

ОСОБЕННОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА СТАНЦИИ РУССКАЯ (ЗАПАДНАЯ АНТАРКТИДА)

*н.с. Н.Е.ИВАНОВ, канд. физ.-мат наук В.Е.ЛАГУН, канд. географ. наук Э.И.ЛУЦЕНКО
ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, aaricoor@aari.nw.ru*

Статистический анализ скорости приземного ветра выполнен по данным срочных (4 раза в сутки) измерений на станции Русская в западной Антарктиде за период с 1980 по 1990 г. Оценки параметров межгодовой изменчивости, годовой ритмики, процессов синоптического масштаба и суточного хода с учетом низкочастотной модуляции получены в терминах вектора математического ожидания и инвариантов тензоров дисперсии и спектральной плотности в предположениях стационарности и периодической коррелированности векторного случайного процесса, для параметризации изменчивости синоптического масштаба использована модель случайного импульсного процесса. Приведены рекомендации по комплектованию прикладных климатических пособий.

Ключевые слова: Западная Антарктида, скорость приземного ветра, климатическая изменчивость, спектральный анализ, кatabатические потоки

ВВЕДЕНИЕ

Антарктическая станция Русская открыта 9 марта 1980 г., закрыта 12 марта 1990 г., расположена на мысе Беркс (Берег Хобса) в точке с координатами 74° 46' ю.ш. и 136° 52' з.д. на высоте 124 м над уровнем моря. Берег в районе станции представляет собой снежно-ледниковый барьер высотой от 2 до 40 м. С западной стороны мыса Беркс береговая линия круто уходит на юг. К востоку от станции берег на протяжении 30 км ориентирован в широтном направлении (рис. 1). На этом участке Берега Хобса поднятие материкового ледникового покрова в сторону полюса составляет около 300 м на 10 км. Горизонталь с отметкой 100 м проходит на расстоянии около 3 км от береговой черты. В районе станции вдоль берега расположен ряд возвышенностей с отметками 125–145 м. Особенности орографии способствуют усилению восточных ветров в приземном слое атмосферы.

Морское дно в районе станции характеризуется резким уклоном к морю. Изобата 50 м проходит на расстоянии 200 м от берега, а изобата 20 м – на расстоянии 100 м от берега. Грунт представлен скальными породами.

Станция Русская расположена в центральной части огромного района Антарктиды, не охваченного научными наблюдениями, и предназначалась для выполнения чисто исследовательских задач. На станции проводился комплекс гидрометеорологических, геофизических, астрономических, медико-физиологических и других наблюдений. Синоптическое обеспечение жизнедеятельности станции проводилось прогностической группой станции Молодежная.

Чрезвычайно суровые условия погоды, характерные для района расположения станции, формируются при сочетании низких температур воздуха и ураганных



Рис. 1. Окрестности станции Русская (фото из архива РАЭ)

ветров. Среднегодовая температура воздуха за весь период наблюдений составила – 12,4 °С. Наиболее теплый месяц январь, наиболее холодный – август. Абсолютный минимум температуры составил –46,4 °С, абсолютный максимум +7,4 °С. В районе станции часты метели около 150 дней в год нередко с выпадением снега и ограничением видимости до минимальных значений. В силу особенностей орографии преобладают ветры восточного направления (см. также <http://south.aari.nw.ru>).

Атмосферная циркуляция в тихоокеанском секторе Антарктики характеризуется высокой активностью. Процессы циклогенеза наиболее развиты в холодный период года и ослаблены в ноябре–январе. Наибольшая повторяемость подвижных циклонических вихрей отмечается в зоне 60–70° ю.ш., а основная область интенсивного циклогенеза локализуется к северу от островов Тасмания и Новая Зеландия в зоне 50–60° ю.ш. Случаи образования циклонов южнее 60° ю.ш. чрезвычайно редки. Преобладающее число циклонических вихрей смещается по зональным траекториям, но наибольшей активностью отличаются циклоны, движущиеся по субмеридиональным траекториям из вышеуказанной зоны циклогенеза по направлению к Берегу Хобса. Такие процессы связаны с развитием блокирующего тропосферного гребня, направленного с севера на море Амундсена. Высокая повторяемость подобных ситуаций способствует формированию квазистационарной барической депрессии к северу от Берега Хобса, что особенно характерно для холодного периода года. С другой стороны, развитие блокирующих ситуаций при активизации антарктического антициклона способствует также образованию области высокого давления над побережьем Земли Мэри Бэрд.

Своеобразие процессов атмосферной циркуляции в исследуемом регионе определяет уникальность барического и ветрового режимов станции Русская.

Среднегодовое значение давления на уровне моря на станции Русская является самым низким для прибрежных антарктических станций – 980,9 гПа. Годовой ход давления характеризуется наступлением максимума в январе и минимума в октябре. Абсолютный максимум давления составил 1019,1 гПа, абсолютный минимум – 923,4 гПа. Амплитуда годового хода давления по среднемесячным данным на станции Русская значительно выше, чем на других антарктических станциях.

Суровость ветрового режима – отличительная черта климата района станции Русская. Среднегодовая скорость ветра составляет здесь 12,9 м/с. Максимум средней за месяц скорости ветра отмечен в марте – 18,1 м/с, минимум – в январе – 9,6 м/с. Максимальная средняя скорость ветра в течение года, за исключением января и февраля, колеблется в пределах 46–61 м/с. Зарегистрированный

максимальный порыв скорости ветра составил 77 м/с, более сильные порывы измерить не удалось вследствие разрушения датчиков ветра. Известен случай, когда ветер силой 50–60 м/с длился непрерывно в течение 16 суток. В среднем за год на станции отмечается 264 дня с ветром более 15 м/с и 136 дней с ветром более 30 м/с. Все зафиксированные на станции ураганные ветры имели циклоническое происхождение с направлением в диапазоне 75–85°. Характерные для других районов антарктического побережья с крутым ледниковым склоном юго-восточные ветры здесь неустойчивы. Даже в тыловых частях циклонических возмущений направление ветра тяготеет к западному–юго-западному, соответственно широтной ориентации берега. Во всех случаях ураганные усиления ветра были связаны с приближением очень активных циклонов с северо-запада к побережью Земли Мэри Бэрд, траектория перемещения которых определялась локализацией блокирующего тропосферного гребня, направленного на море Амундсена. При этом центры циклонических вихрей располагались над океанической акваторией западнее меридиана станции, а облачный фронт был ориентирован вдоль побережья. Очевидно, с учетом орографии побережья, эти условия являются необходимыми для ураганного усиления ветра.

