

Л.Н. Карлин, В.Ю. Чанцев, А.В. Даньшина

**ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ
ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ
АТМОСФЕРЫ НА ТЕРРИТОРИИ ТУАПСЕ**

L.N. Karlin, V.Yu. Chantsev, A.V. Danshina

**REVEALING SPATIAL INTERRELATIONS
OF A DYNAMIC REGIME OF ATMOSPHERIC BOUNDARY
LAYER ON TUAPSE TERRITORY**

Динамика приповерхностного слоя атмосферы в районе Туапсе характеризуется сложной топографией подстилающей поверхности. При таком рельефе местности стандартные методы оценки перемещения воздушных потоков над рассматриваемой территорией становятся неприменимыми. В приведенном исследовании рассматриваются оценки взаимосвязей динамических характеристик приземного слоя атмосферы между стационарно расположенными постами и маршрутными станциями наблюдений. В результате проведенного анализа выявлены особенности распределения пространственно-временных неоднородностей в динамическом режиме приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: приземный слой атмосферы, корреляция, динамический режим, флуктуации, мезомасштабные процессы.

Atmospheric boundary layer dynamics in Tuapse region is characterized by complex topography of a spreading surface. At such district relief the standard methods of an estimation of air flows moving over considered territory become inapplicable. In brought research the estimations of interrelations of dynamic characteristics of atmospheric boundary layer between permanently located posts and routing stations of observations are considered. In result of the conducted analysis the peculiarities of spatial-temporary inhomogeneous distribution in a dynamic regime of atmospheric boundary layer are revealed.

Keywords: surface layer of the atmosphere, correlation, dynamic regime, fluctuations, mesoscale processes.

Введение

Характер динамических полей в приземном слое атмосферы на территории Туапсе определяется атмосферными процессами в тропосфере над всем Черноморским регионом. Глобальные климатические изменения приводят к нарушению внутригодовой изменчивости погодных условий, сложившихся в последнее столетие над всем Черным морем и, в частности, над районами Российского Причерноморья, в частности [Титов, 2002]. Так, в сезонном распределении ветра за последние 5 лет наблюдается интенсификация динамики приземного слоя в районе Туапсе в конце лета. По данным Туапсинского гидрометеобюро (ГМБТ), помимо усиления ветра в августе за последние 2008 и 2009 гг. наблюдается увеличение продолжительности динамической активности в приземном слое атмосферы в осенне-зимний период. При некотором снижении максималь-

ных интенсивностей ветра над Туапсе в январе, динамически активный сезон начинается в ноябре и заканчивается уже только в апреле–мае.

Пространственное распределение динамического режима приземного слоя атмосферы на территории Туапсе не совпадает с распределением параметров ветра на ГМБТ, и это не позволяет в полной мере использовать данные ГМБТ для контроля загрязнения атмосферы. Пространственно-временная неоднородность динамических полей приземной атмосферы связана с резкой изрезанностью рельефа местности.

При анализе топографической структуры исследуемого района, основанного на использовании доступного топографического материала масштаба 1:50 000, выявлены орографические особенности. На достаточно небольшой территории (6×6 км), включающей большое количество отдельных холмов и гряд (рис. 1), выделяется 16 наиболее значимых высот (от 130 до 420 м), которые формируют локальные особенности движения приземного слоя атмосферы. Наибольшие высоты распределены по периферии с северо-запада, через север, на северо-восток, проникая с севера в центральную часть и разделяя ее на две неравнозначные долины. Значимые горизонтальные градиенты перепада высот изменяются в пределах от 0,17 до 0,68. Две долины представляют собой два коридора, в которых могут формироваться продольные струйные потоки воздуха в приземном слое атмосферы. Основные топографические объекты, вызывающие возникновение пространственной неустойчивости воздушных потоков и формирование вихревых образований, имеют среднюю пространственную протяженность 600×300 м.

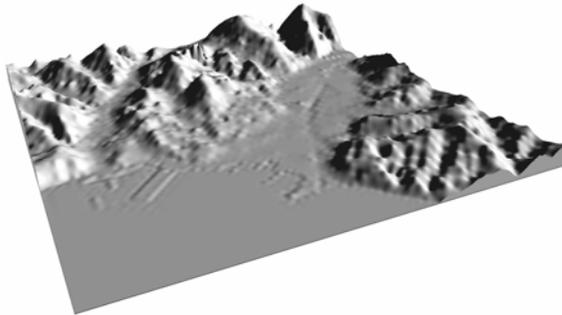


Рис. 1. 3D изображение топографии территории поселения городского типа Туапсе

В условиях резкой топографической неоднородности исследуемой территории поиск взаимосвязей между параметрами динамического режима приземного слоя атмосферы в разных районах не может основываться только на стандартных методах статистического анализа. Динамическая неустойчивость воздушных потоков у земной поверхности, возникающая за счет топографических причин, формирует локальные статистически независимые, в первом приближении, флуктуации ветрового режима [Лайхтман, 1970]. Для получения максимальной количественной информации о характере пространственно-временной

неоднородности динамического режима приземной атмосферы при минимальном количестве постоянных постов наблюдений необходимо использовать методы поиска вероятностных взаимосвязей.

