

УДК 523.683

ВОЛНОВЫЕ ВЫСОТНЫЕ И МЕЖПОЛУШАРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ СОЛНЕЧНЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ ФАКТОРОВ

*А.Н. Фахрутдинова, А.М. Степанов, В.В. Гурьянов,
А.А. Гаврилов, Д.В. Коротышкин, С.В. Максютин, Д.В. Мамедов,
К.А. Магдеев, Д.В. Федоров, И.Д. Ахметгалеев*

Аннотация

В работе представлены закономерности динамического режима нейтральной атмосферы на высотах 0–100 км, установленные по радиометеорным измерениям в Казанском университете на высотах 80–100 км; в интервале высот 0–57 км получены с привлечением архивных данных Реанализа ВАСД (УКМО). Рассмотрены динамическая эффективность волновых возмущений с масштабами ВГВ, приливов, планетарных волн, межполушарные взаимодействия; воздействие солнечно-геомагнитной активности на динамические параметры и опосредованно на Es-слой.

Ключевые слова: динамический режим, динамические параметры, нейтральная атмосфера, нижняя и средняя атмосферы, волновые возмущения, ВГВ, приливы, планетарные волны, межполушарные взаимодействия, солнечно-геомагнитная активность.

Радиометеорные исследования нейтральной атмосферы на высотах мезосферы – нижней термосферы проводятся в Казанском университете последние 50 лет [1]. Радиометеорные измерения скорости ветра начаты в 1964–1965 гг., и в 1969 г. впервые проведены непрерывные полугодовые радиометеорные измерения скорости ветра на метеорном радаре, оснащенный высотомером. Регулярные радиометеорные измерения начаты в 1978 г. и проводятся по настоящее время по специальным и международным программам.

Прогресс исследований напрямую связан с техническим уровнем применяемых радиосредств, внедрением новых технологий при обнаружении сигналов, повышением статистической обеспеченности пространственного и временного единичных интервалов измерений, проведением непрерывного мониторинга по координированным измерениям на международной сети станций. Выполнение этих условий позволяет расширить спектр исследуемых динамических процессов: от масштабов акустико-гравитационных, приливных и планетарных волн до долгопериодных вариаций, обусловленных солнечными циклами и климатическими трендами. В последние годы выполнена модернизация метеорного радара, которая позволила улучшить помехозащищенность и повысить статистическую обеспеченность ветровых измерений [2–4]. По результатам измерений созданы база данных и региональная модель преобладающих, приливных, турбулентных движений и параметров годовых, полугодовых вариаций в зависимости от высоты [1]. Региональная модель преобладающих приливных движений включена в международные модели, представленные в работах [5, 6]. Получаемые при международном и российском сотрудничестве результаты исследований, выполненные в Казанском университете,

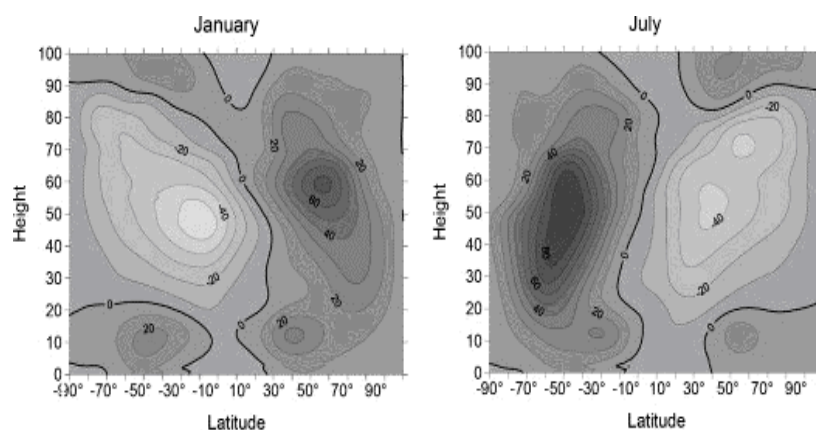


Рис. 1. Высотная и широтная структура зонального ветра в зимний (слева) и летний (справа) периоды

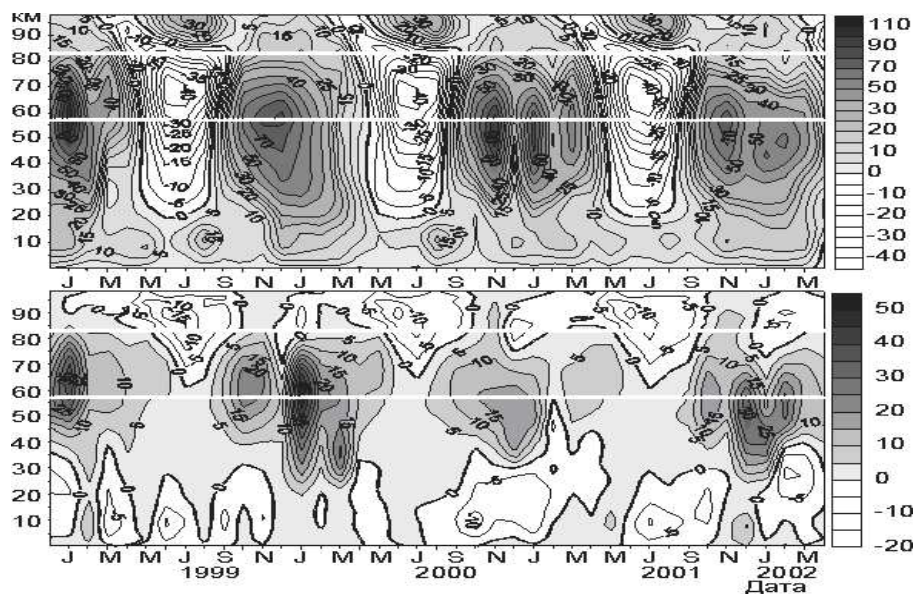


Рис. 2. Локальная высотно-сезонная структура преобладающих зонального (верхний рисунок) и меридионального (нижний) ветров

были включены в глобальную полуэмпирическую модель зональной и меридиональной циркуляций для Северного и Южного полушарий [7].

В настоящей статье приводятся наиболее значимые результаты исследований динамических закономерностей в интервале высот 0–100 км.

На рис. 1 показаны примеры высотной и широтной структуры зонального ветра для зимнего и летнего периодов. Видно изменение направления зонального ветра в экваториальных широтах в зимний и летний периоды. Максимальное значение зонального ветра характерно для высот 50–60 км.

