

Семенов А.И., Шефов Н.Н.
Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы
им. А.М. Обухова РАН, Россия

УДК 551.511.8

ОРОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ОБТЕКАНИЕМ КАВКАЗСКОГО ХРЕБТА ВОЗДУШНЫМИ ПОТОКАМИ

ВВЕДЕНИЕ

При взаимодействии воздушного нестационарного потока земной атмосферы с препятствием возникают возмущения, которые являются источником различных волновых процессов. Первоначально при исследованиях этих явлений рассматривались стоячие волны, называемые орографическими волнами, возникающие в движущемся ветровом потоке. Они возникают над горными образованиями и регистрируются в подветренных областях. Эти процессы наблюдаются преимущественно в тропосфере. Однако кроме них в тропосфере и выше генерируется широкий спектр волн, которые распространяются через среднюю атмосферу и на высотах мезопаузы и нижней термосферы разрушаются. Энергия диссипирующих волн через инфракрасное излучение молекул CO_2 и O_3 удаляется из атмосферы. Это обеспечивает сток энергии из нижней атмосферы, который в свою очередь регулируется солнечной активностью [1] и влияет на климат. Это определяет важность изучения процессов возникновения волновых процессов в нижней атмосфере.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Для выявления свойств волновых возмущений в верхней атмосфере, возникающих над препятствиями рельефа, наиболее отчетливыми в этом смысле представляющие собой горные хребты, первоначально были предприняты самолетные измерения в районе Уральских гор (~ 64°N). Этот горный хребет высотой около 1000 м достаточно резко выделяется над окружающей равниной, как с западной, так и с восточной стороны. Для исследований использовались характеристики собственного ночного излучения верхней атмосферы, возникающие на различных высотах. Измерения температуры гидроксильного излучения мезопаузы (~ 87 км) позволили обнаружить ее увеличение примерно на 10 К в подветренной области гор, а также относительное увеличение интенсивности эмиссии атомарного кислорода 630 нм (~ 270 км) ~ 20 %, размер области возмущения составляет ~ 200 км [2-4].

Для детального изучения свойств волновых процессов, регистрируемых в подветренной области гор, с 1985 г. специальные регулярные измерения были начаты в Институте физики атмосферы АН СССР на высокогорной станции (43.7°N, 42.7°E, Z = 2070 м) вблизи г. Кисловодска. Для этой цели были разработаны и изготовлены два фотометра. Двухканальный сканирующий фотометр с интерференционными светофильтрами был предназначен для определения вращательной температуры полосы $\text{OH}(8-3) \lambda 727.3$ нм в одиннадцати дискретных направлениях в плоскости, перпендикулярной средней линии Кавказского хребта (рис. 1).

Выбранные зенитные углы обеспечивали распределение регистрируемых областей излучающего слоя гидроксильной эмиссии на расстояниях через каждые 50 км относительно направления в зенит. Место измерений находилось на расстоянии 50 км к северу от горы Эльбрус (5642 м) (рис.1). Цель измерений состояла в определении пространственного распределения изменений вращательной температуры поперек подветренной области хребта в зависимости от скорости и направления ветра над горным хребтом.

Второй фотометр имел восемь оптических каналов, предназначенных для исследования пространственных свойств характеристик внутренних гравитационных волн (ВГВ) в подветренной области на высотах слоя гидроксильного излучения (~ 87 км). Варианты использовавшейся пространственной структуры областей измерения на высоте 87 км показаны на рис.1.

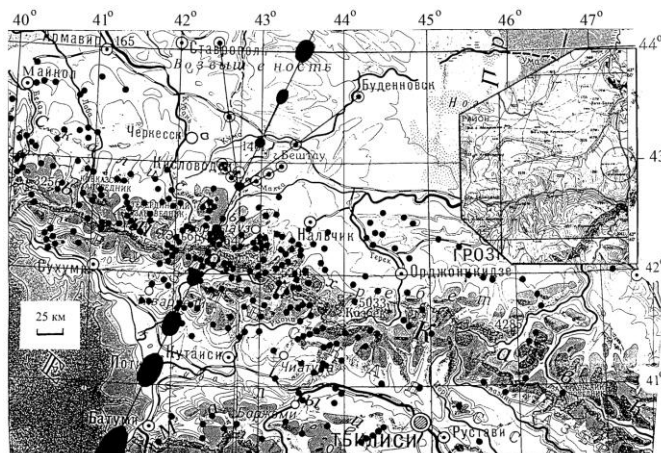


Рис.1. Пространственное распределение источников ВГВ над Кавказским хребтом (точки), полученное методом обратного лучевого трассирования на основе данных спектрального анализа временных рядов. Показаны пункт регистрации (КВНС), области излучающего слоя, визируемые двухканальным фотометром и варианты базы областей визирувания восьмиканального фотометра. На врезке – район расположения КВНС (внутри круга) [5].

