

удк 551.513.22

Ю. А. Семенова [Y. A. Semenova],
Р. Г. Закинян [R. G. Zakinyan]

ГОДОГРАФ ВЕТРА ВО ВЛАЖНОЙ АТМОСФЕРЕ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАБЛЮДАЕМЫХ СКОРОСТЯХ ВЕТРА

Hodograph of a Wind in the Damp Atmosphere and its Change at the Various Observable Wind Speeds

В данной статье исследована динамика ветра в пограничном слое влажной атмосферы и показано изменение годографа ветра при различных синоптических ситуациях.

Ключевые слова: спираль Экмана, прогноз скорости ветра, влажность.

In the present work the wind dynamics in the interface of the damp atmosphere is investigated and change of a hodograph of a wind is shown at various synoptic situations.

Key words: Ekman's spiral, forecast of speed of a wind, humidity.

Как известно, влажность оказывает влияние на движение воздуха, замедляя его. В [1] мы уже исследовали изменение профиля скорости ветра в пограничном слое атмосферы с учетом изменения давления вдоль параллели и меридиана. Далее покажем зависимость профиля ветра от влажности. Для этого уравнение движения, как и в [1], представим в виде:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{il}{\nu} c = \frac{1}{\rho_i \nu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} i + \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где ρ_i — плотность рассматриваемой влажной воздушной частицы. Плотность представим в следующем виде:

$$\rho_i = \rho_e (1 - \alpha \Delta T - \beta \Delta s),$$

где $\Delta T = T_i - T_e = T_{i0} - \gamma_a z - T_{e0} + \gamma_1 x + \gamma_2 y$ (γ_1, γ_2 — изменение температуры вдоль параллели и меридиана);

$\Delta s = s_i - s_e = s_i - s_{e0} + b_1 x + b_2 y = \Delta_0 s + b_1 x + b_2 y$ (b_1, b_2 — градиент массовой доли водяного пара по параллели и меридиану). Заметим, что плотность изменяется как по горизонтали, так и по вертикали $\rho_e = \rho_0 e^{-\sigma}$, где $\sigma = \frac{\gamma_a - \gamma}{T}$. С учетом последних выражений получим

$$\rho_i = \rho_0 e^{-\sigma} (1 - \alpha(T_{i0} - \gamma_a z - T_{e0}) - \beta \Delta_0 s - \alpha(\gamma_1 x + \gamma_2 y) - \beta(b_1 x + b_2 y)). \quad (2)$$

Аналогично решению, рассмотренному в [1], решение уравнения (1) будем искать в виде $c = c_0 + c_1$, где решение однородного уравнения

$$c_0 = C_1 e^{(1+i)kz} + C_2 e^{-(1+i)kz}, \quad (3)$$

а решение неоднородного уравнения

$$c_1 = A(z) e^{(1+i)kz} + B(z) e^{-(1+i)kz}. \quad (4)$$

Далее составим систему для нахождения постоянных в (4):

$$\begin{cases} A'(z) e^{(1+i)kz} + B'(z) e^{-(1+i)kz} = 0 \\ A'(z) e^{(1+i)kz} - B'(z) e^{-(1+i)kz} = \frac{1}{\rho_i \nu k (1+i)} \left(\frac{\partial p}{\partial y} i + \frac{\partial p}{\partial x} \right), \end{cases} \quad (5)$$

выразим одну постоянную из первого уравнения системы (5):

$$B'(z) e^{-(1+i)kz} = -A'(z) e^{(1+i)kz}, \quad (6)$$

подставим во второе уравнение системы, получим

$$A' = \frac{e^{-(1+i)kz}}{2\rho_i \nu k (1+i)} \left(\frac{\partial p}{\partial y} i + \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (7)$$

Для начала найдем производные градиентов давления по параллели и меридиану, используя выражение для плотности (2) и учитывая закон Менделеева — Клайперона:

