

О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин

О природе мезомасштабных вариаций концентрации приземных атмосферных примесей

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 17.01.2005 г.

Представлены результаты, полученные на основе многолетних экспериментальных наблюдений на станциях атмосферного мониторинга в Татарстане. Станции одновременно измеряют приземные концентрации аэрозоля, малых газовых примесей и метеопараметры. По оригинальной методике найдены волновые мезомасштабные вариации с периодами от 5 мин до 16 ч, распространяющиеся в пространстве. Показано, что для всех примесей и метеопараметров распределения периодов, фазовых скоростей и длин волн вариаций совпадают. Обнаружено, что направление распространения приземных мезомасштабных вариаций зависит от азимута среднего ветра.

Выявлено, что кинетическая энергия волн составляет в среднем 75% всей энергии, а среднее значение термобарической энергии в два раза превышает значение упругой энергии. Эти результаты вместе с результатами проверки дисперсионного соотношения свидетельствуют о том, что мезомасштабные вариации атмосферных примесей в основном вызваны внутренними гравитационными волнами, источником которых служат локальные орографические неоднородности поверхности.

В спектре атмосферных процессов мезомасштабные вариации занимают особое место, как наименее исследованные. Ранее считалось, что эти процессы дают наименьший вклад в общую дисперсию атмосферных параметров. Существует даже термин — «мезомасштабный минимум». Этот термин возник тогда, когда исследователи строили спектры флуктуаций атмосферных параметров и усредняли их во времени или по большому числу реализаций [1]. Теоретические исследования показали, что такие процессы, как внутренние гравитационные процессы (ВГВ), относящиеся к мезомасштабному минимуму, должны давать значительный вклад в динамику и энергетику атмосферы [2, 3].

Авторами ранее было показано, что интенсивность мезомасштабных процессов в приземном слое непостоянна, иногда они вносят значительный вклад в дисперсию атмосферных параметров, в том числе примесей [4, 5]. В то же время мезомасштабные вариации атмосферных параметров и особенно загрязняющих примесей остаются наименее исследованными экспериментально, так как требуют сложной организации эксперимента — пунктов сбора данных, разнесенных на относительно малые расстояния, измерений концентрации примесей и других атмосферных параметров с большой частотой.

Для исследования мезомасштабных процессов в приземном слое использовались данные периода ежеминутных синхронных измерений 1996–1999 гг. сетью из пяти автоматических станций в г. Альметьевск [53° с.ш., 51° в.д.], Республики Татарстан, России. Пункты наблюдения разнесены на расстояние от 1 до 6 км. Станции одновременно измеряют приземные концентрации аэрозоля, окиси

углерода, двуокиси азота и других газообразных атмосферных примесей и метеопараметры (температуру, давление, скорость и направление ветра, относительную влажность).

Нами обнаружено, что в приземном слое часто наблюдаются когерентные в пространстве вариации концентрации примесей с периодами от 5 мин до 16 ч. Время существования значимых вариаций — несколько часов, всегда более 4–6 периодов волны, иногда более 1 сут. В то же время отмечаются вариации скорости ветра, относительной влажности и других параметров. Такие вариации наблюдаются достаточно часто и, как правило, почти синхронно на всех станциях. Данная работа продолжает исследования мезомасштабных вариаций в приземном слое, опубликованные в [4–8], с целью дальнейшего анализа для определения природы мезомасштабных вариаций примеси в приземном слое.

Для определения параметров периодических мезомасштабных вариаций были проанализированы синхронные временные ряды всех атмосферных параметров, включая концентрации приземных примесей в пространственно разнесенных пунктах. По оригинальной методике, разработанной на основе вейвлет-анализа и опубликованной в [6, 8], найдены пространственные характеристики волновых мезомасштабных возмущений с периодами от 5 мин до 16 ч, распространяющихся в пространстве.

С целью обнаружения квазипериодических возмущений ряды всех измеряемых величин подвергались вейвлет-преобразованию [9]. В полученных по данным с разных станций вейвлет-преобразованиях временных рядов, привязанных к одному периоду времени, выбраны значимые возмущения

концентрации примеси или метеопараметров, выявленные одновременно на всех станциях. Для каждого такого события одновременные наблюдения фазовой части вейвлет-преобразований в пространственно-разнесенных точках позволяют оценить горизонтальные фазовые скорости перемещения волновых возмущений C_x , их пространственные размеры (длины волн λ_x). Распределения C_x и λ_x для различных атмосферных параметров и примесей совпадают с вероятностью 95% по критерию Пирсона, т.е. выборки параметров принадлежат к одной генеральной совокупности. Это означает, что вариации температуры, скорости ветра, относительной влажности, давления, а также концентраций малых газовых примесей и аэрозоля определяются теми же самыми атмосферными процессами.

