

О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, О.С. Александровская

Динамика и энергетика внутрисезонных атмосферных процессов по наземным и аэрологическим измерениям

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 26.01.2006 г.

Исследованы внутрисезонные вариации по экспериментальным наблюдениям сети станций атмосферного мониторинга и аэрологическим наблюдениям в нескольких промышленных регионах Татарстана за период 1996–2003 гг. Одновременно измерялись приземные концентрации аэрозоля, малых газовых атмосферных примесей и метеопараметры. Длинные ряды измерений позволили надежно провести эмпирическое исследование волновых атмосферных процессов внутрисезонного масштаба путем оценки их энергетического баланса на нескольких высотных уровнях, а также исследования соотношений между волновыми параметрами. Волны, распространяющиеся с запада на восток, и возмущения с противоположными скоростями показывают значимое различие как по пространственным зависимостям, так и по энергетическим характеристикам.

Введение

Знание закономерностей развития внутрисезонных атмосферных процессов в приземном слое позволяет более эффективно решать задачи прогноза метеорологического и экологического состояния окружающей среды, более точно оценивать антропогенное воздействие на нее.

К настоящему времени построено множество различных моделей атмосферных вариаций, имеющих характерные пространственные масштабы — несколько тысяч километров, и периоды от 2 до 60 сут [1, 2]. Планетарные волны определяют динамическое взаимодействие между тропосферой и другими слоями атмосферы [3]. Большая часть экспериментальных наблюдений относится к волнам Россби в тропосфере и стратосфере [4], озоносфере [5] и в других областях атмосферы. Волны Россби нормальных мод представляют собой планетарные волны, распространяющиеся с востока на запад, которые являются свободными колебаниями атмосферы. Имеются свидетельства существования планетарных волновых процессов, распространяющихся на восток. Например, по спутниковым стратосферным данным [6, 7] доказано существование волн Кельвина. В работе [8] по аэрологическим и метеорологическим данным исследованы колебания, распространяющиеся на восток, с периодами 30–50 сут, в средних широтах и показана их связь с волновыми процессами в тропиках.

Атмосферные волновые процессы могут быть одной из причин временной и пространственной изменчивости примесей. В свою очередь примеси могут служить индикатором волновых движений [9–11]. Наиболее исследованной темой неоднородностей атмосферных примесей следует считать пространственно-временную изменчивость озона, в мень-

шей степени других малых газовых примесей [10, 13, 14]. Периоды 8–18 сут представляют собой колебания концентрации примесей, вызываемые крупномасштабными синоптическими процессами [15]. Периоды 1–7 сут обычно характеризуются локальными короткопериодными процессами, включающими локальные синоптические процессы, которые обуславливаются как локальными характеристиками местности, так и влиянием циклонов и антициклонов и т.д. [14]. Влияние синоптических процессов на изменчивость характеристик субмикронного аэрозоля показано в [16]. В [11] исследованы долгопериодные вариации оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля.

Экспериментальные данные и методы исследования

В работе [12] показано, что вариации приземной концентрации атмосферных примесей в двух промышленных регионах Татарстана в значительной степени определяются внутрисезонными процессами с периодами 2–64 сут. Для исследования синоптических и внутрисезонных процессов в приземном слое используются данные сети станций в гг. Альметьевск (53° с.ш., 51° в.д.), Зеленодольск (54° с.ш., 49° в.д.), Азнакаево (53° с.ш., 51° в.д.) и Казань (56° с.ш., 49° в.д.). Одновременные измерения концентрации CO, NO, NO₂, H₂S, SO₂ проводятся на высоте 2,4 м. На станциях измеряют температуру, относительную влажность, давление, скорость и направление ветра. Расстояние между пунктами от 50 до 310 км.

