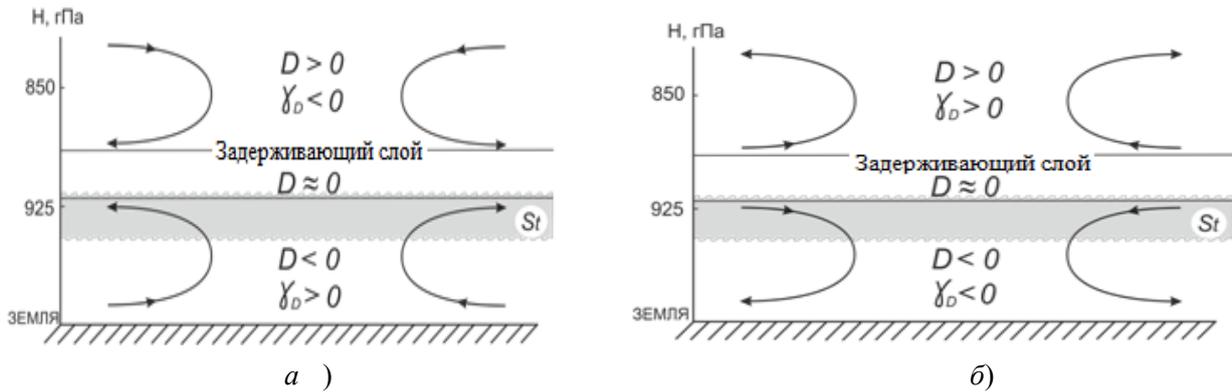


Рис. 10 – Схема влияния дивергенции D и её вертикального градиента γ_D на процессы понижения (а) и повышения (б) НГО.

Для проверки правильности наших выводов о влиянии дивергенции на эволюцию НГО, построим поле значений нижней границы облачности за сроки 12 и 15 СГВ 07. 01. 2016 (рис. 12). Если полученные по временным рядам результаты верны, то пространственная структура поля дивергенции в зоне, характеризующейся минимальными значениями НГО, должна быть идентичной той, которая наблюдалась в моменты максимального понижения НГО.

Вертикальные разрезы дивергенции, представленные на рис. 13, через зону со значениями НГО менее 100 м за указанные сроки (соответственно вдоль кривых AB и $A'B'$) показывают наличие очагов с отрицательными значениями

у поверхности земли и их постепенное ослабление до уровня 925 гПа, а также области с её положительными значениями выше уровня 850 гПа.

Область, соответствующая значениям дивергенции близким к нулевым, вероятнее всего, идентифицирует задерживающий слой, под которым находится слой облакообразования.

Характерно, что отрезкам с наименьшей высотой нижней границы задерживающего слоя соответствуют участки с наибольшим вертикальным градиентом дивергенции, что подтверждает полученные выше заключения.

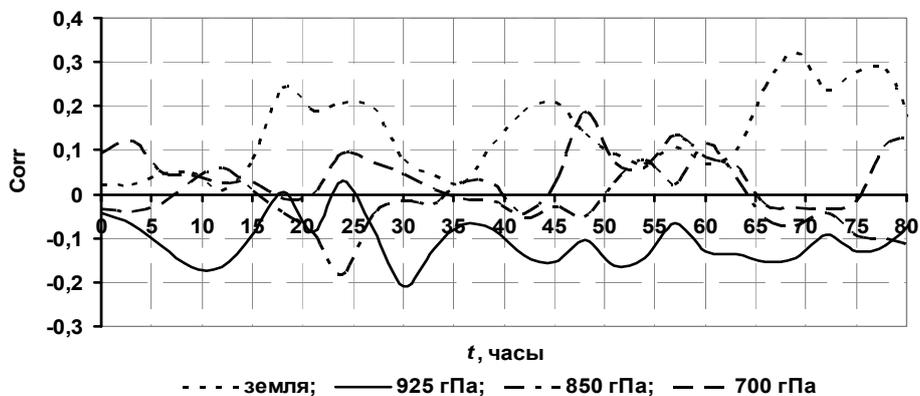


Рис. 11 – Корреляционная зависимость между временным ходом НГО и локальной производной на указанных уровнях.