Для успешного прогнозирования таких ситуаций необходимо получать спутниковую информацию об облачности не менее двух раз в сутки, что позволяет определить скорость и направление перемещения облачных вихревых возмущений. Вспомогательным материалом могут служить синоптические карты, но они бывают неточны для этого региона из-за недостатка данных метеорологических наблюдений.

Усиление скорости ветра до ураганных значений можно предусмотреть также по данным метеонаблюдений на станции. Приближение активного циклона к побережью обычно сопровождается натеканием перисто-слоистой и высоко-слоистой облачности за 6–12 ч до усиления ветра. При этом отмечается падение давления и повышение температуры воздуха на 5–10°. Последующий разворот ветра на 75–85°, если до этого направление было иное, свидетельствует о скором его усилении. Разворот ветра к северо-востоку с понижением скорости не всегда можно принимать за окончание шторма, так как это может быть связано с прохождением фронтального раздела, за которым следует очередной циклон. В некоторых случаях возможно прохождение двух и более циклонических возмущений с примерно суточной периодичностью, что является причиной длительных штормовых ситуаций. Обычно ветер стихает окончательно при повороте на юго-запад.

Основной особенностью ледового режима района расположения станции Русская является ежегодно формирующаяся широкая сплошная полоса припая и цепочка стационарных полыней, развитых вдоль береговой линии в летний период. Характерной особенностью припая является его повышенная устойчивость. Ежегодно он достигает одних и тех же предельных размеров – около 100 км, ограниченных шельфовой зоной. В весенне-летний период разрушается около половины припайного льда. В районе станции припай взламывается один раз в 3–4 года. В случае взлома многолетнего припая частые ураганные ветры длительное время препятствуют формированию устойчивого льда.

Ниже приводятся синоптические и статистические оценки ключевых элементов режима района станции Русская.

СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ УРАГАНЫХ ВЕТРОВ НА СТАНЦИИ РУССКАЯ

Возможности анализа синоптических условий экстремальных усиления ветра в районе станции ограничены полным отсутствием данных метеорологических наблюдений на обширнейшем участке побережья и океанической акватории западной части тихоокеанского сектора Антарктики, что определяет невысокое ка-

чество синоптических материалов в этом регионе. Поэтому для этой цели использовались в основном данные спутниковых наблюдений облачного покрова и четырехсрочных метеорологических наблюдений непосредственно на станции. В качестве исходных послужили материалы за 1986 г., когда на станции Русская было зарегистрировано восемь случаев ураганных ветров, скорость которых при порывах равнялась или превышала 60 м/с. Выбор этого периода был определен наличием соответствующей спутниковой информации об облачности. Штормовые ситуации преобладали в холодный период года. Два случая отмечены в мае, один в июле, два в июне, два в октябре и один случай зарегистрирован летом – в декабре. Минимальная продолжительность экстремального усиления ветра составила двое суток, максимальная – около пяти. Наибольшая сила ветра 75 м/с при порыве была зарегистрирована 27 октября. Выполненный анализ показал, что во всех рассматриваемых ситуациях экстремальные усиления ветра были связаны с выходом к побережью активных циклонических вихрей с северо-запада.

Атмосферная циркуляция в западной части тихоокеанского сектора Антарктики характеризуется высокой интенсивностью, и даже в летний период здесь обычны вспышки активного циклогенеза. Высокая повторяемость блокирующего тропосферного гребня, ось которого располагается в секторе 140–160° з.д., обуславливает формирование так называемой новозеландской меридиональной циклонической траектории, одной из наиболее значимых в атмосфере Антарктики. Циклонические вихри, образующиеся над океанической акваторией в умеренных широтах, перемещаются в юго-восточном направлении к антарктическому побережью в районе Берега Хобса и в большинстве случаев заполняются в этом регионе, создавая условия для формирования климатического циклона [1].

На станции приближение циклона обычно характеризуется падением атмосферного давления, натеканием высоко-слоистой облачности, разворотом ветра к ВСВ и дальнейшим его усилением до ураганных значений. В период шторма повышается температура воздуха, иногда довольно значительно – на 15–20°, что, очевидно, связано с выносом тепла с северных океанических акваторий при приближении циклона к побережью. Особо следует отметить устойчивость направления штормовых и ураганных ветров, которое удерживается преимущественно на отметке 70–80°. Ослабление ветра обычно связано с его разворотом к ЗЮЗ и началом роста давления, что свидетельствует о смещении циклонического вихря на восток. В случае регенерации циклона, вызвавшего ураган, или приближения следующего атмосферного вихря шторм приобретает затяжной характер. Регенерация активных циклонов, имеющих значительные запасы тепла и приближающихся к антарктическому побережью, осуществляется при вовлечении в расширяющуюся по площади циклоническую циркуляцию холодного антарктического воздуха южными тыловыми потоками. При смещении нескольких вихрей возможно образование малоподвижной барической депрессии в океаническом регионе к северу от Берега Хобса. В таком случае сильный восточный ветер, иногда усиливающийся до штормового, может сохраняться на станции длительный период. Описанная выше схема развития ситуации с ураганными усилениями ветра на станции Русская существенно отличается по своей природе от характера возникновения юго-восточных стоковых ветров, обычных для районов антарктического побережья, имеющих крутой ледниковый склон. Юго-восточные ветры здесь вообще неустойчивы, их повторяемость незначительна. При обычном стоке нет четкой зависимости параметров ветра от циклонической деятельности. Характерно, что в тыловой части циклона стоковый ветер усиливается, а ураганный ветер на станции Русская, наоборот, ослабевает, причем и в такой ситуации направление ветра тяготеет к ЗЮЗ – вдоль береговой черты.