Для исследования атмосферных волновых вариаций по временным рядам атмосферных параметров и примесей применялись оригинальные методи-

ки. Авторское развитие метода вейвлет и взаимного вейвлет-анализа позволяет исследовать параметры волновых атмосферных процессов по синхронным временным рядам, измеренным в пространственно разнесенных точках [9, 12]. При выделении событий внутрисезонных вариаций учитывались только периодические вариации, показавшие значимость амплитудного и фазового вейвлет-спектра более чем 80%. Найдены экспериментальные распределения горизонтальных фазовых скоростей и пространственных масштабов волновых процессов.

В данной статье, которая является продолжением исследований, начатых в [12], исследуются закономерности внутрисезонных процессов по массиву волн, полученному в [12]. Высотная структура приземного слоя изучалась по радиозондовым данным станции Казань за 1998–2002 гг.

Привлечение к исследованию данных о вертикальных профилях атмосферных параметров позволяет дополнить исследование горизонтальной пространственной когерентности полей атмосферных параметров и примесей.

Высотная структура внутрисезонных вариаций в приземном слое

На рис. 1 представлены вейвлет-спектры интенсивности синоптических вариаций температуры

на нескольких высотных уровнях, полученные по аэрологическим данным за 2002 г. Видно, что почти одновременно в спектрах наблюдаются максимумы на всех высотах, это проявляется в диапазоне от 10 до 5500 м. Коэффициент корреляции матриц амплитуд вейвлет-спектров для близких высот, например для высот 100 и 600 м или для высот 2000 и 4000 м, равен 0,8; для разнесенных высот 600 и 4000 м – 0,2. Этот факт объясняется тем, что внутрисезонные вариации имеют небольшой, но значимый высотный фазовый сдвиг. Анализ фазовых вейвлет-спектров на различных высотах показывает значимую с 90%-й вероятностью линейную зависимость фазы значимых периодических вариаций от высоты.

Обнаружено, что эти спектры аэрологических данных сходны со спектрами температуры, давления, скорости ветра и относительной влажности, полученными по независимым наблюдениям на сети станций мониторинга в приземном слое. Амплитуды и периоды внутрисезонных вариаций, их локализация совпадают с аналогичными параметрами наземных процессов. То есть, как и следовало ожидать, волны планетарных масштабов проявляются практически одновременно как в приземном слое, так и в тропосфере до высоты 5500 м. По радиозондовым данным были построены также вейвлет-спектры давления, относительной влажности, зональной и меридиональной компонент скорости ветра.

