

ОЦЕНКА ВЕТРОВЫХ РЕСУРСОВ АРАВИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Оценка ветровых ресурсов Аравийского полуострова проводится с привлечением полей ветра объективного анализа Британской метеослужбы. Анализ полученных среднемесячных полей ветра у поверхности земли показал, что они хорошо согласуются с физико-географическими особенностям полуострова и циркуляционными особенностями.

Ключевые слова: поля ветра, данные объективного анализа, профиль ветра, статистические характеристики.

Введение. При оценке ветровых ресурсов какой-либо территории обычно используют данные стандартных наблюдений за ветром на метеорологических станциях. Они включают в себя наблюдения через 6 или 3 часа на стандартном уровне 10 м или в слое 8-12 м. Эти данные наблюдений затем обрабатываются с целью получения статистических характеристик ветра, среди которых наибольший интерес представляют значения вероятности различных скоростей ветра. Анализируются также суточная, сезонная и межгодовая изменчивость представленных статистических характеристик ветра. Недостатком таких обработанных данных для отдельных станций считается их заметное искажение под влиянием местных микро- и мезомасштабных неоднородностей подстилающей поверхности. Поэтому в целях ветроэнергетики применяют специальные процедуры приведения полученных статистических данных к условиям ровной поверхности и открытого горизонта, а также к уровню ветроколеса.

К сожалению, нам оказались не доступны какие-либо фактические данные по распределению скоростей ветра на территории стран Аравийского полуострова. Поэтому было решено воспользоваться данными объективного анализа (ОА) полей ветра и других метеорологических величин. Очевидно, что в этом случае мы будем ограничены в сроках (вместо 4 или 8 фактически будет один-два срока). Заметим, что данные ОА уже широко используются в различных целях, в том числе для анализа режима климата [1,2], но для целей ветроэнергетики, как нам кажется, – впервые.

Характеристика исходных данных и их обработка. С 1999 г. по договоренности между гидрометслужбами Великобритании и Украины в Гидрометцентр Черного и Азовского морей (г.Одесса) регулярно поступают данные объективного анализа и прогноза метеорологических полей на основных изобарических поверхностях, подготовленные специалистами Британской метеослужбы [3]. Подробное описание технологических аспектов получения этих данных можно найти в материалах интернет-изданий [4,5]. Мы здесь кратко отметим основные особенности использованных данных.

Порядок формирования архива этих данных несколько изменялся за прошедшие годы. Так, начиная с июня и до середины ноября 1999 г. привлекались данные объективного анализа только за 12 ГСВ, а затем за 00 ГСВ. Данные за 12 ГСВ архивировались также за период май-сентябрь 2002 г. и с февраля 2003 г. по настоящее время. Имелись также небольшие (порядка нескольких суток) периоды отсутствия данных из-за перебоев в системе связи. В результате за период июнь 1999 г. – август 2005 г. было собрано следующее количество полей для двух сроков (табл.1).

Таким образом, в обработку были приняты данные объективного анализа с июня 1999 г. по сентябрь 2005 г. Рабочая область ограничивалась координатами 34°34,8' - 60°25,8' в.д. и 29°43,2' - 10°16,8' с.ш. или 36×32=1152 узла сетки. Шаг по меридиану

составляет 0.8333° по долготе и 0.5555° по широте, соответственно 62,3 км и 80 - 91 км.

Таблица 1 - Количество полей ветра, собранных в базе данных ОА

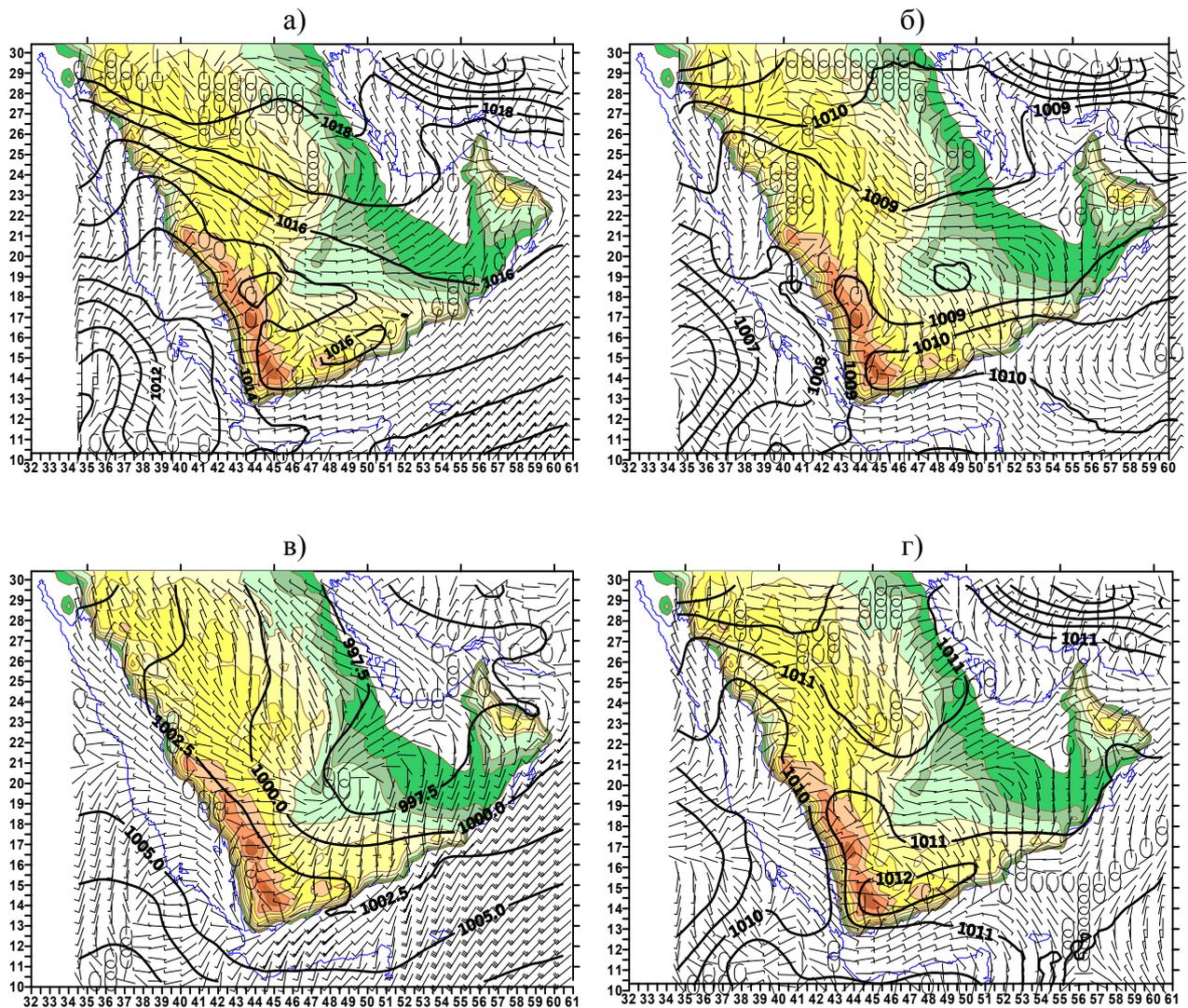
Месяц/ срок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
00 ГСВ	183	163	176	172	174	176	180	180	145	147	148	179	2023
12 ГСВ	61	65	86	80	103	129	150	151	86	84	58	59	1112
сумма	244	228	262	252	277	305	330	331	231	231	206	238	3135

