

К ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ НИЖНИХ УРОВНЕЙ

Приведены результаты моделирования струйных течений нижних уровней в ПСА с различной степенью устойчивости и разных синоптических ситуациях, как по данным отдельных станций, так и по данным ограниченной территории. Наилучшим образом восстанавливаются СТНУ во внутримассовой ситуации при наличии приземной инверсии температур воздуха. Показана роль СТНУ в распространении примесей после аварии на Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: пограничный слой, струйное течение нижних уровней, задерживающий слой, вертикальный профиль, ограниченная территория

Введение. Как известно, профессором В.А. Шнайрманом в ОГМИ была основана школа исследованиями пограничного слоя (ПСА). Большим достоинством была реально функционировавшая модель, которая постоянно совершенствовалась, переводилась на новый программный уровень. Был подготовлен ряд кандидатов наук, в числе которых С.Н. Степаненко, И.Л.Маринин, В.Н. Бондаренко, М.В. Трегубова, О.М. Лазырина. Спектр решаемых задач был очень широк. Так, целью работы И.Л.Маринина была параметризация шероховатости и количественные оценки характеристик пограничного слоя над городской застройкой, а О.М. Лазыриной – развитие комплексного метода восстановления циркуляционной и турбулентной структуры ПСА над ограниченной территорией.

Вольф Абрамович активно развивал международные контакты. В рамках программы международного научного обмена он в 1990 г. посетил Берлинский метеорологический институт, а в 1992-ом – автор статьи и О.М.Лазырина провели там месячную аспирантскую стажировку. Исследования, результаты которых представлены ниже, были начаты в рамках программы обмена и касаются специфического явления в ПСА – струйного течения нижних уровней (СТНУ).

Впервые случаи усиления ветра на малых высотах в пограничном слое атмосферы были отмечены еще в прошлом веке и упоминаются американским исследователем Эспи в работе "философия штормов". С тех пор СТНУ отмечаются повсеместно, над равнинными, прибрежными, горными пунктами, океанской поверхностью, в зоне стоковых ветров у побережья Антарктиды [3,10,16,18-24,35-46].

В первой половине XX века, вместе с началом регулярных радиозондирований нижних слоев атмосферы струйные усиления ветра связываются с опасными явлениями погоды – линии шквалов грозы, пожары, а также особенностями орографии местности. Уже в то время СТНУ связываются с усилением турбулентности в ПСА, а также с неоднородным распределением температуры воздуха по высоте.

Другое название СТНУ – мезоструя – возникло из-за того, что явление относят к типичным явлениям мезо-метеорологического масштаба α , хотя в некоторых случаях по величине временного масштаба они могут быть отнесены к синоптическому масштабу [24]. Таким образом, анализа измерений в отдельных пунктах недостаточно, чтобы исследовать пространственно-временное распространение явления. Оптимальным методом изучения является проведение наблюдений на исследовательском полигоне [32].

Один из первых комплексных экспериментов по изучению пространственно-временной структуры струй нижнего уровня был проведен в 20-ых годах XX столетия

над югом и юго-востоком США, причем именно в этот период появился термин "струйное течение нижних уровней" (Low level jet), введенный Минс в 1944 году. Выяснилось различие в формировании профиля ветра в течение суток, с преимущественным образованием струи ночью в условиях устойчивой стратификации нижних слоев тропосферы и значительного радиационного выхолаживания. Именно для ночного СТНУ была создана первая математическая модель [29], как приложение классической теории ПСА, созданной в те годы [11]. Автор модели – А.Блакейдар - приписал формированию СТНУ освобождение "сдержанного" дневного трения, которое приводит к инерционным колебаниям агеострофического компонента ветра на верхней границе ночной радиационной инверсии и появлению "неклассического" профиля ветра - с наличием максимума в пределах пограничного слоя. В дальнейшем модель Блакейдара получила развитие, с включением в нее эффектов параметризации и вертикальных движений [27,28,32]. Как принято считать, в формирование струеобразного профиля вносят вклад термическая стратификация, бароклинность нижней части атмосфер, адвекция, нестационарность всего ПСА. Было показано, что СТНУ наиболее характерны для уровней выше приземного слоя, где силой трения можно пренебречь. Не-струйные профили ветра описываются с помощью логарифмического либо степенного закона, тогда как струйные усиления ветра представляют сверхгеострофические возмущения на стандартном профиле [4,11,26]. При этом к верхней границе ПСА скорость ветра, как правило, становится близка к скорости геострофического ветра.