В представленном исследовании проводится поиск статистических и вероятностных взаимосвязей между параметрами ветра на стационарных постах и маршрутных станциях, перемещающихся по исследуемой территории.

Данные наблюдений и методы исследования

Обычно для получения метеорологической информации используются наблюдения только со стационарных постов. Такие наблюдения проводятся в стандартные синоптические сроки, что позволяет выявить аномалии погодных условий с синоптическим масштабом времени [Воробьев, 1991]. Натурный эксперимент по изучению динамического режима приземного слоя атмосферы на территории Туапсе проводился в августе 2009 г. по предлагаемой схеме (рис. 2). Одна станция размещалась стационарно на весь период времени работ на метеоплощадке ГМБТ (ст. № 01). На исследуемой территории были выбраны опорные точки, в которых наблюдения за характеристиками ветра проводились в течение всего рабочего дня стационарно (ст. № 02–06). Для расположения опорных точек были выбраны 5 господствующих вершин холмов с благоприятными условиями наблюдений.



Рис. 2. Распределение опорных (черные) и маршрутных (белые) станций наблюдений за характеристиками ветра в приземном слое атмосферы на спутниковом снимке с восстановленной топографией территории поселения городского типа Туапсе в августе 2009 г.

Маршрутные наблюдения проводились в 17 пунктах с продолжительностью 180–200 мин на локальных участках, где возможна генерация вихревых атмосферных образований мезо- и субмезомасштабов. Наблюдения на стационарном посту № 01, на опорных (№ 02–06) и маршрутных станциях № 07–23 выполнялись в синхронном режиме по 1 стационарному посту, 1 опорной и 3 маршрутных станций в день с дискретностью 5 минут. Используемая дискретность позволила выявить мелкомасштабные особенности динамического режима приземного слоя атмосферы на территории Туапсе и получить ряды данных непрерывных наблюдений, содержащие 35–40 элементов.

В наблюдениях за направлением ветра всегда прослеживаются микрофлуктуации с периодами $\sim 1 \times 10^0$ с. Эти случайные флуктуации в направлении ветра исключают возможность получения значимых оценок взаимосвязи между параметрами ветра на разнесенных в пространстве пунктах наблюдений. Поэтому практически всегда направления ветра распределяют по секторам сторон света – румбам. В приведенном исследовании все наблюдения за направлением ветра распределены по 8 румбам. Такая 8-румбовая система выбрана из-за значительных флуктуаций наблюдаемых направлений ветра.

При рассмотрении взаимосвязей между параметрами динамического режима на паре станций наблюдений нельзя использовать традиционные методы статистического анализа, когда вектор ветра раскладывается на две составляющие. Это связано с тем, что в районах со сложной топографией формируются локальные динамические образования различных пространственных и временных масштабов, а значит, интенсивность и направление ветра должны рассматриваться как квазинезависимые составляющие ветра. Для выявления взаимосвязей между интенсивностями ветра на паре удаленных друг от друга станций использовался традиционный метод корреляционного анализа с расчетом коэффициентов корреляции Пирсона [Кудашкин, Кудрявая, 1985]. Продолжительность имеющихся данных наблюдений позволяет получить значимые оценки этих взаимосвязей.

Оценка пространственно-временной взаимосвязи между направлениями ветра в пунктах с различными топографическими условиями на исследуемой территории не может проводиться с использованием традиционного корреляционного анализа. Из-за периодичности значений направления ветра расчет среднегоарифметического значения направления невозможен. Для оценки статистической взаимосвязи между направлениями ветра необходимо выбрать некоторый равновесный уровень, относительно которого происходят осцилляции направления. В качестве такого равновесного уровня может использоваться любое направление, либо румб направлений, имеющий наибольшую повторяемость в рассматриваемой генеральной совокупности. Тогда коэффициент корреляции между направлениями ветра (K_v) можно привести к виду, похожему на коэффициент корреляции Пирсона:

$$K_{\gamma} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_i - \tilde{\alpha})(\beta_i - \tilde{\beta})}{d_{\alpha}^{1/2} d_{\beta}^{1/2}}; \quad (1)$$

$$d_{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_i - \tilde{\alpha})^2}{N}, \quad d_{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^N (\beta_i - \tilde{\beta})^2}{N}, \quad (2)$$

где $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$ – выбранные равновесные уровни направлений ветра на двух станциях наблюдений; α_i , β_i – текущие значения направления ветра; N – длина ряда данных.

