

斜压大气中地形扰动过程的一个数值试验*

朱永提

(中国科学院地球物理研究所)

提 要

本文应用了考虑地形边界的三层模式对一个緯圈环流的初始理想場进行了 60 小时地形扰动过程的数值计算。試驗結果表明地形扰动影响具有一定的时滞性(扰动过程在 48 小时后才趋于相对稳定状态)。其次, 西藏高原对带状流的强迫分支(繞流現象)在計算結果中有較明显的反映。在半球范围内形成的地形槽脊位置基本上亦与环流平均槽脊位置較为相似, 这表明模式中所取边界条件的基本适用性。

在定常問題中地形动力扰动作用对大气环流的影响已有不少工作給予了較詳尽的分析和討論^[3-5]。結果都表明, 大气环流平均状态的形成原因除了海陆分布的热力影响以外, 地形动力扰动亦为重要因素之一。

对于非定常問題, 亦有不少較有成效地考虑了地形边界影响的短期預报模式^[7,8]。計算結果表明, 地形边界的引入对小区域的气压場預报有一定程度的改善。在文献[2]中我們給出了地形对于半球范围大型天气过程影响的个例分析。但是, 我們不能由此获得对地形非定常扰动过程的机构的了解。为此, 我們將对初始时刻沒有扰动的斜压大气, 在地形作用下所引起的发展过程作一討論; 即給定緯圈环流为大气初始状态。我們以文献[2]所取一例(1959年1月12日)的 300, 500 及 1000 毫巴高度值分別按各緯度平均, 所得高度值作为各該緯度的初值。在这种情况下等高綫乃是以极为中心的同心圆, 从风速分布經向剖面(图 1)可以看到, 在北緯 35° 上空存在強西风带(300 毫巴处地轉西风风速为每秒 26 米), 在近地面存在东西风带, 风速零值綫位于北緯 40°, 即 $\theta < 50^\circ$ 处, $u > 0$, 而 $\theta > 50^\circ$ 区域, $u < 0$; 最大东西风速为每秒 7 米左右。

我們取地球的实际地形平均廓面作为大气的下界面。即主要考虑西藏高原, 落基山和格陵兰, 其中西藏高原位于中亚南部, 其平

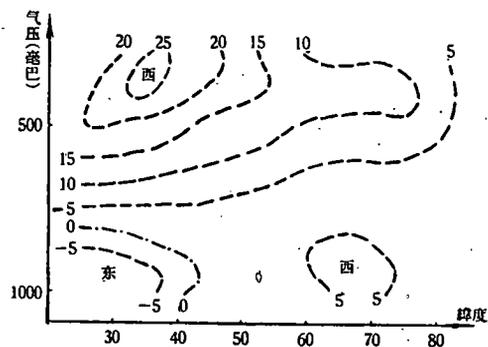


图 1 初始地轉风速分布經向剖面图

* 本文部分工作系 1960 年在苏联科学院应用地球物理研究所 E. H. 勃利諾娃 (Блинова) 通訊院士指导下进行的。

本文 1961 年 11 月 2 日收到。

均高度大于 4 公里, 水平剖面图上其等高线呈椭圆形, 其长轴沿纬圈向, 长约 3000 公里, 短轴长约 1500 公里. 鉴于高原山系结构的复杂性 (个别山峰山岭高达 7—8 公里), 在现时条件下只能取按面积平均后的高原外形^[9]. 其次为落基山, 位于北美西岸, 呈南北向分布, 平均高度为 2 公里. 最后的主要障碍物为大西洋北部的格陵兰岛, 该岛陆地高度虽仅 600 米, 但其上有厚达 2500 米左右的巨大冰层复盖, 虽地处高纬, 但其宽广的面积和一定的高度仍将对大气过程有一定的动力影响. 至于热力影响, 则由于其下垫面的特性估计对大气过程更有特殊作用. 在我们的计算中以上三者, 及其他山系的高度值 $h(\theta, \lambda)$ 将取地形的平均高度. 模式^[2]中所取的边界条件为: 在 $\xi = 1$ 处, 有

