

**Труды Военно-космической
академии имени А.Ф. Можайского**
Научное рецензируемое издание
Выходит с 1942 года

Выпуск 674
Проблемы
военно-прикладной
геофизики и контроля
состояния природной
среды
2020 г.

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение
высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»
Министерства обороны Российской Федерации

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского
доктор техн. наук, профессор М.М. Пеньков

Члены редакционного совета:

С.В. Буг – заместитель начальника Михайловской военной артиллерийской академии
по учебной и научной работе *доктор пед. наук, проф.*;

В.П. Гаенко – главный научный сотрудник НИЦ БТС 12 ЦНИИ МО РФ
доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации;

А.М. Гончаров – начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности
и технологического сопровождения передовых технологий
(инновационных исследований) МО РФ *доктор воен. наук, проф.*;

М.А. Еремеев – профессор кафедры института комплексной безопасности и специального приборостроения
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» *доктор техн. наук, проф.*;

А.В. Кузичкин – заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт
телевидения» по информационным технологиям *доктор техн. наук, проф.*;

А.В. Сержантов – заместитель начальника Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил
Российской Федерации по научной работе *доктор воен. наук, проф.*;

Б.В. Соколов – главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации;*

К.Г. Ставров – главный научный сотрудник научно-исследовательского океанографического центра
Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института
доктор техн. наук, проф.

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. Ю.В. Кулешов

Составители:

Г.Г. Шукин, доктор физико-матем. наук, проф.;

И.А. Готюр, доктор техн. наук, доц.

Редколлегия:

председатель **Ю.В. Кулешов**, *доктор техн. наук, проф.*;

зам. председателя **И.В. Сахно**, *доктор техн. наук, проф.*;

ответственный секретарь **А.Л. Федер**, *доктор воен. наук, доц.*;

Н.Ф. Аверкиев, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Ф. Алексеев**, *доктор техн. наук, проф.*;

Т.В. Алексеев, *доктор истор. наук, доц.*; **А.П. Алёшкин**, *доктор техн. наук, проф.*;

В.Н. Арсеньев, *доктор техн. наук, проф.*; **Д.Н. Бирюков**, *доктор техн. наук, доц.*;

И.А. Готюр, *доктор техн. наук, доц.*; **А.П. Доронин**, *доктор техн. наук, проф.*;

И.Ю. Еремеев, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Замарин**, *доктор техн. наук, проф.*;

В.Н. Калинин, *доктор техн. наук, проф.*; **Б.Д. Казахов**, *доктор воен. наук, проф.*;

В.В. Клейменов, *доктор техн. наук, проф.*; **В.В. Козлов**, *доктор техн. наук, проф.*;

Н.С. Кужекин, *кандидат филос. наук, проф.*; **В.Н. Кузьмин**, *доктор воен. наук, проф.*;

Н.Б. Кунгурова, *доктор пед. наук, доц.*; **Е.Л. Лебедев**, *доктор техн. наук, проф.*;

А.Г. Ломако, *доктор техн. наук, проф.*; **А.И. Лоскутов**, *доктор техн. наук, проф.*;

Г.Н. Мальцев, *доктор техн. наук, проф.*; **Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук;*

А.Н. Павлов, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Паршуткин**, *доктор техн. наук, проф.*;

Н.А. Репях, *кандидат филос. наук, доц.*; **А.М. Сычева**, *доктор техн. наук, проф.*;

И.В. Фоминов, *доктор техн. наук;* **А.В. Харченко**, *доктор техн. наук, доц.*;

К.Ю. Цветков, *доктор техн. наук, проф.*; **А.В. Чарушников**, *доктор воен. наук, проф.*

Издание зарегистрировано
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.

Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).
Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

***Издание подготовлено по материалам VI Всероссийской научной
конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля
состояния природной среды» при финансовой поддержке Российского
фонда фундаментальных исследований, проект № 20-05-20016\20***

Ответственный за выпуск:

начальник РИО **С.В. Чернышев**

Выпускающий редактор: *А.В. Головина*

Технический редактор

и компьютерная верстка: *О.В. Филиппова*

Техническая поддержка:

В.В. Семёнов

Адрес:

197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;

тел.: 8 (812) 347-97-69;

<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 14.07.2020.

Формат печатного листа 445×300/4.

Уч.-печ. л. 78,00. Уч.-изд. л. 38,75

Тираж 120 экз. Заказ 0000.

Отпечатано в типографии «Пальмира»

197374, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 89, лит. А, пом. 9.

К.А. Диденко*· **;

А.И. Погорельцев*· **,

доктор физико-математических наук, профессор

* Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург.

** Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ МОДЕЛИ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Показан метод исследования взаимодействий стационарных планетарных волн между собой и со средним потоком, основанный на анализе вклада слагаемых в уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии (квадрат потенциального вихря Эртеля). Используя данные модели средней и верхней атмосферы (МСВА), эти слагаемые были рассчитаны для зимы, когда наблюдалось/моделировалось сильное внезапное стратосферное потепление (ВСП). Результаты представлены в виде широтно-высотных распределений и показано усиление нелинейных взаимодействий в верхней стратосфере, как до наступления потепления, так и во время его развития.

Ключевые слова: стационарная планетарная волна, средний поток, энтропия, завихренность, внезапное стратосферное потепление.

ВВЕДЕНИЕ

С помощью уравнения возмущенной потенциальной энтропии можно проанализировать влияние волн на зональную циркуляцию, а также взаимодействие волн между собой. Уравнение баланса в лог-изобарической системе координат в общем виде, с использованием потенциального вихря Эртеля P [1], будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{P'^2}/2) + \overline{P'(\vec{V}' \cdot \vec{\nabla} P')} + \overline{P'(\vec{V}' \cdot \vec{\nabla} \bar{P})} + \overline{P'(\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P')} = \overline{P'Q'}, \quad (1)$$

A B C D E

где \vec{V} – вектор скорости ветра;

Q – вклад неадиабатических притоков тепла и/или диссипативных слагаемых, которые не могут быть оценены из наблюдений.

Черта сверху в уравнении (1) означает зональное осреднение, а штрихи – возмущения, т.е. отклонения от зонально усредненных значений. Слагаемое А описывает меру изменчивости волновой активности во времени, В – взаимодействие стационарных планетарных волн (СПВ) между собой, С – взаимодействие СПВ со средним потоком, D – адвективный перенос потенциальной энтропии, E – диссипация, которая не может быть оценена из наблюдений [2–3].

Используя метод генерации вторичных волн [4–5], уравнение, аналогичное (1), можно получить для стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2). В этом случае вторичные СПВ1 генерируются в результате нелинейных взаимодействий СПВ1 – СПВ2 и СПВ2 – СПВ3, а вторичные СПВ2 при взаимодействии СПВ1 – СПВ3 и в случае самовзаимодействия СПВ1.

ШИРОТНО-ВЫСОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ, ПОСТРОЕННЫЕ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Так как во время внезапных стратосферных потеплений волновая активность усиливается, для расчетов слагаемых уравнения (1) использовались данные МСВА, когда моделировалось ВСП в январе [был получен ансамбль решений для условий Эль-Ниньо и выбран один из членов ансамбля] (рис. 1).

