

# ОЦЕНКА ВЕТРОВЫХ РЕСУРСОВ АРАВИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА

А. Л. КАЗАКОВ, ДЖАМАЛ АБУБАКАР АВАД АВАД

*Одесский государственный экологический университет, Украина*

e-mail: geophys@ogmi.farlep.odessa.ua

Estimation of wind resources of the Arabian Peninsula is conducted using the objective data of the wind fields provided by the British meteorological service. The analysis of the averaged monthly wind fields near the ground agrees well with the physical and geographical features of the peninsula as well as its circulation characteristics. The recovered wind fields at the 50 m height are shown to be sufficiently strong for the purpose of energy generation by wind.

## Введение

Обеспечение энергией хозяйственной деятельности человека не только в будущем, но и в настоящее время вызывает озабоченность во многих странах, в том числе и в расположенных на Аравийском полуострове. Несмотря на то что этот регион земного шара самый богатый по запасам нефти и газа, все понимают, что они не безграничны. Поэтому возникает проблема использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии — ветровой и солнечной. Но для освоения ветровых ресурсов Аравийского полуострова прежде всего нужно дать им оценку.

В качестве исходных данных привлекались поля объективного анализа Британской метеослужбы за 00 и 12 ГСВ [1]. Нами приняты к обработке данные с июня 1999 г. по сентябрь 2005 г. Рабочая область ограничивалась координатами  $34^{\circ}34.8' - 60^{\circ}25.8'$  в.д. и  $29^{\circ}43.2' - 10^{\circ}16.8'$  с.ш. ( $36 \times 32 = 1152$  узла сетки). Шаг по меридиану составлял 62.3 км, а вдоль круга широты — от 80 до 91 км. Данные по каждой поверхности и каждой метеорологической величине за два срока для всего периода обработки преобразовывались к матричному виду: столбцы содержали значения величин вдоль меридианов, а строки — вдоль кругов широты. Для ветра использованы поля на уровне 10 м. Статистическая обработка приземных полей ветра производилась для выборок значений модуля скорости ветра и направления ветра в каждом узле сетки за 00 или 12 ГСВ. В частности, рассчитывались среднемесячные и среднегодовые значения, среднее квадратичное отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса, вероятности скоростей менее 2 или 5 м/с, более 7, 10 и 15 м/с. Повторяемость отдельных направлений определялась по восьми румбам, т. е. для секторов в  $45^{\circ}$ . Штилем считались скорости ветра менее 0.5 м/с. Эмпирические распределения скоростей аппроксимировались известными теоретическими распределениями (тип I и III Пирсона и нормальный закон).

## 1. Анализ рассчитанных полей ветра на уровне 10 м

Учитывая то обстоятельство, что ветер связан с распределением давления, анализ рассчитанных полей ветра проводился совместно с полями приземного давления. Установлено, что полученные распределения ветра хорошо согласуются с физико-географическими особенностями полуострова, циркуляционными особенностями сезонов. Это свидетельствует о том, что использование данных объективного анализа позволяет получать достоверную информацию о ветре в приземном слое.

На рис. 1 приведено поле рассчитанных среднегодовых значений над Аравийским полуостровом и омывающими его морями. Зоны наибольших скоростей ветра располагаются над Аравийским морем. Над другими акваториями также заметно усиление скоростей по сравнению с сухопутными районами. На суше фон скоростей ненамного превышает 4 м/с, а в горных районах среднегодовые скорости ветра составляют около 2 м/с.

Выполненная оценка внутрисуточной и межсезонной изменчивости показала, что в дневные сроки по сравнению с ночными скорости ветра над сушей выше на 1–2 м/с, а в горных районах — на 3–4 м/с, при этом наибольшие годовые амплитуды среднемесячных скоростей (10–11 м/с) отмечаются над Аравийским морем, тогда как над сушей — не более 2–3 м/с.