Исследованы зависимости пространственных характеристик от периода вариаций. Построена зависимость средней фазовой скорости от периода возмущений (рис. 1). Видно, что с ростом периода фазовая скорость убывает. Это согласуется с теоретической зависимостью, полученной в [3] для ВГВ. Максимальные длины волн 100–120 км наблюдаются у гармоник с периодами 10–16 ч.

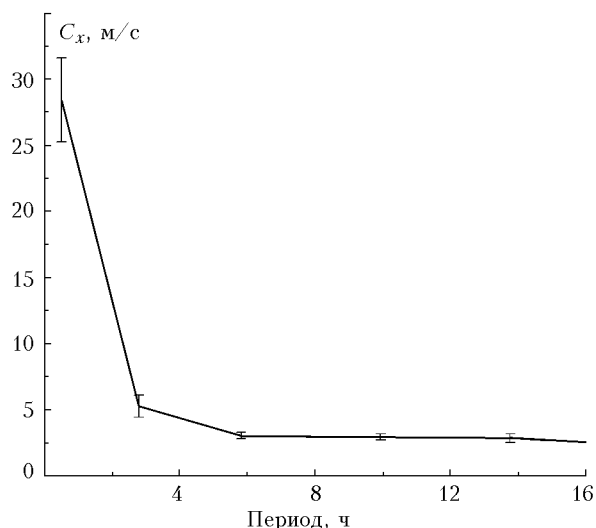


Рис. 1. Зависимость фазовой скорости от периода волн

Пространственный разнос станций позволил определить зональную и меридиональную компоненты длин волн мезомасштабных вариаций. Это дает возможность исследовать азимут прихода волновых возмущений. Распределения азимутов прихода волновых возмущений (рис. 2) для различных атмосферных параметров и примесей совпадают с вероятностью 95% по критерию Пирсона, т.е. выборки азимутов принадлежат одной генеральной совокупности.

Видно преимущественное распространение волновых вариаций в зональном направлении. Исходя из предположения, что в приземном слое волновые возмущения могут формироваться за счет орографии, распределения азимутов прихода волн должны зависеть от направления среднего потока.

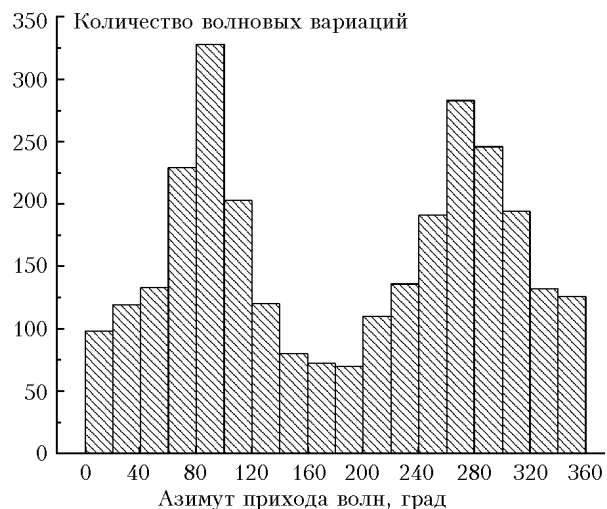


Рис. 2. Распределение азимутов прихода волн. Азимуту 0 и 360° соответствует направление распространения волны с севера; 180° — с юга; 90° — с востока; 270° — с запада

Мы исследовали зависимость азимутов прихода волновых возмущений от направления среднего ветра в приземном слое. На рис. 3 представлены наиболее вероятные диапазоны азимутов прихода волновых возмущений в зависимости от направления среднего ветра.