Метеорологическая площадка станции расположена на мысе Беркс на высоте 124 м над уровнем моря. От оконечности мыса с западной его стороны береговая

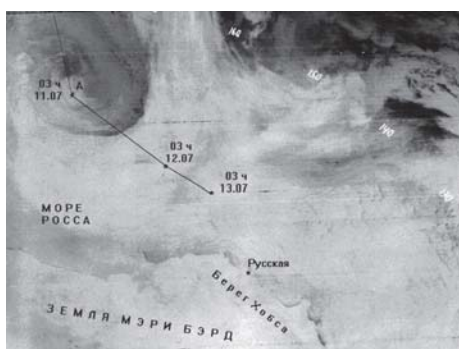


Рис. 2. Облачный вихрь активного циклона (центр в точке «А») и траектория его смещения у антарктического побережья на снимке ИСЗ NOAA-9 11 июля 1986 г. 02 ч 44 мин

линия уходит круто на юг. К востоку от станции берег, представленный материковым ледниковым покровом, на протяжении 20 км ориентирован на восток–северо-восток и далее на расстояние около 10 км – на восток с незначительной южной составляющей. На этом 30-километровом участке берега поднятие материкового ледникового покрова в сторону полюса составляет около 300 м на 10 км. Горизонталь с отметкой 100 м проходит на расстоянии около 3 км от береговой черты. Вдоль берега в районе станции располагается ряд возвышенностей с отметками 125–145 м. В общем, строение рельефа способствует усилению восточных ветровых потоков при приближении циклона, а крутизна склона недостаточна для развития интенсивных стоковых ветров. На рис. 2 показан облачный вихрь циклона, вызвавшего ураганное усиление ветра на станции Русская 11–13 июля 1986 г. Из-за отсутствия данных метеорологических наблюдений не представилось возможным определить его глубину, но структура облачности и размеры свидетельствуют о значительном запасе тепла и высокой активности этого вихря. Обычно в этих широтах циклоны полностью окклюдируются, в приводимом же случае на спутниковом снимке прослеживается наличие теплого фронта.

Данные табл. 1 наглядно иллюстрируют развитие штормовой ситуации. Значения атмосферного давления и барической тенденции свидетельствуют о том, что

Таблица 1

Состояние погоды на ст. Русская 11–14 июля 1986 г.

Дата	Срок набл.	Направление ветра град.	V_{cp} м/с	$V_{пор.}$ м/с	$T_{возд.}$ °С	Рп гПа
11.07	06	00	00	05	–36,9	980,2
	12	35	04	08	–34,2	982,6
	18	75	22	28	–23,6	977,5
12.07	00	80	30	37	–22,1	971,0
	06	80	38	51	–20,2	961,1
	12	85	38	58	–18,6	958,0
13.07	18	80	25	53	–18,0	968,0
	00	85	34	46	–18,8	966,4
	06	85	40	58	–18,2	951,5
13.07	12	85	39	67	–17,3	951,5
	18	75	28	48	–15,4	956,4
	14.07	00	40	05	34	–22,8
06		250	06	12	–26,9	981,5

погода на станции Русская формировалась под влиянием циклона, который 11–12 июля со значительной скоростью смещался к району Берега Хобса (рис. 2). 11 июля во второй половине суток с началом падения давления ветер принял устойчивое направление около 80° и в середине суток 12 июля усилился до 38 м/с при порывах 58 м/с. Во второй половине суток 12 июля на фоне начавшегося роста давления наблюдалось некоторое ослабление ветра, связанное, очевидно, с начавшимся заполнением циклона. Дальнейшее развитие процесса определялось регенерацией этого атмосферного вихря, что выразилось в значительном падении давления и усилении ветра в середине суток 13 июля до 40 м/с при порывах 67 м/с. После этой вспышки активности снова начался рост атмосферного давления и деградация вихря. В начале суток 14 июля ветер развернулся к ЗЮЗ и окончательно ослабел. В процессе развития штормовой ситуации температура воздуха на станции Русская повысилась на 19°.

В рассмотренном случае продолжительность урагана (число шестичасовых сроков наблюдений с силой ветра более 29 м/с при порывах) составила около 54 ч. Ураганный ветер может быть более продолжительным, если к району Берега Хобса сместятся поочередно два или более атмосферных вихря, как это произошло в период с 15 по 19 мая 1986 г., когда такой шторм наблюдался около 116 ч. Развитие этой ситуации отражено в табл. 2. Первый циклон начал оказывать влияние на погоду станции Русская в середине суток 15 мая, что выразилось в падении давления и устойчивом развороте ветра на отметку 70–80° с усилением до 38 м/с при порывах 60 м/с. 17 мая на фоне роста давления наблюдалось постепенное ослабление ветра с поворотом к отметке 60°. Затем приблизился следующий циклон, давление упало

Таблица 2

Состояние погоды на ст. Русская 15–20 мая 1986 г.

Дата	Срок набл.	Направление ветра град.	V_{cp} м/с	$V_{пор.}$ м/с	$T_{возд.}$ °С	Рп гПа
15.05	00	30	08	10	–17,8	1015,6
	06	50	14	17	–16,4	1013,6
	12	70	18	21	–17,7	1011,4
	18	80	26	33	–19,9	1009,4
16.05	00	80	35	44	–20,4	1003,6
	06	70	38	56	–19,8	997,3
	12	70	37	60	–19,5	997,1
	18	80	38	54	–21,4	999,8
17.05	00	85	25	48	–20,4	1004,6
	06	80	31	37	–18,5	1007,5
	12	75	27	42	–17,9	1008,8
	18	60	28	37	–17,3	1012,2
18.05	00	70	26	36	–16,9	1015,5
	06	60	20	32	–16,0	1015,0
	12	80	27	33	–13,7	1009,8
	18	80	27	39	–12,4	1005,9
19.05	00	75	32	41	–11,5	1000,6
	06	65	37	57	–11,0	993,1
	12	80	40	55	–11,1	992,5
	18	80	31	54	–10,8	996,4
20.05	00	80	29	42	–10,9	1001,2
	06	70	23	31	–10,6	1005,2
	12	75	17	22	–09,6	1007,9

и ветер снова усилился до 40 м/с при порывах 57 м/с. Ураган окончательно ослабел в конце суток 19 мая, но сильный восточный ветер (до 23 м/с) сохранялся еще около двух суток, что, очевидно, было связано с образовавшейся в океаническом регионе к северу от Берега Хобса малоподвижной медленно заполняющейся депрессией. Повышение температура воздуха в этом случае составило около 10°.

Наименее продолжительный из рассмотренных восьми случаев ураган (24 ч) был вызван циклоническим вихрем, смещавшимся в направлении Берега Хобса 5–6 мая. Как видно из показаний атмосферного давления и ветровых параметров, процесс усиления ветра до ураганных значений в общих чертах происходил в соответствии с вышеописанными схемами, но в отличие от них циклон быстро смещался на восток, что и обусловило относительную небольшую продолжительность урагана. Температура воздуха на станции повысилась на 5°. Максимальная сила ветра составила 42 м/с, порывы достигали 60 м/с.

В проанализированных ситуациях ураганные ветры возникали при выходе циклонов по меридиональным траекториям. При этом нельзя исключать, что штормовые условия могут вызываться такими вихрями, смещающимися в широтном направлении.