Среди советских ученых одну из первых гипотез формирования мезоструй выдвинул П.Молчанов. Он считал, что основная роль в образовании СТНУ принадлежит термической составляющей барического градиента. Значительное усиление ветра на нижних уровнях должно происходить при определенной ориентации изобар и изотерм. Подробное исследование СТНУ, включая анализ синоптической ситуации, позволило П.А. Воронцову выделить четыре различных типа СТНУ: ночные, орографические, термические и общециркуляционные [5]. Если ночные и орографические мезоструи характерны для конкретных физико - географических районов, то общециркуляционные СТНУ, занимая сравнительно большую площадь, развиваются в барических образованиях в основном циклонического типа.

В работах Л.З. Проха, изучавшего СТНУ над Украиной, подтверждено преимущественное образование их в циклонических областях, а также связь наиболее интенсивных мезоструй с ветровалами леса в Карпатах [19,20]. Детальные исследования циклонических мезоструй, проведенные А. Мастерских, показали, что в этих барических образованиях СТНУ связаны, как правило, прохождением фронтальных разделов [14]. Этим же ученым разработаны методы прогноза скорости ветра на осях фронтальных мезоструй. Выводы других авторов о регистрации СТНУ в зонах атмосферных фронтов различных типов представлены в [24,33].

СТНУ могут формироваться и при отсутствии атмосферных фронтов. Многие исследователи объясняют формирование максимумов ветра наличием инверсий различных типов, в частности, В.Г.Глазуновым указывается, что сильные сдвиги ветра, обусловленные наличием пиков скорости ветра в нижнем 500-м слое атмосферы, формируются зачастую в условиях устойчивой стратификации [6].

Имеются предположения о связи СТНУ и внутренних гравитационных волн, развивающихся в слое приземной (приподнятой) инверсии. Так, Ю. Новожиловым предложена гипотеза о возникновении СТНУ в зонах волнообразных движений [16]. Согласно данной гипотезе, усиление скорости ветра должно происходить ближе верхней границе в задерживающих слоях. Однако, как показано во многих работах, СТНУ отмечены как выше, так и ниже слоя инверсии [17,18,25].

Некоторые ученые учитывают появление СТНУ в моделях гидродинамической неустойчивости атмосферы, в частности Кельвина - Гельмгольца [24]. Так, подробный анализ крупномасштабной гравитационной волны, образовавшейся в ПСА над штатами Вирджиния и Каролина показал, что неустойчивость нижних слоев атмосферы при сдвиге ветра является наиболее вероятным механизмом развития волны. При этом скорость ветра волновых возмущений при прочих равных условиях тем выше, чем ниже положение струи и чем больше скорость ветра на ее оси. Недостатком этих представлений является расхождение с данными наблюдений мезоструй. Кроме того, прогноз волновых инверсионных процессов представляет определенную сложность [28].

На современном этапе исследований наиболее приемлемым методом является количественное описание СТНУ при помощи моделей ПСА или в рамках регионального моделирования, так и рассмотрения отдельных случаев развития мезоструй над ограниченной территорией. В рамках региональной модели, изменяются схемы параметризации физических процессов, отвечающие за степень устойчивости ПСА и блоки, отвечающие за радиационный баланс – прежде всего потоки от земной поверхности [31]. К настоящему времени накоплены и статистически значимые выборки [43], изучены физико-географические районы и синоптические условия развития. Достаточно надежные метод их прогноза разработаны в [1,4,12]. Несмотря на то что Физический механизм возникновения СТНУ достаточно хорошо изучен, регулярно открываются новые черты и сопровождающие явления.