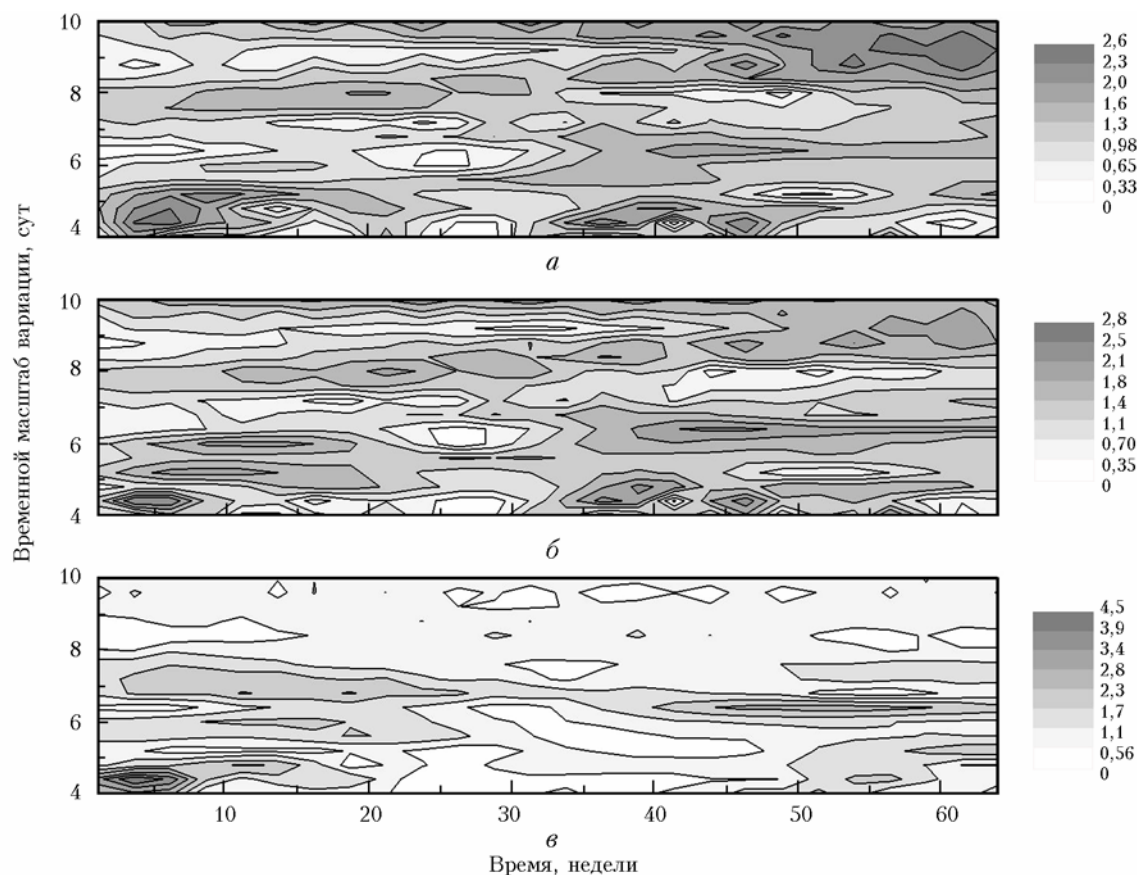


Рис. 1. Вейвлет-спектры интенсивности периодических вариаций температуры T на высотных уровнях 100 (а), 600 (б), 4000 м (в) (Казань, 2002 г.). Шкала – интенсивность температурных вариаций, К

Массив волновых процессов, полученный по данным наземных станций атмосферного мониторинга, был построен путем отбора событий существования когерентных в пространстве квазипериодических вариаций одновременно в двух пунктах Зеленодольск–Альметьевск (1996–1999 гг.) или Зеленодольск–Азнакаево (2002 г.). Причем отбор осуществлялся по независимым измерениям метеопараметров и примесей [12]. Наземные ежесуточные данные температуры, скорости ветра, давления и относительной влажности, измеренные в пункте запуска радиозонда за 2002 г. (Казань), использовались как временные ряды для третьей опорной точки в исследовании фазовых скоростей и длин волн внутрисезонных вариаций. За тот же год по базе Зеленодольск–Азнакаево все обнаруженные волновые вариации в метеопараметрах были получены одновременно и по базе Азнакаево–Казань, причем периоды, фазовые скорости и длины волн каждой вариации совпали в пределах точности методики [9, 12].

Таким образом, можно заключить, что и временные, и пространственные масштабы внутрисезонных вариаций проявляются одновременно в вариациях давления, относительной влажности, компонент скорости ветра во всех слоях тропосферы. По-видимому, они определяют и внутрисезонные вариации приземных примесей.

Динамика интенсивности внутрисезонных вариаций

По длинным рядам наблюдений сделаны оценки доли внутрисезонных процессов в общей дисперсии атмосферных примесей в Татарстане. По ежеминутным данным оценивалась дисперсия примесей внутри каждого календарного сезона за 1996–2003 гг. Далее проводилась фильтрация рядов методом скользящего среднего и вычитанием исключались вариации с периодами более 3 мес и менее 1 сут. По полученным рядам оценивалась дисперсия внутрисезонных вариаций. Полученные значения дисперсии усреднялись по станциям, работающим в каждый сезон измерений. На рис. 2 представлены результаты оценки доли дисперсии внутрисезонных вариаций для массовой концентрации аэрозоля.