На рис. 2 представлены устойчивые высотные структуры зональной и меридиональной скоростей ветра для региона г. Казани (56N, 49E) за период 1999–2002 гг. Значения скоростей ветра в интервале высот 80–100 км получены по радиометеорным измерениям, в интервале высот 0–57 км – с привлечением архивных данных

реанализа и данных BADC UKMO (Метеорологическое общество Великобритании). Интервал высот 60–80 км получен методом интерполяции данных, представленных для высот 0–57 и 60–80 км [1, 8].

1. Климатическая спектральная модель в нижней и средней атмосфере

Разработана климатическая спектральная модель волновой активности с временными масштабами планетарных волн (2–30 сут) (рис. 3) для региона Казани для четырех сезонов года с использованием интегральных вейвлет-спектров [9, 10], построенных на базе вейвлет Морле. Интервал усреднения составил 16 лет с 1986 по 2002 г.

На высотах мезосферы – нижней термосферы обнаруживаются волновые возмущения с периодами, близкими к периодам волн Россби. Среди всего набора волновых процессов с масштабами планетарных волн, наиболее примечательной является 5-суточная волна, которая характерна для зимы и весны в поле зонального ветра и для зимы, весны и осени в поле меридионального ветра; 2-суточные и 4-суточные колебания обнаруживают значимую интенсивность преимущественно в летние месяцы, хотя некоторая волновая активность с периодами, близкими к 4 сут, обнаруживается и в другие месяцы года. Определенная волновая активность наблюдается и с периодами, близкими к 10, 16 и 20–30 сут. При этом интенсивность волновых возмущений сильно зависит от высоты.

Наблюдается преимущественное преобладание по интенсивности волн в поле зональной циркуляции в течение всех сезонов кроме летнего. Однако в летние месяцы наиболее выражены волновые процессы в поле меридионального ветра с периодами 2–4 сут.

Полученные оценки фазы максимума годового цикла для различных уровней высот (тропопауза: ~ 10 км, стратосфера: ~ 29 км, стратопауза: ~ 55 км, мезосфера – нижняя термосфера: 84, 90, 94 и 98 км) для зонального и меридионального ветра представлены на рис. 4, *a* и *b* соответственно.

Анализ фазы максимума годового цикла для зонального ветра на высотах мезосферы – нижней термосферы указывает на скачкообразное изменение фазы с весенне-летних месяцев для периодичностей 2–4 сут на зимние месяцы (декабрь, январь) для временных масштабов 5–30 сут. На высотах тропосферы и стратосферы максимум годового цикла интенсивности волновых возмущений обнаруживается в ноябре–декабре для диапазона масштабов от 2 до 30 сут.

Фаза максимума для годового цикла в поле меридиональной циркуляции не имеет выраженных скачков и для интервала высот мезосферы – нижней термосферы плавно переходит с летних месяцев (июль – август) для 2-суточной волны до зимних месяцев (декабрь – январь) для периода 10 сут и более. На высотах 0–55 км максимум интенсивности обнаруживается в зимний период для всех масштабов от 2 до 30 сут.

Для исследования высотной структуры интенсивности волновых процессов в интервале высот 0–100 км с масштабами 2–30 сут проведены расчеты высотных профилей выборочной дисперсии в среднем за сезон (зима 1998–1999 гг., лето 1999 г.) для зонального и меридионального ветров. Расчеты данных параметров выполнены для трех станций: в Казани (56N, 49E) радиометеорным методом для высот 80–100 км, в Коллме, Германия (52N, 12E) методом LF D1 для высотного уровня около 94 км [11] и в Саскатуне, Канада (52E, 107W) на MF радаре в интервале высот 70–97 км [12, 13], результаты расчетов представлены на рис. 5.

Максимум интенсивности волновых возмущений в зональном и меридиональном ветрах наблюдается около стратопаузы (~ 55 км) в зимний период, в то время

