

УДК 551.4:681.3.06
ББК 26.823.1
Б 38

М.К. Беданок, Р.Б. Коблева

Влияние орографических возмущений на перераспределение озона в атмосфере в районе Кисловодска
(Рецензирована)

Аннотация

На языке программирования «MATLAB» разработан пакет программ, позволяющий исследовать обтекание воздушным потоком рельефа произвольной формы. Используется нелинейная, трехслойная, гидродинамическая аналитическая модель обтекания. На основе этой модели проведено исследование влияния орографических возмущений на перераспределение озона в атмосфере в районе Кисловодска.

Ключевые слова: орографические возмущения, озон в атмосфере, траектории движения частиц, обтекание рельефа воздушным потоком.

М.К. Bedanokov, R.B. Kobleva

Influence of orographical perturbation on ozone reallocation in an aerosphere around Kislovodsk

Abstract

The software package was developed in the programming language "MATLAB", allowing research of the air stream flowing over the topography of any form. The nonlinear, three-layer, hydrodynamical analytical model of a flow is used. On the basis of this model research was made on influence of orographic perturbations on the ozone redistribution in the atmosphere of the Kislovodsk region.

Key words: orographic perturbations, ozone in the atmosphere, trajectories of particle movement, air stream flowing over the topography.

Исследование изменчивости различных временных масштабов параметров озоносферы и поиски физических причин этой изменчивости до настоящего времени остаются актуальной проблемой. И актуальность эта определяется той существенной ролью, которую играет озон в термодинамическом балансе атмосферы, в формировании климата, в развитии глобальных изменений окружающей среды. Наибольшая информация накоплена о таком параметре озоносферы как общее содержание озона в атмосфере (ОСО). Общепринятым является сейчас положение о том, что вариации ОСО должны быть тесно связаны с динамическим режимом атмосферы, в первую очередь, конечно, с динамикой стратосферы, где сосредоточена большая часть озона.

Возмущения воздушного потока, обтекающего орографические препятствия, оказывают влияние на распределение концентрации озона в тропосфере и в стратосфере. Они могут сказываться на результатах измерения общего содержания озона в вертикальном столбе. Об этом свидетельствуют наблюдения содержания озона в атмосфере [1].

Различают два процесса воздействия орографических возмущений на содержание озона в атмосфере: фотохимический и динамический.

Фотохимический предполагает изменение интенсивности процессов образования и разрушения озона в химических реакциях при колебаниях температуры воздуха под воздействием внутренних гравитационных волн. В горных районах она возбуждаются систематически благодаря орографическим возмущениям от «постоянно присутствующих источников» и в условиях существующих обычно преимущественных воздушных потоков.

Динамический предполагает перераспределение озона под влиянием процессов переноса. При наличии в нижней стратосфере резкого вертикального градиента озона

конвергентные движения в волновой зоне и связанные с ними вертикальные смещения воздуха формируют неоднородную структуру пространственного распределения озона на различных высотных уровнях.

Оценку величины такого влияния можно выполнить с помощью численного моделирования обтекания реального интересующего рельефа, используя стационарную трехслойную, нелинейную, неограниченную по высоте модель, без учета вязкости и силы Кориолиса [2]. Данная модель имеет такие характеристики по следующим причинам:

- численные схемы решения исходных гидродинамических уравнений пока недостаточно разработаны для решения данной задачи.
- признано, что орографические возмущения в атмосфере не являются малыми, поэтому необходимо применять нелинейные модели.
- многолетние исследования показали, что именно на основе такого подхода можно проводить корректные расчеты тех характеристик, которые можно сравнить с результатами прямых измерений в природе.

Следует также отметить, что при моделировании реальных атмосферных процессов нельзя забывать про вертикальную неограниченность атмосферы и существенную зависимость возмущений от качества воспроизведения формы обтекаемого рельефа.

Для такой модели рассматривается система уравнений движения, адиабатичности и неразрывности:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \vec{V} = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p - \vec{g}, \\ \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \left(\vec{\nabla} \vec{V} \right) = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \left(\rho \vec{V} \right) \right] = 0, \text{ где} \\ \frac{d}{dt} \Theta = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \left(\vec{V} \vec{\nabla} \right), \quad \vec{V} = (u, v, w), \quad \vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right), \quad (1.1)$$

\vec{V} - вектор скорости, ρ и p - плотность и давление, \vec{g} - вектор силы тяжести, Θ - потенциальная температура, выражаемая через температуру T и давление по формуле:

$$\Theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (2)$$

В формуле (2) k - отношение удельных теплоемкостей, p_0 - эталонное давление (давление в основном состоянии на земле). Возмущения определяются как отклонение атмосферы от ее основного состояния. Основным состоянием атмосферы считают состояние атмосферы на бесконечном расстоянии перед обтекаемыми горами, в той части пространства, где всюду поверхность земли имеет вид бесконечной плоскости. Это состояние называют натекающим потоком.

