

УДК 523.53

ГЕОФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР В. В. ФЕДЫНСКИЙ,
Б. Л. КАЩЕЕВ, В. А. НЕЧИТАЙЛЕНКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРА ПРЕИМУЩЕСТВЕННОГО ВЕТРА ПО РАДИОНАБЛЮДЕНИЯМ МЕТЕОРОВ

Радионаблюдения метеоров являются единственным эффективным методом, позволяющим проводить систематические исследования атмосферных течений на высоте 80—110 км в различных пунктах земного шара, поскольку дрейф метеорных следов практически совпадает с движением нейтральной атмосферы. При интерпретации этих наблюдений на основании метеорных, а также ракетных измерений принято считать, что движение атмосферы на средних широтах происходит в основном в горизонтальном направлении. Это предположение вряд ли можно постулировать при изучении верхней атмосферы в районе экватора, где следует ожидать также наличия значительных вертикальных перемещений воздушных масс. Поэтому необходимо тщательно рассмотреть условия вычисления как горизонтальной, так и вертикальной составляющих вектора дрейфа метеорных следов.

В 1968—1970 гг. в Республике Сомали (Могадишо, 2° N, 45° E) работала Советская экваториальная метеорная экспедиция АН СССР (¹). Применялся азимутальный метод изучения ветра (^{2, 3}). В одном из азимутальных направлений амплитудно-фазовым методом (⁴) регулярно определялась высота отражающих точек регистрируемых метеорных следов.

Соотношения для определения величины и направления скорости ветра по радионаблюдениям дрейфа метеорных следов в работе (³) получены в предположении квазигоризонтальности дрейфа и пренебрежении статистическим уменьшением измеряемой горизонтальной составляющей скорости ветра (v_r) вследствие конечной ширины диаграмм направленности антенн. Более строгое решение этой задачи с учетом статистических характеристик радиолокационной аппаратуры, используемой для наблюдения метеоров, получено в (⁵).

Визуальные и фотографические наблюдения метеорных и искусственных светящихся образований, создаваемых с помощью геофизических ракет, выявили значительные вертикальные градиенты скорости горизонтального переноса этих объектов. Теоретический анализ и эксперименты, проведенные в Харьковском политехническом институте, позволили установить (⁶), что средние значения высоты регистрации метеоров являются некоторой функцией азимута (рис. 1).

Можно показать, что при отсутствии вертикального переноса и наличии градиента горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте (⁵) вычисленное значение вертикальной составляющей

$$v_B = \sum_{m=1}^M v_{r\text{ср}} / (M k_B), \quad (1)$$

где $v_{r\text{ср}}$ — среднее выборочное значение радиальной составляющей дрейфа в m -ом направлении,

$$k_B = \int_0^{1/2\pi} W(\varepsilon) \sin \varepsilon d\varepsilon,$$

ε — угол возвышения, $W(\varepsilon)$ — одномерный закон распределения случайной величины ε , M — число фиксированных направлений, будет в общем случае отличным от нуля.

Пусть $h(\theta) = h_0 - \Delta h \cos(\theta - \theta_h)$, где θ_h — азимут линии наибольшего наклона плоскости, проходящей через отражающие точки с высотами $h(\theta)$, Δh — амплитуда отклонения высоты, а зависимость горизонтальной составляющей скорости ветра от высоты

$$v_r(h) = v_0 + \Delta v(h - h_0).$$

Для простоты положим

$$v_0 = 0, \quad W(\varepsilon) = \delta(1/2\pi - \varepsilon), \quad W(\theta) = \delta(\theta_m), \quad (2)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция. В этом случае математическое ожидание величины радиальной составляющей скорости в любом из m направлений определяется соотношением

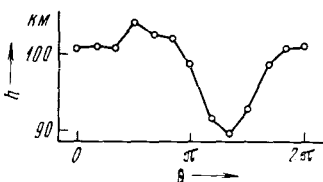
$$v_{rm} = [v_0 - \Delta v \Delta h \cos(\theta_m - \theta_h)] \times \times \cos(\theta_m - \theta_0) \sin z_0,$$

где θ_m — азимут m -го направления.

При расчете по формуле (1) получаем

$$v_b = -1/2 \Delta h \Delta v \operatorname{tg} z_0 \cos(\theta_h - \theta_0).$$

Рис. 1. Зависимость вычисленного значения средней высоты h отражающих точек от азимута; 12^h, март



На практике вследствие конечной ширины диаграммы направленности, ограниченной и непостоянной статистики по направлениям, а также того, что высоты являются

некоторыми случайными величинами, вычисленное значение v_b — также случайная величина.