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi \partial t} \approx f = \frac{1}{a^2 \sin \theta} \left[\frac{a^2 \Gamma g l}{RT_1 \xi_h} \{ \psi, h \} - \left\{ \psi, \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right\} \right]_{\xi = \xi_h}$$

这里 ψ 为流函数, $\xi = \frac{\tilde{p}(z)}{P}$ ($\tilde{p}(z)$ 为依赖于高度的标准气压, P 为海平面气压), a ——地球半径, θ ——余纬度, λ ——经度, l ——地转参数, R ——气体常数, T_1 ——大气平均温度, $\{A, B\} = \frac{\partial A}{\partial \theta} \frac{\partial B}{\partial \lambda} - \frac{\partial A}{\partial \lambda} \frac{\partial B}{\partial \theta}$, $\Gamma = \frac{R^2 T_1}{4 a^2 \omega^2 g} \left(\frac{\gamma_a - \gamma}{\cos^2 \theta} \right)$ ——为大气稳定度参数, 我们暂取为常数 ($\Gamma = \frac{1}{36}$).

上式右端第一项为地形动力扰动项, 可以看出与地形表面的风速、地形坡度、大气稳定度、纬度等有关. 第二项为地形表面的温度平流项. 由于模式中所取层次的限制和地形坡度的近似, 我们不能精确计算地表面的动力扰动和温度平流. 在文献^[2]中提出了用 500 及 1000 毫巴面的资料, 求取地表面风速和温度的线性内插公式.

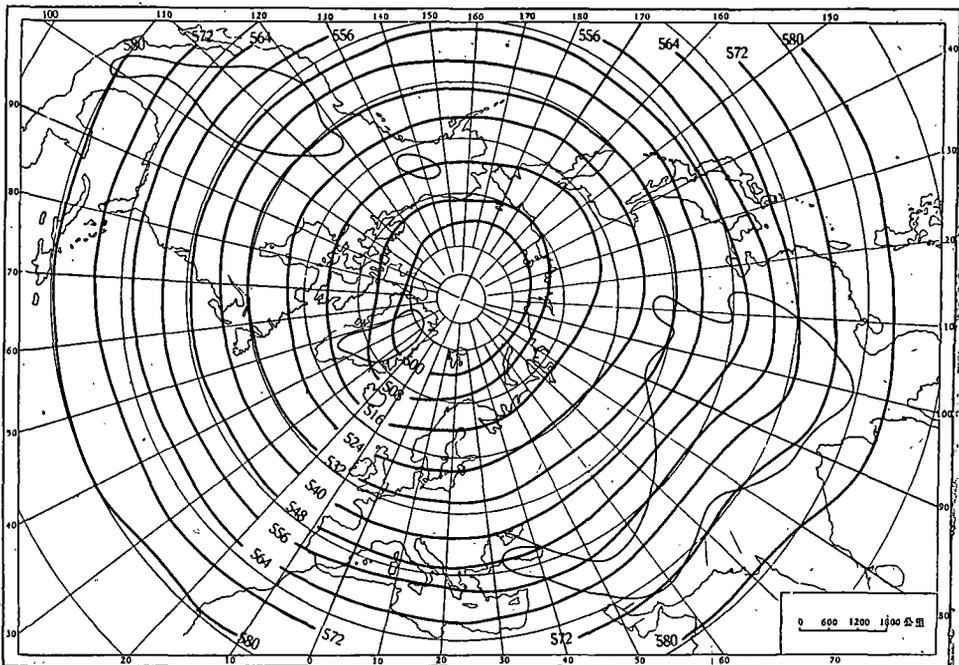


图 2 500 毫巴 12 小时地形扰动高度场(细实线为 1.3 公里的地形廓线)