В данной проблеме в рамках стационарного приближения основной акцент делается на учет действия неровностей на движущуюся упругую атмосферу. Упругость определяется вертикальной стратификацией среды. Возникающие возмущения изучаются на основе гидродинамики стратифицированной жидкости, а неровности играют роль вынуждающих сил. В системе уравнений (1) в полной производной по времени опускается частная производная, т.е.

$$\frac{d}{dt} = \left(\vec{V} \vec{\nabla} \right). \quad (3)$$

Натекающий поток считают не зависящим от времени и полностью определяемым вертикальными профилями скорости и одной из термодинамических величин. В предположении, что неровности земли локализованы в ограниченной окрестности начала координат, натекающий поток можно определить соотношениями:

$$\vec{V} \rightarrow U(z), \quad T \rightarrow \bar{T}(z) \quad \text{при } x \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где U - скорость натекающего потока, температура и остальные его термодинамические характеристики выделяются чертой сверху. Наличие гидростатически устойчивого распределения температуры в натекающем потоке определяет упругие свойства атмосферы по отношению к быстрым вертикальным смещениям ее частиц. Мерой этой упругости в атмосфере служит частота Брента-Вяйсяля N , которая определяется формулой:

$$N^2 = \frac{g}{\Theta} \frac{d\bar{\Theta}}{dz} = g \frac{\gamma_a - \gamma}{T_1}, \quad \gamma = -\frac{d\bar{T}}{dz}, \quad (5)$$

где γ_a - сухоадиабатический градиент температуры, T_1 - характерная (средняя) температура рассматриваемого слоя атмосферы.

Скорость и частота Брента-Вяйсяля N определяют некоторый масштаб b , который пропорционален собственному волновому масштабу λ_c , впервые введенному Лира [3]:

$$b = \frac{U}{N}, \quad \lambda_c = 2\pi b = 2\pi \frac{U}{N}. \quad (6)$$

Взаимодействие атмосферы и неровностей имеет волновой характер, причем в возникающих возмущениях частота Брента-Вяйсяля N и собственный масштаб λ_c всегда должны, так или иначе, проявляться. Возникающие волны представляют пример внутренних гравитационных волн. Сами возмущения порождаются горами, поэтому их можно классифицировать как внутренние гравитационные волны орографической природы. Натекающий поток считают не возмущенным и не зависящим от времени. Но скорость натекающего потока сохраняется постоянной, а статистическая устойчивость скачком меняется от слоя к слою.

Модель строится при условии несжимаемости, причем это условие позволяет ввести функцию тока с помощью формул

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (7)$$

Т.к. процесс стационарен, изолинии этой величины совпадают с траекториями движения. Данную нелинейную систему уравнений (1) можно свести по Буссинеску [4, 5] к линейному уравнению без предположения о малости возмущений поля скорости за счет перехода к некоторому частному случаю свойств натекающего потока [2, 6]. Согласно анализу [6-8], наиболее интересным для атмосферы вариантом является случай, когда

$$U = const, \quad \gamma = const. \quad (8)$$

В этом случае решение проблемы сводится к решению уравнения Гельмгольца для возмущений функции тока в каждом слое:

$$\nabla^2 \psi' + K^2 \psi' = 0, \quad \psi' = \psi - \psi_0, \quad \psi_0 = -Uz, \quad (9)$$

$$K = \frac{N}{U} = b^{-1} = 2\pi \lambda_c^{-1}. \quad (10)$$

При этом возмущения температуры определяются через возмущения функции тока по формуле:

$$T' = -(\gamma_a - \gamma) \frac{\psi'}{U}, \quad (11)$$

тем самым достигается соответствие требованиям адиабатичности изменений при вертикальных смещениях.

В данной модели изменения свойств атмосферы с высотой учитывались с условием, что на первом этапе можно считать, что скорость натекающего потока не изменяется с высотой, а вариации градиента температуры воспроизводятся переходом к рассмотрению трехслойного потока жидкости. Для каждого слоя $j = 1, 2, 3$ решается уравнение (9) со своим коэффициентом K , или согласно (6) со своим масштабом Лира λ_c . Решение задачи сводится к отысканию поля возмущений функции тока ψ'_j . В каждом слое собственный характерный масштаб Лира обозначается через λ_j .

