

УДК 551.557.5

Э.В. Агайар, к. геогр. н.

Одесский государственный экологический университет

СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НИЖНЕГО УРОВНЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ СЛАБОМ ВЕТРЕ У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Рассмотрены особенности формирования струйных течений нижнего уровня атмосферы (СТНУ) над территорией Северо-Западного Причерноморья и определена их связь с наличием слабого ветра у поверхности земли.

Ключевые слова: СТНУ, слабый ветер, малоградиентное поле, задерживающие слои.

Введение. Формирование слабого ветра у поверхности земли над Северо-Западным Причерноморьем, как и над многими географически неоднородными территориями [2, 10, 11], часто связано со струйными течениями нижних уровней (СТНУ) и задерживающими слоями [1, 4].

Целью исследования является выявление связи между наличием СТНУ и формированием слабого ветра у поверхности земли над территорией Северо-Западного Причерноморья.

Материалы исследования и полученные результаты. Для получения связи между характеристиками СТНУ и скоростью приземного ветра использовались данные трехразовых радиозондирований за период 1981-1990 гг., одноразовых за следующее десятилетие (1991-2000 гг.), а также дневники погоды по станции Одесса-ГМО и синоптические карты (приземные, АТ₈₅₀ и АТ₅₀₀). Для ст. Кишинев взяты 6-летние метеорологические и аэрологические наблюдения (1983-1988 гг.) в центральные месяцы сезонов (январь, апрель, июль, октябрь).

Известно [7, 8, 9], что за последние 20 лет скорость ветра значительно уменьшилась над большинством регионов Европы, в том числе и над Украиной. Это ослабление скорости хорошо видно на примере пяти метеорологических станций, расположенных на побережье Черного моря в районе Одессы. Среднегодовая скорость приземного ветра за период 1991-2000 гг. составляет на станциях: Одесса-ГМО – 3,0 м·с⁻¹, порт-Ильичевск – 3,4 м·с⁻¹, порт-Одесса – 4,6 м·с⁻¹, порт -Южный – 4,5 м·с⁻¹ и Одесса - АМСГ – 4,7 м·с⁻¹, что значительно меньше аналогичных значений за предыдущие десятилетия [6]. В качестве примера в табл. 1 приведена повторяемость слабых (0...4 м·с⁻¹) скоростей ветра по срокам в центральные месяцы каждого сезона в портах Ильичевск и Южный, а также на станции Одесса-АМСГ.

Слабый ветер преобладает на станции Ильичевск-порт во все сезоны и сроки, изменяясь в среднем за сутки от 77,4 в холодный до 87,5% в теплый период, при этом максимальное их количество фиксируется в июле 91,6 % (06 UTC). На станции Одесса-АМСГ в дневные часы ветер значительно усиливается и повторяемость слабого ветра снижается до 20-35%; ночью доминирует слабый ветер в течение всего года. Среднегодовая амплитуда колебания повторяемости составляет 3,6%. В порту Южный слабый ветер наблюдается в 51,4% случаев в октябре и 60,5% в апреле. Такая различная повторяемость слабого ветра на станциях, расположенных на небольшом расстоянии одна от другой, при одних и тех же синоптических условиях, по-видимому, связана с физико-географическим расположением станций.

За период наблюдений над Одессой при наличии слабого ветра (до 4 м·с⁻¹) у поверхности земли выявлены 58 СТНУ в зимне-весенний и 41 струя в летне-осенний период (табл. 2). Струйным течением нижнего уровня принято

называть наличие в пределах пограничного слоя атмосферы пика скорости ветра $\geq 15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, если в 300-метровом слое выше и ниже уровня максимума скорость изменяется на $3\text{-}4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и более [3].

Наибольшая повторяемость СТНУ связана с циклонической циркуляцией; обычно это поля с небольшим градиентом давления. Максимальное число случаев (33%) СТНУ приходится на зиму и весну и связано с западным переносом, который соответствует южной или юго-восточной периферии циклона, и южным переносом (20%), что характерно для передней части циклона; наименьшая повторяемость (10%) струй зафиксирована при – восточном переносе (южная периферия антициклона) и в седловине.

Таблица 1 – Повторяемость (%) слабого ветра по срокам за период 1991-2000 гг.