Вначале исходные файлы с данными по ветру на уровне 10 м за один срок преобразовывались к матричному виду, в котором столбцы содержали значения величин вдоль меридианов, а строки – вдоль кругов широты. Далее создавался файл, содержащий поля в виде матриц за каждый срок за весь период обработки. Каждое поле за конкретный срок предварялось строкой, содержащей сведения о дате, типе величины и поверхности. Таким образом были сформированы файлы данных ОА за 00 и 12 ГСВ за конкретный месяц.

Следующий этап представлял уже собственно статистическую обработку приземных полей ветра. С этой целью формировалась выборка значений модуля скорости ветра $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ и направления ветра в каждом узле сетки за весь период за срок 00 или 12 ГСВ. Здесь u и v – составляющие скорости ветра из полей ОА. Полученный ряд хронологических значений характеристик ветра рассматривался как простой статистический ряд и к нему применялся аппарат статистической обработки. 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. Определение повторяемости отдельных направлений ветра осуществлялось по восьми румбам, то есть для 45° секторов. Штилем считались скорости ветра менее 0,5 м/с. Эмпирические распределения скоростей аппроксимировались известными теоретическими распределениями (I, III тип Пирсона и нормальный закон). Проверка расхождений между эмпирическими и теоретическими распределениями осуществлялась с помощью проверки статистической гипотезы H_0 на уровне значимости $\alpha=0,05$. Для ее проверки использовался критерий Пирсона χ^2 . Что касается количества интервалов k в сгруппированных рядах, то, в основном, оно определялось количеством интервалов скорости 1 м/с. Это было связано с тем, что оценка утилизируемой мощности ветроэнергетических установок (ВЭУ) обычно проводится для единичных интервалов скорости ветра, но так, что $k \geq 5$.

Ветровой режим у поверхности земли над Аравийским полуостровом по данным объективного анализа. Средние поля приземного давления и воздушных потоков. Учитывая то обстоятельство, что ветер связан с распределением давления, рассмотрим сначала особенности распределения приземного давления. На рис.1* представлены среднемесячные поля приземного давления и ветра за 00 СГВ. Последний представляет собой средний вектор ветра, который получен из средних значений составляющих ветра за рассматриваемый период. Здесь и на последующих картах Аравийского полуострова ось x совпадает с направлением оси долгот, а ось y – с направлением широты.

* Здесь и далее на рисунках по оси x -ов обозначены градусы восточной долготы, а по оси y -ов – градусы северной широты.



Характеристики ветра даны по коду КН-01, «0» - штиль

Рисунок 1 - Поля приземного давления и среднего вектора ветра над Аравийским п-вом за 00 ГСВ: а) январь, б) апрель, в) июль, г) октябрь.

В среднемесячных полях давления обнаруживаются несколько особенностей. В холодное полугодие территория полуострова как бы разделена на две части вдоль линии СЗ-ЮВ. Северо-восточная часть находится под влиянием Азиатского антициклона, а юго-западная - Африканской депрессии с несколько повышенными значениями (выше среднего значения 1013 гПа). В летний период большая часть полуострова находится в области ложбины, направленной с востока. В июле и августе среднемесячные значения давления в восточной части полуострова становятся ниже 1000 гПа. Только в горной, юго-западной части Йемена, отмечаются области повышенного давления. В переходные месяцы область пониженного давления может охватывать практически всю центральную часть полуострова от Красного моря до Оманского залива, а юг полуострова и омывающие его акватории оказываются в области повышенного давления около 1010 гПа.

Приведенные поля средних векторов ветра за календарные месяцы показывают весьма интересную картину изменчивости воздушных течений над Аравийским

полуостровом и окружающими его водными объектами. В зимние месяцы направления воздушных потоков над акваторией Персидского залива, территорией пустыни Руб эль Хали, восточной и юго-западной частями полуострова, Аденским заливом и Аравийским морем не плохо согласуются с расположением указанных выше гребня и обширной ложбины. Отметим области с хорошо выраженной сходимостью потоков в ложбине над юго-западными районами полуострова, Красным морем и Африканским континентом. При этом наиболее сильные потоки отмечаются над морскими акваториями, а над сушей они заметно слабее. Над Аравийским морем и Аденским заливом отмечаются муссонные ветры с сезонной сменой направлений: зимой северо-восточных, а летом - юго-западных.

