

УДК 551.515.3:551.55:551.510.522

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ПЕСЧАНЫХ БУРЯХ

Канд. физ.-мат. наук О.Е. Семенов

*Измерения скорости ветра на мачтах во время песчаных бурь выявило три типа ее профилей. Для слабых бурь характерно влияние на профили скорости ветра температурной стратификации. При умеренных бурях профили логарифмические, т.к. влияние термической стратификации на них становится несущественным. Профили ветра очень сильных бурь даже при изотермии оказываются подобными инверсионным из-за затраты пульсационной энергии на взвешивание частиц. Их можно аппроксимировать логарифмически линейной функцией, в которой внешним параметром подобия является масштаб Баренблатта - Голицына  $L_d$ . Для бури в Приаралье  $L_d$  оказался равным 12-18 м.*

Песчаные бури в Казахстане - широко распространенное природное явление, так как около четверти территории республики занимают песчаные пустыни. Бури - мощный источник поступления аэрозолей и атмосферу, они приводят в движение громадные массы песка, которые наступают на освоенные в сельскохозяйственном отношении земли, мешают работе транспорта и предприятий, влияют на изменение климата и здоровье людей. Экспериментальные исследования бурь в Казахстане начаты в конце 60-х годов. За это время накоплено много лабораторных и экспедиционных данных по механике этого явления природы. Наиболее изученными являются бури на высохшем дне Аральского моря [3] и в Прибалхашье [1].

Градиснтные измерения на метеорологических мачтах над подвижным песком во время бурь выполнялись более чем 15 экспедициями,

которые работали в Южном Прибалхашье и на осушенном дне Аральского моря. Измерения проводились над песками различной крупности в условиях как сложного рельефа (с барханами высотой до 1,5 м), так и ровными поверхностями. Дисперсный состав песков аппроксимировался логарифмически нормальным распределением частиц по размерам. Средний геометрический размер частиц песка  $x_0$  в местах проведения экспедиций в различные годы изменялся от 78 до 270 мкм, среднее квадратическое отклонение логарифмов размеров  $\sigma_{lgx}$  - от 0,09 до 0,15.

На 16-метровых метеорологических мачтах на высотах 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 9 и 16 м проводились измерения средней за 10 минут скорости ветра импульсными анемометрами. На этих же уровнях определялась переносимая ветром масса песка уловителями конструкции автора. Для расчета коэффициента турбулентности и локального числа Ричардсона выполнялись измерения температуры воздуха на уровне 2 м и ее градиента в слое 0,5-2 м. Изучалось также изменение с высотой дисперсного состава переносимых частиц песка. Перечисленный комплекс измерений позволял получать вертикальные профили скорости ветра и переносимой массы песка во время бурь, информацию об основных кинематических и динамических параметрах приземного слоя атмосферы, необходимых для анализа результатов измерений и понимания самого процесса переноса ветром твердой фазы потока. Наиболее ценные результаты получены в Аральском регионе, где одиннадцатью экспедициями выполнены исследования почти семидесяти бурь различной интенсивности, измерено свыше 800 профилей средней скорости потока и 140 профилей переноса массы песка.

Прежде чем перейти к анализу профилей скорости ветра, рассмотрим стратификацию приземного слоя атмосферы во время бурь. Для оценки устойчивости атмосферы обычно рассматривается роль вертикального потока тепла в процессе генерации турбулентной энергии и сравнивается вклад этого эффекта с поступлением энергии за счет градиента средней скорости. Для количественного определения степени устойчивости атмосферы можно использовать масштаб Монина-Обухова или число Ричардсона в градиентной форме

$$Ri = \frac{g}{\theta} \cdot \frac{\partial \theta / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2},$$

где  $\theta$  - потенциальная температура,  $g$  - ускорение свободного падения,  $u$  -

скорость ветра,  $z$  - высота. В приземном слое  $\partial u / \partial z = \partial T / \partial z$ , где  $T$  - абсолютная температура. Как известно, при устойчивой стратификации  $Ri > 0$ , при сверхadiaбатической (неустойчивой)  $Ri < 0$ , а условиям, близким к безразличной стратификации, соответствуют значения  $|Ri| \leq 0,03$ .