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}(RT\rho_i) = RT \frac{\partial}{\partial y} \rho_0 e^{-\sigma} (1 - \alpha(T_{i0} - \gamma_a z - T_{e0}) - \beta\Delta_0 s - \alpha(\gamma_1 x + \gamma_2 y) - \beta(b_1 x + b_2 y))$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -RT\rho_0 e^{-\sigma} (\alpha\gamma_2 + \beta b_2) - R\rho_0 e^{-\sigma} \gamma_2 = -R\rho_0 e^{-\sigma} (T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2), \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(RT\rho_i) = RT \frac{\partial}{\partial y} \rho_0 e^{-\sigma} (1 - \alpha(T_{i0} - \gamma_a z - T_{e0}) - \beta\Delta_0 s - \alpha(\gamma_1 x + \gamma_2 y) - \beta(b_1 x + b_2 y))$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -RT\rho_0 e^{-\sigma} (\alpha\gamma_1 + \beta b_1) - R\rho_0 e^{-\sigma} \gamma_1 = -R\rho_0 e^{-\sigma} (T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_1), \quad (9)$$

Подставим (8) и (9) выражение для плотности (2), в котором пренебрежем $1 - \alpha(T_{i0} - \gamma_a z - T_{e0}) - \beta\Delta_0 s - \alpha(\gamma_1 x + \gamma_2 y) - \beta(b_1 x + b_2 y) \approx 1$ в уравнение (7) и проинтегрируем

$$A = - \int_0^z \frac{e^{-(1+i)kz}}{2\nu k(1+i)} \cdot R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)i + (T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)] dz. \quad (10)$$

Получим

$$A = \frac{R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)i + (T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)]}{2\nu k^2(1+i)^2} \cdot (e^{-(1+i)kz} - 1) \quad (11)$$

Далее найдем постоянную B из уравнения (6)

$$B' = -A' e^{2(1+i)kz},$$

используя (10)

$$B = \int_0^z \frac{e^{-(1+i)kz}}{2\nu k(1+i)} \cdot R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)i + (T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)] dz.$$

Проинтегрируем последнее выражение:

$$B = \frac{R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)i + (T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)]}{2\nu k^2(1+i)^2} \cdot (e^{(1+i)kz} - 1). \quad (12)$$

Для удобства вычислений в уравнениях (11) и (12) сделаем замены

$$a = \frac{R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)i + (T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)]}{2\nu k^2(1+i)^2}.$$

Подставляя в неоднородное уравнение (4) выражения для постоянных (11) и (12), получим

$$c_1 = a(1 - e^{(1+i)kz}) + a(1 - e^{-(1+i)kz}) = a(2 - e^{(1+i)kz} - e^{-(1+i)kz}). \quad (13)$$

Общее решение для уравнения (1) с учетом (13) примет вид

$$c = c_0 + c_1, \\ c = C_1 e^{(1+i)kz} + C_2 e^{-(1+i)kz} + a(2 - e^{(1+i)kz} - e^{-(1+i)kz}). \quad (14)$$

Для нахождения констант C_1 и C_2 примем $C_1 = a$, получим

$$c = a e^{(1+i)kz} + C_2 e^{-(1+i)kz} + 2a - a e^{(1+i)kz} - a e^{-(1+i)kz} = C_2 e^{-(1+i)kz} + 2a - a e^{-(1+i)kz} \\ c = 2a + e^{-(1+i)kz}(C_2 - a). \quad (15)$$

Примем обращение скорости в ноль у поверхности земли:

$$0 = 2a + C_2 - a \text{ или } C_2 = -a.$$

Подставляя C_2 в (15), получим

$$c = 2a(1 - e^{-(1+i)kz}). \quad (16)$$

При обращении скорости в геострофическую при росте высоты в (15) получим

$$c_{gv} = 2a = u_{gv} + i v_{gv}.$$

Из последнего выражения видно

$$c_{gv} = 2a = \frac{R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)i + (T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)]}{\nu k^2(1+i)^2}$$

$$c_{gv} = \frac{2R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)i + (T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)]}{il} = \frac{2R[(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2) - i(T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)]}{\nu l},$$