В климатологии для характеристики циркуляционных условий часто используют понятие господствующий ветер, под которым понимают наибольшую повторяемость направления ветра из восьми румбов. Эта информация используется также при выработке рекомендаций по установке ВЭУ. На большей части полуострова повторяемость господствующих ветров не превышает 30 % с большей устойчивостью господствующих ветров над Аравийским морем, северными частями Красного моря и Персидского залива. Что касается общей характеристики направлений воздушных потоков, то, на первый взгляд, представляется, что картина носит элементы хаотичности. Однако, при более тщательном анализе, можно выделить ряд интересных особенностей. Сравнение господствующих ветров за ночной и дневной сроки показала, что несмотря на достаточно грубое разрешение по горизонтали в данных объективного анализа, для горных районов обнаруживаются особенности, связанные с суточной периодичностью местных горно-долинных ветров. Так, в горном массиве на востоке Омана, в дневные и ночные часы господствующие ветры меняют свое направление: днем в горы, а ночью – с гор. Еще более четкое изменение потоков были заметны вдоль горных хребтов на юго-западе полуострова. Ночью потоки направлены в разные стороны от хребта, а днем – сходятся над ним.

Нам представляется, что определенный интерес могут иметь поля господствующего ветра и за центральные месяцы зимнего и летнего сезонов (рис.2). Поля воздушных потоков имеют весьма четкие различия в эти сезоны. **Зимой** можно выделить две основные ветви крупномасштабных течений. Первая, “начинается” с северо-восточных районов полуострова северо-западными ветрами, продолжается также над Персидским заливом, но раздваивается. Одна часть потока проходит через Ормузский пролив и огибает Оман, соединяясь со второй ветвью – северо-восточным муссоном, другая - постепенно поворачивает к югу, видимо под влиянием горного массива восточного Омана, приобретая заметную северную составляющую, а затем в виде юго-восточных потоков через центральные районы полуострова подходит к горному массиву и обтекает его севернее Джидды, и далее через Красное море в виде северных потоков попадает на Африканский континент. Вторая ветвь, северо-восточный муссон, огибает полуостров и входит в Красное море и Эфиопию. Тем самым, обе ветви образуют циркуляцию, сходную с обтеканием острова на реке. **Летом** Аравийский полуостров в силу значительного прогрева, становится зоной конвергенции ветров. К его центральным районам сходятся ветры северного, северо-восточного, южного, западного и северо-западного направлений. При этом, потоки северо-западного направления с Красного моря соединяются, обтекая юго-запад полуострова, с юго-западным муссоном, а последний, обтекая восточную горную часть полуострова, образует зону конвергенции с северо-западными потоками Персидского залива в районе Ормузского пролива. Наибольшую повторяемость имеют потоки над морскими акваториями, хотя и над сушей повторяемость большинства потоков превышает 30 %.