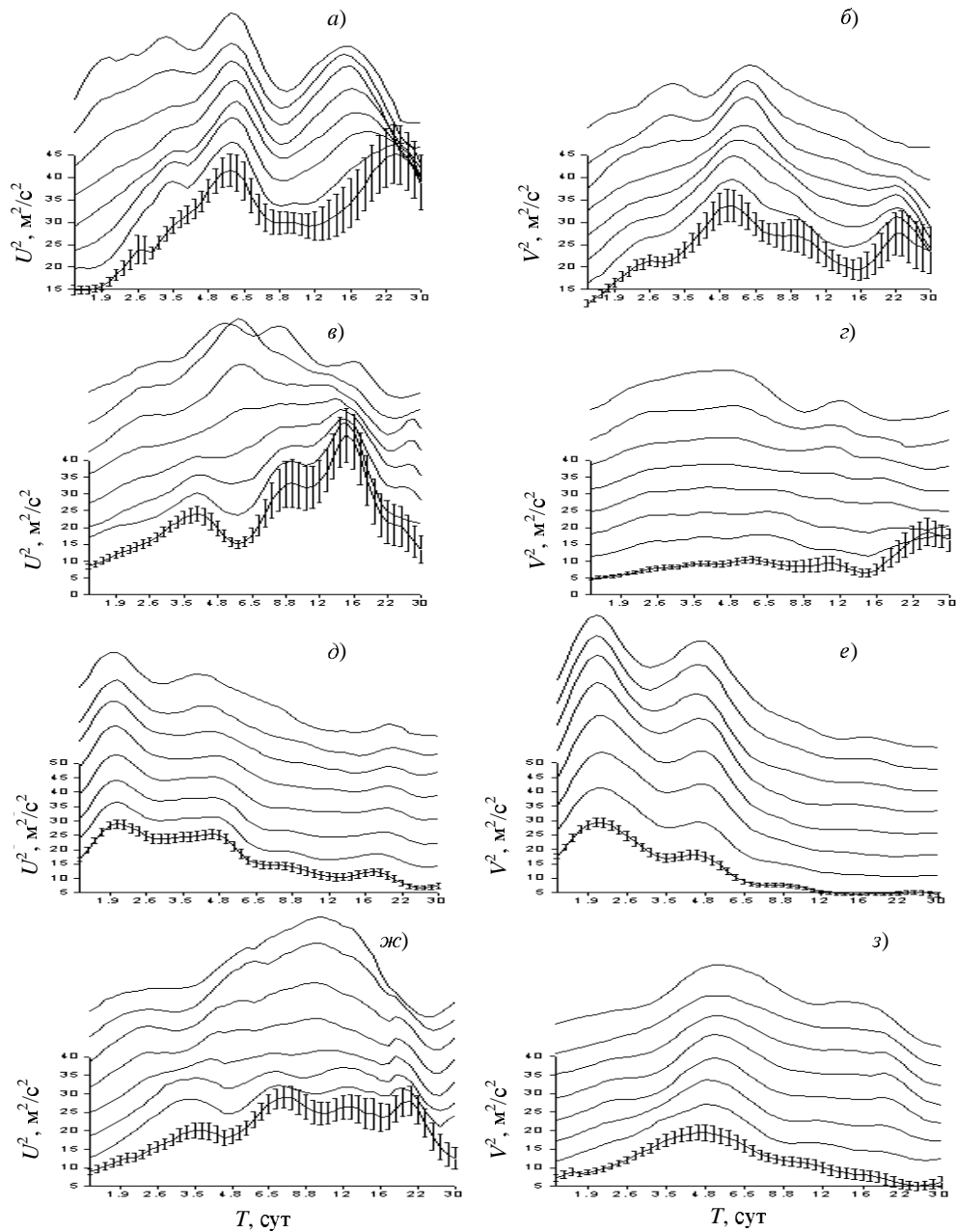


Рис. 3. Энергетические спектры скорости ветра на 8 высотных уровнях в интервале 84–98 км (снизу вверх) для волновых полей зонального (а, в, д, жс), меридионального (б, г, е, з) ветров в зимний, весенний, летний, осенний периоды соответственно по измерениям 1986–2002 гг. (Казань)

как в летний период максимальные значения σ_V^2 получены для высот около тропопаузы. В стратосфере в летний период наблюдается слабая волновая активность. Что касается высот мезосферы – нижней термосферы, в летний период высотные профили σ_U^2 и σ_V^2 для Казани и для Саскатуна совпадают на высотах ниже 90 км, в то время как для высот выше 90 км большая интенсивность обнаруживается для

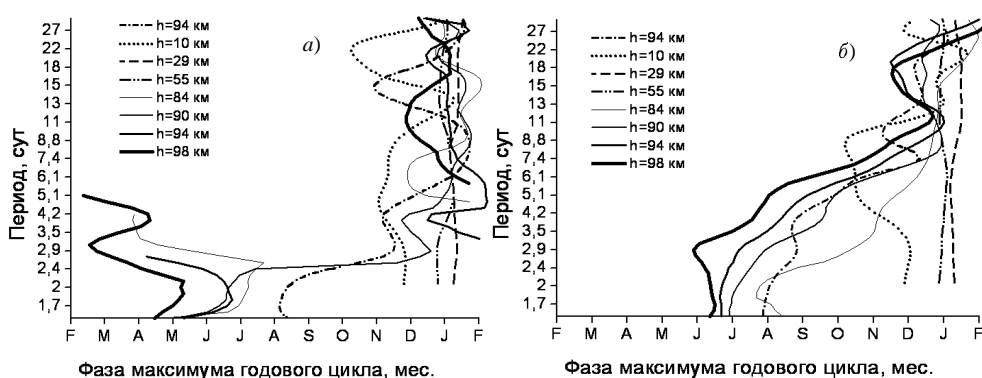


Рис. 4. Фаза максимума годового цикла интенсивности волновых процессов в интервале периодов 1–27 сут в поле зональной (а) и меридиональной (б) циркуляций

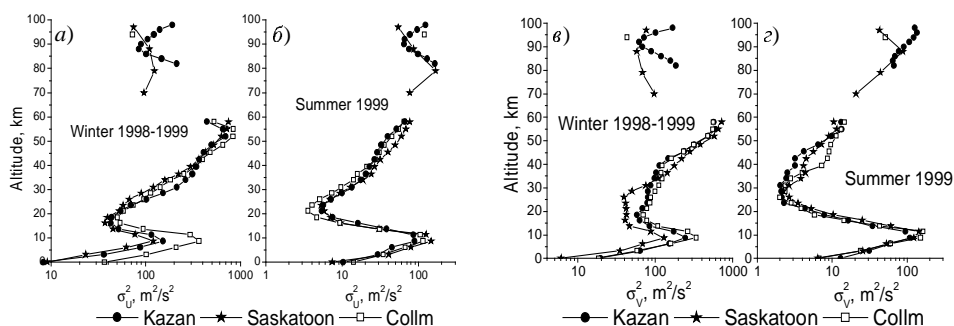


Рис. 5. Высотные профили выборочной дисперсии скорости зонального (а, б) и меридионального (в, г) ветров на высотах 0–100 км для зимы (а, в) и лета (б, г)

Казани. В зимний период обнаруживаются существенные различия в измерениях на разных станциях как следствие выраженных возмущений циркуляций зимой и, соответственно, более выраженных долготных различий.

Таким образом, разработанная спектральная климатическая модель обнаруживает характерные временные масштабы волновых возмущений в зависимости от сезона и высоты: зимой – 5, 16, 27 сут (80–90 км), весной – 5 (90–100 км) и 16 сут (80–90 км), летом – 2 и 4 сут, осенью – 5 и 10 сут.

Установлена устойчивая высотно-сезонная структура интенсивности волновых возмущений для временных масштабов, характерных для планетарных волн в интервале высот 0–55 км для регионов Казани, Коллма, Саскатуна для основных сезонов года (зима и лето) в поле зонального и меридионального ветра. Долготные различия волновой активности заключаются в следующем: в зимний период замечено превышение интенсивности волновых возмущений в Казани по сравнению с регионами Коллма и Саскатуна, тогда как в летний период интенсивности волновых возмущений приблизительно равны.

2. Межгодовые, внутригодовые, внутрисуточные вариации динамических параметров

Разработана и реализована методика спектрального анализа нестационарных временных рядов на основе модифицированного метода непрерывного вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Морле, адаптированного для анализа

используемых в работе временных рядов с нерегулярными временными отсчетами, имеющих разрывы. Выполнены расчеты динамической эффективности вихревых потоков для масштабов планетарных волн из выражений

$$K_U = \frac{\sigma_U^2}{U^2 + \sigma_U^2}, \quad K_V = \frac{\sigma_V^2}{V^2 + \sigma_V^2},$$

где в качестве параметра эффективности вихревых потоков взяты отношения внутримесячной дисперсии суточных значений скорости ветра к сумме квадрата скорости ветра и внутримесячной дисперсии суточных значений скорости ветра для зональной и меридиональной циркуляций. Были рассчитаны параметры эффективности (K'_U и K'_V) волновых возмущений с масштабами 1–24 ч (внутренние гравитационные волны (ВГВ) и приливы), которые оценивались на основе отношения внутрисуточной дисперсии среднечасовых значений скорости ветра к сумме квадрата скорости ветра и внутрисуточной дисперсии среднечасовых значений скорости ветра [14].