Месяц	Сроки, UTC								Сутки
	00	03	06	09	12	15	18	21	
Ильичевск-порт									
I	49,0	77,4	80,4	78,7	76,8	74,2	72,6	80,0	77,4
IV	86,0	81,3	83,0	79,3	73,7	69,7	76,4	83,0	79,1
VII	90,0	91,3	91,6	87,4	83,6	81,0	85,8	90,0	87,5
X	81,6	80,4	79,4	75,8	70,0	73,5	78,1	80,3	77,4
Одесса-АМСГ									
I	58,7	58,4	56,2	45,7	42,0	46,4	57,0	58,7	52,9
IV	65,6	70,1	50,8	28,4	18,7	35,8	56,6	67,3	49,1
VII	76,7	75,3	50,4	36,0	23,5	28,8	63,8	75,2	53,5
X	64,0	65,6	52,0	35,2	27,2	47,7	60,0	66,7	52,5
Южный-порт									
I	52,6	56,7	54,8	53,5	51,3	46,1	53,6	52,0	52,6
IV	64,4	65,4	66,4	58,7	53,7	53,4	57,0	63,0	60,5
VII	69,0	70,0	61,9	59,7	59,7	49,3	45,5	64,2	59,9
X	56,2	56,4	54,2	47,4	42,6	44,5	52,9	56,8	51,4

Летом и осенью наиболее благоприятные условия для возникновения низкотропосферных струй формируются также при периферийных синоптических процессах, особенно в тех случаях, когда на расстоянии 200 – 250 км от района исследования могут проходить размытые атмосферные фронты, обуславливая, как свидетельствуют наблюдения пяти метеорологических станций, различные скорости ветра на Одесском побережье.

В сезонном ходе наибольшая повторяемость (70%) струй, как и слабого ветра, наблюдается в ночные часы при наличии задерживающих слоев в пограничном слое атмосферы (ПСА). В качестве причины образования инверсии можно, по-видимому, указать механизм «застоя» более холодного воздуха при сильном излучении с подстилающей поверхности и небольшой облачности, низкой влажности и малых скоростях ветра. Кроме того, действует и динамический фактор, который обуславливает взаимосвязь воздушного потока с особенностями рельефа в расположении пяти вышеназванных метеорологических станций при наличии разрыва свойств подстилающей поверхности суша-море.

Таблица 2 – Характеристики СТНУ при наличии слабого ветра у поверхности земли в районе Одессы

Сезон	Число случаев	Мощность, м	Высота оси, м	Скорость ветра на оси, м·с ⁻¹	
				средняя	максимальная
Зима	31	800	830	20	26
Весна	27	450	580	20	26
Лето	20	280	520	17	22
Осень	21	550	900	18	23

В связи с тем, что низкотропосферные струи над побережьем Чёрного моря рассмотрены достаточно подробно [4], остановимся детальнее на струях над Молдовой.

Станция Кишинев расположена на правом склоне реки Босы на высоте около 90 м над уровнем моря. Долина реки шириной от 2 до 5 км, ориентированная с северо-запада на юго-восток, находится в среднем на высоте 75-80 м над уровнем моря. Местность расчленена балками и оврагами и в радиусе 5-10 км повышается на 200–240 м [5]. Сложный рельеф территории Молдовы с разнообразной экспозицией склонов создает значительные микроклиматические различия на сравнительно небольших расстояниях. Указанные особенности способствуют развитию как динамической, так и термической турбулентности и конвекции. Термической конвекции особенно благоприятствует неравномерность нагревания нижних слоев воздуха из-за различной экспозиции долины. Изрезанность рельефа усиливает динамическую турбулентность. Все это может приводить к развитию мощных восходящих и нисходящих движений воздуха в теплое время года. В жаркие дневные часы при значительном перегреве слоев воздуха на территории Молдовы часто развиваются пыльные и песчаные вихри. Они достигают нередко большого вертикального развития, и их прохождение сопровождается кратковременными шквалами и пыльными бурями. Сильная турбулентность приводит к порывистости ветра. Важнейшим проявлением турбулентности, кроме усиления ветра, является сглаживание вертикальных профилей всех метеорологических величин, т.е. уменьшение контрастов температуры, скорости ветра и других метеорологических параметров по вертикали.

Характерной особенностью ветрового режима в ПСА над территорией Молдовы является также наличие струйных течений нижнего уровня или, как ещё их называют, мезоструй [3, 5]. За исследуемый период (1983–1988 гг.) при наличии слабого ветра (0-4 м·с⁻¹) у поверхности земли над Кишинёвом выявлена 51 низкотропосферная струя, что соответствует 83% струй, образующихся в этот период при различных (не только слабых) скоростях ветра у поверхности земли.