Данные и методология исследования. Исторически сложилось, что используются различные критерии максимума ветра для определения СТНУ, что очевидно, продиктовано постановкой конкретно решаемой задачи. Так, в [28] при выявлении струйных течений не накладывается никаких ограничений на значения скорости ветра на оси мезоструи. Авторы за СТНУ принимали воздушные потоки относительно большой скорости, ограниченные сверху и снизу потоками с меньшей скоростью. В большинстве иностранных работ за мезострую принимают усиление ветра выше 12 м/с, с вертикальным сдвигом ветра более 2 м/с на 100 м выше и ниже оси струи. Пономаренко, выделяя СТНУ по среднемесячным данным, принимает за мезострую относительный пик скорости ветра в ПСА, выше которого сдвиг ветра отрицательный, а ниже – положительный [18]. Приведенные разночтения в критериях идентификации мезоструй в ряде случаев делает весьма затруднительным, а порой и невозможным сопоставление результатов, полученных разными авторами.

В данной работе, в соответствии с требованиями авиационной метеорологии, принято определение СТНУ как пика скорости ветра более 15 м/с в пограничном слое атмосферы, когда ее изменение в 300-м слоях выше и ниже пика не менее 4 м/с.

Дополнительно, рассчитывались следующие структурные параметры СТНУ: мощность струи - разность между высотами в ПСА, где скорость ветра не менее 15 м/с; высоту оси струи - уровень максимума скорости ветра; скорость ветра на оси мезоструи

Однако, при оценке успешности модельных профилей ветра важно было получить результат не столько по скорости ветра, а по наличию в модели струеобразного профиля ветра со сдвигом ветра. сдвиг ветра является количественной характеристикой интенсивности СТНУ, величина которого определяется как векторная разность скорости ветра на двух уровнях в ПСА, отнесенная к толщине слоя [6,7].

Наиболее точно указанные параметры СТНУ могут быть рассчитаны по данным метеорологических наблюдений на высотной метеорологической мачте или при проведении специальных комплексных экспериментов. Однако на практике приходится иметь дело с данными сети радиозондирования, от плотности которой зависит успешность выявления пространственно-временной структуры СТНУ. Из-за низкого разрешения по вертикали (захвата первой точки) всегда есть опасность "просеивания"

мезоструи за счет быстрого подъема радиозонда в ПСА и как следствие, большая погрешность при расчете параметров СТНУ. В данной работе анализировались случаи, когда первая точка в данных радиозондирования была не ниже 100 м.

Для восстановления вертикальных профилей скорости ветра, температуры воздуха и характеристик турбулентности в ПСА при наличии СТНУ в качестве исходных данных для расчетов использованы результаты объективного анализа полей метеорологических величин, получаемые в оперативной полусферной схеме прогноза российского гидрометцентра и стандартных метеорологических наблюдений

Исследование проводится с использованием стационарной бароклинической модели ПСА (автор – проф. В.А. Шнайман), основанная на k -теории, в которой замыкание системы уравнений осуществляется при помощи уравнения баланса кинетической энергии турбулентности, уравнения для скорости диссипации турбулентной энергии в тепло, гипотезы приближенного подобия Колмогорова [26].

Модель учитывает основные физические процессы, протекающие в ПСА, а именно формирование внутренней структуры пограничного слоя под воздействием крупномасштабных полей давления и температуры, подстилающих поверхностей различной шероховатости, вертикального турбулентного обмена, силы Кориолиса, что позволяет применить ее с целью выявления струй нижних уровней.

Данные объективного анализа включают сведения о геопотенциале и температуре воздуха на изобарических поверхностях: 1000, 850, 700 гПа, составляющих скорости ветра на АТ-850 гПа, шероховатости подстилающей поверхности. Для расчета искомым профилей применяется девятиточечный шаблон, центральная точка которого (с номером 5) совпадает с пунктом радиозондирования или располагается вблизи него (рис 2). Расчеты выполнены для случаев с мезоструями, наблюдавшимися в пунктах Одесса, Киев с 02-04 по 20-03-1987 г., а также за январь 1987 г. для Москвы.

Для ограниченной территории использованы данные пунктов Украины (Киев, Харьков), России (Москва, Смоленск), Беларуси (Минск, Гомель, Брест), а также Каунаса в сроки 00, 06 12 UTC с 26 по 28 апреля 1986 г – период непосредственно после аварии на Чернобыльской АЭС.