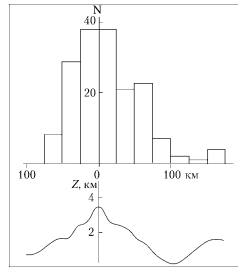


Рис.2. Сопоставление числа источников ВГВ над Кавказским хребтом и среднего профиля высоты хребта гор. Минимум соответствует Колхидской низменности [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Систематические измерения позволили получить материал, характеризующий процессы, происходящие в подветренной области мезопаузы. Средние за ночь вариации температуры ΔT_T вдоль вертикальной плоскости, перпендикулярной средней линии Кавказского хребта, выявили наличие максимума к северу от гор и уменьшение к югу и к северу от него (рис.3) [5, 6].

Сопоставление максимального значения ΔT_T со скоростью ветра в тропосфере на различных высотах в наветренной стороне гор (ст. Сухуми) показало, что максимальный коэффициент корреляции соответствует изобарической высоте 600 мбар, ~ 4 км (рис. 4).

Поскольку колебательная температура гидроксильного излучения, характеризующая распределение населенностей колебательных уровней молекул OH, отображает процесс колебательной релаксации, зависящий от плотности атмосферы и, следовательно, от высоты излучающего слоя, были проведены специальные одновременные измерения распределений поперек

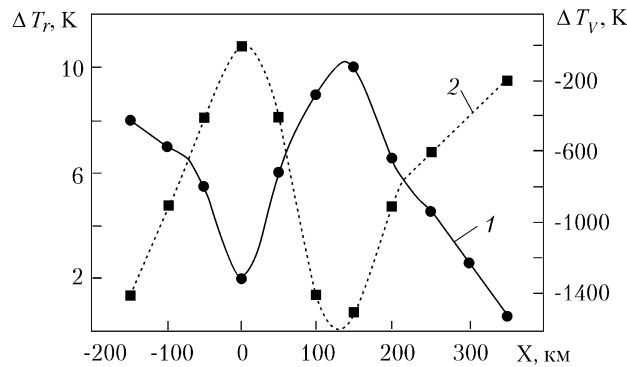


Рис.3. Средние приращения вращательной температуры ΔT_r (кривая 1) и колебательной температуры ΔT_v (кривая 2) гидроксильной эмиссии в зависимости от расстояния X к северу от Кавказского хребта [7,8]

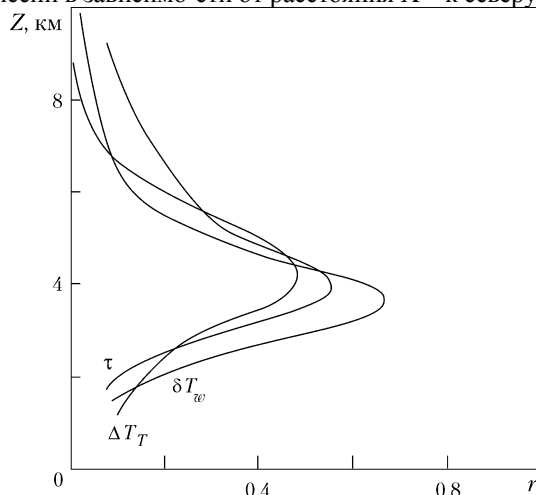


Рис.4. Высотное распределение коэффициентов корреляции амплитуды орографического возмущения ΔT_T , амплитуд δT_w волн и их периодов τ со скоростями ветра в тропосфере над Сухуми [6]

хребта приращений вращательной ΔT_T и колебательной температур ΔT_V . Оказалось, что они изменяются в противофазе, т.е. увеличение вращательной температуры сопровождается уменьшением колебательной (рис. 3) [7,8]. Это означало уменьшение высоты излучающего слоя примерно на 1 км. Непосредственное измерение на спутнике UARS над Кавказским регионом [9] показало, что высота излучающего слоя гидроксила была ниже, чем над другими областями (рис. 5).