Установленные в интервале высот 0–100 км особенности высотной структуры среднегодовых значений параметров динамической эффективности волновых потоков в поле зональной и меридиональной циркуляций, а также амплитуд и фаз их годовых и полугодовых колебаний соответствуют высотам смены режимов зональной циркуляции.

Получено, что динамическая эффективность волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливных волн на высотах 80–110 км примерно в 20 раз выше, чем динамическая эффективность интенсивности волновых движений с масштабами планетарных волн.

На основе сравнения высотных зависимостей амплитуд годовых и полугодовых колебаний фоновой циркуляции и интенсивности волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливов получено новое экспериментальное подтверждение того, что преобладающие движения являются энергетически тесно связанными с волновыми возмущениями с масштабами 1–24 ч, диссипация ВГВ приводит к торможению преобладающего зонального ветра.

Установлено, что для среднеширотной атмосферы в интервале высот 0–55 и 80–87 км наблюдается превышение амплитуд годовых колебаний зонального ветра над полугодовыми, что обусловлено преобладанием на этих высотах радиационных энергетических источников атмосферной циркуляции. В то же время для высотного интервала 87–110 км характерно превышение амплитуд полугодовых колебаний зонального ветра над годовыми, так как на этих высотах значительную роль играют вихревые процессы, связанные с взаимодействиями волновых возмущений, как между собой, так и с фоновым потоком.

Спектральный анализ по длительному ряду измерений 1980–2003 гг. для региона Казани показал 11-летнюю периодичность во временных рядах среднегодовых значений (A_0), амплитуд годовых (A_1) и полугодовых (A_2) колебаний зонального ветра, усредненного в высотном интервале 80–110 км.

Рассчитанные спектральные плотности мощности (СПМ) вариаций параметров A_0 , A_1 и A_2 для Казани представлены на рис. 6. На рисунках видны периодичности, близкие к 11 годам.

Анализируемые в работе вариации динамических параметров атмосферы (скоростей зонального U и меридионального V ветров, а также интенсивности вихревых движений) представлялись в виде суммы среднегодовых значений, годовой и полугодовой периодичностей:

$$P = P_0 + P_1 \cos\left(\frac{2\pi(t - t_{01})}{365}\right) + P_2 \cos\left(\frac{2\pi(t - t_{02})}{182.5}\right),$$

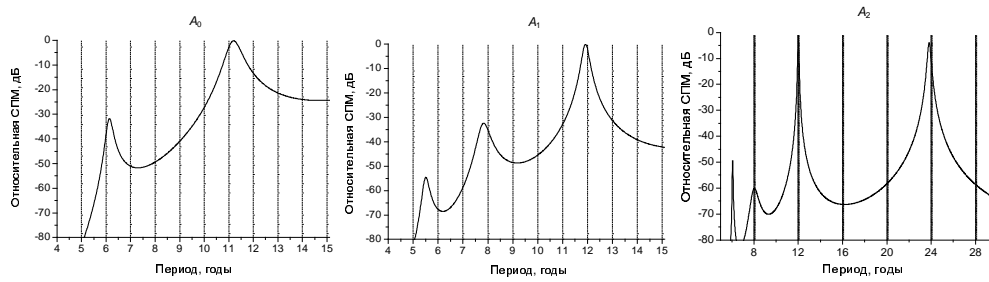


Рис. 6. Спектральные плотности мощностей временных вариаций среднегодовых значений A_0 , амплитуд годовых A_1 и полугодовых A_2 колебаний усредненных в высотном интервале 80–110 км скоростей зонального ветра для региона Казани

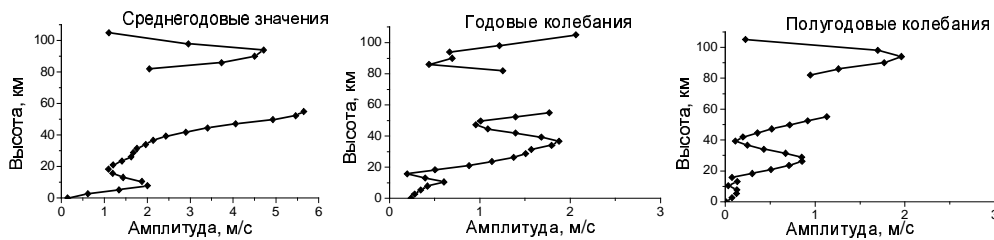


Рис. 7. Высотные профили амплитуд 11-летних периодичностей временных вариаций среднегодовых значений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний зонального ветра (1986–2002 гг. в высотном интервале 80–110 км; 1992–2003 гг. на высотах 0–55 км)

где P – изучаемый динамический параметр; P_0 , P_1 и P_2 – среднегодовое значение, амплитуды годовых и полугодовых колебаний соответственно, t_{01} , t_{02} – времена максимума годовых и полугодовых колебаний, t – время (в сутках).

На рис. 7 представлены результаты рассчитанных значений 11-летних периодичностей в межгодовых вариациях среднегодовых значений, а также в вариациях амплитуд годовых и полугодовых колебаний зонального ветра за период 1986–2002 гг. в высотном интервале 80–110 км и за период 1992–2003 гг. в интервале 0–55 км. На рисунке четко проявляется изменчивость 11-летних периодичностей в интервале 0–100 км, а также в зависимости от анализируемого динамического процесса: среднегодовые значения, амплитуды годовых и полугодовых колебаний ветра. Замечена тенденция роста амплитуд годовых и полугодовых колебаний на высотах около 100 км. Для среднегодовых значений максимумы наблюдаются на высотах около 55 и 90 км.

Проведенные исследования позволили установить механизмы волнового взаимодействия различных слоев нижней, средней атмосферы, динамическую эффективность волновых возмущений с масштабами ВГВ, приливных и планетарных волн. Представленные результаты опубликованы в [15–19].