Результаты. С целью восстановления профиля ветра в ПСА при мезоструях по данным стандартных наблюдений расчеты проведены как для отдельных пунктов (Москва, Одесса), так и для станций на ограниченной территории. Чтобы проследить успешность работы модели в различных условиях, выбирались разные синоптические ситуации, с наличием приземной или приподнятой инверсии (изотермии) в ПСА.

В качестве примера приведем сравнительный анализ модельных и фактических профилей ветра для станции Киев за 2 и 3-04 1987 г. Для сопоставления результатов расчетов и зондирования за 12 UTC 2 апреля используются асинхронные данные (разница во времени 6 ч), а за 3 апреля – синхронные. В первые дни апреля 1987 г. станция Киев находится на юго-западной периферии антициклона. Вертикальное распределение скорости ветра и температуры воздуха в ПСА в эти дни характеризуется приземной инверсией температуры воздуха в пределах нижнего 600 метрового слоя и четко выраженный максимум скорости ветра более 15 м с в подинверсионном слое (рис 1). В срок 00 UTC 2-04 1987 г мезоструя зафиксирована в точках с номерами 8 и 9, несколько слабее по максимуму скорости, и ориентируется к верхней границе инверсии. Таким образом, ошибка восстановления высоты оси СТНУ минимальна во внутримассовых условиях.

Однако, 2 апреля 1987 г на станции Киев, в точках 8 и 9 по расчетным данным СТНУ отсутствует, но имеется перегиб в профилях скорости ветра в узлах 6 и 7. Следует полагать, что в рассмотренном случае модель не вполне адекватна реальным процессам, такая же картина отмечена в расчетном профиле скорости ветра во втором

случае - 3 апреля. В обоих случаях модель не обнаруживает струю, которая по данным зондирования выражена достаточно четко.

Далее, рассмотрим пример фронтальной мезоструи над Одессой 20-03-1987 г, когда СТНУ связано с теплым фронтом, который проходит на расстоянии 100-150 км к северо-востоку от узла 5, выбранного вблизи Одессы. Фактическая струя за 00 UTC (рис 1а) располагается в верхней части приподнятого задерживающего слоя, скорость ветра на оси составляет 25 м/с. По расчетному профилю мезоструйный пик скорости в узле 5 не обнаруживается, хотя в точке 6, через которую в данный срок проходит теплый фронт, Модель выявляет пик скорости ветра 14 м/с с высотой оси на 200 м выше наблюдаемой, поскольку узел 6 находится на расстоянии около 200 км от пункта зондирования и для сопоставления использована синхронная информация. Очевидно, в данном случае модель выявляет местоположение струи с погрешностью, соизмеримой с шагом сетки, причем скорость ветра на оси является заниженной по сравнению с фактической.