Следует учесть, что на поверхности земли, заданной в виде

$$z = z_0 + h(x), \quad (12)$$

граничное условие скольжения будет использоваться в виде:

$$\psi = -Uz_*, \quad \psi'(x, z) = Uh(x) \quad \text{при } z = z_0 + h(x). \quad (13)$$

Также предполагается, что невозмущенный уровень земли в натекающем потоке равен z_* , а орографическое смещение относительно этого уровня есть $h(x)$, причем в окрестности точки $x = 0$ последнее отлично от нуля.

В результате приходим к решению интегрального уравнения Фредгольма I рода [1]. При решении возникает необходимость определения орографической функции f , которая определяется на основе условия скольжения на поверхности земли.

Решение такой проблемы может быть некорректным [9]. Возникающие трудности при расчетах в тропосфере можно преодолевать на основе редуцированной процедуры [10].

На основе этой модели проведено исследование влияния орографических возмущений на перераспределение озона в атмосфере при обтекании Антарктического полуострова. Форма препятствий точно соответствовала реальной топографии полуострова. Вертикальные профили ветра, температуры и озона в невозмущенном потоке соответствовали средним климатическим значениям для выбранного региона. По данным численного моделирования построены линии тока и распределения озона в области орографических возмущений. В отдельных слоях изменение концентрации озона достигает 60-70%. Его общее содержание в вертикальном столбе в подветренной зоне горного хребта может изменяться на 2.1%. При этом общее содержание озона в столбе (до нескольких %) уменьшается над основным массивом хребта и развивается слабая периодическая структура с горизонтальным волновым периодом, соответствующим двум-четырем масштабам Лира λ_j [1].

Представим вариант исследования рельефа в районе Кисловодска.

Рельеф построен по топографическим данным Гидрометеоцентра РФ с использованием процедуры усреднения, разработанной ранее [2]. Максимальная высота H_m равна 1263 м над уровнем моря. В трехслойной модели высотные изменения гидростатической устойчивости можно представить следующим образом. Нижний слой имеет толщину 10 км и $\gamma_1 = 6$ К/км, средний – толщину 18,5 км и $\gamma_2 = 0,545$ К/км, верхний слой в расчетах ограничиваем высотой 30 км, а градиент температуры $\gamma_3 = 0$ К/км. В применяемой модели предполагается, что скорость потока не зависит от высоты, хотя полученные данные зондирования показывают довольно заметное возрастание скорости

ветра и изменение его направления с высотой. Но эту особенность атмосферы приходится оценивать лишь качественно. Для этого расчеты проводились для двух значений скорости потока U : 15 и 17 м/с. Каждый вариант представляется полем траекторий движения частиц во всем диапазоне пространственных координат. На рисунках высоты траекторий даны относительно фоновой высоты z_* [2]. В натекающем потоке эти высоты обозначаются как z_0 . Модельные расчеты дают поле возмущений функции тока, его полезно представить в виде поля функций $z_0(x, z)$. После этого положение траекторий определяется по стандартной программе как поле заданных изолиний z_0 . Каждый рисунок показывает движение в вертикальной плоскости (x, z) . В трехмерном пространстве все характеристики возмущений имеют вид цилиндров с образующими, параллельными оси y . Движение направлено слева направо. Поверхности раздела между слоями выделены двойными линиями, причем в натекающем потоке показаны штрихпунктирными горизонталями. В данной работе результаты расчетов поля траекторий иллюстрируются двумя рисунками.

Расчеты показывают, что наибольшие смещения наблюдаются непосредственно над главной вершиной и в зонах, где движение частиц приобретает роторный характер. Появление роторов является главной и характерной особенностью обтекания. Интенсивность роторов зависит от формы и от характеристик натекающего потока. Сами характеристики определяются величинами скорости потока и послойными значениями частоты N , т.е. послойными значениями масштаба Лира λ_j . В основном роторы расположены в области над главной вершиной и имеют горизонтальную протяженность порядка 40-50 км. Вертикальная протяженность роторов составляет несколько километров. По вертикали возмущения изменяются периодически в соответствии с масштабами λ_j . Об этом свидетельствуют роторные области и все остальные характеристики.