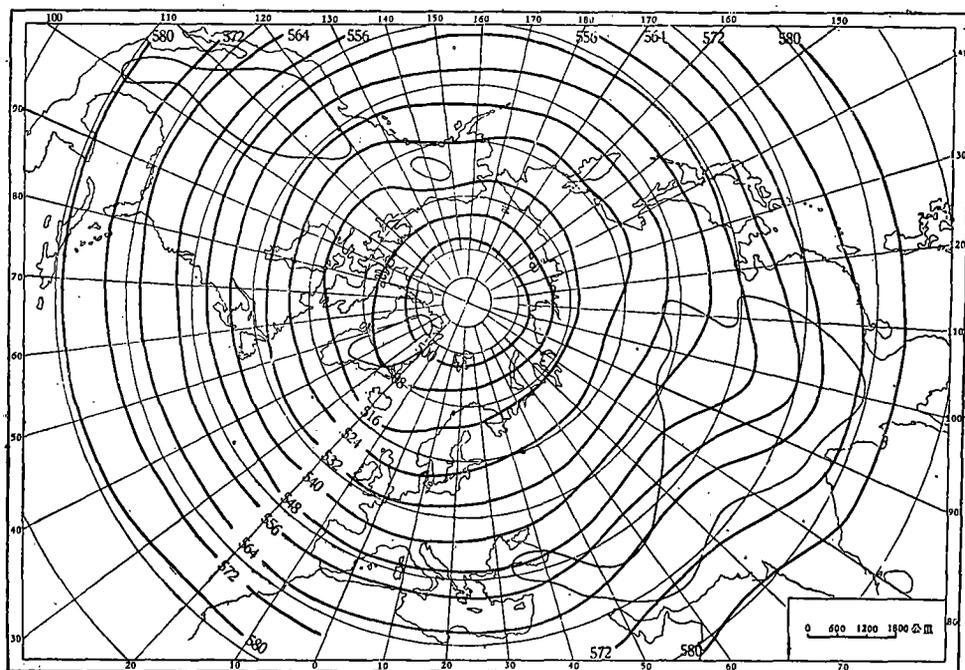


图 3 500 毫巴 24 小时地形扰动高度場(說明同图 2)

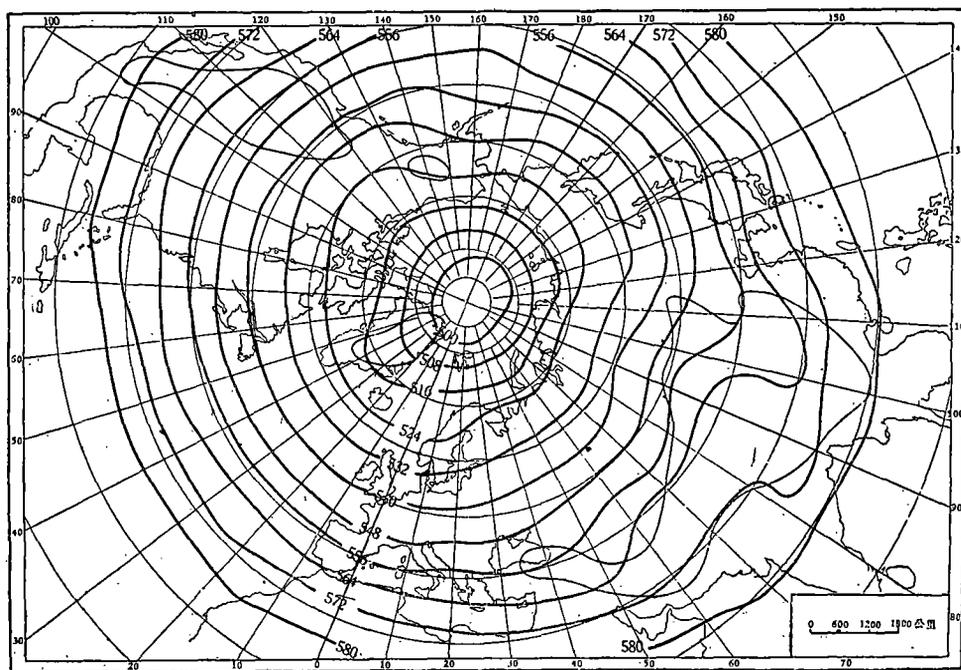


图 4 500 毫巴 36 小时地形扰动高度場(說明同图 2)