По рассчитанным распределениям скорости ветра выполнена оценка вероятности скоростей ниже 5 м/с и выше 7 м/с. Оказалось, что над всем Аравийским полуостровом вероятность слабых ветров может достигать 60 %, а в горных областях — 95 %. Эти оценки были дополнены анализом распределения ветровых условий отдельно для дня и ночи. Ночью вероятность слабых скоростей менее 2 м/с возрастает, особенно в горных районах, достигая 70 % случаев, а менее 5 м/с — даже 100 %. В дневное время вероятности скоростей в “рабочих” диапазонах заметно возрастают, достигая 20 % и более на участках суши, прилегающих к Персидскому заливу.

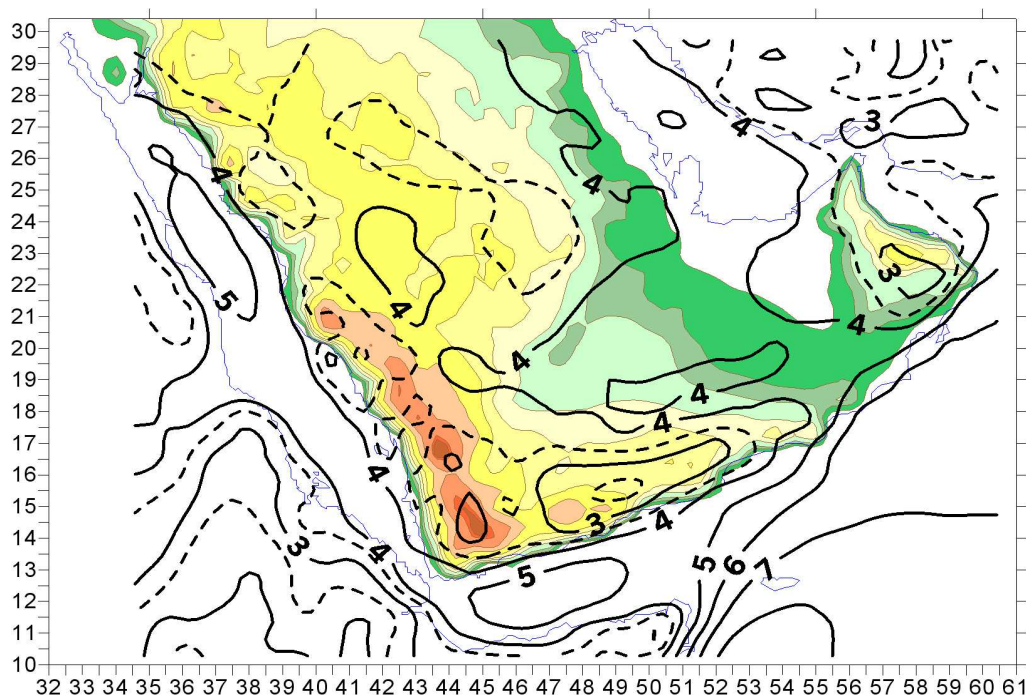


Рис. 1. Среднегодовые скорости ветра возле поверхности земли над Аравийским полуостровом.

## 2. Методика восстановления скорости ветра на уровень ветроколеса

Поскольку уровни расположения ветроколеса современных ветроустановок составляют 50 м и более, представляют интерес оценки ветровых условий для таких уровней, которые, как известно, оказываются значительно выше стандартного уровня измерений ветра на метеостанциях. Отсюда следует, что в инженерных изысканиях ветроресурсов необходимо провести восстановление вертикального профиля ветра. Нами рассмотрена методика расчета скорости ветра в приземном слое на уровне расположения ветроколеса с использованием теории подобия Монина — Обухова [2]. Окончательно вертикальные профили скорости ветра могут быть определены из формулы

$$U = \begin{cases} \frac{f_u(\zeta_X, \zeta_0)}{f_u(\zeta_U, \zeta_0)} U(Z_U) & \text{при } R_i \neq 0 \\ \ln \frac{Z_X}{Z_0} / \ln \frac{Z_U}{Z_0} & \text{при нейтральной стратификации} \end{cases},$$