При обтекании воздушным потоком рельефа со скоростью 17 м/с образуются наиболее развитые возмущения, а при обтекании с меньшей скоростью равной 15 м/с возмущения развиты меньше.

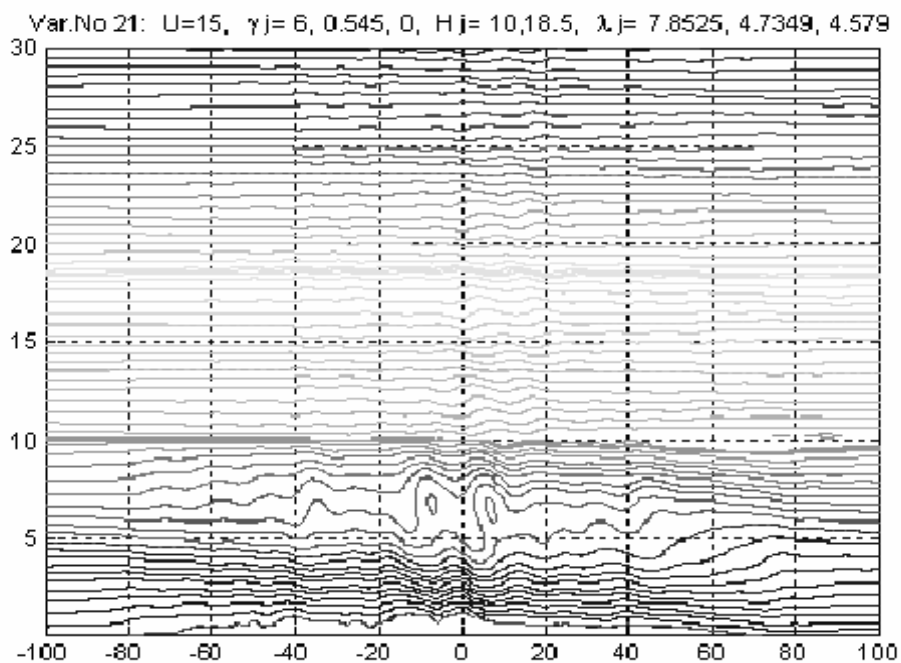


Рис. 1. Траектории движения частиц при обтекании рельефа воздушным потоком со скоростью 15 м/с

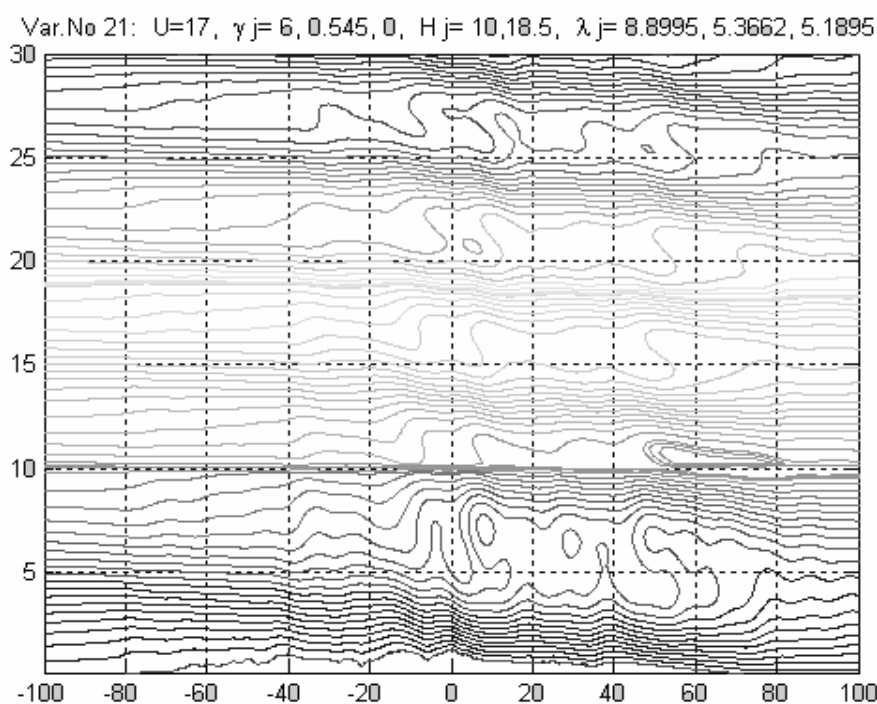


Рис. 2. Траектории движения частиц при обтекании рельефа воздушным потоком со скоростью 17 м/с

Картины течения над рельефом в районе Кисловодска, полученные на основе модельных расчетов, позволяют исследовать влияние орографических внутренних гравитационных волн (ВГВ) на изменения распределения концентрации озона в атмосфере.