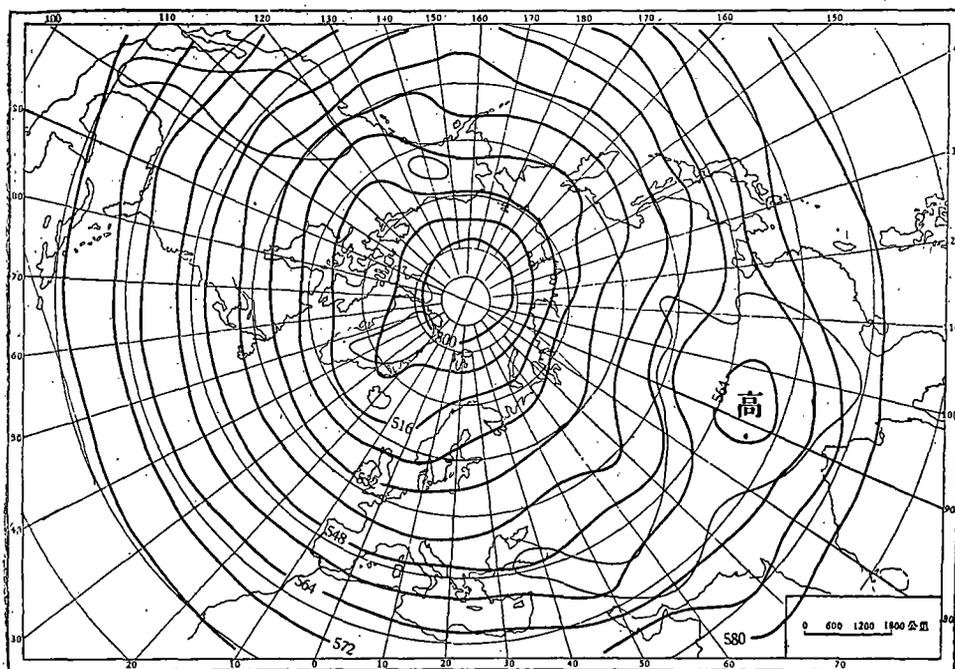


图5 500毫巴48小时地形扰动高度场(说明同图2)

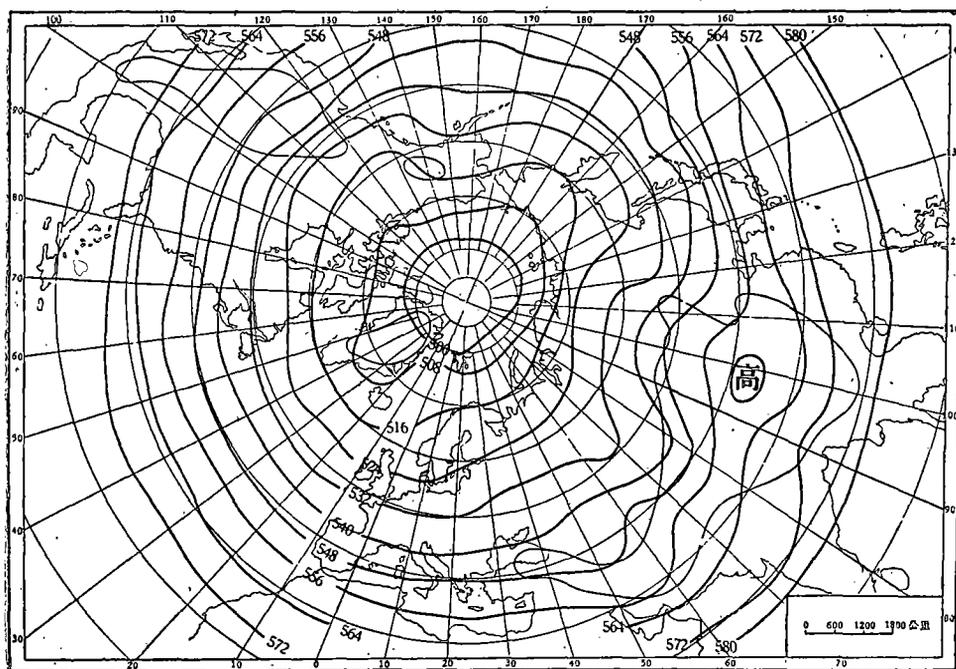


图6 500毫巴60小时地形扰动高度场(说明同图2)