3. Взаимодействие волн с зональным потоком

Проведено исследование взаимодействия планетарных волн с зональным потоком с использованием концепции потока Элиассена–Пальма [20]. Проведенные ранее коллективом исследования по данным архива MetOffice Stratospheric Assimilated Data за период 1994–2006 гг. в слое 0–55 км [21] выявили наличие в стратосфере внетропических широт трех областей дивергенции потока Элиассена–Пальма (рис. 8), что говорит о существовании здесь источника стратосферных

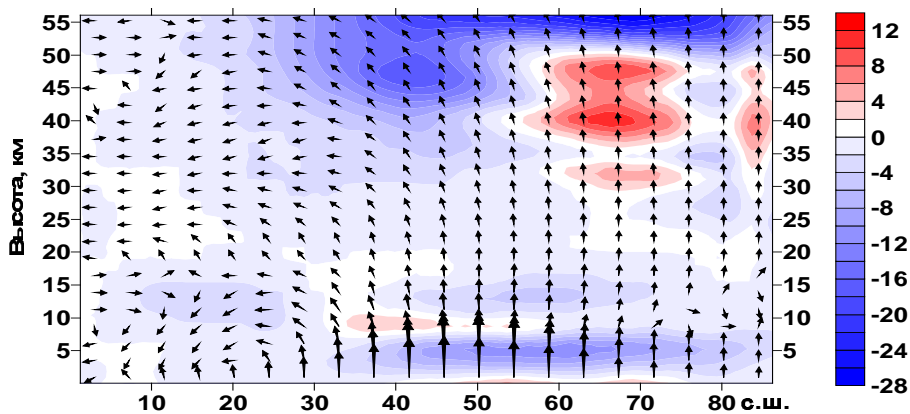


Рис. 8. Вектор Элиассена–Пальма и его дивергенция ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) для января 1994–2006 гг.)

планетарных волн [22]. Очаги положительной дивергенции расположены на высоте около 30, 40 и 48 км. При этом верхний очаг (наиболее интенсивный), располагается на верхней границе области наблюдений. В связи с этим в 2006 г. проведено дальнейшее исследование вихревого форсинга зонального потока с использованием архива MetOffice Stratospheric Assimilated Data за период 2003–2006 гг. в слое 0–63 км. По трем зимним сезонам установлено, что область интенсивного положительного вынуждения западного потока в верхней стратосфере внетропических широт сменяется отрицательным вынуждением в нижней мезосфере выше 60 км.

Для объяснения наблюдаемой высотно-широтной структуры выдвинута гипотеза о высотной изменчивости нелинейных взаимодействий планетарных волн на высотах стратосферы в интервале широт, для которого характерно вертикальное распространение планетарных волн с тропосферных уровней. Суть гипотезы заключается в следующем. На основе биспектрального анализа длительных временных рядов (6 месяцев холодного периода) обнаружено нелинейное взаимодействие волновых возмущений с временными масштабами планетарных волн и колебаниями с периодами 30–90 сут, присутствующими в тропо-стратосфере. Оно приводит к усилению интенсивности планетарных волн и увеличению эффектов их взаимодействия как между собой, так и с фоновым потоком. В конечном итоге процессы нелинейных взаимодействий играют роль возможных источников энергии планетарных волн, поступающей от крупномасштабных движений.

4. Межполушарные взаимодействия

Исследование межполушарных взаимодействий выполнено в работе [23] с использованием нестационарной полуэмпирической модели атмосферных термических приливов (АТП) [24].

Численные эксперименты с использованием разработанной полуэмпирической модели АТП показали, что полусуточные приливные возмущения (ПВ), генерируемые антарктической озоновой аномалией (АОА), распространяясь в горизонтально-вертикальном направлении от АОА, достигают среднеширотной и полярной нижней термосферы Северного полушария и из-за наличия турбулентной и молекулярной вязкости диссипируют на этих высотах. На этих же высотах ПВ из-за взаимодействия с фоновыми движениями теряют энергию и импульс. Как результат, ПВ, генерируемые АОА, непосредственно воздействуют на фоновую циркуляцию и фоновую температуру нижней термосферы Северного полушария.

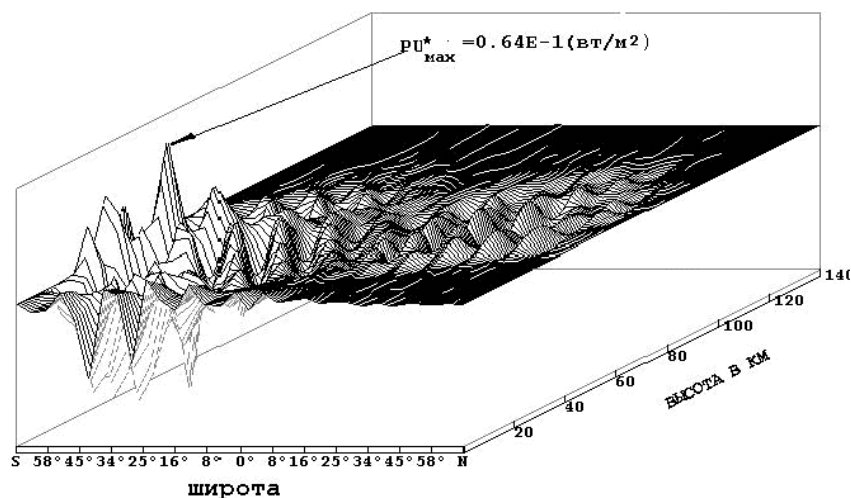


Рис. 9. Широтно-высотный рельеф меридионального потока энергии PU^* , переносимый полусуточными ПВ, генерируемыми АОА

На рис. 9 в качестве примера приведен полученный в численных экспериментах широтно-высотный рельеф меридионального потока энергии PU^* (U^* – комплексно сопряженное значение меридиональной компоненты скорости ПВ), которую переносят полусуточные ПВ, генерируемые АОА.

Как видно из рис. 9, полусуточные ПВ распространяются в меридиональном направлении (с юга на север) под углом $1-2^\circ$ к горизонту и достигают среднеширотной и полярной нижней термосферы Северного полушария. Критическими широтами для них являются лишь полярные широты ($\theta = 0; 180^\circ$), поэтому происходит распространение приливных волн в мезосфере и нижней термосфере Северного полушария и обмен энергией и импульсом с фоновыми движениями, существующими на этих высотах.