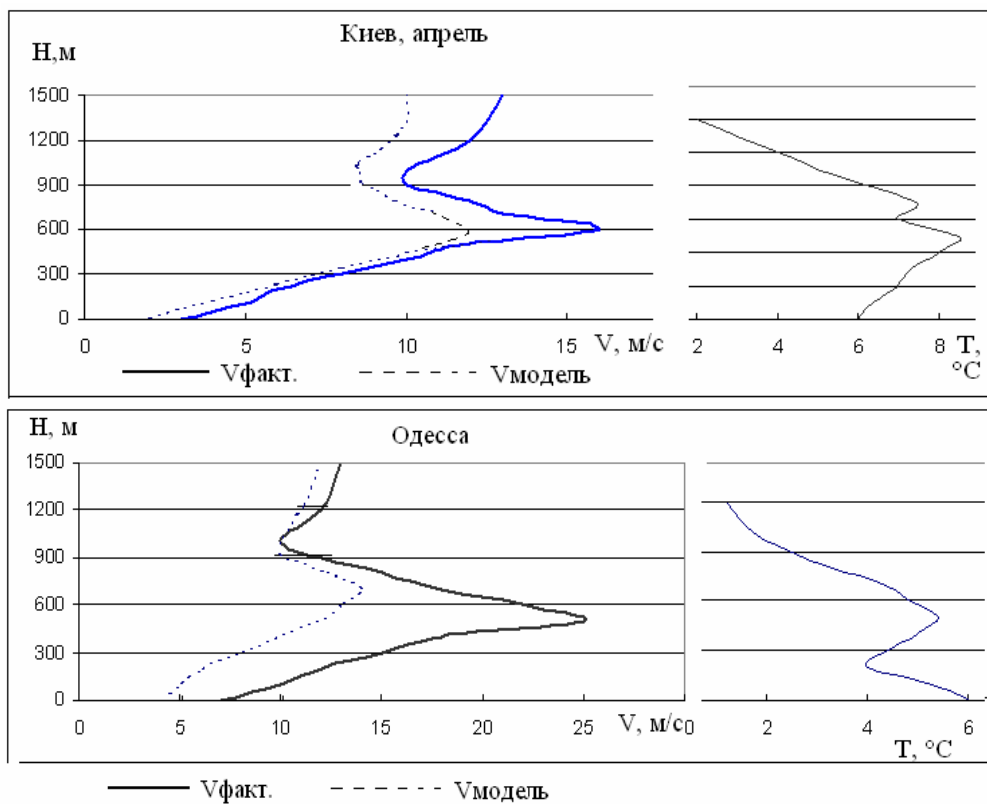


Рис.1 - Вертикальные профили ветра (V), фактические и модельные (пунктир), температуры воздуха (Т), Киев 02-04-1987, Одесса 20-03-1987 г.

Еще одним примером выявления СТНУ по данным объективного анализа может служить результаты расчетов, проведенных для Москвы за 12-13 января 1987 г, когда СТНУ образуется в условиях перестройки барических полей. В 00 UTC 12 над Москвой располагается южная периферия мощного антициклона, центральная часть которого находится над северными районами России. В районе Москвы фон давления довольно высокий - около 1040 гПа, направление переноса воздушных масс - северо - восточное. На расстоянии 500-600 км к юго-западу от Москвы проходит теплый фронт. Через сутки макроциркуляционные условия над большей частью рассматриваемого района претерпевают существенные изменения: над Москвой располагается теплый сектор южного циклона, приземное давление понижается на 15 гПа. По данным

За ночной срок (00 UTC) отмечены наименьшие погрешности между рассчитанными и фактическими параметрами СТНУ. В срок 06 UTC эти погрешности больше, особенно в присутствии приземной (приподнятой) инверсии с резким изломом профиля температуры воздуха.

Общий вид профиля скорости ветра более сглажен по сравнению с наблюдаемой СТНУ. По результатам модели, максимум скорости располагается ближе к верхней границе инверсии, тогда как реально в некоторых случаях СТНУ отмечается значительно выше (Курск, Москва, 27-04 1986 г., 06 UTC). Возможно, это следствие неучтенности эффектов инерционных колебаний вектора ветра, возрастающих к утру и способных увеличить высоту расположения СТНУ.

Рассчитанная скорость ветра на оси ночных струй в большинстве случаев меньше фактической на 2-3 м/с, что вполне удовлетворительно для применения этой модели в целях диагноза СТНУ, связанных с приземной инверсией в ПСА. Дневные СТНУ (срок 12 UTC) воспроизводятся моделью с большими погрешностями в определении параметров струи: так, согласно расчетам 28-04-1986 г., скорость ветра на оси мезоструи на 3-5 м/с, меньше, а ее высота - на 250 м ниже фактической.

Таким образом наилучшее соответствие рассчитанного по модели ПСА профиля скорости ветра фактическому с наличием струйного течения нижнего уровня обнаружено для всех рассмотренных пунктов в антициклоническом поле.

Другим выводом является роль СТНУ в распространении примесей после аварии на Чернобыльской АЭС. Если у поверхности земли преобладал слабый ветер, то на высоте в ПСА на всех пунктах северо-западного переноса отмечены струеобразные максимумы скорости ветра, от 12 до 18 м/с, причем ветер вплоть до уровня АТ-700 гПа был слабее. Как известно, в первые дни после аварии радиоактивное облако достигло стран Балтики и Скандинавии [2].