На рис. 2 приведены распределения v_b , полученные по методу Монте-Карло. В основу построения исходной модели для вычисления индивидуальных значений радиальных составляющих v_{ri} положены известные статистические характеристики комплекса регистрируемых отражений до $+7^m$ и параметры метеорной РЛС «Тропик» (⁶). Статистика N_m по направлениям имеет распределение, близкое к пуассоновскому с математическим ожиданием $N_{mat} = 18$. В качестве одномерного закона распределения регистрируемых высот приняты экспериментально полученные распределения $W(h_i)$, при этом оценки h_0 соответствуют полученным в (7), а стандартное отклонение высоты $\sigma_h = 7$ км. Заданные значения Δh , Δv , v_0 составляли 5 км, 3 м/(сек·км) и 50 м/сек соответственно.

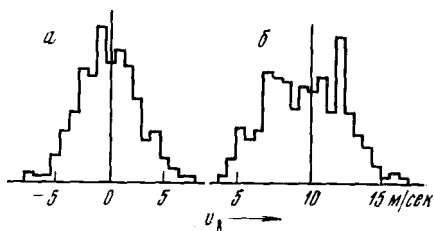


Рис. 2. Гистограммы распределения v_b : а — $\theta_0 - \theta_h = 1/2\pi$, б — $\theta_0 - \theta_h = \pi$; $N \approx 300$

Из формулы (1) и полученных по методу Монте-Карло распределений следует, что когда направления ветра θ_0 и линии наибольшего наклона θ_h взаимно перпендикулярны, полученная по формуле (1) оценка v_b является несмещенной со стандартным отклонением около 2,5 м/сек. В случае, когда θ_0 и θ_h либо совпадают, либо противоположны, смещение оценки стремится по вероятности к величине

$$|\Delta v_b| = \frac{1}{2} \Delta h \Delta v \frac{k_r}{k_b}, \quad k_r = \int_0^{1/2\pi} W(\varepsilon) \cos \varepsilon d\varepsilon. \quad (3)$$

Таким образом, значения вертикальной составляющей вектора ветра в метеорной зоне, полученные в результате статистической обработки экспериментального материала, отягощены погрешностями и не отражают действительного переноса воздушных масс на высотах 80—110 км.

Для определения параметров вектора преимущественного ветра следовало бы задаться некоторой общей моделью, с параметрами, число которых достаточно для описания процесса с требуемой точностью, а затем из экспериментального материала методом максимального правдоподобия определить оптимальные значения этих параметров. Однако малая информативность исходного наблюдательного материала делает такие оценки малонадежными. Значительно больший практический интерес имеет задача получения оценок вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра (v_r и v_b) и величины вертикального градиента горизонтальной составляющей из упрощенной модели со следующими параметрами:

$$v_b = \text{const}, \quad v_r = v_0 + \Delta v(h - h_0), \quad \theta_0 = \text{const},$$

где v_0 — величина горизонтальной составляющей на высоте h_0 , Δv — градиент горизонтальной составляющей.

Можно показать, что смещение оценки θ_0 , определенной из формулы (5),

$$\text{tg } \theta_0 = \left(\sum_{m=1}^M v_{r\text{мсп}} \sin \theta_m \right) / \left(\sum_{m=1}^M v_{r\text{мсп}} \cos \theta_m \right), \quad (4)$$

по вероятности стремится к нулю и не зависит от величины и знака градиента скорости, что позволяет использовать ее для расчета θ_0 при оптимизации параметров рассматриваемой нами модели.

На практике мы имеем дело в общем случае с зависимостью $h(\theta)$ довольно сложного вида. Представим ее в виде ряда Фурье

$$h(\theta) = h_0 - \sum_{i=1}^{\infty} \Delta h_i \cos(i\theta - \theta_{hi}) \quad (5)$$

и вычислим смещение оценки на идеализированной модели, рассмотренной выше. В этом случае для математического ожидания величины радиальной составляющей скорости в любом из m направлений имеем

$$v_{rm} = \left[v_0 - \Delta v \sum_{i=1}^{\infty} \Delta h_i \cos(i\theta_m - \theta_{hi}) \right] \cos(\theta_m - \theta_0) \sin z_0. \quad (6)$$