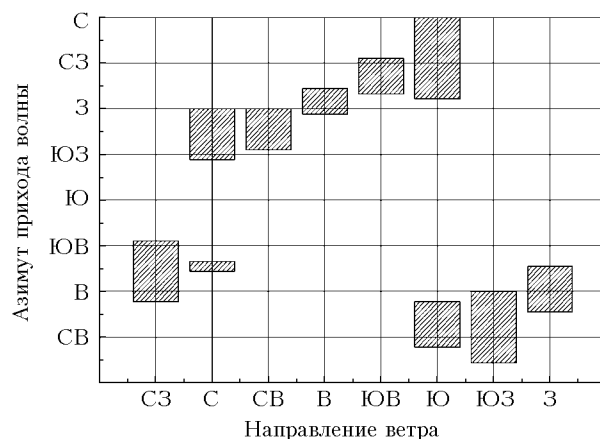


Рис. 3. Наиболее вероятные значения азимутов прихода волновых возмущений в зависимости от направления ветра в приземном слое

Волновые вариации распространяются преимущественно с западного направления при восточном и северо-восточном ветре, а при западном и северо-западном ветре преимущественно с востока и юго-востока. При южном и северном ветре наблюдаются по два наиболее вероятных направления фронта вариаций. Наиболее вероятное направление прихода волн почти противоположно азимуту ветра, но имеет небольшую нормальную составляющую к направлению среднего потока. Это, видимо, следствие того, что в зависимости от направления ветра происходит формирование внутренних гравитационных волн различными составляющими неоднородностей рельефа. Рельеф в районе г. Альметь-

евска достаточно сложный, хотя и не имеет высоких возвышенностей, и большая часть выделяемых волн, видимо, порождается орографическими неоднородностями.

В работах [10, 11] по эпизодическим наблюдениям подветренных орографических волн в тропосфере получено, что ВГВ в основном распространяются против направления ветра. При моделировании орографических возмущений в виде волнового пакета [12, 13] получено, что горизонтальная скорость волнового пакета противоположна скорости среднего потока. Эта зависимость видна и в наших результатах. По-видимому, составляющая скорости ветра, нормальная неоднородностям рельефа, вызывает волны, имеющие компоненту фазовой скорости, противоположную этой составляющей скорости среднего ветра.

По нашим измерениям, при возрастании модуля скорости среднего ветра уменьшается средний период атмосферных вариаций, что согласуется с теоретическими исследованиями [2, 14] волн, генерируемых орографическими неоднородностями. В то же время нами выявлено, что нет значимой взаимосвязи фазовой скорости и амплитуд вариаций параметров в волне от направления ветра.

Количество обнаруженных нами волновых вариаций максимально при направлении ветра с юга и с запада и минимально при восточном ветре.

То есть, по-видимому, можно интерпретировать большую часть выделенных мезомасштабных возмущений атмосферных параметров как внутренние гравитационные волны, генерируемые локальными орографическими неоднородностями.

Мы исследовали соотношение различных видов энергии в мезомасштабных волнах. Энергетический состав колебания может служить объективной характеристикой различий между типами волн. Расчет плотности энергии проводился непосредственным вычислением по данным эксперимента (амплитудам волновых вариаций скорости ветра, давления, температуры) с помощью нижеследующих выражений [3].

– Кинетическая энергия горизонтальной составляющей движения

$$E_p = \bar{\rho} \frac{|u|^2 + |v|^2}{2},$$

где u , v – возмущения зональной, меридиональной компонент скорости ветра; $\bar{\rho}$ – средняя плотность воздуха.

– Упругая энергия, связанная с флуктуациями давления:

$$E_y = |p|^2 / (2\kappa\bar{p}).$$

– Энергия, связанная с флуктуациями энтропии (термобарическая энергия):

$$E_\tau = |p - c^2\rho|^2 \frac{g}{2\kappa^2 R \bar{p} (\gamma_a - \gamma)},$$

где R – универсальная газовая постоянная; g – ускорение свободного падения; c – адиабатическая скорость звука; γ – вертикальный градиент температуры; γ_a – адиабатический градиент температуры; $\kappa = c_v/c_p$ – отношение удельных теплоемкостей воздуха при постоянном объеме и постоянном давлении. Термобарическая энергия имеет непосредственное отношение к силам плавучести, действующим на частицу, отклонившуюся по вертикали от состояния равновесия.

Исследовались волны с периодами от 5 мин до 16 ч в двух группах периодов. Результаты приведены в таблице.