При некоторых сценариях рассчитанные поправки к фоновой температуре в полярной нижней термосфере Северного полушария за счет диссипации и долготной дивергенции потоков энергии и импульса полусуточных ПВ, генерируемых антарктическим стратосферным озоном, достигают значений $5-10^\circ\text{C}$.

5. Геомагнитные возмущения в мезосфере – нижней термосфере

Проведено исследование реакции ветра нейтральной атмосферы в высотном диапазоне 80–110 км, полученного радиометеорным методом в Казани (56N, 49E), на геомагнитные возмущения, вызванные прохождением Земли через границы секторов межпланетного магнитного поля (ММП).

В связи с выраженными годовыми и полугодовыми вариациями динамических процессов и их высотной изменчивостью проведено исследование геомагнитных эффектов в зависимости от высоты и сезона. Обнаружены следующие основные закономерности влияния смены полярности ММП на динамику верхней мезосферы – нижней термосферы (рис. 10): прохождение Земли через границы секторов ММП сопровождается возмущением геомагнитного поля и ростом значений Кр-индекса (планетарного индекса геомагнитной активности); наиболее выраженное влияние смены полярности ММП на величину нейтрального ветра наблюдается в верхней мезосфере – нижней термосфере для зональной составляющей ветра зимой, для меридиональной – летом; обнаружена высотная зависимость влияния смены

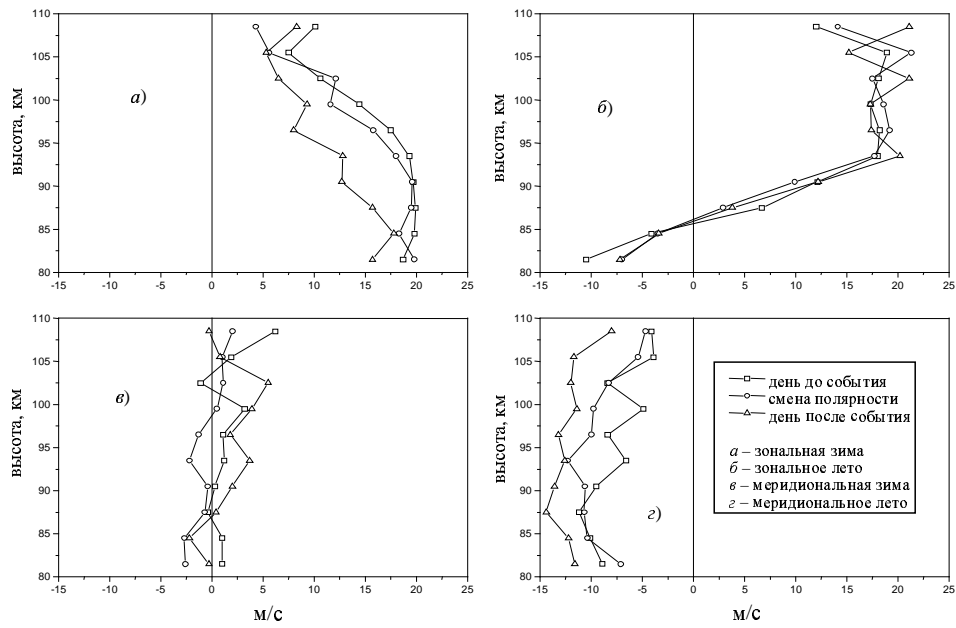


Рис. 10. Влияние смены полярности ММП на динамику верхней мезосферы – нижней термосферы

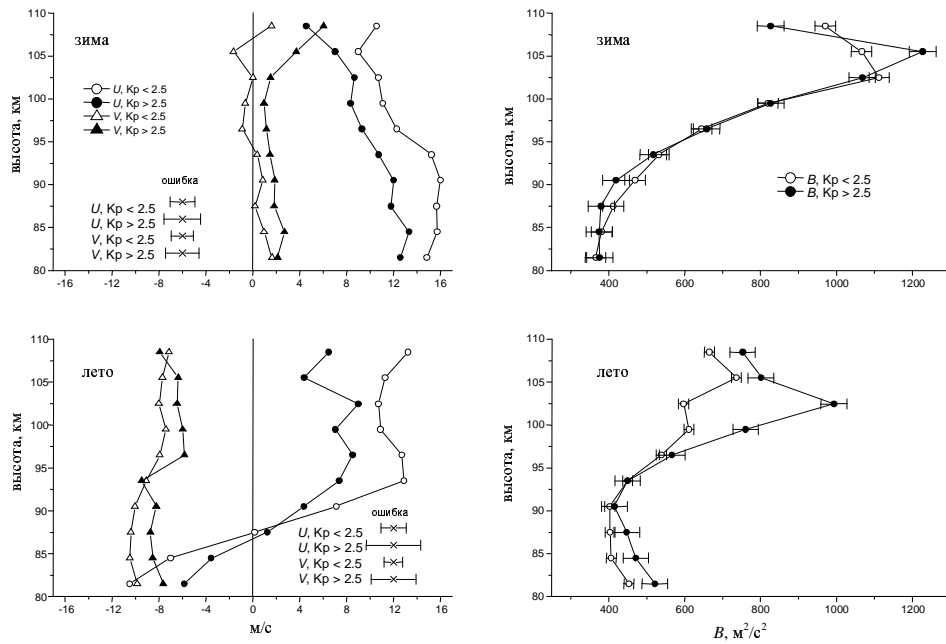


Рис. 11. Влияние индекса геомагнитной активности на зональный (U), меридиональный (V) ветра и интенсивность мезомасштабной турбулентности (B)

полярности ММП на параметры нейтрального ветра в области высот верхней мезосферы – нижней термосферы, степень и характер которой зависят от исследуемого процесса и сезона наблюдения.

Проведенные исследования влияния геомагнитных возмущений на динамические параметры [25] показали следующее. Для зонального преобладающего ветра в летний и зимний периоды наблюдается его ослабление при усилении уровня геомагнитной возмущенности во всем высотном интервале; для меридиональной компоненты во всем высотном интервале замечено появление составляющей, направленной на север (рис. 11); при возмущенных геомагнитных условиях обнаружен поворот вектора преобладающего ветра против часовой стрелки в осенне-зимний период; летом обнаружен поворот вектора преобладающего ветра по часовой стрелке при возмущенных геомагнитных условиях в интервале высот 90–110 км и против часовой стрелки в интервале высот 80–90 км. Для амплитуды и фазы суточного и полусуточного приливов отклик на геомагнитные возмущения менее выражен, чем для преобладающего ветра. Влияние уровня геомагнитной активности на мезомасштабную турбулентность наиболее выражено летом в интервале высот выше 95 км, когда для возмущенных условий наблюдается двукратное усиление интенсивности турбулентности на высотах 100–105 км (рис. 11).