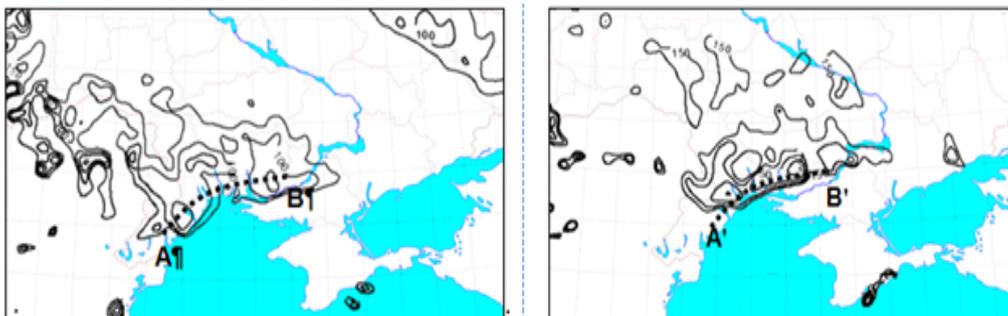


Рис. 12 – Поле нижней границы облачности ($H_n \leq 150$ м) за 12 (а) и 15 (б) СГВ 07. 01. 2016 (пунктиром (кривые AB и $A'B'$) показаны линии, вдоль которых построены вертикальные разрезы дивергенции)

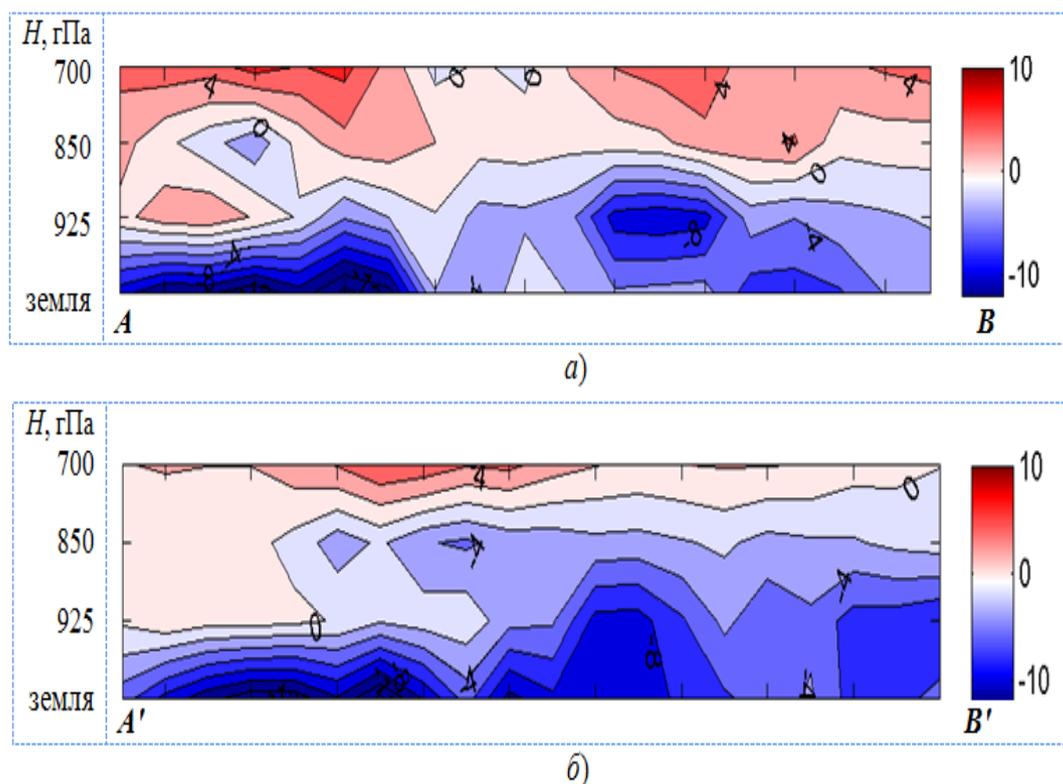


Рис. 13 – Вертикальные разрезы дивергенции $D \times 10^{-6}, \text{c}^{-1}$ вдоль кривых AB (а) и $A'B'$ (б) за сроки 12 и 15 СГВ 07. 01. 2016 соответственно.