где

$$\zeta_U = \frac{Z_U}{L}, \quad \zeta_X = \frac{Z_X}{L}, \quad \zeta_0 = \frac{Z_0}{L}, \quad f_u(\zeta_U, \zeta_0) = \ln \frac{Z_U}{Z_0} - \psi_u(\zeta_U, \zeta_0)$$

— универсальные функции профилей скорости в приземном слое;  $\psi_u(\zeta_U, \zeta_0)$  — функции, определяющие отклонение профилей от логарифмического;  $L = u_*^2 / (\kappa^2 \lambda \theta_*)$  — масштаб Монина — Обухова;  $u_*$ ,  $\theta_*$  — масштабы скорости ветра и температуры в приземном слое;  $\kappa$  — постоянная Кармана;  $\lambda = g/\overline{T}$  — параметр плавучести;  $Z_X$  — уровень, на котором

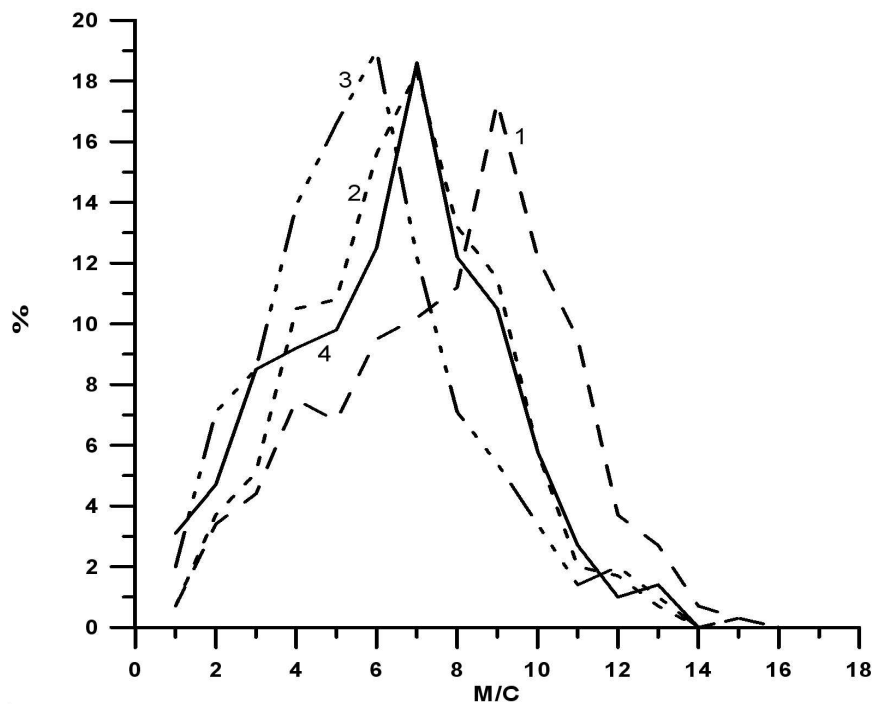


Рис. 2. Повторяемость рассчитанных скоростей ветра на уровне 50 м: 1 — учет стратификации в нижней части приземного слоя; 2 — учет температурной стратификации во всем приземном слое; 3 — логарифмический закон; 4 — фактические данные.

нужно найти скорость ветра;  $Z_U$  — уровень измерения скорости ветра;  $Z_0$  — параметр шероховатости. В качестве универсальных функций использованы функции профилей для скорости ветра и температуры [3].

Для проверки предложенного метода использованы данные экспедиционных наблюдений в период эксперимента Wangara [4]. Наилучшее согласие расчетной скорости ветра на уровне 50 м с данными наблюдений получено при использовании перепада температуры во всем приземном слое (как способа учета температурной стратификации) [5]. При этом использование логарифмической формулы или степенной зависимости может привести к занижению скоростей ветра по сравнению с фактическими (рис. 2).