После подстановки (6) в (1) и соответствующих преобразований получаем

$$v_b = -1/2 \Delta v \Delta h_1 \text{tg } z_0 \cos(\theta_0 - \theta_{h1}), \quad (7)$$

откуда следует, что на величину и знак смещения оценки v_b влияет только первая гармоника разложения $h(\theta)$ в ряд Фурье. Этот результат имеет достаточно очевидное физическое объяснение и позволяет значительно уточнить вид оптимизируемой по результатам эксперимента зависимости. В этом случае для суммы квадратов отклонений величины $v_{r\text{мсп}}$ имеем

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \{ [v_0 - \Delta v \Delta h_1 \cos(\theta_m - \theta_{h1})] \cos(\theta_m - \theta_0) k_r k_0 + v_b k_b - v_{r\text{мсп}} \}^2,$$

где Δh_1 и θ_{h1} — амплитуда и фаза первой гармоники функции $h(\theta)$,

$$k_0 = \int_{1/2\pi}^{1/2\pi} W(\theta_i) \cos \theta_i d\theta_i,$$

$W(\theta_i)$ — одномерный закон распределения величины θ_i .

Минимизируя Q по v_0 , Δv и v_b , получаем следующие расчетные соотношения:

$$v_0 = 2 \sum_{m=1}^M v_{rmp} \cos(\theta_m - \theta_0) / (M k_r k_0); \quad (8a)$$

$$v_b = \sum_{m=1}^M v_{rmp} / (M k_b) + \frac{1}{2} \frac{k_r}{k_b} \Delta v \Delta h_1 \cos(\theta_0 - \theta_{h1}); \quad (8б)$$

$$\Delta v = \frac{4 \cos(\theta_0 - \theta_{h1}) \sum_{m=1}^M v_{rmp} - 8 \sum_{m=1}^M v_{rmp} \cos(\theta_m - \theta_0) \cos(\theta_m - \theta_{h1})}{M \Delta h_1 k_r k_b}. \quad (8в)$$

Азимут горизонтальной составляющей ветра находится по формуле (4).

Значение величины v_0 относится к высоте h_0 , определенной из разложения $h(\theta)$. Легко показать, что расчетные формулы для v_r и v_b работы

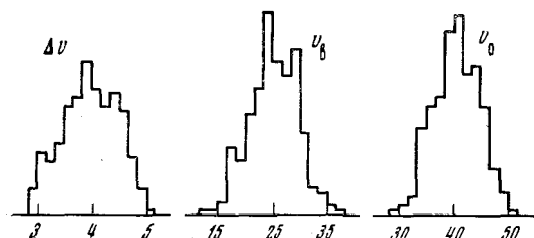


Рис. 3. Гистограммы распределения Δv , v_b и v_0

(⁵) являются частным случаем формул (8а, б), т. е. при равенстве либо Δv , либо Δh нулю вычисленное значение Δv и второй член в формуле (8б) по вероятности стремятся к нулю. На рис. 3 приведены распределения Δv , v_b и v_0 , полученные по методу Монте-Карло на описанной модели. Заданные в модели Δv , v_b и v_0 равны 4 м/(сек·км), 25 м/сек и 40 м/сек соответственно. Как следует из результатов (⁷), точность определения h_0 , Δh_1 и θ_{h1} такова, что смещение оценок не превышает величины их выборочного стандарта.

Харьковский политехнический
институт

Поступило
25 VIII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ П. Б. Бабаджанов, Б. В. Кальченко и др., Вестн. АН СССР, 9, 32 (1970).
² L. A. Manning, O. G. Villard, A. M. Peterson, Proc. IRE, 38, 877 (1950).
³ L. A. Manning et al., J. Geophys. Res., 59, 47 (1954). ⁴ Б. С. Дудник, Геофизич. бюлл., 17, 62 (1966). ⁵ Б. Л. Кащеев, Н. Д. Верба и др., Геомагнетизм и аэронавигация, 11, 176 (1971). ⁶ P. B. Babadjanov, B. V. Kalchenko, B. L. Kashcheyev, V. A. Nechitailenko, Intern. Assoc. of Geomagn. and Aeronomy, № 26, Paris, 1969, p. 2. ⁷ Б. Л. Кащеев, Н. В. Новоселова, Астрономический циркуляр, АН СССР, Бюро астрон. сообщ., № 608 (1971).