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- вертикальная составляющая вихря скорости, его вертикальный градиент и локальная производная не оказывают значимого влияния на изменение нижней границы низкой облачности, при этом в момент её наибольшего понижения в подоблачном слое наблюдаются отрицательные значения вертикального градиента вихря;

- понижение нижней границы облачности сопровождается уменьшением отрицательных значений дивергенции у поверхности земли с одновременным увеличением её положительных значений на уровнях 925 и 850 гПа. Первое обуславливает приток воздуха от земли к облакосо-державшему слою, второе – его отток с дальнейшим растеканием под задерживающим слоем или в нем;

- понижение НГО сопровождается увеличением положительных значений вертикального градиента дивергенции ниже слоя облакообразования и уменьшением его отрицательных значений (с временным лагом 3 - 4 часа) выше указанного слоя, повышение НГО – обратным

процессом с сохранением временного лага;

- локальная производная дивергенции в нижнем слое атмосферы не оказывает значимого влияния на эволюцию НГО;

- пространственные вертикальные разрезы поля дивергенции через области с минимальными значениями НГО подтверждают необходимость поступления воздуха в слой облакообразования от поверхности земли и его оттоке (растекании) выше слоя облакообразования для формирования низкой облачности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность к. геогр. н. Пишняку Д. В. и аспиранту Institute of Pharmacology and Toxicology, University of Wuerzburg Грушевскому Е. О. за оказанную практическую помощь и консультации по обработке массивов данных и визуализации результатов расчетов, а также начальнику АМСГ Одесса Драган А. Н. за любезно предоставленные данные о фактической погоде, использованные в статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссия экспертов подтвердила высшую категорию аэродрома «Борисполь» и повысила уровень пожарной защиты // Международный аэропорт «Борисполь». URL: <http://kbp.aero.ru/about/press-center/news/2014/666/> (дата обращения 22 мая).
2. Аэрологическая диаграмма / орг. «StopDesign». URL: http://meteo.paraplan.net/forecast/aerological_diagram.html (accessed 5 May).
3. Atmospheric Soundings. *University of Wyoming, College of Engineering and Applied Science, the Department of Atmospheric Science*. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (accessed 13 April).
4. Абрамович К. Г., Хргиан А. Х. Организация исследования условий возникновения облачности нижнего яруса // Труды ЦИП. 1959. Вып. 80. С. 3-9.
5. Абрамович К. Г. Об условиях образования облачности нижнего яруса // Труды ЦИП. 1959. Вып. 80. С. 10-41.
6. Гоголева Е. И. Изменения дефицита точки росы перед появлением и рассеиванием облачности высотой ниже 600 м // Труды ЦИП. 1959. Вып. 80. С. 42-57.
7. Колоколова Г. В. Определение уровня переноса при прогнозе низкой облачности // Труды ЦИП. 1959. Вып. 80. С. 58-63.
8. Арраго Л. Р., Швец М. Е. К теории образования и эволюции неконвективной облачности // Труды ЦИП. 1961. Вып. 121. С. 53-58.
9. Абрамович К. Г. Некоторые особенности распределения метеорологических элементов в нижней части тропосферы в облачные и безоблачные дни // Труды ЦИП. 1964. Вып. 136. С. 3-11.
10. Рубинштейн М. В. Прогноз облачности высотой 100 м и менее на 3-6 час. с помощью диаграмм рассеяния // Труды ЦИП. 1966. Вып. 157. С. 5-11.
11. Абрамович К. Г., Глазунов В. Г. Условия формирования и эволюции нижних облаков на Украине в ноябре – декабре 1962 г. // Труды ЦИП. 1966. Вып. 157. С. 25-44.
12. Абрамович К. Г. Некоторые особенности переноса в нижних слоях атмосферы и их роль в формировании стратификации при нижней облачности // Труды ГМЦ. 1967. Вып. 7. С. 50-62.
13. *Clouds and Precipitation. Handbook of Weather Forecasting*. United Kingdom Meteorological Office. Bracknell: Meteorological Office, 1975. Chapter 19. 161 p.
14. Абрамович К. Г. К характеристике атмосферных процессов в дни с нижней облачностью // Труды ЦИП. 1964. Вып. 136. С. 12-26.
15. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н. Спектры повторяемости осадков на территории европейской части бывшего СССР в зависимости от интенсивности фронтальных зон и конвективной неустойчивости сеточного масштаба // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 4. С. 5-18.
16. Wells L. A. Marine Layer Stratus Study. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, vol. 164, pp. 1397-1421.
17. Koračin D., Dorman C. E. Marine Atmospheric Boundary Layer Divergence and Clouds along California in June 1996. *Monthly Weather Review*, 2001, vol. 129, pp. 2040-2056.