Преобладающее число СТНУ (70%), как и над Одессой, связано с циклоническим полем циркуляции, однако по сезонам их повторяемость существенно различается. В январе струи отмечаются в передней части циклонов (42% случаев), в малоградиентных полях повышенного и пониженного давления (по 17%), в размытых барических полях давления, в передней части антициклона и при северо-восточном переносе (по 12%). В апреле почти половина всех мезоструй (46%) формируется в малоградиентном поле низкого давления; 27% мезоструй отмечено в малоградиентном поле тёплого сектора циклона; наименьшее число струй (всего по одной) имело место в передней и юго-западной частях антициклона с центром над Восточной Европой или в районе восточных границ Украины. В июле СТНУ преимущественно (50%) связаны с тёплыми фронтами. В октябре зарегистрировано всего четыре мезоструи, наблюдающихся либо

при синоптических ситуациях, соответствующих передней части антициклона, либо при наличии северо-западного переноса.

Таким образом, наиболее благоприятные условия для возникновения струйных течений нижнего уровня в районе Кишинёва создаются при макропроцессах, соответствующих циклонической циркуляции (27%) и малоградиентному полю пониженного давления (22%). Скорость ветра на оси фронтальных струй различается незначительно. Причем, оси струй в зоне холодного фронта, как правило, расположены ниже, чем в зоне тёплого. Анализ пространственных разрезов показывает, что в исследуемом районе, как и во многих других [12], наиболее протяженные струи связаны с атмосферными фронтами.

Продолжительность сохранения низкотропосферной струи обычно не превышает 6 часов. Чаще они отмечаются в утренний срок зондирования. В случаях, когда СТНУ связаны с тёплыми фронтами, время их существования увеличивается до 24 часов. Чаще всего струи наблюдаются при наличии облаков нижнего яруса, но также могут отмечаться при ясном небе и облаках верхнего и среднего ярусов (что следует из анализа повторяемости СТНУ по типам синоптических процессов).

Направление ветра в мезоструях над Кишинёвом, в основном, южное и северо-западное. При этом в пограничном слое атмосферы наблюдается чаще правый поворот ветра с высотой, т.е. СТНУ связаны, как правило, с адвекцией тепла, исключение составляют струи, связанные с холодными фронтами.

Если говорить о годовом ходе повторяемости СТНУ, то над Молдовой в январе и апреле они формируются чаще, чем в другие сезоны (табл. 3). Очевидно, это обусловлено повышенной повторяемостью в нижней части атмосферы задерживающих слоёв, способствующих образованию низкотропосферных струй. Зимой территория Молдовы часто находится под воздействием западной периферии гребня, ориентированного с юго-запада на северо-восток; это приводит к образованию приземных инверсий, повторяемость которых, в сочетании со смешанными, составляет 34 % в ночные и утренние часы.

Суточный ход повторяемости СТНУ выражен слабо, хотя в ночные и утренние часы обнаруживается тенденция к увеличению их числа по сравнению с дневными. Следует отметить, что над Кишинёвом 90% струй формируется при наличии изотермий и инверсий; здесь действует, очевидно, и динамический фактор, обусловленный особенностями рельефа местности – холмистая равнина и наличие гор Кодры. Для столь ограниченного региона рельеф достаточно разнообразен и сложен. Ниже приведены средние значения основных характеристик СТНУ для ст. Кишинев-ГМО (табл. 3).

Таблица 3 – Сезонные характеристики СТНУ над Кишинёвом при слабом ветре

Месяцы	Число случаев	Среднее значение		Скорость ветра на оси, м·с ⁻¹	Максимальная скорость ветра на оси, м·с ⁻¹
		мощность, м	высота оси, м		
Январь	24	430	690	15	23
Апрель	15	490	750	18	23
Июль	8	610	800	16	26
Октябрь	4	400	820	18	20

Средняя мощность (разность высот слоя, охватываемого струйным течением) струи колеблется от 610 летом до 400 м осенью. С увеличением мощности струи

скорость на её оси, как правило, не возрастает. Сравнительный анализ количественных параметров струй показывает, что при слабом приземном ветре мощность и интенсивность СТНУ меньше, а располагаются они выше струй, при которых ветер у поверхности земли над Молдовой не ограничивается значениями слабого. Если учесть, что стратификация температуры воздуха при СТНУ, как правило, устойчивая и направление ветра в струе и у поверхности земли чаще отличается более чем на 60° , то вполне очевидно отсутствие обмена (или слабый обмен) количеством движения между струёй и приземными слоями воздуха, и, как следствие, формирование скорости приземного ветра до $4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Устойчивость в слое атмосферы над струёй способствует ослаблению скорости ветра у поверхности земли до $1-4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (чаще до $2-3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) и увеличению сдвига ветра, информация о котором необходима для обеспечения безопасности воздушных судов при взлёте и заходе на посадку.