Отмеченные закономерности в процессе развития штормовой ситуации на станции Русская могут быть использованы как прогностические признаки, особенно в условиях отсутствия оперативной спутниковой информации об облачности. В таком случае экстремальное усиление ветра можно предусмотреть за 6–12 ч до его начала. Приближение циклона определяется по натеканию перисто-слоистой и высоко-слоистой облачности и началу падения давления. Последующий разворот ветра на восток, если перед этим направление было иное, свидетельствует о скором его усилении.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СКОРОСТИ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА В ЗАПАДНОЙ АНТАРКТИДЕ

Многолетние временные ряды данных срочных метеорологических измерений позволяют анализировать межгодовую изменчивость, годовую ритмику, внутрисезонную изменчивость, процессы синоптического масштаба и суточный ход ключевых элементов климатического режима. Формирование исчерпывающих архивов данных стандартных приземных измерений в южной полярной области [10, 18, 19] предоставило возможность получения надежных оценок параметров климатической изменчивости за весь период измерений в регионе. Проведение детального исследования статистической структуры полей метеорологических элементов обусловлено необходимостью построения прикладных режимно-справочных метеорологических пособий, выполнения климатического районирования и верификации региональных моделей циркуляции с высоким разрешением [20], обеспечения проектирования и установки автоматических метеостанций в Антарктике.

Задача настоящего исследования заключается в количественной оценке особенностей изменчивости параметров ветрового режима с учетом его векторной природы на основе векторно-алгебраического метода [2, 12] по данным приземных измерений, выполненных на станции Русская. В качестве исходных данных в работе использованы результаты четырехсрочных в сутки стандартных измерений за весь период работы станции. Наблюдения за скоростью ветра производились с помощью анеморумбометра М-63М, шкала которого оцифрована и поверена до значений скорости ветра 90 м/с.

Поддиапазонный статистический анализ временных рядов позволяет оценить вклад взаимодействия процессов различных масштабов в формирование климатической изменчивости. Ключевым звеном такого взаимодействия является годовая ритмика — ее характеристики изменяются от года к году, а сам годовой ход модулирует процессы синоптического масштаба и внутрисуточные колебания [11]. В рабо-

те [4] изменчивость параметров годового хода трактуется как модуляционная составляющая (МС) межгодовой изменчивости в отличие от аддитивной составляющей (АС), представленной рядом среднегодовых значений. Задачами поддиапазонного анализа являются выбор адекватных статистических моделей и оценивание вероятностных характеристик изменчивости с учетом векторной природы ветра.

Модели случайной величины (СВ) в терминах закона распределения вероятностей и его моментов и квантилей, стационарного (в широком смысле) случайного процесса (ССП) в терминах математического ожидания, дисперсии и/или среднеквадратического отклонения (СКО) и спектральной плотности использованы ниже для выявления наиболее общих закономерностей во всем частотном диапазоне, оценивания распределения дисперсии по диапазонам, анализа АС и в качестве индикаторов годовой, суточной ритмики и изменчивости синоптического масштаба [7].

Исчерпывающей вероятностной характеристикой стохастического евклидового вектора \vec{V} (с модулем $|\vec{V}|$ и направлением φ как СВ является [13] закон двумерного распределения вероятностей $F(|\vec{V}|, \varphi)$, традиционно представляемый [9, 16] таблицей повторяемости (обеспеченности) по румбам и градациям модуля или графически розой ветра, определяющий на каждом румбе вероятность заданной градации модуля. В практических задачах наряду с $F(|\vec{V}|, \varphi)$ целесообразно использовать квантили распределения [13] модуля $|\vec{V}|_p^{(q)}$ порядка p по выборкам, сгруппированным по румбам, определяющие диапазон значений модуля заданной вероятности. Центр распределения характеризует медиана ($p = 0,5$), оцениваемая центральным членом ранжированной выборки $|\vec{V}|_1 \leq |\vec{V}|_2 \leq \dots \leq |\vec{V}|_n$. Медианы левой ($p = 0,25$) и правой ($p = 0,75$) половин ранжированной выборки называют нижним и верхним квартилями. Интервал $|\vec{V}|_{0,25} \div |\vec{V}|_{0,75}$ называют интерквартильным расстоянием Q , он включает 50 % значений в окрестностях центра распределения, интервалы $|\vec{V}|_{\min} \div |\vec{V}|_{0,25}$ и $|\vec{V}|_{0,75} \div |\vec{V}|_{\max}$ включают по 25 % аномальных значений. Еще одной важной характеристикой масштаба распределения является размах $R = |\vec{V}|_{\max} - |\vec{V}|_{\min}$.

Для сжатия информации о распределении и описания $\vec{V}(t)$ как случайного процесса используют моменты и моментные функции, определяемые векторно-алгебраическим методом [2]. Математическое ожидание в стационарном приближении есть вектор \vec{m}_V с модулем $|\vec{m}_V|$ и направлением φ . Дисперсия в стационарном приближении есть симметричный тензор D_V , свойства которого раскрываются через инварианты – скалярные числа, не изменяющиеся при развороте исходной системы координат. Собственные числа λ_1, λ_2 характеризуют дисперсию по ортогональным направлениям и используются для геометрической интерпретации D_V в виде эллипса с полуосями λ_1, λ_2 , развернутого на угол α относительно положительного направления оси OY исходной системы координат. Инвариантами тензора среднеквадратического отклонения σ_V являются числа $\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}$. Линейный инвариант I_1 тензора D_V

$$I_1 = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (1)$$

характеризует модуль общей изменчивости скорости независимо от того, изменяются ли модуль $|\vec{V}|$ или направление φ скорости ветра. Поэтому сопоставление I_1 с дисперсией D_V модуля скорости V как скалярной величины можно использовать для оценки вклада вращения. Инвариант χ

$$\chi = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (2)$$

характеризует вытянутость эллипса дисперсии – при $\chi = 0$ происходят только реверсивные изменения скорости, либо изменяется лишь $|\vec{V}|$ при постоянном φ , а при $\chi = 1$ интенсивность изменчивости по всем направлениям одинакова. Векторным аналогом коэффициента изменчивости является число

$$v = (I_1)^{0,5} / |\vec{m}_V|. \quad (3)$$

Спектральная плотность в стационарном приближении $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega)$ есть тензор-функция, содержащая симметричную и кососимметричную части. Неотрицательный инвариант $I_1(\omega)$ (1) симметричной части $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega)$ характеризует распределение по частотам интенсивности общей (по $|\bar{\mathbf{V}}|$ и по φ) изменчивости, а знакопеременный инвариант $D(\omega)$ кососимметричной части $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega)$, называемый индикатором вращения, характеризует вклад вращения в общую дисперсию. Они связаны соотношением $I_1(\omega) \geq |D(\omega)|$. Если $D(\omega) > 0$, то преобладает вращение по часовой стрелке и наоборот, а $D(\omega) = 0$ может свидетельствовать не только об отсутствии вращения, но и об одинаковой интенсивности вращательных движений в обоих направлениях. Необходимым и достаточным условием отсутствия вращения является $I_1(\omega) = \lambda_1(\omega)$.