REFERENCES

1. Komissiya ekspertov podtverdila vysshuyu kategoriyu aerodroma «Borispol» i povysila uroven' pozharnoy zashchity [The commission of experts confirmed the highest Boryspil airport category and increased the level of fire protection]. *Mezhdunarodnyy aeroport «Borispol» - Boryspil International Airport*. URL: <http://kbp.aero.ru/about/press-center/news/2014/666/> (accessed 22 May).
2. Aerologicheskaya diagramma [Aerological diagram]. *Organizatsiya «StopDesign» - StopDesign organization*. URL: http://meteo.paraplan.net/forecast/aerological_diagram.html (accessed 5 May).
3. Atmospheric Soundings. *University of Wyoming, College of Engineering and Applied Science, the Department of Atmospheric Science*. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (accessed 13 April).
4. Abramovich K. G., Khrigian A. Kh. Organizatsiya issledovaniya usloviy vzniknoveniya oblachnosti nizhnego yarusa [The organization of the study of the onset conditions of the low-level cloudiness]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1959, issue 80, pp. 3-9.
5. Abramovich K. G. Ob usloviyakh obrazovaniya oblachnosti nizhnego yarusa [On the formation conditions of the low-level cloudiness]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1959, issue 80, pp. 10-41.
6. Gogoleva E. I. Izmeneniya defitsita tochki rosy pered poyavleniem i rasseivaniem oblachnosti vysotoy nizhe 600 m [Dew-point deficit changes before the onset and dissipation of the clouds with bases below 600 m]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1959, issue 80, pp. 42-57.
7. Kolokolova G. V. Opredelenie urovnya perenosa pri prognoze nizkoy oblachnosti [Determination of the transfer level in forecasting low cloudiness]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1959, issue 80, pp. 58-63.
8. Arrago L. R., Shvets M. E. K teorii obrazovaniya i evolyutsii nekonvektivnoy oblachnosti [Towards the theory of the formation and evolution of the non-convective clouds]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1961, issue 121, pp. 53-58.
9. Abramovich K. G. Nekotorye osobennosti raspredeleniya meteorologicheskikh elementov v nizhney chasti troposfery v oblachnye i bezoblachnye dni [Some features of the distribution of meteorological elements at the bottom of the troposphere during the cloud and cloudless days]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1964, issue 136, pp. 3-11.
10. Rubinshteyn M. V. Prognoz oblachnosti vysotoy 100 m i menee na 3-6 chas. s pomoshchyu diagramm rasseyaniya [Prediction of the cloudiness with a base at 100 m and less with the lead time of 3-6 hours by using scattering diagrams]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1966, issue 157, pp. 5-11.
11. Abramovich K. G., Glazunov V. G. Usloviya formirovaniya i evolyutsii nizhnikh oblakov na Ukraine v noyabre –

dekabre 1962 g. [Conditions of the formation and evolution of the lower clouds in Ukraine in November - December 1962]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecasting Institute*, 1966, issue 157, pp. 25-44.

12. Abramovich K. G. Nekotorye osobennosti perenosa v nizhnich sloyach atmosfery i ich rol v formirovanii stratifikatsii pri nizhney oblachnosti [Some features of the transfer in the lower atmosphere and their role in the formation of stratification in the presence of the lower cloudiness]. *Trudy GMC – Proceedings of the Hydrometeorological Centre*, 1967, issue 7, pp. 50-62.

13. *Clouds and Precipitation. Handbook of Weather Forecasting*. United Kingdom Meteorological Office. Bracknell: Meteorological Office, 1975. Chapter 19. 161 p.