应用文献[1,2]所提三层模式(1000, 500 及 300 毫巴)对上述理想场在苏联科学院快速电子计算机 БЭСМ-1 上进行了 60 小时以上地形影响过程的计算(对于辅助函数 ζ 的初始场, 同样还利用了 700 及 100 毫巴等压面纬圈平均高度值)。以下我们给出每隔 12 小时的 500 毫巴等高线分布(图 2—6)。由图 2—6 可以看到纬圈环流在地形作用下逐渐破坏, 在 12 小时时青藏高原东部已有槽线呈东北西南向的地形扰动槽形成, 而高原西部的扰动脊仅在 24 小时后才较为显著。24 小时后地形槽脊的振幅加大, 并有缓慢东移的趋势; 高原扰动槽的北部移速较快, 与其南部逐渐分离, 至 36 小时北部槽已移至堪察加半岛; 之后, 振幅加大并稳定于东经 140° — 150° 区域, 这与东亚大槽冬季平均位置较为相近。36 小时后高原地区上空开始有绕流现象出现, 纬向环流分成南北两支。48 小时分支现象更为显著, 并在高原上空形成反气旋闭合环流。60 小时后环流始呈相对稳定状态。此时, 在半球范围内形成四个低压槽, 其中阿留申低槽与乌拉尔槽在强度与位置上都与冬季环流平均状态较为接近, 而北美槽在强度上远为不够, 估计这一方面由于模式中未引入摩擦项, 使青藏高原扰动影响无阻尼地向下游传播, 以致削弱落基山的地形作用。其次, 由于落基山呈狭长条状, 其宽度与纬向网格相差不多, 使地形差分坡度不能真实描写落基山对气流的强迫抬升作用所致。

在 300 毫巴等压面上, 同样有地形扰动槽脊形成, 但波幅远较 500 毫巴面为小, 且高原地区的绕流现象已不甚显著, 60 小时后基本上仍保持纬向环流的特征。虽然如此, 从纬向剖面图上仍可清晰地看出地形扰动槽脊发展的情况。

地面气压场变化过程较高空远为迅速和剧烈, 在 12 小时的图上高原东部已有地形气旋形成, 而在其西部则为地形高压, 之后该高压加强发展并向东北伸展, 至 60 小时整个高原区已为高压控制, 仅在我国东南沿海一带尚残留一低压区。在落基山和格陵兰有类似现象。前面已经提到地面初始场存在着东西风带, 其分界线恰在高原中部, 低纬东风而高纬西风, 这种情况有助于地面高压的迅速形成和发展。这些系统处于地形之下, 显然是没有实际意义的。

为了更清晰地了解地形对气压场扰动的影响过程, 特别是青藏高原的作用, 我们沿北纬 35° (大致为高原长轴的位置) 作出等压面高度和厚度的分布曲线(图 7)。图中实线为等压线, 虚线为厚度线, 在纵轴上标有相应各曲线的高度值(千米), 图下缘为地形廓线。分析图 7 可以得出下列几点:

一、地形对大气动力扰动影响系自西而东向下游传播。从图 7 中 III 可以看到 12 小时后动力扰动影响已扩及地形下游西经 140° 地区; 相反, 在高原的上游(即东经 50° 以西)地形影响却为零。

二、扰动影响向上传播。对流层上部地形槽脊的发展过程落后于对流层下部。

三、在起始阶段(24 小时)地形扰动的槽脊位置自地面至高空皆系向风坡为脊区, 背风坡为槽区。此后, 该地形槽缓慢东移并减弱, 而在其下游有新的槽脊形成。至 60 小时, 高原区由最初的一槽一脊发展为三槽二脊。