Средние значения удельной плотности энергии для мезомасштабных вариаций

| Удельная плотность энергии, Дж/м ³ | Группа периодов | |
|---|-----------------------|-----------------------|
| | 5–120 мин | 2–16 ч |
| Термобарическая | $1,841 \cdot 10^{-3}$ | $7,527 \cdot 10^{-3}$ |
| Упругая | $2,163 \cdot 10^{-3}$ | $3,168 \cdot 10^{-3}$ |
| Горизонтальная кинетическая | $1,2 \cdot 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ |

Если выделенные мезомасштабные возмущения вызываются внутренними гравитационными волнами, то у них согласно теории [3] должны быть приблизительно равные доли кинетической и потенциальной энергии. Из таблицы видно, что упругая энергия гравитационных колебаний не очень мала (13,4% суммарной плотности энергии для вариаций с периодами 5–120 мин и 7,8% для вариаций с периодами 2–16 ч); это говорит о том, что сжимаемость оказывает некоторое влияние на процессы в этих волнах.

Гравитационные колебания связаны с периодическим переходом энергии из кинетической в потенциальную, и наоборот. При этом для длинных гравитационных волн доля вертикальной энергии пренебрежимо мала, т.е. вся кинетическая энергия должна состоять из энергии горизонтального движения [3]. Из наших расчетов следует, что кинетическая энергия волн составляет в среднем 75% всей энергии. Это показывает, что гироскопические силы оказывают воздействие на волны данных масштабов и их влияние увеличивает долю кинетической энергии. В работе [3] теоретические расчеты дают значение 57% для ВГВ с частотами, близкими к частоте Брента–Вяйсяля. Поскольку масштабы исследуемых процессов значительно больше, то и доля кинетической энергии должна быть больше, чем в [3].

Модельные расчеты [2, 3, 14] показали, что в случае гравитационных волн пульсации энтропии должны быть больше пульсаций давления, т.е. термобарическая энергия должна быть больше упругой. Из наших результатов следует, что среднее значение термобарической энергии в два раза превышает значение упругой энергии. Причем доля термобарической энергии в потенциальной растет с ростом периода (в полном соответствии с теорией).

На рис. 4 приведены средние значения упругой и горизонтальной энергии волн в зависимости от горизонтального масштаба.

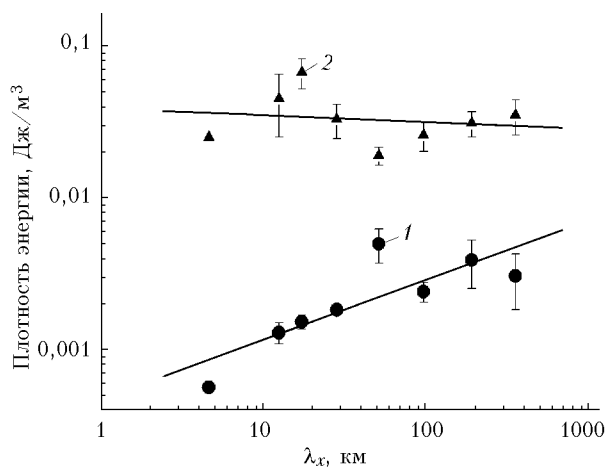


Рис. 4. Зависимость плотности упругой (1) и горизонтальной (2) кинетической энергии от масштаба волн

Видно, что при возрастании масштаба энергетический состав колебаний изменяется в направлении увеличения доли упругой энергии по сравнению с горизонтальной. Это также соответствует модельным расчетам для ВГВ [2, 3, 14]. В соответствии с общим положением [3, 14] упругая энергия в среднем возрастает с ростом фазовой скорости, что также наблюдается в наших экспериментальных результатах измерений.

Рассмотрим, как дисперсионное соотношение для ВГВ выполняется по нашим экспериментальным измерениям. Дисперсионное соотношение для ВГВ согласно [14] записывается в виде

$$\omega^2 = N^2 \frac{k^2}{k^2 + m^2},$$

где k и m — горизонтальное и вертикальное волновые числа; N — частота Брента–Вяйсяля; ω — частота волны. В [14] дисперсионное соотношение для ВГВ используется для вывода поляризационных соотношений между компонентами скорости ветра и давления в волне. Можно получить из экспериментальных данных все эти величины и, проверив выполнение поляризационного соотношения в эксперименте, доказать согласие дисперсионного соотношения. В [14] показано, что амплитуда возмущения горизонтальной скорости ветра связана с амплитудой возмущения давления, горизонтальным волновым числом и частотой волны. Дисперсионное соотношение можно преобразовать и записать в виде

$$C_x = p / (\bar{\rho} V),$$

где $\bar{\rho}$ — средняя плотность воздуха в приземном слое. Полученные амплитуды вариаций давления p

и скорости ветра V , определенные из амплитудного вейвлет-спектра вариаций, и горизонтальные фазовые скорости C_x , найденные из фазового вейвлет-спектра, используются для проверки дисперсионного соотношения.