Как показали наши наблюдения, слабые процессы переноса песка ветром могут наблюдаться в различно стратифицированном потоке. С увеличением интенсивности бурь, когда значения динамической скорости и. превышали 0,35 - 0,40 м/с в подавляющем числе случаев влияние температурной стратификации на поток оказывалось несущественным, так как наблюдались условия, близкие к безразличной стратификации. Рассчитанное для высоты 1 м локальное число Ричардсона было меньше 0,03 (рис. 1).

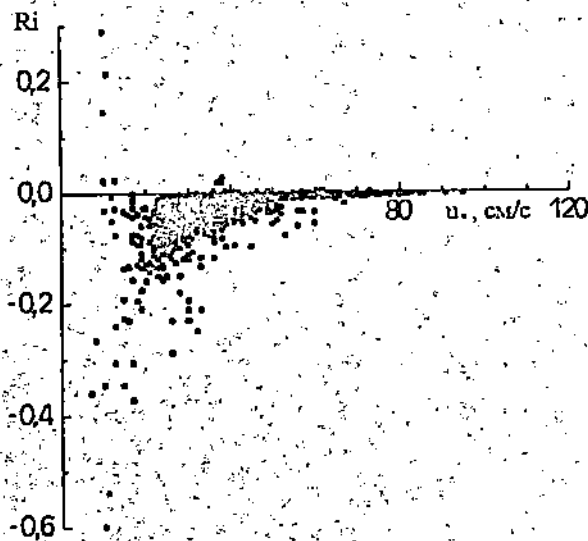


Рис.1. Изменение стратификации приземного слоя атмосферы при песчаных бурях с ростом динамической скорости потока в Приаралье

Это явление объясняется двумя физическими процессами. Как известно, с ростом скорости ветра роль потока тепла на генерирование турбулентной энергии быстро падает. Вторая причина связана эффектом нагревания слоя воздуха, насыщенного аэрозолем, как счет сильного поглощения солнечной радиации, так и передачи тепла воздуху от частиц песка, поднимаемых с горячей подстилающей поверхности. Происходит повышение

кальция до 80 мг/л, при уменьшении суммы натрия и калия до 40 мг/л.

При нарушенном гидрологическом режиме в этих показателях произошли коренные изменения. Например, в зимнюю межень в указанном створе резко возросли показатели сульфатов и хлоридов, соответственно до 1300 и 1500 мг/л при относительной стабильности гидрокарбонатов 220 мг/л. Общая минерализация достигла 4000 мг/л. При этом в катионном составе резко возрастает содержание магния до 420 мг/л, кальция - до 300 мг/л при резком уменьшении суммы натрия и калия (30 мг/л). Причем ранее малозначимые азотные и фосфорные группы (биогены) становятся более осязаемыми. В створе ГП Уланбель произошедшие изменения аналогичны. При показателе общей минерализации зимой 4700 мг/л, наблюдается некоторое уменьшение хлоридов (1340 мг/л) и возрастание сульфатов до 1630 мг/л. В катионном составе при постоянстве кальция (300 мг/л) резко возрастает сумма натрия и калия (до 860 мг/л), наблюдается снижение содержания магния до 320 мг/л. Очевидно, это объясняется сбросом возвратных вод с орошаемых массивов и выклиниванием в зоне гидравлической связи поверхностных и грунтовых вод. В створе ГП свх. Амангельды изменение гидрохимического режима в половодье характеризуется следующим образом.

Увеличение общей минерализации произошло более чем в 2 раза, по сравнению с условно-естественным периодом гидрологического режима, и достигло 1080 мг/л. Резко возросло содержание суммы натрия и калия (190 мг/л) при некотором росте кальция и магния (48 и 62 мг/л). Рост наблюдается в содержаниях сульфатов до 415 мг/л и хлоридов до 94 мг/л. Содержание карбонатов 240 мг/л. Створ ГП Уланбель характеризуется минерализацией до 1750 мг/л. Содержание сульфатов - до 600 мг/л, хлоридов - до 390 мг/л, при показателе гидрокарбонатности 280 мг/л. Необходимо подчеркнуть, что наравне с изменением гидрохимического режима реки Шу также наблюдается загрязнение водотока инородными ингредиентами - ионами тяжелых металлов (медь, цинк). Из всего перечня загрязнителей ни один из них не входит в список генетической принадлежности речному бассейну, т.е. все они имеют антропогенное происхождение.