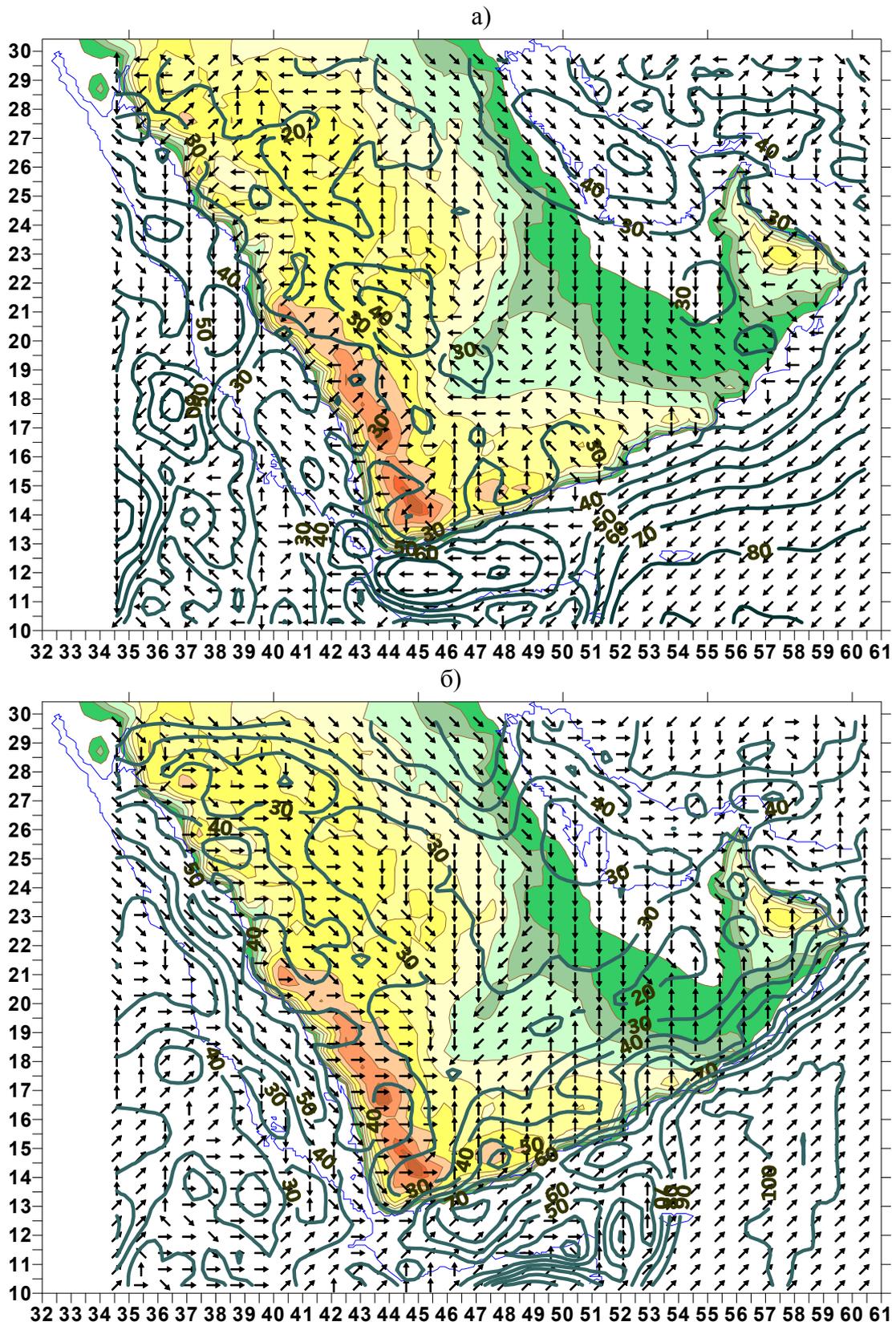


Рисунок 2 - Господствующее направление ветра и его повторяемость (%)
а) за январь, б) за июль.

Сравнение направлений потоков, представленных в виде средних векторов ветра и господствующих направлений для двух месяцев показало, что они в большинстве районов совпадают. Различия становятся заметными лишь в тех местах, где их повторяемости не велики.

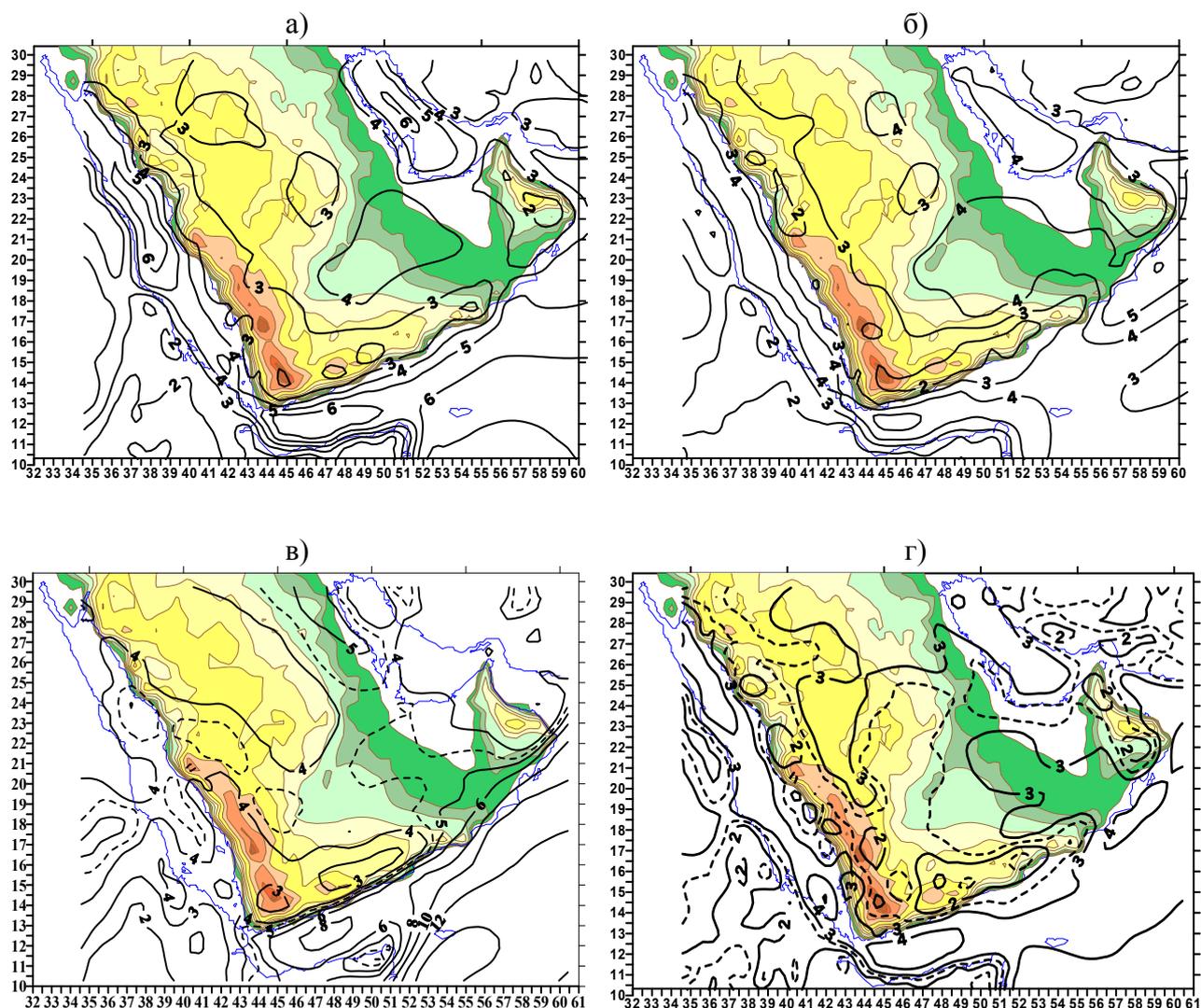
На рис.3 представлены среднемесячные поля скорости ветра для центральных месяцев сезонов, полученные осреднением данных ОА за 00 и 12 ГСВ. Отмеченные на рис.1 особенности силы приземных ветров в полях среднего вектора ветра очень четко прослеживаются в полях изотох. Над всеми акваториями – Персидским заливом, Аравийским морем, Аденским заливом, Красным морем – скорости ветра оказываются выше на 1-3 м/с, чем над ближайшими частями суши. В экстремальных значениях скорости ветра прослеживается сезонный ход: минимальные значения в переходные сезоны, а максимальные в периоды развития муссонов. Очертания береговой линии очень четко отделяют области повышенных и пониженных значений средней скорости. По существу все горные области, лежащие вдоль Красного моря и Аденского залива, а также на востоке Омана выделяются пониженными значениями скорости (1 – 2 м/с). Только над пустыней Руб эль Хали практически круглый год отмечаются зоны повышенных скоростей ветра (4 - 5 м/с) по сравнению с окружающими пустынными областями. Наибольшие скорости отмечены в Аравийском море в период летнего муссона вблизи о.Сокотра (13 м/с).