Была также обнаружена нелинейная зависимость ΔT_T от скорости ветра на высоте 4 км

$$\Delta T_T (\text{K}) = 3.3 + 1.7 \cdot \sqrt{V_{600} (\text{M/C})}. \quad (1)$$

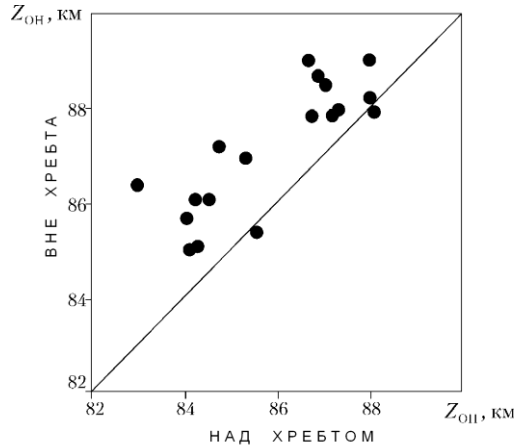


Рис. 5. Сопоставление высот слоя ОН, измеренных на спутнике WINDII/UARS над Кавказским хребтом (ось абсцисс) и вне его в полосе широт 35–45°N (ось ординат) [5,9]

Расстояние X_M максимума ΔT_T от хребта и ширина области возмущения ΔX минимальны, когда преобладающий ветер направлен перпендикулярно к осевой линии хребта ($A_V^* = 0$), и увеличиваются с ростом азимута A_V^*

Для параметров ВГВ, регистрируемых в подветренной области гор, также выявляется корреляция со скоростью ветра на различных высотах тропосферы. Максимум так же как для орографического увеличения температуры в области мезопаузы, имеется для высот 4 км [6]. Результаты измерений для Кисловодска волн с периодами 6–20 мин полностью соответствуют этим корреляциям.

Измерения волн при помощи восьмиканального фотометра выявили, что пространственные расположения источников генерации ВГВ, определенные на основе метода обратного лучевого трассирования [5] тесно ассоциируются с горным хребтом Кавказа и другими неоднородностями рельефа Закавказья и практически отсутствуют в Колхидской низменности (рис.1 и 2). Результаты исследований ВГВ с периодами 10-20 мин в Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузии (41.8°N, 42.°E) свидетельствуют об аналогичной ситуации, когда четко выделяются направления приходящих волн от районов, где находятся горные образования [10]. Количество источников, соответствующих определенным уровням высот, образуют четко выраженное распределение, выявляющее высокую степень корреляции (~ 0.85) со средним профилем высоты хребта (рис.2.) [5,6].

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Изложенные результаты измерений свидетельствуют о притоке энергии на высоты вблизи 90 км над подветренной областью горного хребта, обусловленном ВГВ, генерируемыми над горами вследствие обтекания их нестационарными воздушными потоками. На этой основе была сделана теоретическая оценка пространственного распределения притока энергии [5,8,11]. Для этого были использованы результаты работы [12], согласно которой при взаимодействии потока ветра с препятствием возникают флуктуации его направления и порывов ветра, которые и обуславливают возникновение цугов волн. Примеры волновых цугов показаны на рис. 6 [5]. На рис. 7 показано распределение азимутов порывов ветра.

$$p(\cos A) = \frac{1 - g^2}{4(1 - 2g \cdot \cos A + g^2)^{3/2}} \quad (2)$$

Важно отметить, что использование нормального распределения в качестве функции $p(\cos A)$ не позволило получить согласия с данными измерений. На основе использованной теории удалось построить пространственное распределение притока энергии на высотах около 90 км над подветренной областью Кавказских гор для оценки области возмущения, образующейся на высотах нижней термосферы (рис. 8). Для области максимума это дает $|F_z| \approx 3 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

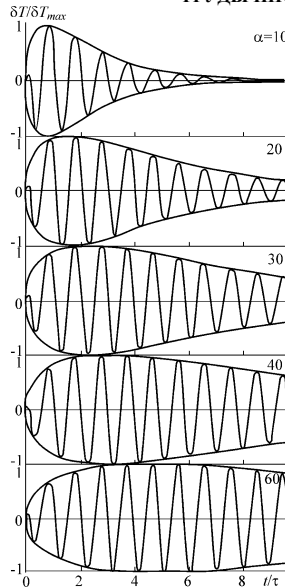


Рис.6. Примеры цугов волн для различных значений параметра α , определяющего декремент затухания [5]

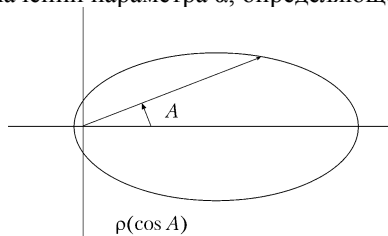


Рис.7. Функция $\rho(\cos A)$ Хеньи- Гринстейна распределения азимутов флуктуаций направлений локального ветра и порывов ветра, $g = 0.5$

ДАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ОРОГРАФИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДРУГИХ ЭМИССИЙ

Последующие результаты исследований позволили расширить сведения о свойствах орографически обусловленных возмущениях в верхней атмосфере.