Адекватной математической моделью, учитывающей регулярную повторяемость колебаний и стохастичность их параметров, является периодически коррелированный случайный процесс [5, 12]. Процесс называют периодически коррелированным (ПКСП), если его вероятностные характеристики инвариантны относительно сдвига на положительное число периодов коррелированности T (1 год или 1 сутки). Когерентные оценки вероятностных характеристик ПКСП $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$, $\mathbf{D}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$, $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega, t)$ получают по данным, взятым через T , т.е. за одноименные месяцы (сроки) после предварительного центрирования на средние за T значения (т.е. на АС). В силу периодичности они разложимы в ряд Фурье. Оценки компонентов Фурье \mathbf{m}_k , \mathbf{D}_k , $\mathbf{S}_k(\omega)$ придают количественную определенность качественным особенностям годового (суточного) хода $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$, $\mathbf{D}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$, $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega, t)$ и использованы для сжатия информации и параметризации процессов с годовой и суточной ритмикой. Математическое ожидание в ПКСП-приближении есть периодический вектор [7, 13]:

$$\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{V}}}(t) = \bar{\mathbf{m}}_0 + \sum_{k=1}^N \bar{\mathbf{m}}_k(t), \quad (4)$$

где $\bar{\mathbf{m}}_0 \equiv \bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{V}}}$, $\bar{\mathbf{m}}_k(t)$ – векторные гармоники, представленные годографами векторов $\bar{\mathbf{m}}_k(t_j)$, j – номер месяца, концы которых за период T_k обходят эллипсы с параметрами $L_{1,2}^{(k)}$ – длина большой и малой полуосей, $\beta_k \pm \pi$ – ориентация большой оси в исходной системе координат, $\psi_k \pm \pi$ – фаза (два момента максимума $|\bar{\mathbf{m}}_k|$), в направлении по часовой стрелке $J_k > 0$ или против часовой стрелки $J_k < 0$. Эти параметры определяют через амплитуды $A_{x,y}^{(k)}$ и фазы $\psi_{x,y}^{(k)}$ компонентов разложения в ряд Фурье проекций $m_x^{(k)}(t)$, $m_y^{(k)}(t)$. Дисперсионный вклад векторных гармоник $\bar{\mathbf{m}}_k$ в результирующий годовой ход $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$ можно представить числами

$$\mu_k = \frac{[L_1^{(k)}]^2 + [L_2^{(k)}]^2}{\sum_{k=1}^m [L_k^{(k)}]^2 + [L_2^{(k)}]^2}. \quad (5)$$

В ПКСП приближении $\mathbf{D}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$ – периодическая тензор-функция, инварианты которой являются скалярными периодическими функциями [13]. Для описания эволюции $\mathbf{D}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$ во времени использованы ряды параметров разложения (4) исходных данных $\bar{\mathbf{V}}(t)$ на годовых отрезках [8].

Когерентной оценкой спектральной плотности в ПКСП-приближении является поверхность [5, 13] $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega, t)$, которую можно графически представить набором сечений по t . В компонентном методе распределение по частотам средней за период T мощности колебаний, оставшихся в ПКСП после центрирования на АС и $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{V}}}(t)$, характеризует нулевой спектральный компонент $\mathbf{s}_0(\omega)$, обладающий всеми свойствами спектральной плотности ССП и связанный с $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega)$ соотношением

$$\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{V}}}(\omega) = \mathbf{s}_0 + \sum_{k=-N}^N |\bar{\mathbf{m}}_k|^2 \delta\left(\omega + k \frac{2\pi}{T}\right). \quad (6)$$

Таким образом, $s_0(\omega)$ уже не содержит составляющих, определяющих мощность регулярных колебаний.

Суточный ход скорости ветра в Антарктиде в значительной степени обусловлен кататическим эффектом [9] из-за усиления выхолаживания приповерхностного воздуха в ночные и предутренние часы. Сезонную модуляцию суточного хода описывает модель бипериодически коррелированного случайного процесса (БПКСП) [5, 13]. В когерентном методе она реализована в форме оценок $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{v}}}(t)$, $\mathbf{D}_{\bar{\mathbf{v}}}(t)$, $\mathbf{S}_{\bar{\mathbf{v}}}(\omega, t)$ на суточном периоде $T = 24$ ч по месяцам, а в компонентном методе – посредством разложения этих оценок в двойной ряд Фурье на периодах коррелированности $T_1 = 1$ сутки, $T_2 = 1$ год.

Синоптическую изменчивость целесообразно анализировать по ряду $\bar{\mathbf{V}}^0(t)$, центрированному на АС и годовой ход среднемесячных значений. Сезонную модуляцию и межгодовую изменчивость интенсивности процессов синоптического масштаба можно описать временным рядом внутримесячной дисперсии $\mathbf{D}_{\bar{\mathbf{v}}^0}$ как реализации ПКСП. Синоптическая изменчивость в атмосфере представляет собой динамику (зарождение, перемещение, трансформацию и исчезновение) циклонов и антициклонов. Обусловленные этими процессами изменения метеорологических характеристик в фиксированной точке пространства представляют собой ее локальные проявления. Поэтому для ее описания и параметризации целесообразно использовать последовательность «штормов» и «окон погоды» в форме модели случайного импульсного процесса [15]. «Шторм» означает выход $\bar{\mathbf{V}}^0(t)$ за заданный уровень z_j , а «окно погоды» – промежуток между двумя последовательными штормами. Тогда параметризация сводится к формированию последовательностей трех чисел – мощности h_i штормов, продолжительности τ_i штормов и окон погоды θ_i . Уровни z_j задают (например, на основании квантильного анализа или как критерии опасных или особо опасных явлений погоды).