Отмеченные особенности ветрового режима, конечно, явились отражением барико-циркуляционного режима. Однако, следует все же отметить, что полученные поля являются данными объективного анализа с разрешением $0,56^{\circ} \times 0,83^{\circ}$, представляющих собой сглаженные поля и включающих в себя результат применения процедур усвоения данных, например, конкретную математическую модель атмосферных процессов с параметризацией процессов подсеточного масштаба [5].

На рис. 4 приведено поле рассчитанных среднегодовых значений над Аравийским полуостровом и омывающими его морями. Зоны наибольших скоростей расположены над Аравийским морем. Над другими акваториями также заметно усиление скоростей по сравнению с сухопутными районами. Над сушей фон скоростей не намного превышает 4 м/с, а в горных районах значения среднегодовых скоростей могут понижаться до 2.5 м/с.

Нами были также рассмотрены поля общего числа дней со штилевыми условиями (значения скоростей менее 0,5 м/с) за период с июня 1999 по сентябрь 2005 г. для ночного и дневного сроков. Сопоставление данных за ночные и дневные сроки четко указывает на уменьшение штилевых ситуаций в дневные сроки в несколько раз. Причем зоны наибольшей повторяемости штилей располагаются в одних и тех же местах: в горных районах вдоль Красного моря, Аденского и Оманского заливов. На акватории Аравийского моря штилевые условия практически отсутствуют.

Изменчивость скорости ветра. Анализ полей среднеквадратичных отклонений скорости ветра для января и июля за 00 ГСВ в сравнении с полями средних скоростей позволил выделить следующие особенности. Зоны максимальных среднеквадратичных отклонений располагались над акваториями и совпали с расположением зон повышенных скоростей ветра. На суше отмечены меньшие значения среднеквадратичных отклонений по сравнению с акваториями. Однако над пустыней Руб эль Хали и предгорьями могут отмечаться зоны с повышенными значениями среднеквадратичных отклонений, при том, что в горных областях обе величины имеют минимальные значения. Оказалось также, что характер распределения и сами значения среднеквадратичных отклонений скорости ветра у земли мало меняются от зимы к лету.



Пунктиром отмечены изотахи, кратные 0,5 м/с

Рисунок 3 - Поля среднемесячной скорости ветра у земли над Аравийским полуостровом за 00 ГСВ: а) январь, б) апрель, в) июль, г) октябрь.

Об изменчивости скорости ветра можно также судить по их амплитуде суточных и годовых колебаний. Как и предполагалось, днем отмечались большие значения скорости ветра и поэтому над территорией Аравийского полуострова преобладают положительные разности скоростей. Причем, наибольшие превышения дневных скоростей над ночными до 3-4 м/с отмечены в горных районах. На остальной территории для всех месяцев амплитуды суточного хода невелики и не превышали 1-2 м/с. Оценка годовой амплитуды скорости ветра показала, что независимо от времени суток, наибольшие амплитуды, достигающие 10-11 м/с, получены для Аравийского моря. Над Аденским заливом они оказались почти в два раза меньше и приблизительно в три раза меньше над Красным морем и Персидским заливом. Над сушей амплитуды в основном не превышали 1,5 м/с и только над восточной частью пустыни Руб эль Хали достигали 2 м/с, а для ночных часов даже 3 м/с.

Отличительной особенностью полей дат наступления максимальных или минимальных значений скорости является их группировка по определенной территории. Это означает, что в каждом из отмеченных таким образом районов

формируется собственный ветровой режим. Так, для ночных сроков максимальные среднемесячные скорости отмечаются в июле над акваторией Аравийского моря и Аденского залива в период действия летнего муссона, а также над большей частью южного Йемена и Омана (рис.5). Что касается сроков наступления минимальных среднемесячных скоростей, то они в основном оказались приурочены к переходным сезонам.