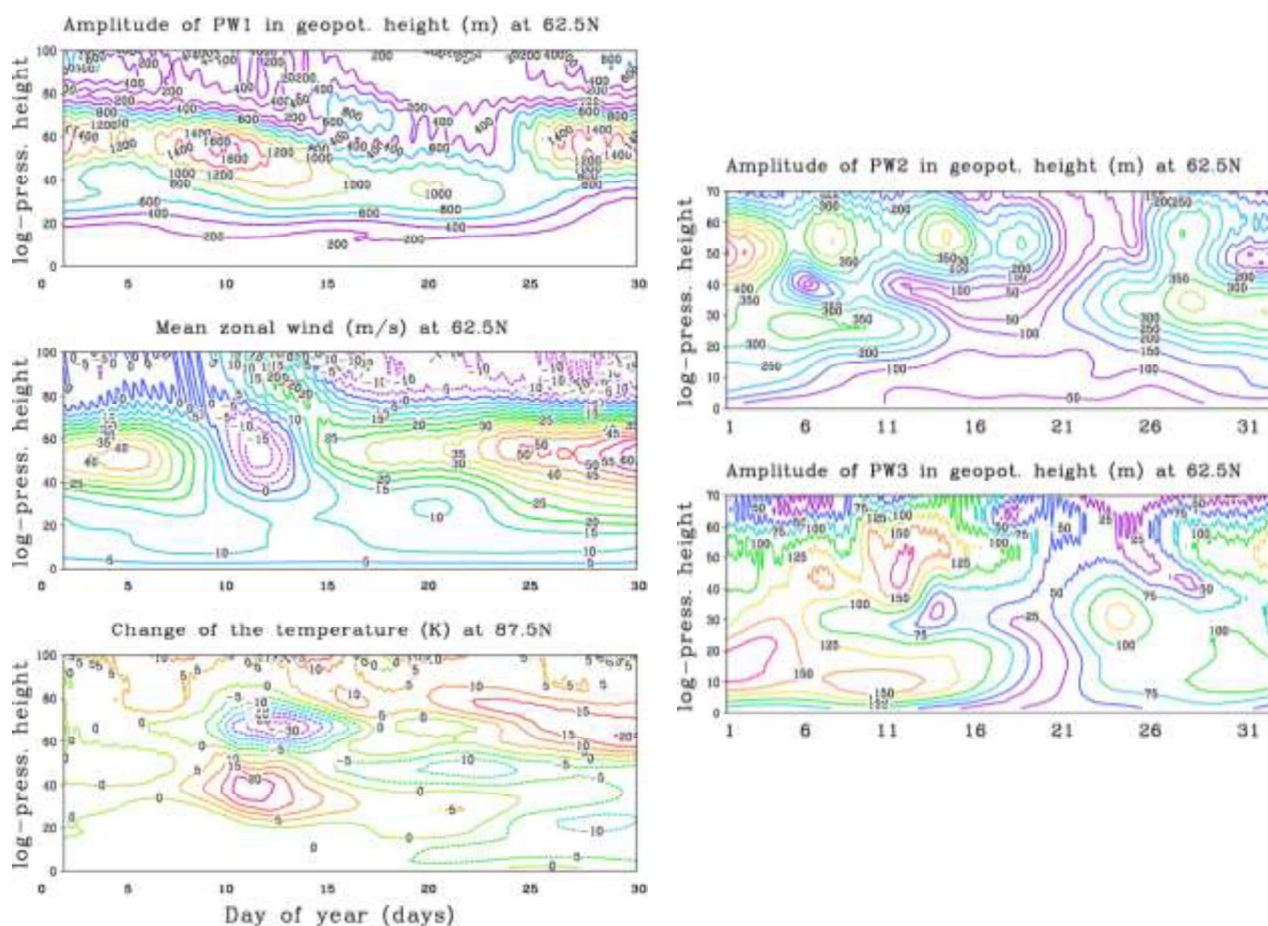


Рис. 1. Высотно-временное представление амплитуд зональных гармоник в геопотенциальной высоте (м) с волновым числом $m = 1$ (верхняя панель, слева), $m = 2$ (верхняя панель, справа) и $m = 3$ (нижняя панель, справа), распределение среднего зонального ветра (м/с) (средняя панель, слева) на $62,5^\circ$ с.ш. и изменения средней зональной температуры (К) на $87,5^\circ$ с.ш. (нижняя панель, слева)

Сильное увеличение амплитуд СПВ1 происходит 10 января, что сопровождается изменением среднего зонального потока в стратосфере. В результате несколько дней спустя наблюдается сильное внезапное стратосферное потепление. На рис. 1 также показано, что наступлению ВСП предшествует увеличение амплитуд не только СПВ1, но значительное увеличение амплитуд СПВ2 и СПВ3.

По данным МСВА слагаемые уравнения (1) были рассчитаны и усреднены за 5 дней, т.е. 1–5 января – дни до внезапного стратосферного потепления, происходит увеличение амплитуды СПВ1 (рис. 2 и 3); 6–10 января – амплитуда СПВ1 достигает максимального значения, увеличивается амплитуда СПВ2, начинается ВСП (рис. 4 и 5). Все результаты в единицах измерения $10^{12}(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3})^2\cdot\text{PVU}^2/\text{сут.}$, где $1\text{PVU} = 10^{-6}\text{К}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$.