Видно, что в среднем она составляет 20–30% от общей дисперсии, а в отдельные сезоны повышается до 45%. Для малых газовых примесей наблюдаются подобные зависимости. Такой подход учитывает вклад всех внутрисезонных процессов, меняющих концентрации примесей в атмосфере, как антропогенных, так и вызванных вариациями метеопараметров. Учет только периодических и когерентных в пространстве процессов, которые, как показано в [12], практически одновременно наблюдаются как в метеопараметрах — скорости ветра, температуре, относительной влажности, так и в массовой концентрации аэрозоля и малых газовых примесей, позволяет частично отфильтровать антропогенные внутрисезонные факторы.

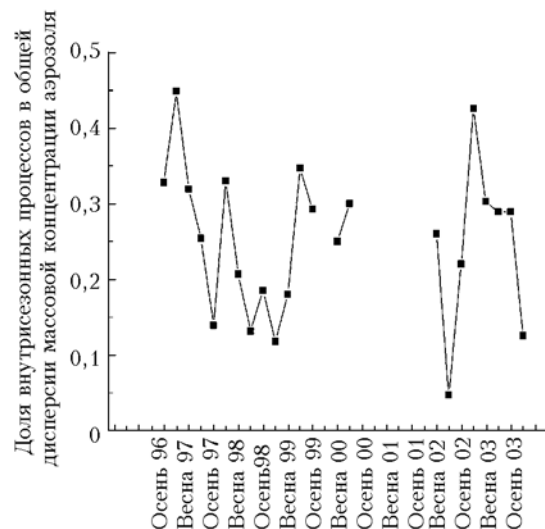


Рис. 2. Оценки вклада внутрисезонных вариаций в дисперсию массовой концентрации аэрозоля

Мы усреднили амплитуды всех обнаруженных волновых вариаций по календарным сезонам. Максимальные амплитуды у всех метеопараметров, кроме относительной влажности и примесей, наблюдаются в зимний период, что соответствует работам [8, 17], где также отмечены максимальные амплитуды в зимний период по наблюдениям внутрисезонных вариаций в тропосфере, связанных с волнами Кельвина. Максимумы амплитуд волн Россби зимой обнаружены по спутниковым данным в [4, 5]. Общее количество обнаруженных волновых вариаций также больше в зимний период, этот факт отмечен в наблюдениях планетарных вариаций стратосферы и мезосферы [3].

Пространственные характеристики волн в зависимости от периода

По знаку фазовой скорости все выявленные волновые возмущения разделились на две группы. Основная масса вариаций, вызванных волнами, распространяющимися на запад, имеет периоды 3–10 сут, а на восток — в основном периоды 8–58 сут. Были исследованы параметры волновых вариаций в зависимости от периода процесса (рис. 3).

Для волн, распространяющихся на восток, периоды всегда больше 8 сут, фазовая скорость практически не зависит от периода, длина волны растет с увеличением периода. Это согласуется с теоретическими зависимостями для волн Кельвина — их минимальный период для широты наших станций равен 7,6 сут [2]. Волны Кельвина движутся с постоянной фазовой скоростью, они не испытывают дисперсии. Их дисперсионное соотношение выражается простой формулой $\omega = kC$, где k — горизонтальное волновое число, C — фазовая скорость волны. Эти результаты подтверждают предположение о том, что возмущения атмосферных параметров и примесей, распространяющиеся с запада на восток, могут быть вызваны волнами Кельвина.