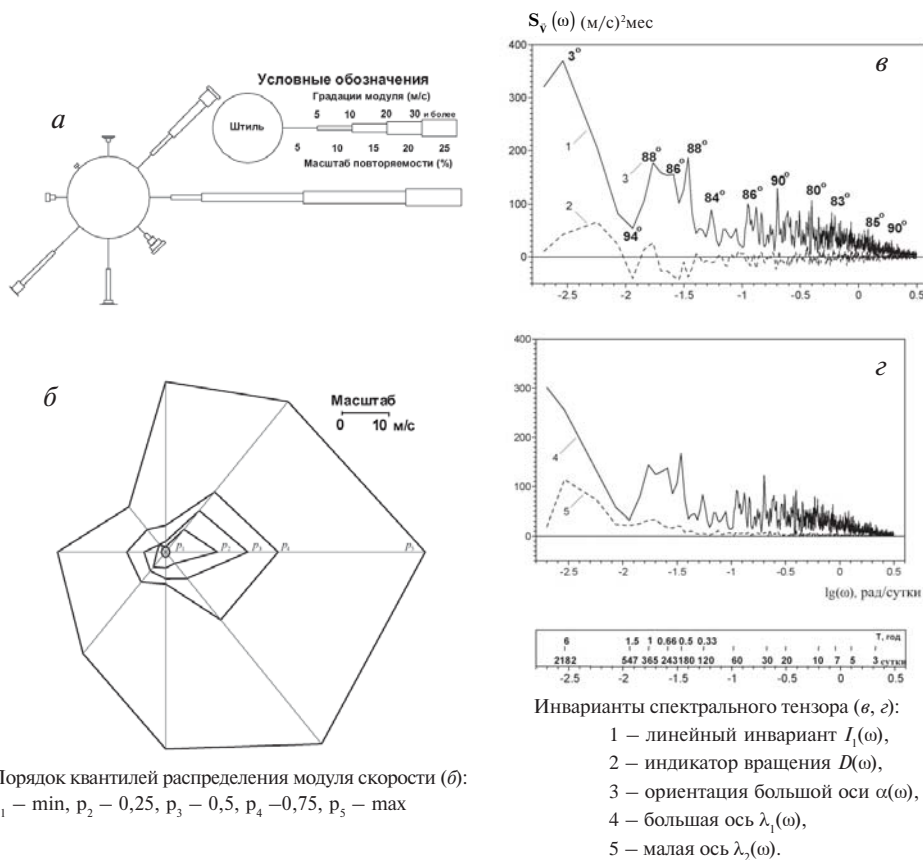
Экстремумы модуля $|\bar{\mathbf{V}}(t)|$ векторного случайного процесса можно анализировать по данным, сгруппированным по румбам. Использование в качестве экстремумов квантилей $|\bar{\mathbf{V}}_p^{(q)}$ редкой повторяемости (например, 3 % обеспеченности $p = 0,97$) позволяет оценить значения, возможные 1 раз в N лет [1, 14]. Оценки повторяемости P_j экстремумов по месяцам $j = 1 \div 12$ позволяют представить распределение годовых F_{extr} экстремумов смесью ежемесячных распределений F_j [1].

Тренд во временных рядах скорости ветра определен как [3]:

$$\bar{\mathbf{V}}(t) = \bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{v}}} + \bar{\mathbf{a}}t + \bar{\varepsilon}(t), \quad (7)$$

где $\bar{\mathbf{a}} = \{a_x, a_y\}$ – вектор с декартовыми компонентами a_x, a_y , являющимися наклонами трендов проекций, определяемых по линейной регрессионной модели [6] $V_{x,y}(t) = m_{x,y} + a_{x,y}t + \varepsilon_{x,y}(t)$. Параметрами тренда являются модуль и направление векторного аналога углового коэффициента $\bar{\mathbf{a}}$ и инварианты тензора дисперсии $\mathbf{D}_{\bar{\varepsilon}}$ аномалий относительно тренда. Из (7) следует, что тренд скорости ветра может проявляться не только через усиление/ослабление скорости, но и через разворот. Признаком преобладания первого из названных эффектов является выполнение условия $\Phi_{\bar{\mathbf{a}}} \pm \pi \approx \Phi_{\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{v}}}}$, а признаком наличия второго из названных эффектов является выполнение условия $\Phi_{\bar{\mathbf{a}}} \pm \pi \approx \Phi_{\bar{\mathbf{m}}_{\bar{\mathbf{v}}}} \pm \pi/2$.

Общая характеристика поддиапазонной изменчивости представлена на рис. 3 и в табл. 3–6. Двумерная повторяемость скорости ветра $P(|\bar{\mathbf{V}}|, \varphi)$ представлена розой ветра (рис. 3 а) – штиль показан кружком в центре, на каждом румбе выделено по 5 градаций (слабый 1–5 м/с, умеренный 6–10 м/с, сильный 11–20 м/с, очень сильный 21–30 м/с и штормовой ветер 30 м/с и более), обозначенных прямоугольниками различной высоты, а диаметр круга и длина прямоугольников соответствуют повторяемости. Две наиболее яркие и взаимосвязанные особенности распределения – исключительно сильный контраст между румбами восточной



Порядок квантилей распределения модуля скорости (θ):
 p_1 – min, p_2 – 0,25, p_3 – 0,5, p_4 – 0,75, p_5 – max

Рис. 3. Оценки вероятностных характеристик скорости ветра по данным срочных измерений: a – роза ветра, b – квантили распределения модуля скорости по румбам (без учета штиля), v, z – инварианты тензора спектральной плотности

четверти и остальными и большая повторяемость очень сильных и штормовых ветров восточной четверти в результате взаимодействия синоптических процессов и кататического эффекта. На других румбах повторяемость ветра $|\vec{V}| > 20$ м/с нулевая или ничтожно мала. Второй (более слабый) максимум повторяемости по ϕ имеет юго-западный ветер, но он обусловлен повышенной повторяемостью слабого и умеренного ветра. Наименьшую повторяемость имеет северо-западный ветер, у которого $|\vec{V}|$ не превышает 10 м/с.