Обсуждение. Наилучшее соответствие расчетного профиля фактическому получены при наличии приземной инверсии в квази-стационарных внутримассовых условиях. Это объясняется тем, что Модель учитывает изменение притока радиационного тепла, при практическом отсутствии горизонтальной адвекции. Большие ошибки модели в зонах атмосферных фронтов, в особенности на теплых, объясняются мезомасштабной изменчивостью конвективно-неустойчивого пограничного слоя, когда его характеристики до значительной высоты определяются сильными турбулентными перемешиваниями, адвекцией.

Анализ модельных и фактических профилей ветра по данным полей объективного анализа показывает, что в целом модель отражает особенности вертикального распределения ветра в пределах пограничного слоя. Однако географическое положение СТНУ с помощью модели оценивается с погрешностями порядка сеточного шага, что можно объяснить с одной стороны, асинхронностью данных расчета и зондирования, а с другой тем, что центральный узел, как правило, не совсем совпадает с пунктом зондирования: максимальное расхождение составляет 150 км. Общая закономерность полученных данных заключается в том, что расчетный профиль ветра оказывается более сглаженным по сравнению с фактическим и вследствие этого скорость ветра на оси струи оказывается почти всегда заниженной.

Заключение. Эффективность модели по восстановлению вертикальных профилей скорости ветра существенно зависит от характера СТНУ, типа задерживающего слоя и синоптической ситуации (фронтальные или внутримассовые). В большинстве из рассмотренных случаев моделью выявляются СТНУ внутримассового происхождения (в 80% случаев); при резкой смене характера атмосферных процессов эффективность восстановления профилей ветра заметно снижается.

Результаты моделирования показывают более сглаженный и в среднем менее интенсивный пик скорости ветра, в большинстве случаев разница с фактической не превышает 3 м/с, при этом модельный пик располагается несколько выше фактического. Наилучшее соответствие расчетного профиля фактическому получены при наличии приземной инверсии в антициклональных условиях, в Ночной и утренний сроки.

В циклоне, при больших барических градиентах в зоне теплого фронта результаты моделирования несколько хуже, прежде всего для высоты оси и слоя, захваченного СТНУ. Введение поправки на бароклинность не дает существенных улучшений по максимуму скорости в ПСА, а лишь изменяет параметры рассчитанной мезоструи

Струеобразные максимумы скорости ветра в ПСА, отмеченные на ограниченной территории вдоль преобладающего переноса после аварии на Чернобыльской АЭС играют роль в трансграничном переносе примесей. В случае регистрации СТНУ в подобных антициклонических условиях целесообразно рассчитывать траекторию по данным о ветре на уровне АТ-925 гПа.

Необходимо также отметить, что в дальнейшем, в работе О.М.Лазыриной была выполнена модификация модели стратифицированного бароклинного АПС применительно к задаче расчета характеристик циркуляционной и турбулентной структуры ПСА над ограниченной территорией, позволяющая уточнить выходную информацию модели и получить взаимно согласованные поля скорости ветра и коэффициента турбулентности. Выполнена методика дополненных вертикалей как разновидность метода гидродинамической интерполяции, с совместным использованием данных пункта и метеостанций расположенных в пределах радиуса влияния, что существенно повышает достоверность результатов объективного анализа в узлах регулярной сетки.

Литература

1. *Ахметов М. С., Гуляев А.В.* Эмпирико-статистические характеристики механизма и предсказуемости мезоструйных образований. - Межвузовский сборник научных трудов. Пермь, 1989. – с. 28-38.
2. *Борзилов В.А., Клепикова Н.В., Костриков А.А., Хваленский А., Троянова НИ.* Метеорологические условия дальнего переноса радиоактивных продуктов аварии на Чернобыльской атомной электростанции. - Метеорология и гидрология, 1989, N 11.- с 5-11.
3. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы.- Л. : Гидрометеиздат, 1989 .-264 с.
4. *Волкова В.И.* О некоторых особенностях связи мезоструйного образования со стратификацией температуры в нижнем слое атмосферы - Труды СВГМО, 1982, вып. 17. - с. 25-27.
5. *Воронцов П. А.* Струйные течения пограничного слоя атмосферы. Труды ГГО, 1967, вып. 20 - с. 77-92.
6. *Глазунов В.Г.* Зависимость вертикального сдвига ветра от толщины слоя и высоты его верхней границы.- Труды Гидрометцентра СССР, 1988, вып. 296.- с. 45-49.
7. *Ермакова А.И.* Особенности анализа и оценки метеорологических условий для обеспечения безопасности полетов на международных линиях.- Л.: Гидрометеиздат, 1987.- 192 с.
8. *Ивус Г.П., Кивганов А.Ф., Тимофеев В.Е.* Струйные течения пограничного слоя атмосферы. Учебное пособие. Одесса, 1991. - 46 с.