Количественная оценка различий повторяемости для рассчитанных и фактических скоростей ветра выполнялась с помощью коэффициента различия:  $K_{ij} = 1 - Q_{ij}$ , где  $Q_{ij}$  — общая часть площадей, которые ограничиваются кривыми плотности вероятности  $P_i(x)$  и  $P_j(x)$ ;  $x$  — рассматриваемый аргумент. Таким образом, коэффициент  $K_{ij}$  дает количественную характеристику отличий двух повторяемостей случайных величин [6]. Этот коэффициент можно рассматривать и как количественную оценку погрешности рассчитанной повторяемости по сравнению с фактической — в упомянутом самом успешном эксперименте  $K_{ij} = 0.085$ , а для логарифмического закона ветра  $K_{ij} = 0.217$ .

Эксперименты, проведенные с заданием возможных значений параметра шероховатости ( $Z_0 = 0.001, 0.01$  и  $0.1$  м), показали, что изменение его численного значения существенно влияет на форму кривой повторяемости скорости ветра, хотя, по-видимому, значение шероховатости 1 мм следует считать самым приемлемым.

### 3. Анализ рассчитанных полей ветра на уровне 50 м

Основными формулами для пересчета скорости ветра на любом уровне в приземном слое служат вышеприведенные формулы, в которых вместо скоростей  $U$  и  $U_{Z_U}$  следует принимать значение скорости ветра на уровне ветроколеса  $Z = 50$  м и стандартном уровне 10 м. В качестве последних значений мы использовали данные объективного анализа Британской метеослужбы. Для определения стратификации приземного слоя атмосферы (перепада температур  $\delta T = T(z_2) - T(z_1)$ ) приходится использовать данные объективного анализа температуры вблизи подстилающей поверхности и на ближайшей изобарической поверхности (1000, 950, 925, 850 или 700 гПа). В случае отсутствия данных нужной изобарической поверхности или данных по температуре использовалась логарифмическая формула.

На рис. 3 представлены рассчитанные среднегодовые скорости ветра на уровне 50 м. Практически на всей территории полуострова скорости ветра выросли по сравнению с теми, что были получены для уровня 10 м. Над горными областями вдоль Красного моря и Аденского залива также заметен рост скоростей, а над о. Сокотра среднегодовые скорости составили более 9 м/с. Отличия в средних скоростях для дня и ночи связаны с влиянием температурной стратификации на развитие турбулентности: рост скоростей с высотой ночью составил 3–4 м/с, а днем 1–2 м/с. Кроме того, за весь период на уровне 50 м по всей территории полуострова сократилось число штилей: ночью до 2–5 случаев.

В результате пересчета скорости ветра на уровень 50 м отмечено уменьшение вероятности слабых ветров менее 5 м/с: в одних районах в 2.5–3 раза в течение года, в других — в отдельные сезоны, зимой, весной или летом, а в третьих — в пределах 20–30 % также в течение года. Таким образом, оказалось, что самыми частыми над пустыней Руб-эль-Ха-