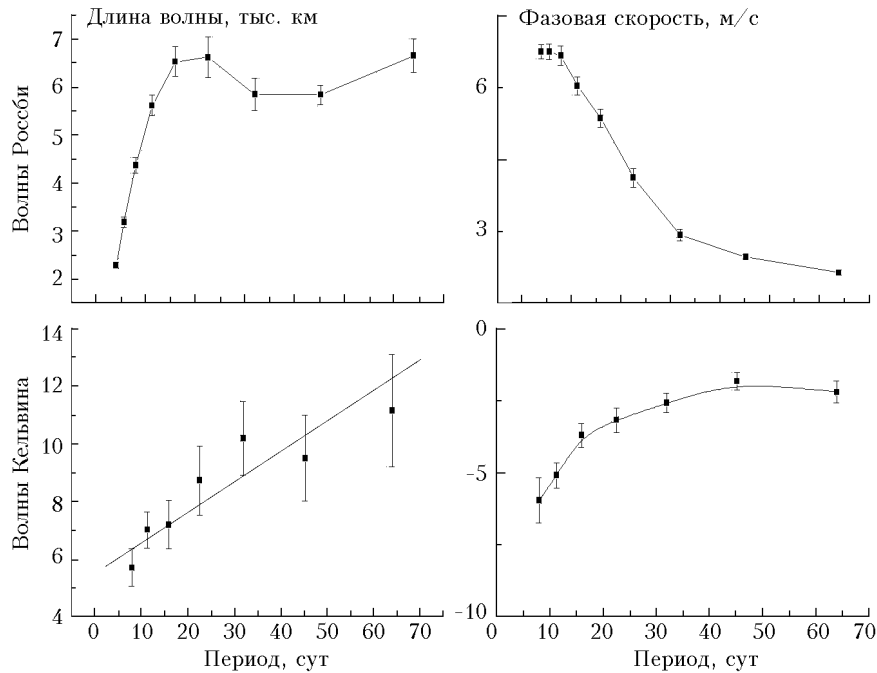


Рис. 3. Параметры внутрисезонных волн в зависимости от периода процесса

В последнее время проводились детальные исследования различными методами и на разных высотных уровнях, которые показали наличие волн Кельвина в средних широтах, например, в общем содержании озона [7, 17] и в тропосфере Европы и Азии по радиозондовым и приземным метеорологическим наблюдениям [8].

Средние фазовые скорости волн, распространяющихся на запад, падают с ростом периода. Амплитуды температуры максимальны для периодов до 10 сут, затем несколько снижаются. Амплитуды скорости ветра и примесей, наоборот, больше для волн с периодами более 10 сут. Фазовые скорости и длины волн, распространяющихся на восток, соответствуют как наблюдаемым, так и теоретически рассчитанным для внутрисезонных вариаций в стратосфере и тропосфере [1, 3]. Полученные нами зависимости хорошо согласуются с параметрами волн Россби с большими волновыми числами [1, 2].

Для волн, распространяющихся на запад, видна тенденция к увеличению фазовой скорости в осенне-зимний период. Длина волны в среднем меньше летом и осенью. Видимо, это связано с тем, что летом и осенью проявляются коротковолновые моды волн Россби. Максимальное количество волн, распространяющихся на запад, для всех параметров, кроме массовой концентрации аэрозоля, наблюдается в зимний период. Это связано со значимостью вариаций, мы просто не обнаруживаем проявление волн при малой концентрации аэрозоля. Фазовые скорости волн, распространяющихся на восток, постоянны в течение всего года. Сезонная зависимость длин этих волн противоположна волнам, распространяющимся на запад, — максимальные длины волн наблюдаются летом, а минимальные зимой. Максимальное количество волн, распространяющихся на восток, для всех параметров,

кроме концентрации NO_2 и SO_2 , наблюдается в осенний период. Это связано со значимостью вариаций, проявление волновых процессов при малой концентрации этих примесей не обнаруживается.

Энергетика внутрисезонных вариаций

Малоизученной областью остается экспериментальное исследование планетарных волн, особенно их энергетических характеристик в приземном слое, где энергетика различных волн может сильно отличаться от модельных представлений в силу влияния подстилающей поверхности и турбулентных процессов. Объективной характеристикой различий между типами волн может служить энергетический состав колебания [1]. Нами исследуются соотношения различных видов энергии в планетарных (периоды 2–64 сут) волнах.

Расчет плотности энергии проводился непосредственно по данным эксперимента с помощью выражения для кинетической энергии горизонтальной составляющей движения:

$$E_p = \bar{\rho} \frac{|V_x|^2 + |V_y|^2}{2},$$

где V_x , V_y — возмущения зональной, меридиональной компонент скорости ветра; $\bar{\rho}$ — средняя плотность воздуха.