四、地形扰动槽脊的垂直轴向西倾斜, 最初 300 毫巴地形槽脊与地面系统的位相差约为 10—20 个经度。扰动振幅由地面至对流层中部迅速减小。

五、在起始阶段, 地形扰动所引起的温度波(图 7 中 I—II)与对流层上部气压场扰动

波位相适相反,大致是向风坡的上升运动伴随着降温,而背风坡的下沉运动引起增温所致。之后,由于大气本身的斜压性发展,使温度波振幅加大并东移;至60小时温度波与300及500毫巴槽脊位相已基本一致。

六、地形扰动过程的持续性较久。可以认为,大致在48小时后才趋于相对稳定状态。

綜上所述,可以看出地形作用的考虑不但能提高短期数值预报的准确率,而且,由于地形扰动过程的时滞性,其累积作用对24小时以上的大型天气过程将更为显著。其次,試驗結果亦表明了模式中所取边界条件的基本适用性。

在实际大气中,由于气流与地形的相对位置,并非如理想场与地形间的单调关系,且随时间变化亦较大。因此,虽然地形的存在在地理位置上是恒定的,但作为对气流的扰动源而言,则其分布显然要复杂得多,且与时间有关。在应用斜压模式作环流形势预报时(考虑了地形影响),在数值上地形区域并无恒定的变高分布,可能与上述原因有关。

試驗結果同时也表明,更进一步的讨论地形扰动过程必须在对流层下部选取较多的层次。这样,首先可使内插求得的地形表面水平风速更接近实际,而避免气压扰动振幅由于不合适的内插而引起的虚假发展(特别是海平面气压场)。其次,图8给出了在两种不同水平网格距下求得的地形纬向差分坡度 $\frac{\Delta h}{\Delta \lambda}$ 的纬圈分布,由曲线的幅度可以看到,在中纬度不论是西藏高原地区,或者是落基山地带,由小网格距求得的地形差分纬向坡度的数值,普遍小于以大网格求得的坡度(最大差达300%)。在个别地区甚至符

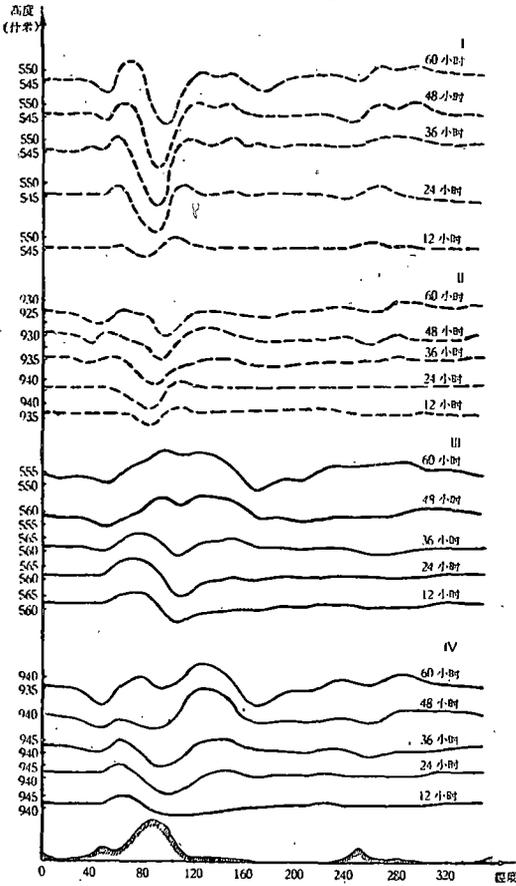


图7 地形扰动高度及温度的纬圈分布 ($\varphi = 35^\circ$)