До высот порядка 40 км озон переносится как консервативная примесь. ОСО не зависит от горизонтальной координаты, т.к. в натекающем потоке траектории частиц воздуха представляют собой прямые линии. Частицы воздуха в зоне возмущений отклоняются от своих исходных уровней, причем в разных точках траекторий по-разному. Появляются и возвратные движения (рис.2). Вместе с тем, следует учесть, что максимум концентрации озона находится на высоте 20 км, а выше и ниже этой области наблюдаются большие градиенты озона. Указанные факторы говорят о том, что в зоне смещений происходит перераспределение озона и его общее содержание в столбе начинает зависеть от горизонтальной координаты.

Каждая из рассчитанных линий тока характеризуется ее относительной высотой в натекающем потоке z_0 . Высоте соответствует определенная плотность озона $\rho(z_0)$. ОСО в вертикальном столбе получается интегрированием по высоте по стандартной программе на основе ранее полученных данных о поле $z_0(x, z)$. Расчеты по данной методике проводились в области значений x , где находится основная часть всех орографических возмущений. Интегрирование велось от земной поверхности до линии тока, не имеющей участков возвратного движения и характеризующейся высотой z_0 , достаточной для определения общего содержания озона во всей атмосфере с достаточной точностью.

Наиболее заметные относительные изменения ОСО соответствуют скорости натекающего потока 15 м/с. В атмосфере над большей частью рассматриваемого рельефа ОСО в зоне орографических возмущений пониженное. Максимальные отклонения могут наблюдаться над главной вершиной и несколько ниже по потоку.

При скорости натекающего потока 20 м/с отклонения ОСО в окрестности главного хребта могут быть положительными или знакопеременным. Причем варианты таких чередований знака могут быть достаточно разнообразными. Это говорит о том, что при увеличении скорости потока профили ОСО изменятся. Во-первых, они трансформируются в волновые. Во-вторых, величина изменений уменьшится при переходе на большие скорости натекающего потока. Хотя амплитуда смещений траекторий, по выше показанным расчетам, ведет себя иначе: она возрастает с ростом скорости. Таким образом, можно сделать вывод, что нет простой зависимости скорости натекающего потока от изменений ОСО. Характер изменений ОСО зависит от конкретных пространственных характеристик возмущений, возникающих над горами. Ряд наблюдений указывает, что орографические эффекты наиболее надежно проявляются в виде периодических пространственных или временных колебаний. Длина волны в распределении озона вдоль горизонтальной оси коррелирует с величиной масштаба Лира [11, 12].

Для определения вклада вариации ОСО отдельных слоев потока над горами, проводятся дополнительные расчеты по той же методике. Вариации озона в любом отдельном слое определяются двумя характеристиками - характером и интенсивностью возмущений, а также тем насколько значителен вертикальный градиент концентрации озона в этом слое. В большинстве случаев перед главным хребтом идет быстрое уменьшение содержания озона по потоку, а далее он достаточно плавно возвращается к исходному уровню.

Изменения озона в слоях между роторами очень схожи по величине и характеру. Они могут почти вдвое превышать изменения, характерные для слоев с роторами. Вклад отдельных слоев в изменения ОСО над горами может быть заметно большим, чем суммарное изменение во всем столбе атмосферы. Слои без роторов дают самый большой вклад. Хотя число слоев, их дивергентность и сама величина вклада прямо зависят от появления и развитости роторных зон в поле возмущений [1].

Заключение

В результате орографического воздействия гор воздушные потоки в тропосфере сильно возмущаются, возникает сложная система движений, имеющая как волновую, так и неупорядоченную структуру, появляется система периодически повторяющихся по высоте роторных слоев, разделенных зонами с заметными изменениями дивергенции и слабыми вертикальными колебаниями частиц, движущихся по потоку. Такие возмущения ведут к перераспределению озона над горами при наличии исходного вертикального градиента концентрации озона, к появлению в поле озона сложных волновых и неупорядоченных структур. Наиболее заметные изменения в вертикальном профиле озона наблюдаются в слоях между роторами (до нескольких десятков процентов). При этом общее содержание озона в столбе (до нескольких %) уменьшается над основным массивом хребта и развивается слабая периодическая структура с горизонтальным волновым периодом, соответствующим двум-четырем масштабам Лира λ_j .