Для использования предлагаемого подхода определения коэффициентов корреляции между направлениями ветра на разнесенных постах румбовую систему наблюдений направления ветра необходимо рассматривать не как круговую систему, а как полукруговую. В этом случае румбы направлений берутся с обратным знаком симметрично относительно отсчетного направления. Такой подход позволяет получить сдвиговые корреляции не только во времени, но и по направлению, выбирая значение равновесного уровня.

Для определения вероятностных взаимосвязей в распределении параметров ветра между отдельными пунктами на исследуемой территории использовалось вычисление относительных или априорных вероятностей, как частоты попадания величины направления ветра на маршрутной станции в заданный румб направления ветра на стационарной станции. Для повышения достоверности получаемых результатов из всего ряда наблюдений делалась выборка синхронных наблюдений на обеих станциях в моменты, когда на стационарной станции наблюдалось направление ветра выбранного румба. Выявление вероятностных взаимосвязей направлений ветра на паре станций требует проведения продолжительных наблюдений.

Анализ взаимосвязи распределения параметров ветра

При рассмотрении синхронных наблюдений за параметрами ветра, проводимых на стационарном посту № 01 и сети опорных станций (№ 02–06), распределенной по основным доминирующим высотам исследуемой территории, были сделаны предварительные выводы. Районы со сложной топографией местности являются районами генерации атмосферных динамических неоднородностей малых масштабов (1 км и менее). Процессы в приземном слое атмосферы над такими районами характеризуются быстрой изменчивостью независимо от направленности основных процессов в нижней тропосфере. В общих тенденциях развития динамических процессов были выявлены локальные особенности. При достаточно частой смене направлений воздушных потоков, как на стационарном посту, так и на опорных станциях, из расчетов повторяемостей выявляются преимущественные направления ветра. При преобладающем ЮЗ румб-

бе ветров на стационарном посту на опорных станциях наблюдался западный перенос и только на ст. № 02 – южный. Нестабильность преобладающих направлений ветра на отдельных станциях значительно снижала корреляционную связь по направлению ветра с постом № 01. Преобладающим направлениям ветра на опорных станциях соответствуют и максимальные коэффициенты корреляции для направлений ветра, показанные в табл. 1. На ст. № 05 эти связи незначимы. Устойчивость проявившихся взаимосвязей необходимо подтвердить дальнейшими исследованиями.

Таблица 1

Коэффициент сдвиговой корреляции между направлениями ветра на стационарном посту № 01 и на опорных станциях в августе 2009 г.

Станция	Угловой сдвиг, град	Коэффициент корреляции
№ 02	45	0,7
№ 03	90	0,5
	45	0,42
№ 04	0	0,55
	45	0,48
№ 06	90	0,55
	45	0,55

Прямые корреляции изменчивости динамических характеристик между локальными районами исследуемой территории практически отсутствуют. Только на станции № 04 взаимный коэффициент корреляции между изменчивостью скорости ветра со ст. № 01 имел значение при синхронной связи $R = 0,42$ и повышался до 0,5 при временном сдвиге 10 мин, а на ст. № 05 $R = 0,42$ при сдвиге 5 мин. Отсутствие тесной взаимосвязи в колебаниях интенсивности динамических процессов связано с имеющимися различиями в спектральном составе этих колебаний.

Маршрутные наблюдения за параметрами динамического режима приземного слоя атмосферы на территории Туапсе проводились в районах, где возможно формирование динамических неоднородностей с пространственно-временными масштабами, характерными для локальных топографических условий. В рассмотренных взаимосвязях значимыми в основном могут быть только корреляции по направлению ветра. Так, синхронно с опорной станцией № 02 проводились маршрутные наблюдения на 6 станциях (№ 07–09, 12–14). Взаимная корреляция по скорости ветра между ст. № 02 и маршрутными станциями в большинстве случаев была незначима. На ст. № 07 и 08 она ограничивалась величиной 0,35 со сдвигом 25 и 35 мин, соответственно. Корреляция 0,57 со сдвигом 25 мин наблюдалась на ст. № 12 и 0,42 со сдвигом 40 мин на ст. № 14. Наличие сдвиговой корреляции характерно только для низких скоростей ветра. Сдвиговые корреляции по направлению ветра прослеживались только на ст. № 07 (0,5 при синхронных наблюдениях и угловом сдвиге 45°) и на ст. № 12 (0,75 при сдвиге 30 мин и угловом сдвиге 0°).