I. OT_{1000}^{500} 曲线的发展过程, II. OT_{300}^{300} 曲线的发展过程,
III. 500毫巴等压线的演变 IV. 300毫巴等压线的演变

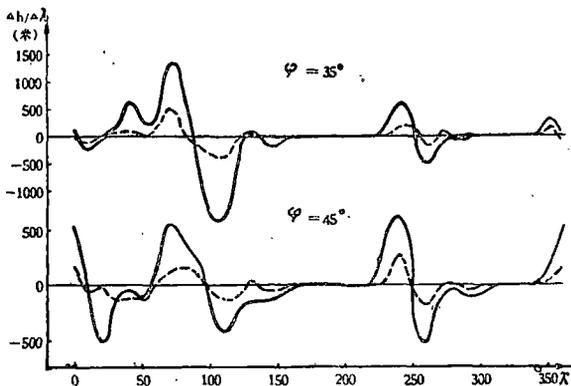


图8 地形纬向差分坡度的纬圈分布 (实线为 $\Delta \lambda = 20^\circ$, 虚线为 $\Delta \lambda = 10^\circ$)

号亦相反。即在大网格下为上坡,而小网格情况下却为下坡,或則相反。由此可見,必須縮小山区的水平网格距(或用小网格計算出的差分坡度場来代替地形高度場)。这样,使地形的差分坡度接近于实际。除此而外,对于模式本身而言,不論是从問題的物理性考虑,还是从数学处理方面来考虑,都包含着有待改进和研究的問題。

参 考 文 献

- [1] Чжу Юнь-ти (朱永禛), "Об учете динамического влияния горных массивов в нелинейной задаче долгосрочного прогноза, метеозлементов". *Изв. АН СССР сер. геофиз.* № 12, 1959.
- [2] 朱永禛, 球坐标三层模式的一个非綫性預报, *气象学报*, 31 (1961), 216—233.
- [3] Мусаелян Ш. А., "Пространственная задача обтекания неровностей земной поверхности с учетом сферичности Земли" *Докл. АН СССР*. т. 103, № 2, 1955.
- [4] Курбаткин Г. П., "Влияние крупных орографических препятствий на Западно-восточный поток" *Изв. АН СССР сер. геофиз.* № 2, 1958.
- [5] Chu P. C. (朱抱真), "The steady perturbations of the westerlies by large-scale heat sources and Earth's orography". *Sci. Record, new ser.*, 1, No. 3. 1957.
- [6] Chao J. P. (巢紀平), "The 3-dimensional orographically produced finite perturbations in a baroclinic westerlies" *Sci. Sinica* V. 6, 1957.
- [7] Белоусов С. Л. и Быков В. В., "Об учете влияния гор при прогнозе барического поля" *Изв. АН СССР сер. геофиз.* № 9, 1957.
- [8] 杜行远, "Пространственная задача численного прогноза барического поля с учетом влияния высокогорных плато" *Тр. ГГО* вып. 99, 1959.
- [9] Berkofsky L. and Bertoni E. A., "Mean topographic charts for the entire hemisphere". *Bull. Am. Met. Soc.*, V. 36, 7, 1955.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ О ПРОЦЕССЕ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В БАРОКЛИННОЙ АТМОСФЕРЕ*

Чжу Юнь-ти

(Институт ГеоФизики АН КНР)

Резюме

В данной работе изложены результаты расчета, полученные в применении трехуровневой модели с учетом орографий и показывающие процесс развития атмосферной циркуляции под воздействием горных массивов в течение 60 часов (в качестве начального состояния принимается зональный поток).

В результатах обнаружена некоторая замедленность влияния орографических возмущений на воздушный поток (после начала воздействия спустя 48 часов процесс возмущений стремится к относительно постоянному состоянию); а также заметно выражено явление обтекания Тибетского плато зональным потоком. Далее, вычисленное положение ложбин и гребней, образуемых под воздействием орографий, в основном совпадает с их фактическим средним распределением. Это показывает, что выбранное нами в модели граничное условие в основном оказывается приемлемым.

* Часть данной работы была выполнена в Институте прикладной геофизики АН СССР под руководством чл.-корр. Е. Н. Блиновой в 1960 г.