Для многих видов деятельности за критерий опасного явления погоды (ОЯ) принят $|\vec{V}| > 10-12$ м/с, а за критерий особо опасного явления погоды (ООЯ) принят $|\vec{V}| > 30$ м/с. Из квантильной диаграммы (рис. 3 б) видно, что в восточной четверти критерий ОЯ не превышают всего лишь 25 % (интервал p_1-p_2) наиболее слабых ветров, 50 % значений $|\vec{V}|$ в окрестностях центра распределения (интерквартильное расстояние p_2-p_4) приходится на сильные ветры, 25 % положительных аномалий (интервал p_4-p_5) представлены очень сильными и штормовыми ветрами, причем ООЯ отмечаются почти в 10 % случаев. Учитывая, что общая повторяемость восточных ветров наиболее велика, а их $|\vec{V}|$ достигает 50 м/с и более, условия в районе станции Русская по этому показателю похожи на условия

Таблица 3

Оценки вероятностных характеристик годового и суточного хода модуля $|\bar{m}_v|$ и направления φ средней скорости ветра $\bar{m}_v(t)$, инварианта I_1 и ориентация α эллипса дисперсии $D_v(t)$, вытянутости χ эллипса СКО $\sigma_v(t)$ и коэффициента изменчивости ν

Месяц	Срок	Среднее		Дисперсия и СКО							
		$ \bar{m}_v $ м/с	φ град.	Срочные данные				Среднемесячные данные			
				$I_1^{(D)}$ м ² /с ²	$\alpha^{(D)}$ град.	$\chi^{(e)}$	ν	$I_1^{(D)}$ м ² /с ²	$\alpha^{(D)}$ град.	$\chi^{(e)}$	ν
I	ночь	8,4	86	106,4	77	0,30	1,52	9,1	65	0,38	0,46
	утро	8,5	82	110,7	76	0,33	1,57	10,4	60	0,50	0,51
	день	7,4	82	109,5	74	0,30	1,75	8,3	55	0,57	0,53
	вечер	7,5	85	109,7	74	0,29	1,73	9,1	59	0,48	0,54
II	ночь	8,8	88	101,4	78	0,29	1,42	6,6	65	0,48	0,39
	утро	8,6	86	108,0	79	0,31	1,50	6,2	65	0,47	0,39
	день	7,6	85	116,4	77	0,31	1,78	6,6	60	0,47	0,45
	вечер	7,8	88	111,8	76	0,30	1,69	5,9	67	0,50	0,42
III	ночь	11,9	88	176,5	82	0,35	1,42	23,1	93	0,53	0,55
	утро	12,3	87	184,9	82	0,36	1,41	25,9	102	0,57	0,56
	день	11,6	86	186,6	79	0,36	1,52	26,0	88	0,64	0,61
	вечер	11,7	87	179,1	82	0,34	1,45	28,6	87	0,61	0,61
IV	ночь	12,6	87	205,4	82	0,34	1,44	39,7	78	0,41	0,65
	утро	12,5	88	193,5	79	0,35	1,42	32,0	78	0,39	0,59
	день	12,7	87	205,8	81	0,39	1,46	28,4	76	0,46	0,63
	вечер	12,5	89	208,2	78	0,35	1,47	38,2	73	0,40	0,64
V	ночь	12,7	85	205,7	82	0,41	1,47	22,6	46	0,48	0,50
	утро	13,3	84	215,7	81	0,45	1,43	28,3	42	0,48	0,54
	день	13,5	86	212,3	81	0,43	1,42	29,1	44	0,51	0,54
	вечер	12,8	84	215,4	81	0,44	1,51	25,1	47	0,63	0,54
VI	ночь	10,5	89	221,7	81	0,42	1,86	17,9	59	0,74	0,56
	утро	10,6	87	229,2	83	0,48	1,91	19,2	36	0,77	0,58
	день	10,5	89	231,0	82	0,52	1,95	20,9	30	0,78	0,61
	вечер	10,5	86	202,0	82	0,43	1,86	14,6	34	0,80	0,51
VII	ночь	9,5	85	202,2	78	0,39	1,93	19,9	57	0,62	0,65
	утро	10,1	84	191,8	76	0,41	1,79	21,3	59	0,68	0,64
	день	9,9	86	197,2	76	0,42	1,85	22,4	67	0,70	0,66
	вечер	9,8	87	203,7	77	0,40	1,88	19,7	54	0,62	0,62
VIII	ночь	9,8	88	207,9	77	0,37	1,88	25,1	74	0,44	0,67
	утро	9,7	86	194,8	80	0,37	1,85	26,8	74	0,44	0,70
	день	9,2	89	194,4	79	0,39	1,96	23,7	72	0,48	0,71
	вечер	9,4	87	191,9	80	0,37	1,90	23,4	75	0,51	0,69
IX	ночь	8,2	89	188,0	77	0,42	2,18	10,6	17	0,72	0,55
	утро	8,5	88	193,7	76	0,45	2,17	9,7	19	0,56	0,50
	день	7,9	89	172,5	75	0,42	2,19	10,6	40	0,59	0,56
	вечер	8,0	88	173,1	75	0,45	2,17	10,1	27	0,65	0,55
X	ночь	11,3	87	199,6	82	0,38	1,61	18,8	106	0,82	0,54
	утро	11,6	86	197,8	81	0,40	1,57	18,5	41	0,84	0,53
	день	10,9	85	192,6	79	0,36	1,63	13,0	66	0,89	0,47
	вечер	10,8	86	197,8	8	0,35	1,66	15,0	91	0,77	0,50
XI	ночь	9,4	87	144,0	79	0,32	1,60	12,1	92	0,52	0,50
	утро	9,4	83	144,4	79	0,34	1,63	13,9	92	0,52	0,54
	день	8,8	83	155,3	77	0,32	1,79	15,0	91	0,49	0,59
	вечер	8,9	86	144,8	78	0,31	1,70	15,9	88	0,45	0,59
XII	ночь	9,0	84	121,1	77	0,30	1,52	10,5	77	0,50	0,48
	утро	8,9	81	123,0	79	0,30	1,55	8,5	77	0,43	0,43
	день	7,5	80	132,2	73	0,31	1,92	9,3	71	0,55	0,55
	вечер	7,8	83	130,9	74	0,32	1,86	8,0	71	0,53	0,49

Таблица 4

Оценки средней многолетней скорости ветра \bar{m}_v , инварианта D_v дисперсии среднемесячных и среднегодовых данных, коэффициента \bar{a} векторного линейного тренда и инвариантов тензора D_ε дисперсии аномалий относительно тренда

Месяц	\bar{m}_v		D_v			\bar{a}		D_ε		
	$ \bar{m}_v $ м/с	φ град.	I_1 м ² /с ²	α град.	χ	$ \bar{a} $ м/с	$\varphi_{\bar{a}}$ град.	$I_1^{(E)}/I_1^{(V)}$ %	α град.	χ
I	8,0	83	8,8	59	0,47	0,46	63	70	55	0,58
II	8,2	86	6,0	63	0,47	0,23	48	90	66	0,49
III	11,9	87	25,3	93	0,56	0,99	276	71	88	0,71
IV	12,6	86	35,4	76	0,42	0,65	38	86	82	0,33
V	13,1	84	25,6	43	0,50	0,51	6	88	49	0,45
VI	10,5	87	17,3	37	0,78	0,66	2	69	69	0,60
VII	9,8	85	20,1	57	0,66	0,62	343	76	63	0,34
VIII	9,5	87	23,6	73	0,45	0,38	8	92	75	0,35
IX	8,2	88	9,5	24	0,62	0,37	33	83	18	0,69
X	11,1	85	15,7	89	0,90	0,20	323	97	82	0,88
XI	8,9	85	15,9	87	0,46	0,39	64	88	93	0,45
XII	8,3	81	8,1	75	0,50	0,33	73	84	76	0,56
Ср. год	10,1	86	4,5	356	0,71	0,28	18	82	339	0,74