Параллельно с наблюдениями на опорной станции № 03 выполнялись наблюдения на станциях № 10–13. Взаимная корреляция по интенсивности ветра увеличивалась до 0,41 со сдвигом 10 мин только на ст. № 12. Корреляция по направлению ветра между маршрутными наблюдениями и опорной станцией были незначимы.

Наблюдения на маршрутных станциях № 15–17 проводились одновременно с наблюдениями на опорной станции № 04. Сдвиговая корреляция по интенсивности ветра на ст. № 15 увеличивалась с 0,47 при 0 сдвиге до 0,55 при сдвиге 40 мин. На других станциях корреляции по скорости ветра не были выявлены. Корреляция по направлению ветра также присутствовала только на ст. № 15. Она достигала 0,6 при угловом смещении 45 градусов.

Вместе с опорной станцией № 05 проводились наблюдения на ст. № 10, 11, 15, 18–20. Явная взаимосвязь по скорости и направлению ветра между наблюдениями на опорной станции и маршрутными практически отсутствовала.

Колебания интенсивности ветра на ст. № 06 не в полном объеме проявились в колебаниях ветра на ст. № 21–23. Значимые корреляции по интенсивности ветра отсутствовали, но по направлению ветра корреляции наблюдались на всех станциях. Их значения колебались в диапазоне 0,55–0,7 на угловых смещениях 45 и 90°.

Выполненные расчеты показали наличие достаточно высоких вероятностных взаимосвязей между направлениями ветра на опорных и маршрутных станциях. Максимальные значения априорных вероятностей в диапазоне от 0,6 до 0,85 выявлялись в основном тогда, когда повторяемость румбов направления ветра на опорной станции превышала 15 % от всего ряда наблюдений. В зависимости от удаления маршрутной станции от опорной наибольшие значения вероятности соответствующего направления ветра могут возникать при временных сдвигах до 30 мин. Для большинства опорных станций не по всем выявленным румбам ветра отмечается наличие устойчивых вероятностных взаимосвязей. По отдельным румбам ветра на опорных станциях относительная вероятность практически равномерно распределена по зафиксированным направлениям ветра на маршрутной станции.

Снижение уровня априорных вероятностей направлений ветра на маршрутных станциях связано со снижением связи с распределением ветра на опорной станции, т.е. наблюдается статистическая независимость формирующихся динамических образований. Это характерно для станций, где большое влияние оказывают локальные динамические условия и особенности орографии местности. Так наименьшая вероятностная связь с опорной станцией № 02 наблюдается у ст. № 13, априорная вероятность направления ветра на которой в основном не превышает 0,4 для всех значимых румбов направления ветра на опорной станции. У опорной станции № 04 низкая вероятностная связь наблюдается с маршрутной станцией № 16, т.к. маршрутная станция находилась в районе формирования динамических неустойчивостей в приземном слое атмосферы.

Подводя небольшой итог, можно сказать, что только часть из рассмотренных пунктов на территории Туапсе обладают линейными корреляциями между динамическими параметрами в приземном слое атмосферы. Обнаруженные взаимосвязи по интенсивности ветра показывают локальные территории, на которых динамический режим полностью определяется характером ветрового режима на опорных станциях. Также выявлены районы, где перераспределение энергии ветра под влиянием орографических особенностей местности вызывает снижение связей по интенсивности ветра, но может сохранять корреляции по направлению ветра. Эти взаимосвязи формируются при условии, если определенным направлениям атмосферных процессов, фиксируемых на опорных станциях, соответствуют характерные для локальных участков исследуемой территории направления воздушных потоков в приземном слое атмосферы. Практически на всей территории Туапсе выявлены вероятностные взаимосвязи между направлениями ветра на отдельных участках, которые позволяют провести первичное районирование исследуемой территории по распределению структурных особенностей в динамическом режиме приземного слоя атмосферы.

Литература

1. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
2. *Кудашкин А.С., Кудрявая К.И.* Теория вероятностей и математическая статистика в метеорологии. – М.: Воениздат, 1985. – 324 с.
3. *Лайхтман Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 342 с.
4. *Титов В.Б.* Сезонная и многолетняя изменчивость климатических условий над акваторией Черного моря / Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. – М.: Наука, 2002, с. 9–20.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-05-96515).