9. Корнюшин О.Г. Низкоуровневые пики на вертикальном профиле средней скорости ветра. - Труды ВНИИГМИ МЦД, вып. 140, 1987.- с. 3-12.
10. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы.- Л.: Гидрометеиздат, 1970.- 292 с.
11. Лебедева Н.А. Прогноз ветра у земли по мезоструе на карте АТ - 850. - Сб. работ Куйбышевской ГМО, 1976, вып 9.- с. 8-11.
12. Ляхов М.Е. Низкие струйные течения как важный фактор в развитии физико-географических процессов.- Изв. АН СССР, сер. Геофизика, 1961, Н 2.- с. 334.
13. Мастерских М.А. О причинах возникновения мезоструй и расчете скорости ветра на их осях в узких зонах теплых фронтов.- Метеорология и гидрология, 1983, Н 2.- с. 19-24
14. Мелкая И., Надежнина Е.Д., Шкляреви О.Б. Эволюция пограничного слоя под влиянием радиационного охлаждения подстилающей поверхности в ночные часы.- Метеорология и гидрология, 1986, Н 10.- с. 53-61.
15. Новожиллов Н.И. Тропосферные мезоструи.- Изв. АН СССР, сер 1. Геофизика, 1961, № 2.- с. 334-336.
16. Петросяню М.А., Сирдьюк М.В. Струйные течения на нижних уровнях и фронтогенез.- Метеорология и гидрология, 1986, - с. 101-102.
17. Пономаренко Л.В. Максимум на вертикальном профиле ветра в пограничном слое (мезоструя) на территории СССР. - Труды ВНИИГМИ МЦД, 1981, вып. 91.- с. 20-41.
18. Прох Л.З., Башкирова Л.Е., Малиская А.К., Филатов В.Г. Некоторые аэрологические характеристики струйных усиления ветра над Украинскими Карпатами. - Труды УкрНИИГМИ, 1970, вып., 96. - с. 53-65.
19. Прох Л.З., Тарасова Т.Ф. Мезоструи над Киевом. - Труды Укр НИИГМИ, 1974, вып. 132.- с. 117-127.
20. Снитковский А.И., Кошелькова Г.А. Мезоструи над Москвой.- Труды Гидрометцентра СССР, 1969, вып. 56.- с. 3-13.
21. Цвєрава В.Г. Струйные течения в пограничном слое атмосферы. - Метеорология и гидрология, 1967, вып. 10.- с. 71-76.
22. Цигельницкий И.И. Воздушные реки. "Природа", 1986, Н 10.- с. 70-75.
23. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990.- 264 с.
24. Шелковников М.С. Струйные течения на малых высотах.- Метеорология и гидрология.- 1983.- Н 11.- с. 40-46.
25. Шнайман В.А., Фоскарини О.В. Моделирование планетарного пограничного слоя и макротурбулентных характеристик по данным ПГЭП. -Л.: Гидрометеиздат.- 1990.- 116 с.
26. Andre J.C., Marht L. The nocturnal surface inversion and influence of clear-air radiation cooling.- J. Atm. Sci., 1982, vol. 39.- p. 864-878.
27. Beyrich F., Klose B. Some aspects of modelling low-level jets.- J. of Atm. Sci., 1988, v. 32.- p. 341-352.
28. Blackadar A.K. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions.- Bull. Amer., Met. Soc., 1957, vol. 38, N 5.- p. 283-290.
29. Brandon Storm, Jimmy Dudhia, Sukanta Basu, Andy Swift, Ian Giammanco. Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model on Forecasting Low-level Jets: Implications for Wind Energy. Wind Energy , 2008. - DOI: 10.1002/we.288
30. Brook R.R. The Koorin Nocturnal Low-Level Jet.- Boundary Layer Met., 1985, v. 32.- p. 133-154.