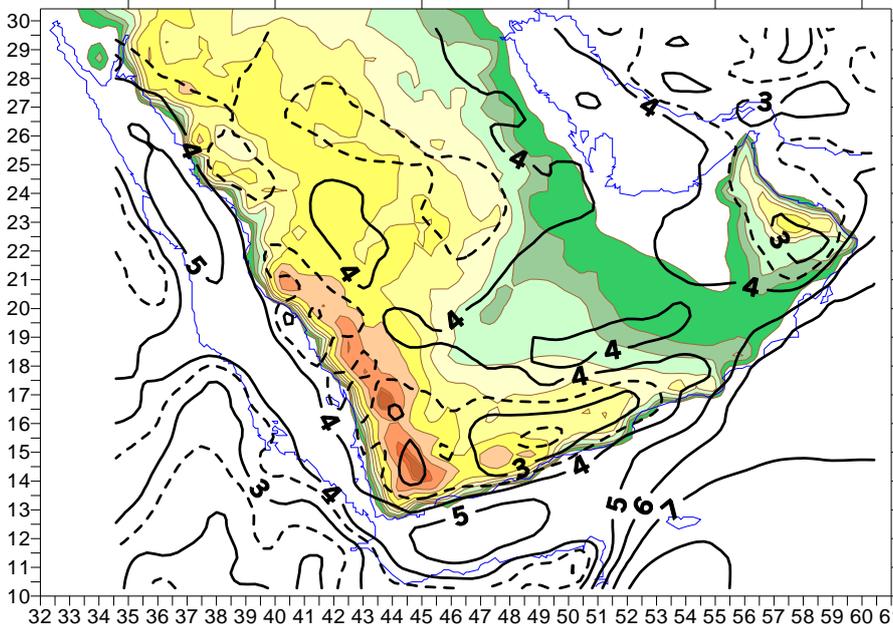
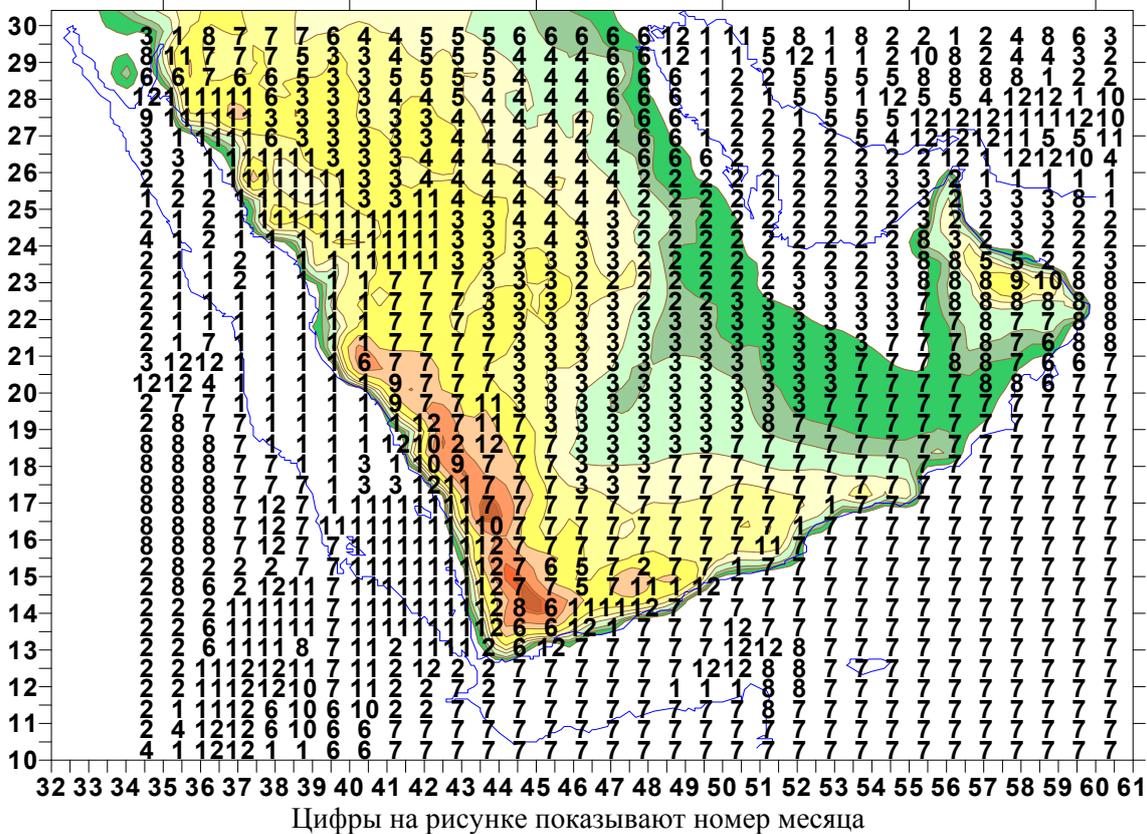


Рисунок 4 - Среднегодовая скорость ветра у поверхности земли над Аравийским полуостровом.



Цифры на рисунке показывают номер месяца

Рисунок 5-Месяц обнаружения максимума среднемесячной скорости ветра за 00 ГСВ.

Практически на большей части Аравийского полуострова и прилегающей акватории Аравийского моря, а также на севере Красного моря минимумы отмечаются в октябре. В целом, области одинаковых дат являются достаточно однородными и компактными областями, хотя возможны и небольшие “вкрапления” других месяцев. В основном такими областями являются горные районы, где максимумы в соседних узлах могут отмечаться в разные месяцы.

Получение среднемесячных значений скорости ветра в различных узлах сетки кажется позволяет провести сравнение с имеющимися данными измерений на станциях полуострова. Как известно, на Аравийском полуострове большинство станций расположено на побережье, однако, некоторая их часть находится и в центральных пустынных районах, предгорьях и горах. Однако, трудность такого сравнения состоит в том, что использование процедуры интерполяции характеристик ветра при весьма сложном рельефе не позволяет получить точные значения в конкретной точке местности по осредненным данным, коими несомненно являются данные ОА, а отнесение станции к конкретному узлу заведомо несет в себе погрешность. Выбор ближайших узлов сетки к расположению станций, очевидно, не всегда будет удачным, поэтому сопоставление кривых годового хода, полученных по данным справочников [6] и расчетам в ближайших узлах сетки, не позволяет сделать однозначных выводов о точности рассчитанных значений. Можно лишь указать на близкие тенденции в изменении скорости ветра на ряде станций Персидского залива и юго-запада полуострова (рис.6). Так, на двух станциях Персидского залива, Бахрейн и Шарджа, и ближайших узлах сетки отмечено неплохое совпадение тенденций изменения и самих значений. Для Адена и Джидды, Райяна и Перима, мы считаем, что также получено вполне удовлетворительное согласие как в форме кривых, так в количественном отношении. Но для Кувейта, Рида, Камарана и Маската никакого совпадения в режиме ветров по данным измерений и ОА не получено. Такой результат, видимо, следует признать закономерным, учитывая сделанные выше замечания. Тем более, что как следует из пояснений, сделанных в [6], для характеристики ветровых условий Аравийского полуострова были включены сильно устаревшие и не отвечающие современным требованиям данные.