В Кишинёве повторяемость сильных сдвигов ветра больше под осью СТНУ. Сильные сдвиги ветра обычно наблюдаются при наличии задерживающих слоёв, которые, в свою очередь, влияют также и на форму струи. Над Молдовой преобладают также мезоструи, в верхней части которых вертикальный градиент скорости ветра меньше, чем в нижней (51%). Как видно из табл. 3, самые мощные струйные течения нижнего уровня тропосферы формируются летом, а самые высокие – осенью. В ночное время струи характеризуются инверсией и изотермией и, как следствие, меньшей интенсивностью турбулентного обмена между струей и «подструйным» слоем атмосферы. Средняя скорость ветра в СТНУ значительно сильнее весной и осенью, а летом и зимой струи менее интенсивны. Для сравнения (табл. 2) над Одессой струи в течение всего года интенсивнее, чем над Кишиневом. Практически все струйные течения связаны с задерживающими слоями: ночью – с приземными, днем – приподнятыми; лишь в летнее время иногда возможно образование слабого СТНУ при отсутствии задерживающего слоя.

Выводы. В целом по результатам выполненного исследования получено:

- струйные течения нижнего уровня тропосферы в районе Одессы чаще формируются в циклоническом поле давления и при периферийных атмосферных процессах; над Кишиневом наибольшее количество СТНУ наблюдается как при циклоническом типе циркуляции, так и в малоградиентных полях пониженного давления;
- над северо-западным побережьем Чёрного моря низкотропосферные струи интенсивнее, чем над Кишиневом;
- при слабом ветре у поверхности земли в пограничном слое атмосферы часто одновременно прослеживается низкотропосферное струйное течение и инверсия температуры (либо задерживающий слой в виде изотермии или замедленного градиента температуры).

Литература

1. Ивус Г. П., Ефимов В. А., Агайар Э. В. Особенности внутренней структуры пограничного слоя при слабом ветре у поверхности земли в районе Одессы // Вісник ОДЕКУ, 2005. – Вип. 1. – С. 38-45.
2. Івус Г. П. Умови утворення та прогнозу слабого вітру біля поверхні землі та інверсій температури в районі Одеси: навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.] / К.: НМК з гідрометеорології Міністерства України, 1998. – 112 с.

3. Ивус Г. П., Кивганов А. Ф., Тимофеев В. Е. Струйные течения нижних уровней атмосферы. – Киев: УМК ВО. – 1991. – 49 с.
4. Ивус Г. П., Семергей-Чумаченко А. Б. К вопросу о струйных течениях нижних уровней над Одессой // Метеорология, климатология и гидрология. – 1998. – Вып. 35. – С. 121-129.
5. Климат Кишинева / Под ред. В. Н. Бабиченко, Т. Г. Шевкун. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1982. – 168 с.
6. Климат Одессы / Под ред. Л. К. Смекаловой и Ц. А. Швер. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1986. – 174 с.
7. Казаков А. Л. Об использовании различной информации по ветру в прикладных исследованиях // Метеорология, гидрология та кліматологія. – 2005. – Вип. 49. – С. 190-203.
8. Луц Н. В. Многолетняя изменчивость скорости ветра в Восточном Приазовье // Метеорология и гидрология. 2001.– Вып. 2. – С. 98-102.
9. Мещерская А. В., Баранова А. А., Еремин В. В., Майстрова В. В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология. – 2006. – Вып. 9. – С. 46-58.
10. Kolar M. Bodennahefeld der Luftstromung auf dem Gebiet der Stadt Brno // Scr. fac. sci. natur UJEP brun. – 1986. – 16. №8. – P. 405-413.
11. 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.
12. Tapp R.G. Patters of weak, near-surface winds at Melbourne, Australia. Boundary Layer Meteorol. – 1985. – 33. №4. – P. 397-414.

Струменеві течії нижнього рівня атмосфери при слабкому вітрі у поверхні землі. Агайар Е.В.

Розглянуті особливості формування струменевих течій нижнього рівня атмосфери (СТНР) над територією Північно-Західного Причорномор'я їх зв'язок з наявністю слабкого вітру біля поверхні землі.
Ключові слова: *СТНР, слабкий вітер, малоградієнтне поле, затримуючі шари.*

Low-level jets in the presence of surface weak winds. Agayar E.V.

It was considered peculiarities formation of low-level jet streams over the territory of the North-Western Black Sea and their connection with the presence of a weak winds at the ground surface.

Keywords: *low-level jet, weak wind, weak gradient field of pressure, inversion.*