В последнее время основными загрязнителями стока реки стали азот аммонийный ( $\text{NH}_4$ ), азот нитратный ( $\text{NO}_3$ ), азот нитритный

*Замечание*  
71

высота измерения скорости. И это вполне ясно, так как в приземном слое наблюдаются условия нейтральной термической стратификации. Но, в отличие от чистых воздушных потоков, в ветропесчаном параметр шероховатости поверхности является переменной величиной и его значения изменяется с ростом скорости от  $10^{-4}$  до 1 см, т.е. на четыре порядка (рис.3)[6].

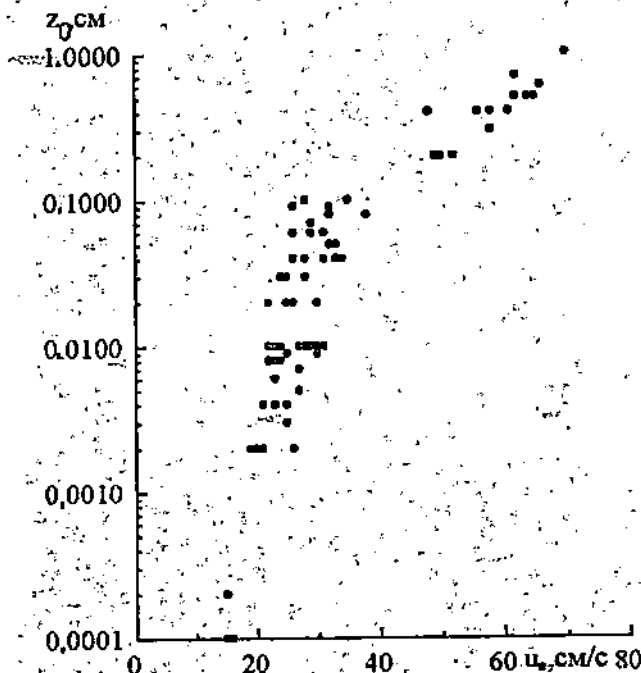


Рис.3. Изменение параметра шероховатости  $z_0$  песчаной поверхности при бурях во время экспедиции 1991 года

Такое поведение  $z_0$  характерно, как известно, также и для взволнованной морской поверхности при штормах. Большая изменчивость  $z_0$  приводит к нелинейной зависимости  $u(z) = f(u)$ , так как в уравнении (1)  $\ln(z/z_0)$  становится переменной величиной.

В 1992 году исследования профилей ветра проводились не только на мачте, но и методом акустического зондирования. Измерения на содаре "Латан 1" выполняли сотрудники Института космических исследований АН Казахстана под руководством В.Ф. Крамара [5]. Высотный диапазон зондирования акустического локаатора от 30 до 800 м, но в условиях бурь достаточно надежные профили удалось получить только до уровня 180 м

при скоростях ветра до 12-15 м/с. Наличие частиц твердой фазы в потоке значительно снизило высоту зондирования вследствие ослабления полезного сигнала из-за рассеивания звуковых волн на аэрозолях. При больших скоростях ветра (> 15 м/с) полезный сигнал терялся на фоне собственных акустических шумов антенн лоатора. Оба эти фактора ограничивают применение содаров для исследования пограничного слоя атмосферы во время сильных бурь.

На рис.4 приведены примеры двух профилей скорости ветра, полученных путем шивки измерений анемометров и содара. Результаты измерений лоатора были осреднены за 10-минутные интервалы времени синхронно с показаниями анемометров. На рисунке видно, что результаты измерений хорошо согласуются до высот 50 - 75 м, выше, из-за слабого уровня сигнала, значительно возрастают случайные погрешности измерений содара. Но можно достаточно уверенно считать, что при скоростях ветра до 12-15 м/с в условиях безразличной стратификации профиль логарифмический во всей толще приземного слоя атмосферы.