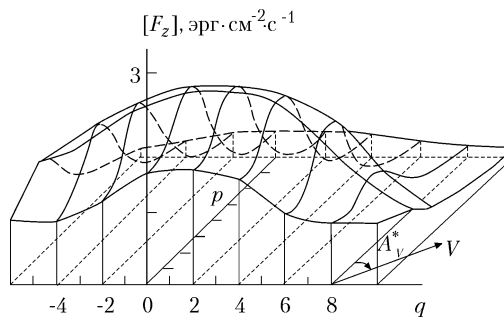


Рис.8. Вычисленные простран-ственные распределения вертикального притока энергии ВГВ на высотах ~ 100 км над подветренной областью Кавказских гор при скорости преобладающего ветра $V_{600} = 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и его азимуте $A_v^* = 45^\circ$ [5,8,11]

Интерферометрические измерения температуры эмиссии 630 нм атомарного кислорода над Андами в Перу вблизи Арекипа (16.5°S , 288.5°E) [13] в 1994 г. выявили ее увеличение над горным хребтом (высота которого ~ 5 км), составившее примерно 200–500 К на расстоянии ~ 430 км от хребта. Ранее оценки изменения температуры для F2 области по эмиссии 630 нм для Урала и Кавказа свидетельствовали об увеличении температуры на 100 и 200 К, соответственно [14]. Пятнистая структура интенсивности эмиссии 630 нм над Гавайскими островами (20.7°N , 203.7°E) [15] также, по-видимому, отображает влияние орографических возмущений [2,3]. Высота гор на островах составляет 3055 и 4205 м.

Измерения интенсивности эмиссии 557.7 нм атомарного кислорода (~ 97 км) в районе Ашхабада (38.0°N , 58.4°E) фактически проводились вблизи Копет-Дагского горного хребта (высота $\sim 2\text{--}2.5$ км). На основе карт изофот эмиссии 557.7 нм в работе [16] был проведен анализ пространственного распределения интенсивности этой эмиссии. Оказалось, что в зависимости от направления ветра в тропосфере относительно средней линии хребта менялся характер распределения.

Измерения эмиссии 630 нм в Ашхабаде также позволили выявить орографические возмущения. В этом случае использование имеющихся упомянутых выше данных различных географических мест исследований дало возможность обнаружить связь дальности расстояний максимумов X_M (км) возмущения интенсивности эмиссии 630 нм с площадью поперечного сечения S (км²) горного образования, представленную на рис. 9, и описываемую регрессионной зависимостью (коэффициент корреляции $r = 0.995 \pm 0.006$) [17]

$$X_M = (210 \pm 9) \cdot \lg\left(\frac{S}{13 \pm 1}\right), \text{ км.} \quad (3)$$

Интересную информацию удалось извлечь из результатов спутниковых измерений на космической станции «Мир» слабых звезд (пятой звездной величины) при их заходе за горизонт [18].

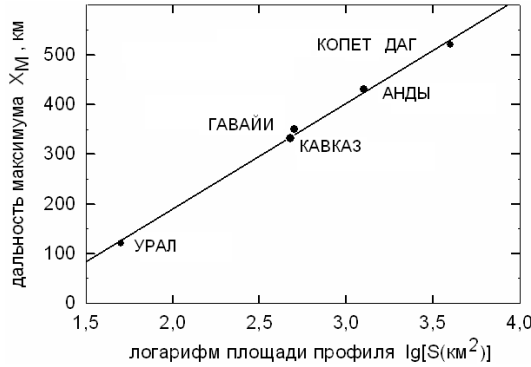


Рис. 9. Сопоставление расстояний максимумов X_M (км) возмущения интенсивности эмиссии 630 нм от горного хребта с площадью поперечного сечения S (км²) горного образования [17].