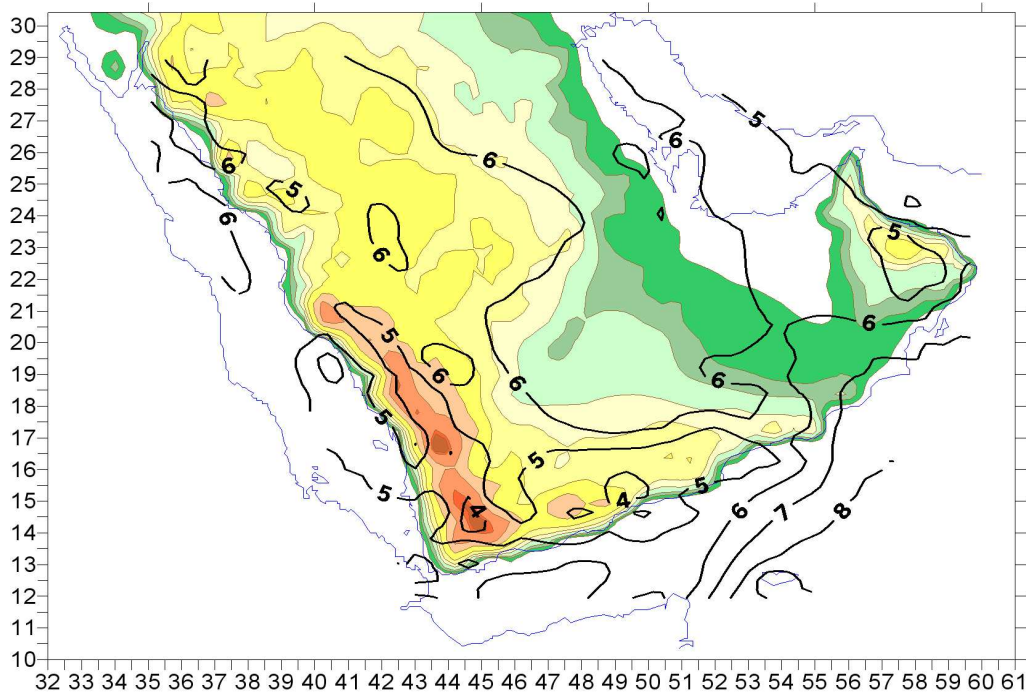


Рис. 3. Среднегодовые скорости ветра на уровне 50 м над Аравийским полуостровом.

ли, областью Асир и северо-восточной частью полуострова являются ветры в диапазоне 6–9 м/с. Эта область располагается к востоку от центрального и юго-западного горного массивов, как бы опоясывая их.

## Заключение

Территория Аравийского полуострова, согласно выполненным нами оценкам полей ветра по данным объективного анализа для уровня 10 м, может считаться непригодной для развития ветроэнергетики, за исключением прибрежных и островных зон. Однако расчеты по восстановлению скоростей на уровне 50 м с помощью теории Мони́на — Обухова указывают на вполне ощутимые “прибавки” скоростей, позволяющие все же использовать здесь современные мощные ветроэнергетические установки.

## Список литературы

- [1] ТАРНОПОЛЬСКИЙ А.Г., КАЗАКОВ А.Л. База данных для диагноза и прогноза состояния атмосферы над территорией Украины и Азово-Черноморским бассейном // Вычисл. технологии. 2002. Т. 7. С. 92–100.
- [2] КАЗАКОВ А.Л., ДЖАМАЛ АБУБАКАР АВАД АБАД. Восстановление вертикального профиля ветра в целях ветроэнергетики // Метеорология, климатология и гидрология. 2004. Вып. 48. С. 103–111.
- [3] КАЗАКОВ А.Л., ЛЫКОСОВ В.Н. О параметризации взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью при численном моделировании атмосферных процессов // Тр. ЗапСибНИИ. 1980. Вып. 55. С. 3–20.

- [4] CLARKE R.H., DYER A.J., BROOK R.R. ET AL. The Wangara experimental boundary layer data // Div. Meteorol. Phys., CSIRO, Australia. 1979. Tech. Paper, N 19.
- [5] ДЖАМАЛ АБУБАКАР АВАД АБАД. Статистический анализ восстановленных скоростей ветра // Метеорология, климатология и гидрология. 2004. Вып. 49. С. 180–189.
- [6] КОЛИНКО А.В. Статистическая структура крупномасштабных океанологических полей на Ньюфаундлендском энергетическом полигоне // Метеорология и гидрология. 1990. № 8. С. 102–107.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.*