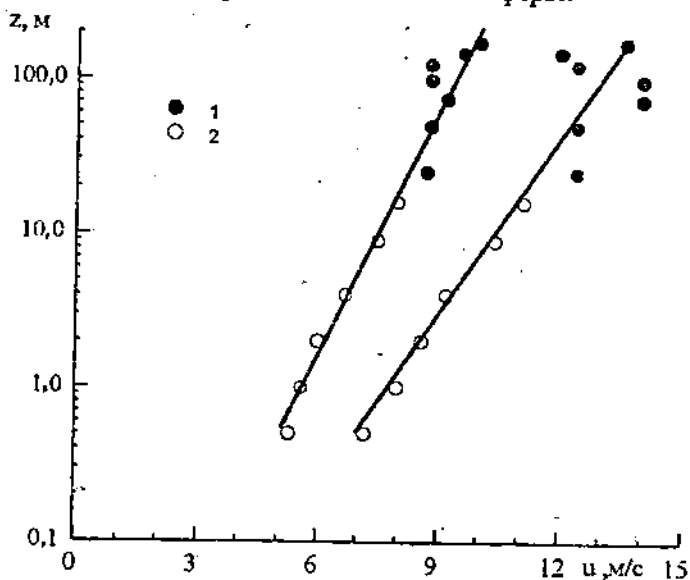


Рис.4. Профили скорости ветра, измеренные анемометрами и акустическим лоатором: 1 - акустический лоатор; 2- анемометр.

Вернемся к анализу профилей скорости ветра (см. рис.2). Крайняя правая группа профилей (кривые 9-11) получена при изотермии  $Ri_1 \in [-0,001, -0,01]$ , но скорость ветра на них растет с высотой заметно быстрее,

чем по логарифмическому закону, что характерно для устойчивой температурной стратификации, т.е. для  $Ri > 0$ . Такое несоответствие строения профилей скорости ветра условиям термической стратификации отмечено нами во время двух очень сильных песчаных бурь - в мае 1970 года в Прибалхашье и в июне 1984 года на осушенном дне Аральского моря. В обоих случаях бури проходили над поверхностями, сложенными мелким песком  $x_0 \in [90 \text{ мкм}, 110 \text{ мкм}]$ . Буря в Прибалхашье была кратковременной и получено лишь 4 таких профиля ветра с ускорением потока [6]. Буря на дне Арала 15-16 июня 1994 года длилась около суток. Измерения на мачтах проводились 16 июня с 7 час 45 мин до 19 час 20 мин местного времени. Профили скорости ветра с ускорением потока наблюдались нами в течение 8 часов. Объяснение этого интересного природного феномена дается теорией развитых пыльных бурь Г.И. Баренблатта и Г.С. Голицына [2,7].

Часть энергии турбулентности, получаемой пульсациями от среднего движения, затрачивается потоком на подъем и транспортировку частиц песка. Баренблатт и Голицын теоретически показали, что при насыщении потока мелкими частицами пыли повышается его устойчивость и уменьшается турбулентность. Поэтому такой поток движется быстрее по сравнению с чистым воздушным потоком. Баренблатт и Голицын представили уравнение баланса пульсационной энергии для несущей частицы твердой фазы потока в следующем виде:

$$\rho \cdot \overline{u'w'} \cdot \frac{du}{dz} + \varepsilon + \sigma \rho g s'w' - \frac{\rho}{\theta} g \theta'w' = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  - плотность суспензии,  $u$  и  $w$  - продольная и вертикальная компоненты вектора скорости суспензии,  $\varepsilon$  - диссипация пульсационной энергии единичного объема,  $s$  - объемная концентрация,  $\sigma = (\rho_p - \rho_g) / \rho_g$  - превышение плотности частиц  $\rho_p$  над плотностью газа  $\rho_g$ , штрихами обозначены пульсации случайной величины, чертой сверху - средние значения.