Непосредственной целью таких измерений было исследование пространственно-временной структуры плотности воздуха в стратосфере по наблюдениям мерцаний ярких звезд. Однако при регистрации слабых звезд существенный вклад в измеряемое излучение обеспечивал континуум собственного свечения атмосферы (λ 420-530 нм). По трассе луча зрения над поверхностью Земли для каждого измерения над различными долготами на широтах 46–52°N оказалось возможным получить долготное распределение интенсивности свечения, высоты излучающего слоя и его толщины, которое приблизительно соответствует горным хребтам (рис. 10) [5]. Это свидетельствует о том, что орографические возмущения присутствуют во всей атмосфере.

Полученные результаты можно использовать для оценки глобального вклада ВГВ (с периодами 7-20 мин), генерируемых вблизи земной поверхности, в приток энергии в область мезопаузы и нижней термосферы [14]. Приблизительно можно оценить протяженность гор в северном полушарии как $L_N \sim 6 \cdot 10^4$ км, в южном – $L_S \sim 4.5 \cdot 10^4$ км, т. е. общепланетарная протяженность $L_E \sim 1 \cdot 10^5$ км. Средняя ширина гор $W_M \sim 300$ км, средняя высота $Z_M \sim 2$ км, средняя область возмущения $\Delta X \sim 400$ км. Отсюда приблизительная оценка средне планетарного притока энергии может составить $1.5-2$ эрг·см⁻²·с⁻¹.

Представленные выводы о возмущениях в верхней атмосфере вблизи горных образований можно, очевидно, распространить и на генерацию ВГВ в областях холодных фронтов, циклонов, над которыми всегда присутствуют ветровые потоки. Перемещающаяся метеорологическая ситуация над поверхностью Земли будет обуславливать переменный фоновый компонент возмущения. Это создает, таким образом, предпосылки для разработки на основе планетарных карт орографической структуры рельефа Земли и метеорологи

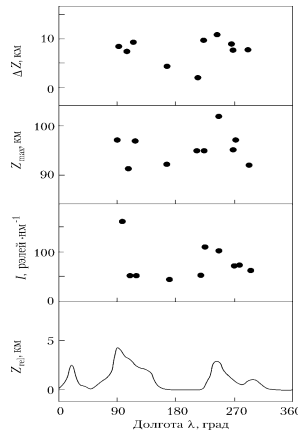


Рис.10. Долготное распределение результатов десяти измерений излучения верхней атмосферы в диапазоне спектра 420–530 нм на орбитальном корабле «Мир» на широтах 46–52°N [5], полученное на основе данных [18]

Показаны значения интенсивности I , высоты максимума излучающего слоя Z_{max} , толщины слоя ΔZ , и средняя высота рельефа Z_{rel} земной поверхности в указанной полосе широт

ческой ситуации учета возмущений в верхней атмосфере и их введения в современную модель верхней атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При взаимодействии порывов ветра с горными образованиями происходит генерация ВГВ, распространяющихся в мезопаузу и создающих в ней возмущения. Поток энергии, транспортируемый ВГВ в эту область атмосферу составляет $\sim 3 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Волны генерируются в тропосфере в слое толщиной $\sim 2 \text{ км}$ и на высотах $\sim 4 \text{ км}$. Амплитуда изменения температуры на высотах $\sim 90 \text{ км}$ равна $\sim 10 \text{ К}$, ширина области возмущения составляет $\sim 300 \text{ км}$.