или составляющие скорости геострофического ветра во влажной атмосфере равны:

$$u_{gv} = \frac{2R(T(\alpha\gamma_2 + \beta b_2) + \gamma_2)}{\nu l}, \quad v_{gv} = -\frac{2R(T(\alpha\gamma_1 + \beta b_1) + \gamma_1)}{\nu l}. \quad (17)$$

Из (17) видно, что составляющие скорости геострофического ветра во влажной атмосфере зависят от влажности и горизонтальных градиентов температур. Подставляя (17) в (16), получим

$$c = (u_{gv} + i v_{gv}) \left(1 - e^{-(1+i)kz}\right) = (u_{gv} + i v_{gv}) \left(1 - e^{-kz} (\cos kz - i \sin kz)\right). \quad (18)$$

Составляющие скорости из (18) равны

$$u_v = u_{gv} (1 - e^{-kz} \cos kz) - v_{gv} e^{-kz} \sin kz, \quad (19)$$

$$v_v = v_{gv} (1 - e^{-kz} \cos kz) + u_{gv} e^{-kz} \sin kz. \quad (20)$$

На рис. 1 изображены годографы ветра. Из рисунка видно, что угол наклона ветра к параллели полученных нами моделей значительно отличается от стандартной модели.

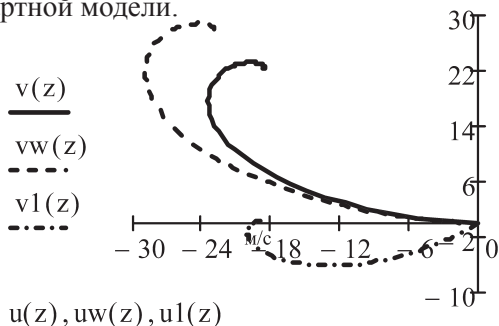


Рис. 1. Годографы ветра:

$P_2 = \frac{P}{P_0} = 70$ – построенный по стандартной модели Экмана, $v(z)$ и $vw(z)$ – для сухой и влажной атмосферы при различной ориентации изобар.

Найдем тангенс угла наклона касательной к графику функции

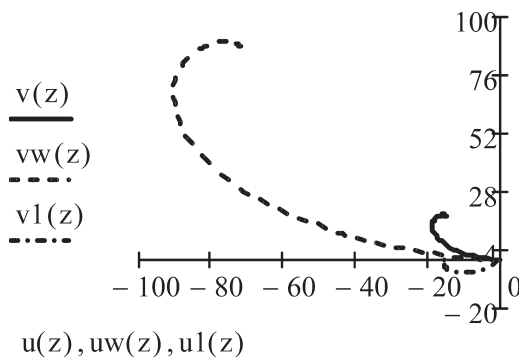
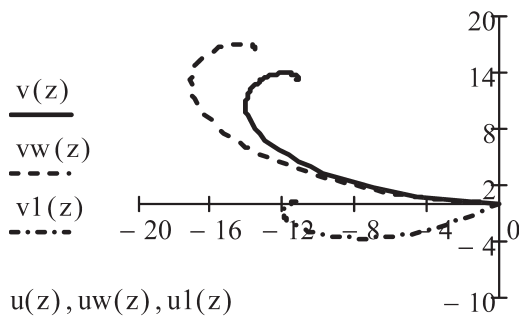
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_v}{u_v} = \frac{u_{gv} + v_{gv}}{u_{gv} - v_{gv}}. \quad (21)$$

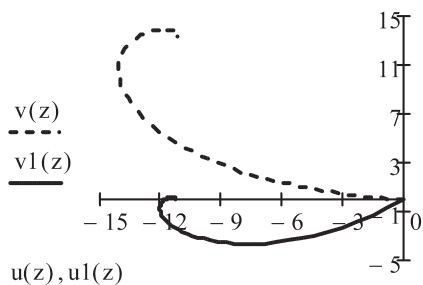
При движении влажного воздуха тангенс угла наклона зависит от горизонтальных градиентов температуры и влажности воздуха.