Энергия, связанная с флуктуациями энтропии (термобарическая энергия):

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

где R — универсальная газовая постоянная; c — адиабатическая скорость звука; γ — вертикальный градиент температуры; γ_a — адиабатический градиент

температуры; \bar{p} – давление, p – возмущение давления в волне; $\kappa = c_V/c_P$ – отношение удельных теплоемкостей воздуха при постоянном объеме и постоянном давлении; g – ускорение свободного падения [1].

Исследовались все обнаруженные волны с периодами от 2 до 64 сут. Плотность кинетической энергии рассчитывалась на трех различных высотных уровнях с использованием радиозондовых данных. Результаты вычисления средней плотности приведены в таблице.

Средняя плотность энергии в синоптических и внутрисезонных волнах

Плотность энергии, Дж/м ³	Волны, распространяющиеся на запад	Волны, распространяющиеся на восток
Кинетическая на высоте, м		
10	0,072	0,055
50	0,194	0,194
100	0,267	0,203
Термобарическая	0,311	0,207

Очевидно, что кинетическая энергия волн, распространяющихся на восток, на высоте 100 м приблизительно равна потенциальной, а для волн, распространяющихся на запад, составляет 46% от общей энергии. Радиус Россби для широты 56° около 2 тыс. км, поэтому все моды, которые обнаружены, сравнимы с радиусом Россби и соотношение плотностей энергии должно быть приблизительно равным.

Средняя плотность кинетической энергии для волн, распространяющихся на запад, постоянна, а термобарической растет с увеличением длины волны. Плотность кинетической энергии для волн, распространяющихся на восток, слабо растет с длиной волны. Плотность термобарической энергии этих волн с ростом длины волны имеет тенденцию

уменьшаться, но это уменьшение не имеет значимости. Указанные зависимости представлены на рис. 4.

Таким образом, и по пространственным зависимостям, и по энергетическим характеристикам волны, распространяющиеся с запада на восток, и возмущения с противоположными скоростями показывают значимое различие.

Заключение

В работе показано, что внутрисезонные атмосферные процессы проявляются в тропосфере на высотах от 2 до 5500 м, причем имеют высотный фазовый сдвиг. Они дают существенный вклад в дисперсию приземных примесей. По зависимостям пространственных и энергетических характеристик от временных масштабов волны, распространяющиеся с запада на восток, и возмущения с противоположными скоростями показывают значимое различие. Исследование закономерностей для периодов, фазовых скоростей этих вариаций позволяет предположить, что возмущения параметров и примесей в приземном слое, распространяющиеся на запад, связаны с волнами Россби, а распространяющиеся на восток – с волнами Кельвина.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 04-05-64194) и фондом НИОКР РТ.

1. Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1969.
2. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Т. 1, 2. М.: Мир, 1986.
3. Холтон Дж.Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1976.
4. Venne D.E. Normal-mode Rossby waves observed in the wave number 1–5 geopotential fields of the stratosphere and troposphere // J. Atmos. Sci. 1989. V. 46. N 7. P. 1042–1056.