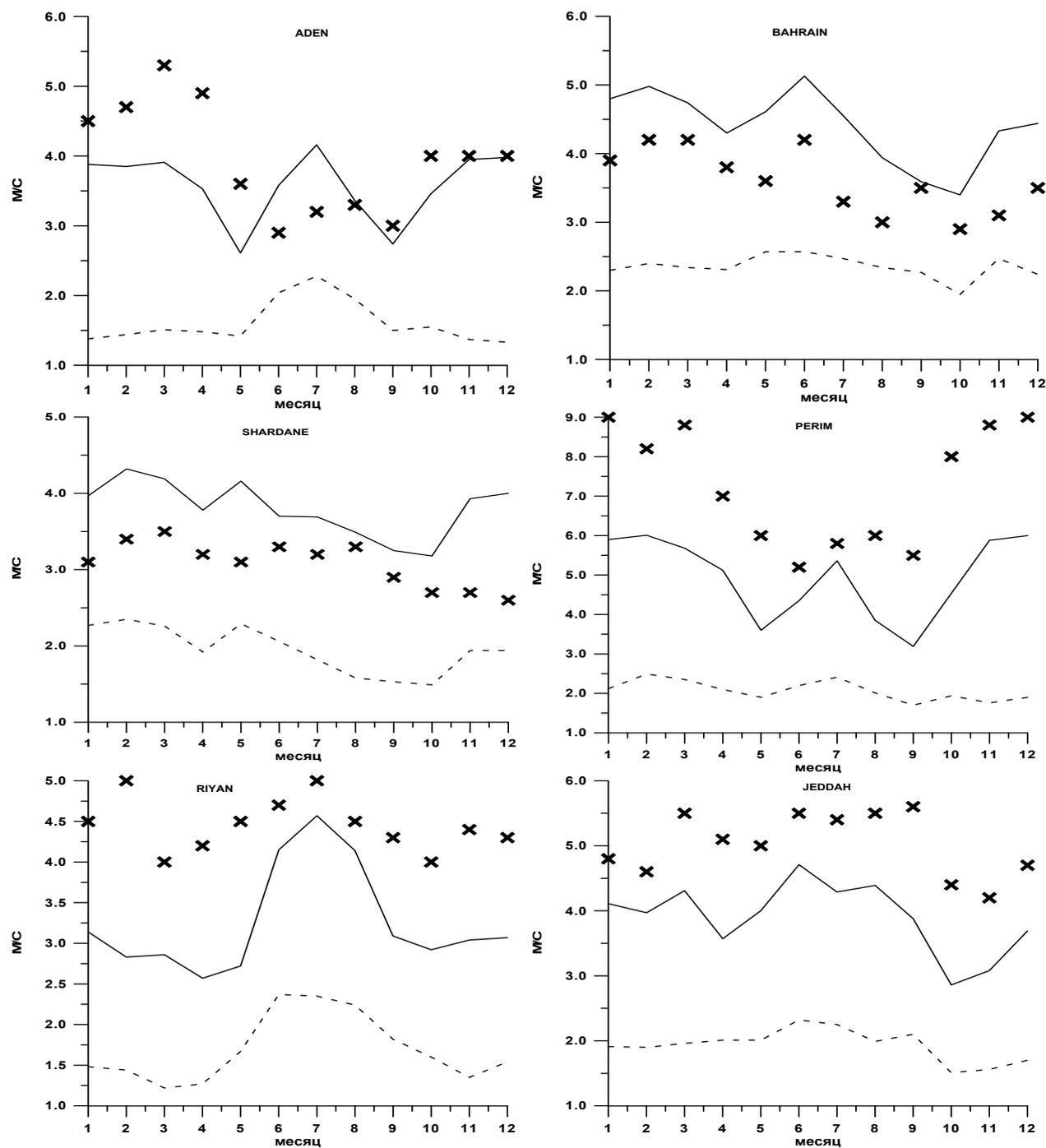
Вероятностные характеристики скорости ветра. Выше уже указывалось на то, сформированные в каждом узле выборки рядов скоростей ветра, расположенных в хронологическом порядке, преобразовывались в сгруппированные ряды, (далее они рассматриваются как эмпирические распределения) и оценивались их статистические характеристики. Как и ожидалось, I тип Пирсона редко использовался для аппроксимации эмпирических распределений. В большинстве случаев, более 50 % случаев, эмпирические распределения скорости ветра в течение всего года аппроксимируются III типом Пирсона, в 10-15 % случаев – нормальным законом. В тех случаях, когда ни один из названных теоретических законов не удавалось использовать для аппроксимации эмпирических распределений, то, учитывая, что длина выборки была достаточно большой, $n > 50$, вероятность оценивалась по формуле [7]:

$$P(U < U_3) = \frac{m_i}{n}.$$

Здесь U_3 - заданное значение скорости ветра, n , m_i - длина выборки и частоты. Анализ пространственного распределения зон с отсутствием аппроксимации распределений скорости показал, что большинство таких случаев отмечается в горных районах, тогда как в пустынных районах и над морями удается аппроксимировать практически все эмпирические распределения.

На рис. 7 приведены поля вероятности ветров близких к пороговым значениям ВЭУ (ниже 5 м/с) и вероятности скоростей рабочих диапазонов (более 7 м/с) в целом за

год. Выше уже указывалось на то, что над всем Аравийским полуостровом средние значения скоростей находятся ниже 5 м/с, а в горных районах юго-западной части полуострова даже ниже 2 м/с. Именно в этих областях вероятность скоростей ниже пороговых для ВЭУ может достигать 95%. Тогда на “рабочие” диапазоны скоростей по всей территории остается не более 10 % случаев. Исключение составляют острова в различных морях. Наиболее пригодными можно считать о-ва Сокотра, Перим и Масира, хотя и там вероятности скоростей близких к пороговым для ВЭУ в интервале 40-60%.



Сплошная линия - данные ОА, пунктир – среднеквадратичные отклонения, x-данные из [6]
 Рисунок 6 - Годовой ход среднемесячных скоростей ветра у поверхности земли над Аравийским полуостровом.