Для того чтобы оценить практическую значимость полученных моделей, сравним годографы ветра при различных синоптических ситуациях:

- 1) 16 апреля 2013 года — усиление ветра до 22 м/с.

Прогноз: в 00 часов ложбина южного циклона, небольшое усиление ветра до 15 м/с. В 12 часов у земли усиление взаимодействия южного циклона и юго-западной периферии антициклона.



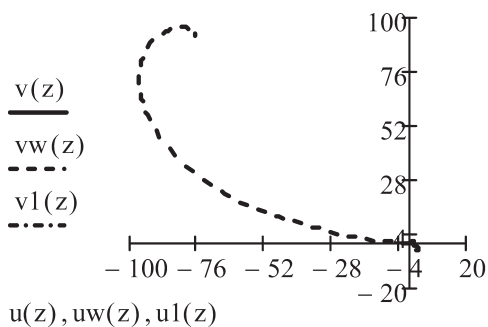


12 часов ВСВ — увеличенная стандартная и полученная нами при различной ориентации изобар модели.

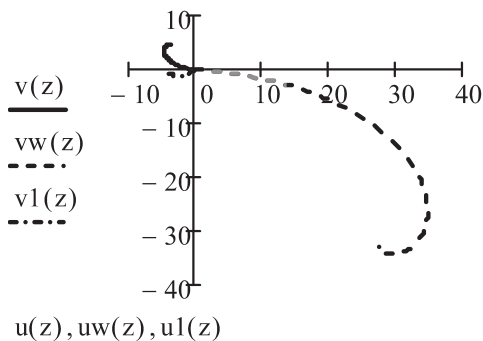
Фактически: максимальный порыв ветра составил за 00 часов ВСВ — 15 м/с, за 12 часов ВСВ — 16 — 22 м/с;

2) 23 марта 2013 года — усиление ветра до 18–22 м/с.

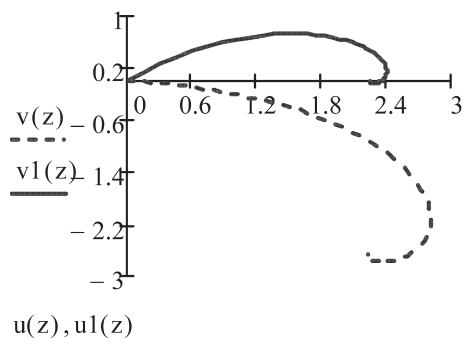
Прогноз: днем взаимодействие ложбины южного циклона и юго-западной периферии антициклона. Во второй вечером ослабление взаимодействия.



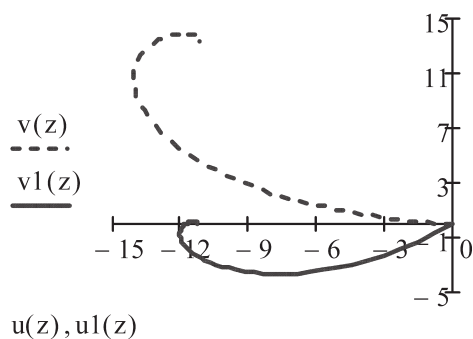
03 часа ВСВ



15 часа ВСВ



03 часов ВСВ — увеличенная стандартная и полученная нами при различной ориентации изобар модели.

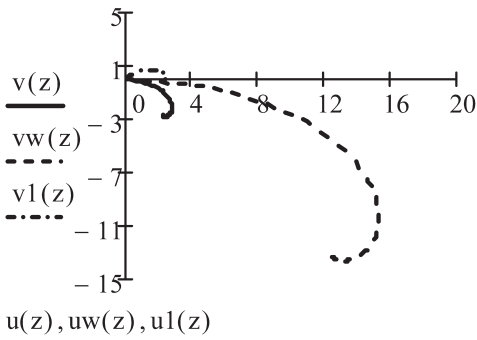


15 часов ВСВ — увеличенная стандартная и полученная нами при различной ориентации изобар модели.