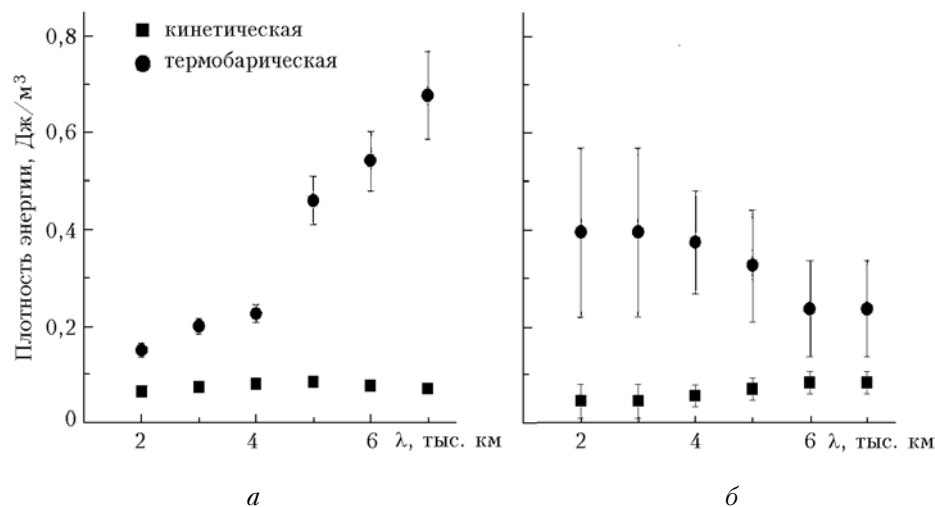


Рис. 4. Средняя плотность энергии на высоте 10 м для волн, распространяющихся: а – на запад, б – на восток, в зависимости от масштаба

5. *Randel W.J.* Global normal-mode Rossby waves observed in stratospheric ozone data // *J. Atmos. Sci.* 1993. V. 50. N 3. P. 406–420.
6. *Randel W.J., Gille J.C.* Kelvin wave variability in the upper stratosphere observed in SBUV ozone data // *J. Atmos. Sci.* 1991. V. 48. N 10. P. 2336–2349.
7. *Ziemke J.R., Stanford J.L.* Kelvin waves in total column ozone, 1994 // *Geophys. Res. Lett.* V. 21. N 2. P. 105–108.
8. *Иванов В.Н., Стерин А.М., Хохлова А.В.* Внутрисезонные колебания атмосферы в умеренных широтах Европы и Азии и их параметры // *Метеорол. и гидрол.* 2003. № 5. С. 31–43.
9. *Хуторова О.Г., Тептин Г.М.* Метод выделения перемещающихся возмущений по синхронным временным рядам // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. Вып. 21. Казань: Изд-во КГУ, 2003. С. 133–139.
10. *Тарасова О.А., Кузнецов Г.И., Захаров И.С.* Применение спектрального анализа для исследования вариаций приземного озона над Европой // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17. № 5–6. С. 430–434.
11. *Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В.* О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 5–6. С. 393–399.
12. *Хуторова О.Г.* Взаимосвязь вариаций приземной концентрации атмосферных примесей в двух промышленных регионах Татарстана // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17. № 5–6. С. 526–529.
13. *Хргиан А.Х., Кузнецов Г.И.* Проблема наблюдений и исследований атмосферного озона. М.: Изд-во МГУ, 1981. 213 с.
14. *Белан Б.Д., Заде Г.О., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Модели распределения аэрозоля и некоторых газов в антициклоне и циклоне // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 2. С. 146–149.
15. *Шакина Н.П.* Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометиздат, 1990. 308 с.
16. *Панченко М.В., Терпугова С.А.* Внутрисезонные факторы изменчивости характеристик субмикронного аэрозоля. 1. Воздушные массы // *Оптика атмосф. и океана.* 1995. Т. 8. № 12. С. 1761–1772.
17. *Варгин П.Н.* Анализ распространяющейся на восток планетарной волны по спутниковым данным об общем содержании озона // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2003. Т. 39. № 3. С. 327–334.

O.G. Khutorova, G.M. Teptin, O.S. Aleksandrovskaia. **Dynamics and energetics of intraseasonal atmospheric processes from the ground and aerological measurements.**

Intraseasonal variations are investigated based on experimental observations of a net of stations of atmospheric monitoring and aerologic observations in several industrial regions of Tatarstan for 1996–2003. The ground concentrations of aerosol, small gas atmospheric impurities, and meteoroparameters are simultaneously measured. Long series of experimental measurements allows us to examine, empirically intraseasonal wave atmospheric processes by estimation of their energy balance at several high-altitude levels, examination of relations between wave parameters. Both spatial dependences and energy performances, waves propagating from west to east, and the perturbations with opposite velocities display significant distinctions.