Физический смысл уравнения достаточно прост и ясен - энергия, получаемая полем пульсаций от среднего движения, расходуется на диссипацию  $\varepsilon$ , взвешивание частиц пульсациями скорости (третий член уравнения) и работу против сил плавучести (четвертый член). Далее они представили это уравнение в форме

$$\rho \cdot \overline{u'w'} \cdot \frac{dh}{dz} \cdot (1 - R_f - K_f) + \varepsilon = 0, \quad (3)$$

где безразмерные параметры

$$R_f = \frac{g}{\theta} \cdot \frac{\overline{\theta'w'}}{\overline{u'w'}(du/dz)} \quad \text{или} \quad R_f = \frac{\alpha_T g}{\theta} \frac{d\theta/dz}{(du/dz)^2}, \quad (4)$$

$$K_f = - \frac{\overline{\sigma g s'w'}}{\overline{u'w'}(du/dz)} \quad \text{или} \quad K_f = - \frac{\alpha_s \sigma g (ds/dz)}{(du/dz)^2} \quad (5)$$

соответственно динамические числа Ричардсона и Колмогорова, которые определяют относительную затрату энергии среднего движения на работу против сил плавучести и на взвешивание твердой фазы потока. В (4) и (5)  $\alpha_T$  и  $\alpha_s$  - турбулентные числа Прандтля и Шмидта.

Для бурь с  $u_* > 0,4$  м/с роль конвекции на баланс турбулентной энергии становится пренебрежимо малой (см.рис. 1) и основное влияние на кинематику и динамику двухфазного потока начинает оказывать работа по взвешиванию частиц. В результате решения системы уравнений для изотермически однородного потока, несущего частицы, Баренблатт и Голицын показали, что изменение скорости ветра с высотой в нем описывается более сложным логарифмическим профилем

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa \Phi(K_f)(1 - K_f)^{1/4}} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (6)$$

в котором  $u(z)$  является функцией от числа Колмогорова. Е.Д. Надежина [4] позднее получила для предельно нагруженного потока функцию  $\Phi(K_f)$  в явном виде

$$\Phi(K_f) = \left[ 1 - \frac{K_f(c_2 - 1)}{c_2 - c_1} \right]^{0.5} (1 - K_f)^{-0.5}. \quad (7)$$

На практике использовать (6) для описания профиля  $u(z)$  затруднительно, в виду того, что необходимо иметь информацию об изменении



$K_f$  с высотой, так как число Колмогорова является локальным (внутренним) параметром подобия потока. Поэтому более удобно использовать для описания влияния на профиль скоростей потока другой внешний параметр подобия - масштаб длины. Для оценки динамического воздействия частиц на поток Баренблатт и Голицын предложили масштаб длины

$$L_d = \frac{u_*^3}{k \sigma \omega_g s_0} \quad (8)$$

где  $\omega_g$  - скорость свободного падения частиц,  $s_0$  - объемная концентрация частиц. Назовем  $L_d$  масштабом Баренблатта - Голицына. Как и масштаб Монина - Обухова  $L$  для термически стратифицированных потоков, масштаб  $L_d$  для ветропесчаных потоков - чисто внешняя характеристика. Если  $s_0$  мала, то  $L_d$  велик, и влияние частиц твердой фазы на динамику потока для  $z \ll L_d$  пренебрежимо мало. Наоборот, при больших  $s_0$  масштаб Баренблатта - Голицына мал, и влияние частиц на динамику потока наблюдается уже на небольших высотах.

В своей работе Баренблатт и Голицын оценили порядок величины  $L_d$  для бури 1974 года в Прибалхашье. Для нейтрально стратифицированного потока, несущего аэрозоль, согласно их теории, ускоренный профиль скорости ветра можно записать и в виде логарифмически линейной функции

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left( \ln \frac{z}{z_0} + b \frac{z}{L_d} \right), \quad (9)$$

где  $b$  - постоянная, аналогичная величине  $\beta$  в обычном логарифмически-линейном законе Монина - Обухова для чистых воздушных потоков. Масштаб Баренблатта - Голицына может быть определен приближенно из (1) и (9)

$$L_d = \frac{u_*}{\kappa \Delta u} b z. \quad (10)$$

По измерениям экспедиции КазНИГМИ в Прибалхашье [6] получен порядок величин:  $b = 10$ , превышение скорости  $\Delta u$  над логарифмическим профилем в 2 м/с и динамическую скорость по нижней логарифмической части профиля  $u_* = 0,5$  м/с. По этим данным  $L_d \approx 50$  м [7]. Для измерений 1984 г., (см. рис.2), масштаб Баренблатта - Голицына оказался значительно меньшим и, по нашим оценкам, равным 12-18 м. Более де-

тальный анализ этого явления еще предстоит проделать. Эффект ускорения насыщенного частицами твердой фазы потока требует дальнейших исследований, набора экспериментальных данных для больших скоростей ветра. Обнаружение явления ускорения потока наглядно свидетельствует об очень слабой изученности сильных песчаных и пылевых бурь.