Для учета влияния вариаций солнечной и геомагнитной активностей на параметры нейтрального ветра, которые могут привести к изменению условия образования Es-слоев, проведено совместное рассмотрение влияния вариаций солнечной и геомагнитной активностей как на динамические параметры нейтральной атмосферы, так и на параметры Es-слоев. Показано, что отрицательная корреляция вероятности появления интенсивных Es-слоев с циклом солнечной активности является результатом опосредованного воздействия уровня солнечной активности через параметры нейтрального ветра [26, 27].

Обнаружено влияние интенсивности мезомасштабной турбулентности на Es-слой. При высоком уровне турбулентности Es-слои отсутствовали, тогда как при ослаблении интенсивности турбулентности выявлена тенденция к появлению интенсивных Es-слоев [28].

Результаты координированных исследований показали, что нижняя и средняя атмосфера представляет собой сложную термодинамическую систему с волновыми механизмами взаимосвязи различных высотных слоев, а также межполушарных взаимодействий. Установлены солнечные и геомагнитные факторы, степень влияния которых зависит от природы динамических процессов сезона и высоты атмосферных слоев. Установленные высотно-сезонные закономерности по измерениям на международной сети станций позволили обнаружить долготные различия. На сегодняшний день полуэмпирическая модель зональной и меридиональной циркуляций в интервале высот 0–100 км разработана лишь в среднезональном приближении. Тем не менее данная модель важна для развития международных справочных моделей CIRA, MSIS и численной гидродинамической модели циркуляции и температуры средней атмосферы, а также при разработке прогноза распространения радиоволн в нейтральной и заряженной атмосфере.

Summary

A.N. Fakhrutdinova, A.M. Stepanov, V.V. Guryanov, A.A. Gavrilov, D.V. Korotyshkin, S.V. Maksyutin, D.V. Mamedov, K.A. Magdeev, D.V. Fedorov, I.D. Akhmetgaleev. High-Altitude Wave and Interhemispheric Interactions in the Earth's Lower and Middle Atmospheres with Account of Solar and Geomagnetic Factors.

This work investigates the dynamic regime of the neutral atmosphere for the range of heights of 0–100 km. The analysis was accomplished by the radio meteor method in Kazan University for the height region from 80 to 100 km. For the heights of 0–57 km, the measurements were carried out using the archive data of BADC (UKMO). We considered the dynamic efficiency of wave perturbations with time scales of inner gravity waves, tides,

and planetary waves, as well as interhemispheric interactions. The influence of solar and geomagnetic activity on the dynamic parameters of the atmosphere and on the Es layers was also studied.

Key words: dynamic regime, dynamic parameters, neutral atmosphere, lower and middle atmospheres, wave perturbations, inner gravity waves, tides, planetary waves, interhemispheric interactions, solar and geomagnetic activity.

Литература

1. *Фахрутдинова А.Н.* Циркуляция мезосферы – нижней термосферы средних широт. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – 167 с.
2. *Фахрутдинова А.Н., Коротышкин Д.В.* Радиометеорные измерения скорости ветра на метеорном радаре Казанского университета // Материалы 21 Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн», 25–27 мая 2005 г. – Йошкар-Ола, 2005. – С. 251–256.
3. *Белькович О.И., Карпов А.В., Насыров А.М., Сидоров В.В., Тептин Г.М., Фахрутдинова А.Н., Шерстюков О.Н.* Радиофизические исследования околоземного космического пространства в Казанском университете // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2005. – Т. 147, кн. 2. – С. 173–185.
4. *Фахрутдинова А.Н.* Развитие радиометеорных средств в целях проведения геофизических исследований в мезосфере – нижней термосфере над регионом восточной Европы // Всеукр. межведом. науч.-техн. сб. «Радиотехника». – Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники, 2010. – Вып. 160. – С. 253–257.
5. *Pancheva D., Mitchell N.J., Hagan M.E., Manson A.H., Meek C.E., Luo Yi., Jacobi Ch., Kürschner D., Clark R.R., Hocking W.K., MacDougall J., Jones G.O., Vincent R.A., Reid I.M., Singer W., Igarashi K., Fraser G.I., Nakamura T., Tsuda T., Portnyagin Yu., Merzlyakov E., Fahrutdinova A.N., Stepanov A.M., Poole L.M., Malinga S.B., Kashcheyev B.L., Oleynikov A.N., Riggин D.M.* Global-scale tidal structure in the mesosphere and lower thermosphere during the PSMOS campaign of June–August 1999 and comparison with the Global Scale Wave Model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2002. – V. 64. – P. 1011–1035.
6. *Portnyagin Yu., Solovjova T., Merzlyakov E., Forbes J., Palo S., Ortland D., Hocking W., MacDougall J., Thayaparan T., Manson A., Meek C., Hoffmann P., Singer W., Mitchell N., Pancheva D., Igarashi K., Murayama Y., Jacobi Ch., Kuerschner D., Fahrutdinova A., Korotyshkin D., Clark R., Taylor M., Franke S., Fritts D., Tsuda T., Nakamura T., Gurubaran S., Rajaram R., Vincent R., Kovalam S., Batista P., Poole G., Malinga S., Fraser G., Murphy D., Riggин D., Aso T., Tsutsumi M.* Mesosphere/lower thermosphere prevailing wind model // Adv. Space Res. – 2004. – V. 34. – P. 1755–1762.
7. *Jacobi Ch., Fröhlich K., Portnyagin Y., Merzlyakov E., Solovjova T., Makarov N., Rees D., Fahrutdinova A., Guryanov V., Fedorov D., Korotyshkin D., Forbes J., Pogoreltsev A., Kürschner D.* Semi-empirical model of middle atmosphere wind from the ground to the lower thermosphere // Adv. Space Res. – 2009. – V. 43, No 2. – P. 239–246.
8. *Fahrutdinova A.N., Korotyshkin D.V., Guryanov V.V.* Altitudinal structure of annual and interannual variations of parameters of the lower and middle atmosphere over Kazan (56N, 49E) during the solar activity maximum phase (1998–2002 year) // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. – 2002. – V. 8, No 2. – P. 29–36.
9. *Коротышкин Д.В.* Климатическая спектральная модель волновой активности с временными масштабами планетарных волн среднеширотной мезосферы – нижней термосферы: Автореф. дис. ... канд. физ.-матем. наук. – Казань, 2005. – 18 с.
10. *Фахрутдинова А.Н.* Волновая структура циркуляции нижней и средней атмосферы Земли. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2006. – 180 с.