В условиях существования внутренних гравитационных волн в поле озона образуются разнообразные тонкие неоднородности вертикального распределения. Аналогичные эффекты могут породить и тонкую структуру другой консервативной примеси атмосферы – аэрозоля. Долговременное стационарирование условий существования ВГВ может привести и к соответствующим изменениям в термобарической структуре стратосферы через радиационные эффекты в областях возмущения озона и аэрозоля.

Примечания:

1. Влияние орографических возмущений на перераспределение озона в атмосфере при обтекании Антарктического полуострова / Н.Ф.Еланский, В.Н. Кожевников, В.Н.Кузнецов, Б.И.Волков // Известия РАН. ФАО. 2003. Т. 39, №1. С. 105-120.
2. Кожевников В.Н. Возмущения атмосферы при обтекании гор. М., 1999. 160 с.
3. Lyra G. Theorie der stationaren Leewellenstromung in freien Atmosphere // Z. angew. Math. Und Mech. 1943. Н. 1, № 23. P. 1-28.
4. Кибель И.А. Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды. М., 1957. 375 с.
5. Long R.R. Some aspects of the flow of stratified fluids. Continuous density gradients // Tellus. 1955. V. 7, № 3. P. 341-357.
6. Кожевников В.Н. К одной нелинейной задаче об орографическом возмущении стратифицированного воздушного потока // Известия АН СССР. Сер. Геофизика. 1963. № 7.
7. Кожевников В.Н. Орографические возмущения в двумерной стационарной задаче // Известия АН СССР. 1968. Т. 4, № 1. С. 33-52.
8. Кожевников В.Н. Орографические возмущения воздушного потока: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1965.
9. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М., 1986. 288с.
10. Пытьев Ю.П. Методы анализа и интерпретации эксперимента. М., 1990. 286 с.
11. Кузнецов Г.И. Исследование связи атмосферного озона с некоторыми гео- и гелиофизическими факторами // Атмосферный озон: тр. VI Всесоюз. симпозиума 15-17 мая 1985г. Л., 1987. С. 200-217.
12. Elansky N.F. Investigations of mesoscale dynamic processes over mountain region by deformation of ozone field. Ozone in the atmosphere / Eds. R. Bjokov and P. Fabian. Hampton, 1989. P. 494-497.

References:

1. Influence of orographic perturbations on ozone redistribution in the atmosphere with the air stream flowing over the Antarctic Peninsula / N.F.Elansky, V.N. Kozhevnikov, V.N. Kuznetsov, B.I. Volkov // Izvestiya of the Russian Academy of Science, FAO, 2003. V.39, No. 1. P. 105-120.
2. Kozhevnikov V.N. Atmosphere perturbations at the air stream flowing over the mountains. M., 1999. 160 p.
3. Lyra G. Theorie der stationaren Leewellenstromung in freien Atmosphere// Z. angew. Math. Und Mech. 1943. Н. 1, №23. P. 1-28.
4. Kibel I.A. Introduction in hydrodynamical methods of short-term weather forecast. Moscow, 1957. 375 p.
5. Long R.R. Some aspects of the flow of stratified fluids. 3. Continuous density gradients // Tellus, 1955 V. 7, No. 3. P. 341-357.
6. Kozhevnikov V.N. On one nonlinear problem about orographic perturbation of the stratified air stream // Izvestiya of the USSR Academy of Science, Series Geophysics. 1963. No. 7.
7. Kozhevnikov V.N. Orographic perturbations in a bidimensional stationary problem // Izvestiya of the USSR Academy of Science. 1968. V. 4, No. 1. P. 33-52.
8. Kozhevnikov V.N. Orographic perturbations of the air stream. Thesis for Cand. of Physical and Mathematical Sci. Moscow, 1965.
9. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Methods of the solution of incorrect problems. M., 1986. 288 pp.
10. Pytiev Yu. P. Methods of the analysis and interpretation of experiment. M., 1990, 286 pp.
11. Kuznetsov G.I. Research of connection of the atmospheric ozone with some geo- and heliophysical factors. // Atmospheric Ozone. Proc. VI Soviet Union symposium, May 15-17, 1985. L. 1987. P. 200-217.
12. Elansky N.F. Investigations of mesoscale dynamic processes over mountain region by deformation of ozone field. Ozone in the atmosphere / Eds: R. Bjokov and P.Fabian. Hampton, 1989. P. 494-497.