Для всех обнаруженных волновых возмущений за весь многолетний период измерений были вычислены отношения правой и левой частей вышенаписанного соотношения и получено, что их среднее значение равно 1,315 (вместо 1) с ошибкой среднего 0,191. Это справедливо для всех временных масштабов и также доказывает, что эти возмущения в основном вызваны ВГВ.

Все экспериментально полученные зависимости по многолетним измерениям согласуются с теоретическими, полученными для ВГВ. А именно: согласуются периоды, длины волн и фазовые скорости; кинетическая энергия превышает потенциальную; термобарическая превышает упругую; доля термобарической энергии растет с ростом периода; доля упругой энергии растет с ростом длины волны; с ростом фазовой скорости растет упругая энергия. Дисперсионное соотношение для ВГВ удовлетворяется для мезомасштабных вариаций. Все эти факты свидетельствуют о том, что мезомасштабные неоднородности примесей в приземном слое с периодами от 5 мин до 16 ч имеют в основном физическую природу внутренних гравитационных волн. В пользу предположения генерации ВГВ за счет локальной орографии свидетельствуют: зависимость азимутов прихода волн от направления среднего ветра, уменьшение среднего периода волн при увеличении скорости среднего ветра.

Работа выполнена при частичной поддержке фондов РФФИ (03-05-96211, 04-05-64194), НИОКР РТ (09-9.5-165) и университетов России (УР.01.01.074).

1. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
2. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1985. 582 с.
3. Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1969. 196 с.
4. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Временные вариации аэрозоля и малых газовых примесей в приземном городском воздухе // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 782–790.
5. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Сезонная изменчивость спектра вариаций атмосферных параметров приземного слоя // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 7. С. 645–647.
6. Хуторова О.Г., Корчагин Г.Е. Исследование пространственной структуры мезомасштабных вариаций тропосферного аэрозоля различными методами // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 650–654.
7. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Исследование мезомасштабных вариаций в тропосфере по наблюдениям концентрации примесей // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2001. Т. 37. № 6. С. 853–856.

8. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Волновые возмущения локальных и синоптических масштабов по синхронным измерениям атмосферных примесей // Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 1. С. 110–112.
9. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
10. Lott F., Teitelbaum H. Topographic waves generated by a transient wind // J. Atmos. Sci. 1993. V. 50. N 16. P. 2607–2624.
11. Gossard E.E., Munk W.H. On gravity waves in the atmosphere // J. Meteorol. 1954. V. 11. P. 259–269.
12. Кожевников В.Н. Возмущения атмосферы при обтекании гор. М.: Научный мир, 1999. 160 с.
13. Кожевников В.Н. О невозмущенности натекающего потока при обтекании гор // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 25–40.
14. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Т. 1,2. М.: Мпр, 1986. С. 397, 415.

O.G. Khutorova, G.M. Teptin. On the nature of mesoscale variations of concentrations of near-ground atmospheric admixtures.

This work is based on long-term experimental observations obtained at a net of stations of atmospheric monitoring in Tatarstan. The stations simultaneously measure the near ground concentration of aerosol, small gas impurities, and meteorological parameters. Mesoscale wave variations with periods from 5 minutes to 16 hours propagating in space are found by the original method. It is shown, that for all impurities and meteorological parameters distributions of periods, phase velocities, and wave lengths of variations coincide. It is revealed, that the direction of propagation of near ground mesoscale variations depends on the mean wind azimuth. It is found, that the kinetic energy of waves makes on the average 75% of all energy, and the mean thermobaric energy twice exceeds the elastic energy. These results show that mesoscale variations of atmospheric impurities are mainly caused by internal gravitation waves, caused by orographic inhomogeneity of the surface.