ლიტერატურა - REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

1. Э.В. Кононович, Н.Н. Шефов, 1999, Средняя атмосфера – регулятор воздействия солнечной активности на долговременные изменения энергетического баланса нижней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 1. С. 79–83.
2. А.И. Семенов, М.В. Шагаев, Н.Н. Шефов, 1981, О воздействии орографических волн на верхнюю атмосферу // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 17. № 9. С. 982-984.
3. Н.Н. Шефов, Н.Н. Перцев, М.В. Шагаев, В.Н. Яров, 1983, Орографически обусловленные вариации эмиссий верхней атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 19. № 9. С. 920-926.
4. G.S. Golitsyn, A.N. Gruzdev, N.F. Elansky, N.N. Pertsev, N.N. Shefov, 1986, Studies of structure of orographic lee waves // Proceeding of International Symposium on the Quighai-Xizang Plateau and mountain meteorology (China, Beijing, March 20-24, 1984). Beijing: China Science Press. P. 854-864.
5. Н.Н. Шефов, А.И. Семенов, В.Ю.Хомич, 2006, Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с.
6. В.А.Суходоев, В.И. Перминов, Л.М. Решетов, Н.Н. Шефов, В.Н. Яров, А.С. Смирнов, Т.С. Нестерова, 1989, Орографический эффект в верхней атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 25. № 9. С. 926-932.
7. **В.А. Суходоев, В.Н. Яров, 1998, Вариации температуры мезопаузы в подветренной области Кавказского хребта // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38, № 4. С. 176–180.**
8. N.N. Shefov, A.I. Semenov, N.N. Pertsev, V.A. Sukhodoev, 2000, The spatial distribution of the gravity wave energy influx into the mesopause over a mountain lee // Phys. Chem. Earth. Part B. V. 25. N 5-6. P. 541-545.
9. R.P. Lowe, V.I. Perminov, 1998, Analysis of mid-latitude ground-based and WINDII / UARS observations of the hydroxyl nightglow // 32nd Scientific Assembly of COSPAR (Japan, Nagoya, 1998). Nagoya, P.131.
10. Т.И. Торошелидзе, 1991, Анализ проблем аэрономии по излучению верхней атмосферы. Тбилиси: Мецниереба, 216 с.
11. Н.Н. Шефов, А.И. Семенов, Н.Н. Перцев, В.А. Суходоев, В.И. Перминов, 1999, Пространственное распределение притока энергии ВГВ в мезопаузу над подветренной областью горного хребта // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 5. С. 87-94.
12. И.П. Чунгузов, 1988, Об орографических волнах, возбуждаемых нестационарным ветром // Изв. АН СССР. Физики атмосферы и океана. Т. 24. № 1. С. 9-19.
13. J.W. Meriwether, J.L. Mirick, M.A. Biondi, F.A. Herrero, C.G. Fesen, 1996, Evidence of orographic wave heating in the equatorial thermosphere at solar maximum // Geophys. Res. Lett. V. 23. N 16. P. 2177–2180.
14. Шефов Н.Н., 1985, Солнечная активность и приземная циркуляция как соизмеримые источники вариации теплового режима нижней термосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т.25 №5 с.848-849.
15. Ф. Роч Дж. Гордон, 1977, Свечение ночного неба. М.: Мир, 152 с.
16. Г.А.Насыров, 2007, Орографически обусловленные вариации интенсивности эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 1. С. 107-110.
17. Г.А.Насыров, 2009, Орографически обусловленные вариации интенсивности эмиссии атомарного кислорода 630 нм // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 3. С.
18. А.С. Гурвич, В.В. Воробьев, С.А. Савченко, А.И. Пахомов, Г.И. Падалка, Н.Н. Шефов, А.И. Семенов, 2002, Ночное свечение верхней атмосферы в диапазоне 420–530 нм по измерениям на орбитальной станции «Мир» в 1999 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 4. С. 541–546.

UDC 551.511.8

OROGRAPHIC DISTURBANCES IN THE UPPER ATMOSPHERE STIPULATED BY AIR CURRENTS STREAMLINING OF GREAT CAUCASUS RANGE./Semionov A., Shefov N. /. Transactions of the Georgian Institute of Hydrometeorology. -2008. - т.115. – p.397-406.- Georg.; Summ. Georg.; Eng.; Russ.

Measurements of mesopause temperature in northern leeward area of the Caucasian ridge have allowed to obtain unique data on characteristics of orographical disturbances at heights of mesopause and of their generation processes in a ground atmosphere. The temperature at heights $\sim 90 \text{ км}$ in leeward area of mountains has a maximum $\sim 10 \text{ К}$ on distance about 150 km from a ridge. Sources of wave disturbances arise in troposphere approximately at heights of 4 km above the Caucasian ridge

УДК 551.511.8

ОРОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ОБТЕКАНИЕМ КАВКАЗСКОГО ХРЕБТА ВОЗДУШНЫМИ ПОТОКАМИ./Семенов А.И., Шефов Н.Н./Сб.Трудов Института Гидрометеорологии Грузии. –2008. – т.115. – с.397-406. – Груз.; Рез. Груз., Англ.,Рус.

Измерения температуры мезопаузы в северной подветренной области Кавказского хребта позволили получить уникальные сведения о характеристиках орографических возмущений на высотах мезопаузы и особенностях их генерации в приземной атмосфере. Температура на высотах ~ 90 км в подветренной области гор имеет максимум ~ 10 К на расстоянии ~ 150 км от хребта. Источники волновых возмущений возникают в тропосфере примерно на высотах 4 км над Кавказским хребтом