14. Abramovich K. G. *K kharakteristike atmosferynykh processov v dni s nizhney oblachnostyu* [On the characterization of the atmospheric processes during the days with the lower clouds]. *Trudy CIP – Proceedings of the Central Forecast-*

ing Institute, 1964, issue 136, pp. 12-26.

15. Shakina N. P., Skriptunova E. N. *Spektry povtoryaemosti osadkov na territorii evropeyskoy chasti byvshego SSSR v zavisimosti ot intensivnosti frontalnykh zon i konvektivnoy neustoychivosti setochnogo masshtaba* [Spectra of the precipitation repeatability in the European part of the former Soviet Union, depending on the intensity of the frontal zones and grid scale convective instability]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and hydrology*, 2006, issue 4, pp. 5-18.

16. Wells L. A. Marine Layer Stratus Study. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, vol. 164, pp. 1397-1421.

17. Koračin D., Dorman C. E. Marine Atmospheric Boundary Layer Divergence and Clouds along California in June 1996. *Monthly Weather Review*, 2001, vol. 129, pp. 2040-2056.

ON STRUCTURE OF DYNAMIC FEATURES OF THE LOWER LAYER OF THE ATMOSPHERE AT LOW CLOUDINESS

O. N. Hrushevskiy, candidate of sciences, associate professor,

O. Ye. Yeshanu, Head of the Research Laboratory of the Department of Military Training

N. M. Mishchenko, candidate of sciences, associate professor

*Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, ogrush@ukr.net*

Low cloudiness is one of the most important factors of a flight meteorological situation determining safety of aircrafts landing.

The majority of publications devoted to the problem of stratiform cloudiness focus main attention on either studying of quantitative parameters of heat and moisture advection or typification of synoptic processes leading to its emergence and evolution. Therefore the main goal of the article consists in study of the spatiotemporal structure of dynamic features of the clouds-containing layer.

Using the example of weather conditions causing air traffic disruption at Odessa International Airport, the article studies spatiotemporal structure of dynamic features of the lower layer of the atmosphere at the time of low cloudiness formation and its degradation. Complex usage of GFS model data with high resolution and data of actual observations with regard to cloudiness ceiling ensured obtaining conclusions about the nature of circulation conditions during its evolution.

In particular, usage of time series helped to determine that vorticity and its features do not significantly affect low cloudiness formation unlike divergence and its vertical gradient. The conclusions obtained are confirmed via drafting of spatial vertical cross sections through the regions with minimum cloudiness ceiling.

Quantitative and qualitative assessments of dynamic structure of the lower layer of the atmosphere at the time of low cloudiness formation may be used when developing criteria and parameters for its forecast.

Keywords: low cloudiness, dynamic features, advection, divergence, vorticity, gradient, cloudiness evolution.

ПРО СТРУКТУРУ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖНЬОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ ЗА НАЯВНОСТІ НИЗЬКОЇ ХМАРНОСТІ

О. М. Грушевський, к.геогр.н., доцент, начальник кафедри військової підготовки
О. Є. Єшану, завідувач науково-дослідної лабораторії кафедри військової підготовки
Н. М. Міщенко, к.геогр.н., доцент кафедри метеорології та кліматології

*Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, ogrush@ukr.net*

На прикладі погодних умов, що призвели до порушення руху повітряних суден в міжнародному аеропорту «Одеса», в статті розглянуто просторово-часова структура динамічних характеристик нижнього шару атмосфери при формуванні низькою хмарності і її деградації. Комплексне використання даних моделі GFS з високою-ким дозволом і даних фактичних спостережень за нижньою межею хмарності дозволило отримати висновки про характер циркуляційних умов в процесі її еволюції.

Зокрема, використання часових рядів даних дозволило встановити, що вихор швидкості і його характеристики не надають значного впливу на формування низької хмарності на відміну від дивергенції і її вертикального градієнту. Отримані висновки підтверджені побудовою просторових вертикальних розрізів через області з мінімальними значеннями нижньої межі хмарності.

Ключові слова: низька хмарність, динамічні характеристики, адвекція, дивергенція, вихор швидкості, еволюція хмарності.

Дата першого подання: 05. 10. 2016

Дата надходження остаточної версії : 21. 11. 2016

Дата публікації статті : 24. 11. 2016