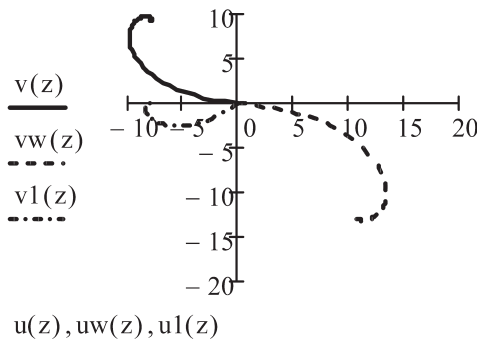
Фактически: на 03 часа ВСВ скорость ветра — 18–22 м/с, 15 часов ВСВ скорость — 15–18 м/с.

- 3) 30 апреля 2013 года — спокойная погода (скорость ветра менее 10 м/с)

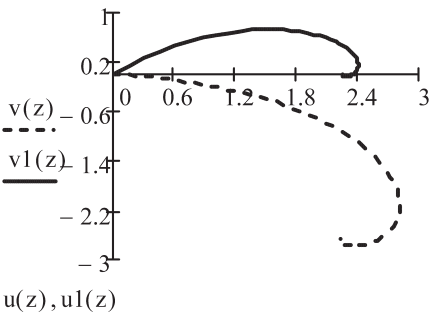
Прогноз: ночью за счет перемещения на территорию края циклона скорость ветра 5–10 м/с, днем — теплый сектор циклона у земли, скорость ветра 3–8 м/с.



00 часов ВСВ



12 часов ВСВ



00 часов ВСВ – увеличенная стандартная и полученная нами при различной ориентации изобар модели.

Фактически: 00 часов ВСВ скорость ветра 5–10 м/с, 12 часов ВСВ скорость ветра — 3–8 м/с.

Оценив полученные графики,
можно сделать следующие выводы:

В п. 1 и 2 видно, что годографы ветра, построенные для сухой атмосферы, плохо отражают усиление ветра до неблагоприятных отметок, тогда как годограф для влажной атмосферы достаточно хорошо улавливает это усиление. Но заметим, что слабый и умеренный ветер улавливает годограф и для сухой и для влажной атмосферы, а стандартный годограф недостаточно хорошо описывает такой ветер (п. 1 и 3).

Таким образом, можно сделать вывод о зависимости годографа от прогнозируемого ветра, а следовательно, полученную нами модель профиля ветра в пограничном слое атмосферы можно применять при прогнозировании скоростей ветра.

Данные предоставлены ФБГУ «Ставропольским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» по метеостанциям «Ставрополь» и «Дивное» (расстояние $1,38 \cdot 10^5$ м).

ЛИТЕРАТУРА 1. **Закинян Р. Г., Авакян К. С., Семенова Ю. А.** Развитие экмановской теории пограничного слоя атмосферы при различной ориентации изобар // Наука. Инновации. Технологии. №1. 2013. С. 26–29.

ОБ АВТОРАХ **Семенова Юлия Александровна**, ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт естественных наук, Кафедра теоретической физики, магистрант.

Semenova Yuliya Aleksandrovna, North Caucasus Federal University, Institute of Natural Sciences, Department of Theoretical Physics, master of physics.

E-mail **brilliance_wave@mail.ru.**

Закинян Роберт Гургенович, ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт естественных наук, кафедра теоретической физики, доктор физико-математических наук, профессор.

Zakinyan Robert Gurgenovich, North Caucasus Federal University, Institute of Natural Sciences, Department Theoretical Physics, Doctor of physical and mathematical sciences, professor.

E-mail **zakinyan@mail.ru.**