11. *Merzlyakov E.G., Portnyagin Yu.I., Jacobi C., Mitchell N.J., Muller H.G., Manson A.H., Fachrutdinova A.N., Singer W., Hoffmann P.* On the longitudinal structure of the transient day-to-day variation of the semidiurnal tide in the mid-latitude lower thermosphere – I. Winter season // *Ann. Geophys.* – 2001. – V. 19, No 5. – P. 545–562.
12. *Fahrutdinova A.N., Guryanov V.V., Korotyshkin D.V., Manson A.H., Meek C.E., Jacobi Ch., Kurschner D.* Longitudinal variability of the zonal and meridional circulation and the intensity of planetary waves in the lower and the middle atmospheres // *Adv. Space Res.* – 2003. – V. 32, No 9. – P. 1759–1764.
13. *Fahrutdinova A.N., Guryanov V.V., Korotyshkin D.V., Manson A.H., Meek C.E., Jacobi Ch., Kurschner D.* Planetary waves activity and rotational effects in the mid-latitudes of the lower and middle atmosphere (0–100 km) // *Adv. Space Res.* – 2003. – V. 32, No 5. – P. 869–784.
14. *Елькин А.Ю.* Высотно-сезонная структура циркуляции среднеширотной средней атмосферы и влияние солнечной активности на ее межгодовую изменчивость: Автореф. дис. ... канд. физ.-матем. наук. – Казань, 2006. – 18 с.
15. *Fahrutdinova A.N., Perevedencev Yu.P., Guryanov V.V., Kulikov V.V.* Dynamical processes and correlations at midlatitudes in the lower and middle atmosphere // *Adv. Space Res.* – 2001. – V. 27, No 10. – P. 1667–1672.
16. *Fahrutdinova A.N., Guryanov V.V., Korotyshkin D.V.* Rotational spectra and wavelet analysis in the investigation of wave activity of vectorial wave fields in the earth atmosphere // *Georesources.* – 2001. – No 2 (5). – P. 10–13.
17. *Fahrutdinova A.N., Elkin A., Guryanov V.* Height variability of solar effects on dynamical processes of middle atmosphere // *Adv. Space Res.* – 2005. – V. 37, No 8. – P. 1589–1596.
18. *Fahrutdinova A.N., Gur'yanov V.V., El'kin A.Yu.* Height-Season Structure of the Available Potential Energy and Kinetic Energy in the Lower and Middle Atmosphere // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* – 2006. – V. 42, No 1. – P. 60–67.
19. *Фахрутдинова А.Н., Гурьянов В.В., Елькин А.Ю.* Высотно-временная структура доступной потенциальной и кинетической энергии в нижней и средней атмосфере // *Изв. РАН. Сер.: Физика атмосферы и океана.* – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 64–72.
20. *Eliassen A., Palm E.* On the transfer of energy in stationary mountain waves // *Geophys. Publ.* – 1961. – V. 22, No 3. – P. 1–23.
21. *Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N.* Height and time variability of planetary wave activity // *Adv. Space Res.* – 2009. – V. 43, No 3. – P. 401–412.
22. *Hartmann D.L., Mechoso C.R., Yamasaki K.* Observations of wave-mean flow interaction in the Southern Hemisphere // *J. Atmos. Sci.* – 1984. – V. 41, No 3. – P. 351–362.
23. *Капица А.П., Гаврилов А.А.* Оценка и прогноз дальнего волнового воздействия озона и водяного пара атмосферы Антарктиды на циркуляцию и температуру нижней термосферы над регионами России // *Докл. РАН.* – 2010. – Т. 434, № 1. – С. 112–116.
24. *Гаврилов А.А., Кайдалов О.В.* Численная модель приливов на высотах 70–100 км и ее сравнение с экспериментальными данными // *Геомагн. аэроном.* – 1990. – Т. 30, № 3. – С. 474–481.
25. *Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Maksyutin S.V.* The geomagnetic activity influence on the dynamics of the upper mesosphere and lower thermosphere // *Int. J. Geomagn. Aeron.* – 2001. – V. 2, No 3. – P. 201–208.
26. *Maksyutin S.V., Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N.* Es layer and dynamics of neutral atmosphere during the periods of geomagnetic disturbances // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2001. – V. 63, No 5. – P. 545–549.

27. *Максютин С.В.* Вариации параметров слоя Es и мезотермосферного ветра в зависимости от гео-гелиоактивности: Автореф. дис. ... канд. физ.-матем. наук. – Казань, 2004. – 18 с.
28. *Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Yasnitsky D.S.* The influence of the irregular movements in the lower thermosphere on the ionospheric Es-layer by radiometeor observations in Kazan (56N, 49E) // *Phys. Chem. Earth.* – 2001. – V. 26, No 6. – P. 445–448.

Поступила в редакцию
29.12.10

Фахрутдинова Антонина Николаевна – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *Antonina.Fahrutdinova@ksu.ru*

Степанов Анатолий Михайлович – научный сотрудник кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *anmistep@mail.ru*

Гурьянов Владимир Владимирович – кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *Vladimir.Guryanov@ksu.ru*

Гаврилов Анатолий Александрович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры рационального природопользования географического факультета Московского государственного университета.

E-mail: *a_a_gavrilov@mail.ru*

Коротышкин Дмитрий Викторович – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *dmitry.korotyshkin@ksu.ru*

Максютин Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *sergey.maksyutin@gmail.com*

Мамедов Денис Владимирович – инженер-программист ICL КПО ВС, г. Казань.

E-mail: *Denis.Mamedov@ts.fujitsu.com*

Магдеев Константин Альбертович – аспирант кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *mrmmrmmrm@mail.ru*

Федоров Дмитрий Викторович – младший научный сотрудник кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *dmitr.fedorov@gmail.com*

Ахметгалеев Ильнур Данилович – аспирант кафедры радиофизики Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *lucky-ilnur@mail.ru*