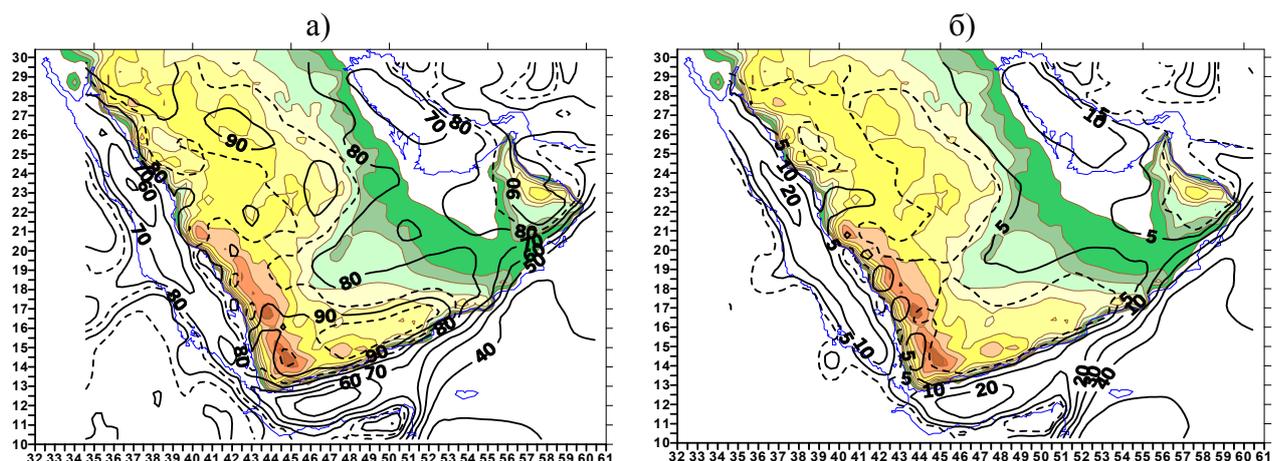


Рисунок 7 - Вероятность (в %) скорости ветра за год
а) менее 5 м/с, б) более 7 м/с.

Эти оценки были дополнены оценками ветровых условий отдельно для дня и ночи, а также оценками их внутригодовой изменчивости. Ночью, как и предполагалось, вероятность слабых скоростей менее 2 м/с возросла, особенно в горных районах, достигая 70 % случаев, а менее 5 м/с даже 100 % отметки. Соответственно на рабочие диапазоны скоростей приходилось около 5 % случаев только в пустыне Руб эль Хали. В дневные часы вероятности скоростей рабочих диапазонов заметно возросли, например, на участках суши, прилежащих к Персидскому заливу, до 20 % и более. Только в горных районах Йемена и на востоке Омана, сохраняется высокая вероятность (80-90 %) ветровых условий, при которых работа ВЭУ не возможна.

Внутригодовая изменчивость вероятности скоростей ниже и выше 5 м/с, как показал проведенный анализ, согласуется с описанным выше годовым ходом средних скоростей. Если максимум среднемесячных скоростей приходится на летние месяцы, то именно в эти месяцы следует ожидать увеличения вероятности скоростей “рабочего” диапазона. Так, для района о.Сокотра и более восточной части моря вероятность ветров этого диапазона для июля составляет около 100 %. Наименьшие вероятности для скоростей “рабочего” интервала получены в октябре по всей территории полуострова и над акваториями прилегающих морей.

Выводы. Впервые для характеристики ветровых ресурсов территории Аравийского полуострова были использованы данные объективного анализа полей ветра Британской метеослужбы с июня 1999 по сентябрь 2005 гг. Проведенный анализ показал, что рассчитанные поля ветра удовлетворительно согласуются с физико-географическими и циркуляционными условиями, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Территория Аравийского полуострова по выполненным нами оценкам полей объективного анализа ветра для уровня 10 м может считаться не пригодной для развития ветроэнергетики, за исключением прибрежных и островных зон. Тем не менее, окончательные выводы можно будет сделать только на основании дополнительного анализа ветровых условий на уровне 50 м, уровня установки ветроколеса. Но это будет темой будущего исследования.

Список литературы

1. *Re-analysis sample data 1979-1993*. Reading: ECMWF, 1997. –26 pp.
2. *Seasonal simulations CD-ROM*. Reading: ECMWF, 1997. –23pp.
3. *Тарнопольский А.Г., Казаков А.Л.* База данных для диагноза и прогноза состояния атмосферы над территорией Украины и Азово-Черноморским бассейном. //Вычислительные технологии, 2002. - Т.7. -С.92-100
4. *Operational numerical modelling*. <http://www.meteoffice.gov.uk/research> 2003
5. *A new Unified model*. NWP Gazette, june,2002.
6. *Климатический справочник зарубежной Азии*. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – Часть 1. – 540 с.
7. *Школьный Є.П., Лоева І.Д., Гончарова. Л.Д.* Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації. — Одеса, 1999. - 600 с.

Оцінка вітрових ресурсів Аравійського півострова. Джамал Абубакар Авад Абад, Казаков О.Л.

Оцінка вітрових ресурсів Аравійського півострова проводиться із залученням полів вітру об'єктивного аналізу Британської метеослужби. Аналіз отриманих середньомісячних полів вітру у поверхні землі показав, що вони добре узгоджуються з фізико-географічними особливостям півострова і циркуляційними особливостями.

Ключові слова: поля вітру, дані об'єктивного аналізу, статистичні характеристики.

Estimation of wind resources of Arabian peninsula. Jamal Abubakar Avad Abad, Kazakov A.

Estimation of wind resources of the Arabian peninsula is conducted with bringing of the fields of wind of objective analysis of British meteorological service. The analysis of the average monthly fields of wind at a terrene showed that they well comported with physical and geographical features of peninsula and circulation features.

Keywords: fields of wind, data of objective analysis, type of wind, statistical descriptions.