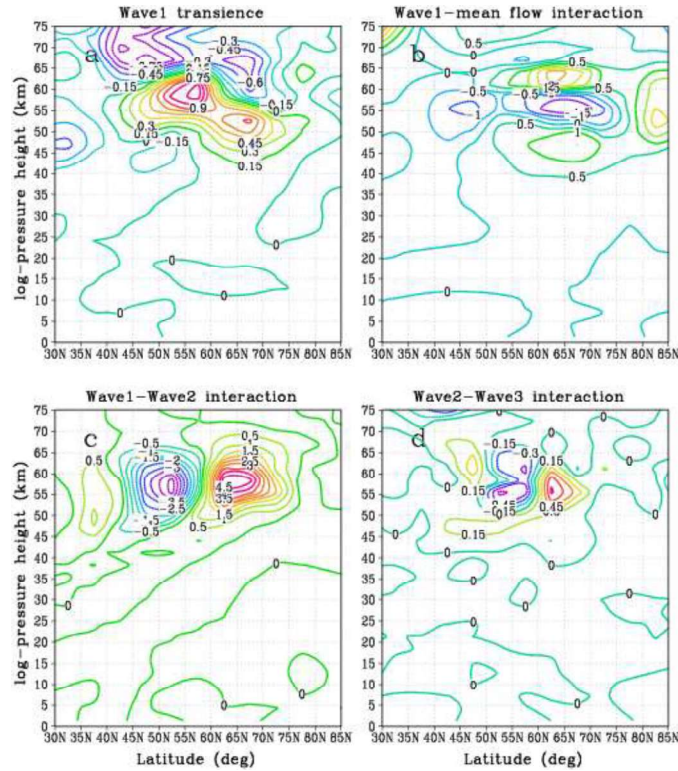


Рис. 2. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1, усредненные за 1–5 января: а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ1 – средний поток; с – взаимодействие СПВ1 – СПВ2; д – взаимодействие СПВ2 – СПВ3

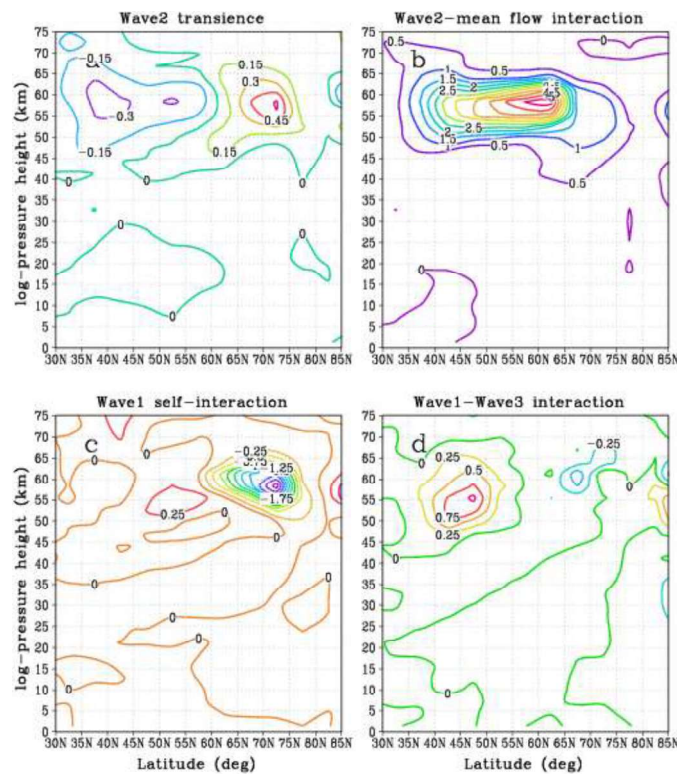


Рис. 3. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ2, усредненные за 1–5 января: а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ2 – средний поток; с – самовзаимодействие СПВ1; д – взаимодействие СПВ1 – СПВ3

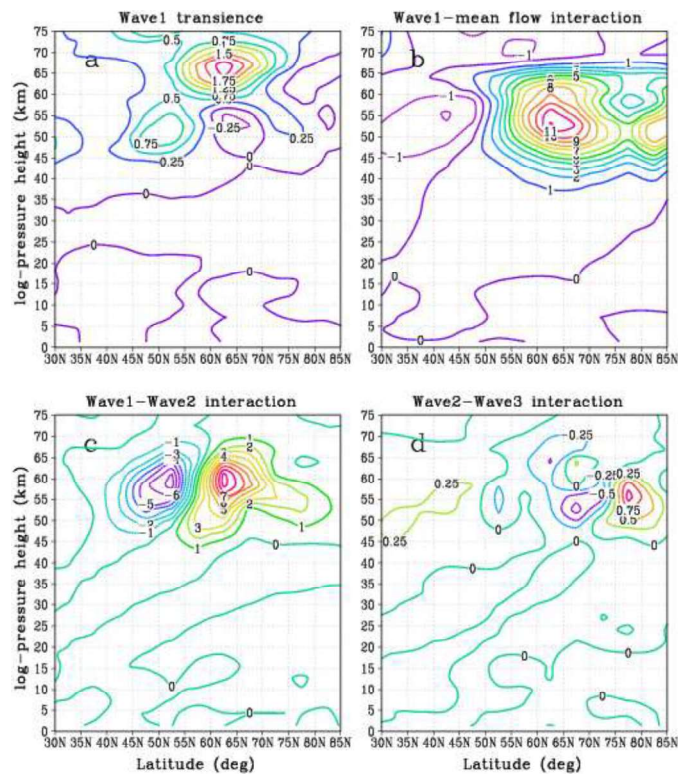


Рис. 4. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1, усредненные за 6–10 января: а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ1 – средний поток; с – взаимодействие СПВ1 – СПВ2; д – взаимодействие СПВ2 – СПВ3