Наряду с важным научно-познавательным значением обнаружение эффекта ускорения потока имеет и большое практическое применение. При строительстве высоких сооружений в зонах развития пыльных бурь (ЛЭП, мачт ретрансляторов и антенн, высотных зданий и т.д.) следует учитывать повышение петровых нагрузок при больших скоростях ветра во время пыльных бурь, возникающих за счет ускорения потока с высотой. Расчеты по обычному логарифмическому профилю приводят к занижению ветровых нагрузок на сооружения и, как следствие, к аварийным ситуациям.

В заключение еще раз хочется отметить, что исследования песчаных бурь находятся еще в начале своего пути. Но уже ясно, что необходимо отказаться от многих привычных представлений о строении пограничного слоя атмосферы. Несмотря на очень большие трудности экспериментальных исследований, необходимо стремиться получить информацию по градиентным измерениям на мачтах во время сильных бурь, начать одновременные измерения пульсаций скорости и концентрации частиц в потоке и очень нужны данные о состоянии пограничного слоя атмосферы. Все это требуется для понимания процесса переноса и описания его моделями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы гидрометеорологии озера Балхаш и Прибалхашья / Под ред. И. И. Скоцеляса - СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. - 269 с.
2. Баренблатт Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. - М.: Изд-во МГУ, 1973. - 44 с.
3. Гидрометеорологические проблемы Приаралья / Под ред. Г. Н. Чичасова. - Л.: Гидрометеоиздат, 1990. - 277 с.
4. Надежина Е.Д. Об использовании дифференциальных уравнений для вторых моментов в моделях пограничного слоя атмосферы // Тр. ГГО. - 1975. - Вып. 362. - С. 3-14.

5. Применение содара в мониторинге пыльных бурь Приаралья/ А.Г. Желиба, Д. В. Климов, В.Ф. Крамар и др. // Акуст. журн. - 1994. - Т. 40, № 3 - С. 471-472.
6. Семенов О.Е. Экспериментальные исследования кинематики и динамики пыльных бурь и поземков// Тр. КазНИГМИ. - 1972. - Вып.49.- С. 3-31.
7. Varenblatt G.I., Golitsyn G.S. Local structure of Matyre Dust Storms // J. of the Atmospheric Sciences.-1974 - Vol. 31, № 7. - P. 1917-1933.

Казахский научно-исследовательский институт  
мониторинга окружающей среды и климата

## ҚҰМДЫ ДАУЫЛДАР БАРЫСЫНДАҒЫ ТІК ҚАЛЫПТАҒЫ ЖЕЛДІҢ ЕКПІНІН ЗЕРТТЕУДІҢ ТӘЖІРИБЕЛЕРІ

Физ.-мат. ғ. канд. О.Е. Семенов

Жергілікті жерлердегі құмды дауылдар кезінде жел жылдамдығын мачталарда өлшеу оның үш түрлі қалыпта болатынын көрсетті. Бәсең дауылдар үшін логарифмикалық сипат тән және оның конвекция салдарынан ауытқуы аңғарылады. Жылу стратификациясы ықпалының төмендеуіне байланысты қалыпты дауыл барысындағы сипаты логарифмикалық бөлшектерді көтермелеуге жұмсалатын бұрқынды энергияға байланысты. Өте күшті дауылда желдің қалыбы, тіпті изотермияның өзінде де инверсиялық сияқты болады екен. Оларды логарифмикалық сызықтық функциямен анықтауға болады, олардың сыртқы қалыпты параметрлері Баренблатт-Голицин масштабы болады. Арал бойы дауылдары үшін  $L$  - 12-18 метрге тең болады.