31. *Browning K.A., Pardoe C.W.* Structure of low level jet stream ahead of mid altitude cold fronts.- *Quart. J. Royal Met., Soc.*, 1973, v. 99, N 421.- p. 619-638.
32. *Garrat J.R.* The inland boundary layer at low latitudes. Part 1. The nocturnal Jet.- *Boundary Layer Met.*, 1991, v. 32, N 4.- p. 307-329.
33. *Gerber H., Chang Simon, Holt Teddy.* Evolution of a marine boundary layer jet.- *J. Atmos. Sci.*, 1989, v. 46, N 10.- p. 1312- 1326.
34. *Izumi Y., Barad M.L.* Wind and temperature variations during development of a low level jet.- *J. Appl. Met.*, 1963, N 2.- p. 668-673.
35. *Kimura F., Arakawa S.* A numerical experiment on the nocturnal low level jet over the Kanto Plain.- *J. Meteorol. Soc., Japan.*, 1983, N 61.- p. 848-861.
36. *Langland Roff H., Tag Paul M., Fett Robert W.* An ice breeze mechanism for boundary layer jets.- *Boundary Layer Met.*, 1989, N 1-2.- p. 177-195.
37. *Niewstadt F.I.* The turbulent structure of the stable, nocturnal boundary layer .- *J. Atm. Sci.*, 1984, vol. 41.- p. 2202-2216. ,
38. *Pitchford K.L., London J.* The low level jet as related to nocturnal thunderstorms over midwest US.- *J. Appl. Met.*, 1962, N 1.- p. 43-47.
39. *Raymond D.J.* Instability of the low level jet and severe storm formation.- *J. Atm. Sci.*, 1978, v. 35, N 2.- p. 2274- 2280.
40. *Rider L.J.* low level winds at Green River, Utah.- *J. Appl. Met.*, 1966, N 6.- p. 283- 287.
41. *Song J, Liao K, Coulter R.L, Lesht B.M.* Climatology of the low-level jet at the Southern Great Plains atmospheric boundary layer experiments site. *Journal of Applied Meteorology* 2005; 44: 1593–1606.
42. *Thorpe J.I., Guymer T.H.* The nocturnal jet.- *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1973, N 103.- p. 633-653.
43. *Vukmirovich D.* The Koshava wind events during the Alpex special observing period.- *Zb. meteorol. i hidrol. rad.*, 1985, N 11.- p. 75-77.
44. *Wittich K.-P.* The nocturnal boundary layer over Northern Germany. An observational Study.- *Boundary Layer Met.*, 1991, V. 55, N 1-2.- p. 47-65.
45. *Zhou Jun, Henry Walter K.* The interface effect and the formation of a low level jet along the east side of the Rocky Mountains.- *Adv. Atm. Sci.*, 1987, 4, N 2.- p. 175-184.

**До проблеми моделювання струменевих течій нижніх рівнів
Тимофеев В.Е.**

Наведено результати моделювання струменевих течій нижніх рівнів (СТНР) в граничному шарі атмосфери з різним ступенем стійкості і різних синоптичних ситуаціях, як за даними окремих станцій, так і за даними обмеженої території. Найкращим чином відновлюються СТНР у внутрішньомасовій ситуації за наявності приземної інверсії температур повітря. Показано роль СТНР в розповсюдженні домішок після аварії на Чорнобильській АЕС.

Ключові слова: *граничний шар, струменеві течії нижніх рівнів, затримуючий шар, вертикальний профіль, обмежена територія*

**To the problem of modelling of low-level jets
Tymofeyev V.E.**

The results of modelling of low-level jets (LLJ's) in the atmospheric boundary layer with different degree of stability and different weather situations are obtained, both from data of separate stations, and from data of the limited territory. In the best way LLJ's are reconstructed in air-mass situation at presence of the ground inversion of air temperature. The LLJ's role in distribution of pollutants after Chernobyl nuclear accident is shown.

Keywords: *atmospheric boundary layer, low-level jets, delaying layer, vertical profile, limited territory*