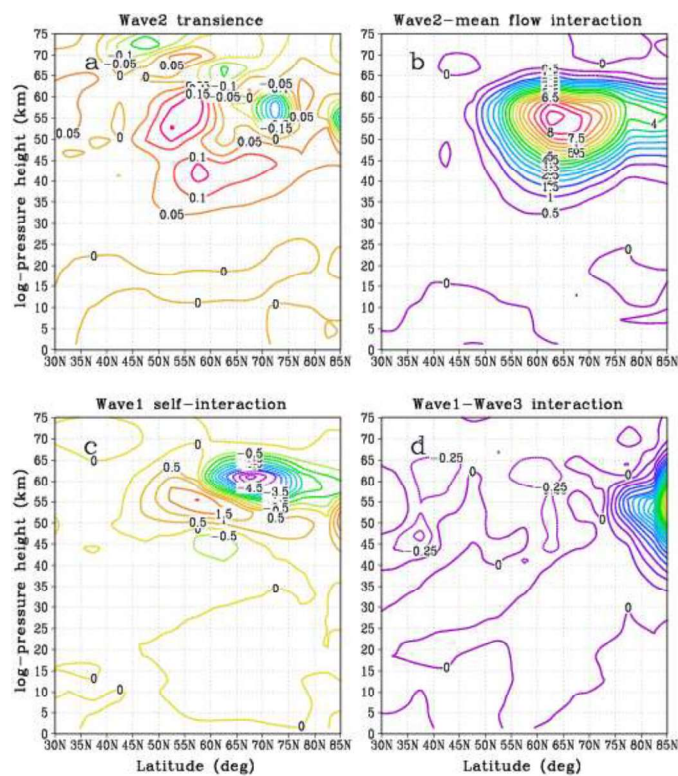


Рис. 5. Широтно-высотные распределения слагаемых возмущенной потенциальной энтропии для СПВ2, усредненные за 6–10 января: а – изменение волны во времени; б – взаимодействие СПВ2 – средний поток; с – самовзаимодействие СПВ1; д – взаимодействие СПВ1 – СПВ3

Результаты расчета показывают, что внезапное стратосферное потепление сопровождается значительным усилением взаимодействий по типу «волна – волна» и «волна – средний поток» в верхней стратосфере в средних и высоких широтах, а в случае взаимодействия между волнами и в низких. В течение рассматриваемых промежутков времени увеличение волновой активности СПВ1 сопровождается уменьшением СПВ2 и наоборот (см. рис. 2,а–5,а). Особое внимание стоит уделить взаимодействию волны со средним потоком (см. рис. 2,б–5,б). До момента наступления ВСП наблюдается значительное усиление взаимодействия СПВ2 со средним потоком в более низких и средних широтах. К моменту начала развития потепления наиболее сильное взаимодействие наблюдается между СПВ1 и средним потоком. Взаимодействие по типу «волна – волна» также увеличивается на протяжении развития ВСП, достигая своих максимумов в последние дни потепления. Усиление волнового взаимодействия при генерации СПВ1 наблюдается в пределах всех средних и высоких широт, а в случае СПВ2 взаимодействие сдвинуто в более высокие широты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проанализированы нелинейные взаимодействия во время ВСП с использованием уравнения возмущенной потенциальной энтропии. Были показаны вклады слагаемых, отвечающих за изменение волновой активности во времени, взаимодействия по типу «волна – волна» и «волна – средний поток» в баланс. Событие ВСП характеризуется усилением всех типов взаимодействий в стратосфере. Стоит отметить, что результаты расчета показывают существенный вклад в генерацию вторичных волн СПВ3, особенно во время развития ВСП. Подобный подход можно применять в исследовании волновых процессов различных типов и периодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-17-00198.

Список используемых источников

1. *Andrews D.G.* On the interpretation of the Eliassen-Palm flux divergence // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* – 1987. – № 113. – P. 323–338.
2. *Smith A.K.* Observation of wave-wave interactions in the stratosphere // *J. Atmos. Sci.* – 1983. – № 40. – P. 2484–2493.
3. *Smith A.K.* Wave-wave interaction in the stratosphere: observations during quiet and active wintertime period // *J. Atmos. Sci.* – 1984. – № 41. – P. 365.
4. *Spizzichino A.* Etude des interactions entre les differentes composantes du vent dans la haute atmosphere // *Ann. Geophys.* – 1969. – Vol. 25, № 4. – P. 773–783.
5. *Pogoreltsev A.I.* Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes // *Phys. Chem. Earth (Part C)*. – 2001. – Vol. 26, № 6. – P. 395–403.