Таблица 5

Годовой и суточный ход максимальной скорости ветра

Месяц	Срочные данные, срок										Средне- месячные данные	
	ночь		утро		день		вечер		ср. сут.			
	V м/с	φ град.	V м/с	φ град.	V м/с	φ град.	V м/с	φ град.	V м/с	φ град.	V м/с	φ град.
I	39	90	35	80	38	100	37	90	34,1	95	12,7	76
II	35	80	37	80	33	80	38	80	30,4	76	11,7	84
III	60	90	60	90	57	90	58	90	57,0	90	19,2	95
IV	60	90	55	80	60	90	60	90	53,8	90	20,6	90
V	53	100	55	90	52	90	54	90	47,3	90	18,6	87
VI	46	75	49	90	49	120	52	90	39,6	89	15,9	85
VII	41	70	47	70	49	80	49	130	42,3	80	15,0	85
VIII	46	100	43	80	44	100	52	90	40,5	80	15,1	94
IX	54	110	51	125	47	115	42	90	46,7	115	11,0	80
X	53	85	52	90	45	90	46	90	45,3	80	16,3	84
XI	40	90	39	80	47	90	40	90	34,0	90	14,0	81
XII	41	80	49	90	42	80	46	70	40,9	86	11,4	80

восточного побережья Антарктиды [9], и эти районы являются одним из мировых полюсов штормовой активности.

В табл. 7 приведены оценки средней скорости ветра \bar{m}_v и инвариантов тензора D_v при различных масштабах осреднения исходных данных. Инвариант I_1 показывает, что наибольший вклад в общую дисперсию вносит межсуточная изменчивость. Ориентация α эллипса D_v срочных, среднесуточных и среднемесячных значений практически совпадает с направлением среднего переноса φ , а у среднегодовых значений отличается почти на 90° . Инвариант χ указывает на существенную роль вращения для среднемесячных и особенно среднегодовых значений. Сопоставление I_1 с дисперсией модуля D_v показывает, что анализ одного лишь V без учета φ занижает дисперсию на 40–60 % для срочных, среднесуточных и среднемесячных значений, а для среднегодовых значений происходит более чем трехкратное уменьшение дисперсии.

Таблица 6

Оценки квантилей и экстремумов характеристик модуляционной составляющей межгодовой изменчивости скорости ветра и компонентов годового хода повторяемости штормов

Параметр	k	x_{\min}	$x_{0,25}$	$x_{0,50}$	$x_{0,75}$	x_{\max}	Q	R	
Параметры годовой ($k = 1$) и полугодовой ($k = 2$) гармоник годового хода скорости ветра									
$L_1^{(k)}$, м/с	1	1,34	2,04	2,82	3,53	4,09	1,49	2,75	
	2	1,00	1,76	1,89	2,29	5,68	0,53	4,68	
$L_2^{(k)}$, м/с	1	0,01	0,10	0,32	0,77	1,33	0,67	1,32	
	2	0,00	0,24	0,46	0,61	1,25	0,37	1,25	
$\psi_k \pm 0,5T_{ks}$, мес.	1	0,0	1,4	2,4	4,0	5,5	2,6	5,5	
	2	0,0	0,2	0,6	0,9	2,6	0,7	2,6	
$\beta_k \pm 180$, град.	1	22	49	76	88	108	39	86	
	2	10	67	78	88	133	21	123	
μ_k	1	0,21	0,27	0,37	0,38	0,77	0,11	0,56	
	2	0,06	0,14	0,25	0,53	0,71	0,39	0,65	
χ_k	1	0,00	0,03	0,18	0,30	0,65	0,27	0,65	
	2	0,00	0,10	0,13	0,27	0,67	0,17	0,67	
sp_{ks} , %	1	sp(+) = 20				sp(-) = 80			
	2	sp(+) = 20				sp(-) = 80			
Амплитуда A_k и фаза ψ_k компонентов годового хода инвариантов тензора внутримесячной дисперсии и повторяемости (P) штормов									
Параметры	k	x_{\min}	$x_{0,25}$	$x_{0,50}$	$x_{0,75}$	x_{\max}	Q	R	
$\lambda_1^{(k)}$	A_k , м ² /с ²	0	106,26	109,53	111,66	121,86	145,86	12,33	39,60
		1	2,90	16,37	27,41	36,70	49,30	20,33	46,40
		2	5,27	13,43	15,96	25,59	47,09	12,16	41,82
ψ_{ks} , мес		1	2,4	5,5	6,12	6,2	8,3	0,7	5,9
		2	0,9	2,7	3,2	3,5	4,2	0,8	3,3
χ_k	A_k , м ² /с ²	0	0,20	0,22	0,25	0,25	0,31	0,03	0,11
		1	0,01	0,02	0,04	0,06	0,10	0,04	0,09
		2	0,00	0,01	0,02	0,03	0,06	0,02	0,06
ψ_{ks} , мес		1	0,0	5,9	6,6	7,2	7,7	1,3	7,7
		2	0,9	1,6	1,9	3,7	4,9	2,1	4,0
P_k	A_k , %	0	6,2	7,1	8,8	9,6	13,1	2,5	6,9
		1	1,6	2,7	5,3	6,2	9,3	3,5	7,7
		2	0,9	3,0	3,7	5,1	7,9	2,1	7,0
		1	3,0	5,1	5,5	5,8	6,8	0,7	3,8
ψ_{ks} , мес		1	0,1	3,0	3,2	3,8	5,5	0,8	5,4

Таблица 7

Средние многолетние значения скорости ветра \bar{m}_v , максимального модуля $|\bar{V}|$ и оценки инвариантов тензора дисперсии D_v скорости ветра и дисперсии ее модуля D_V при различном масштабе осреднения данных

Масштаб осреднения		Срочные, $N = 14484$	Среднесуточные, $N = 3621$	Среднемесячные, $N = 119$	Среднегодовые, $N = 10$
Среднее	$ \bar{m}_v $	10,1			
	ϕ	86			
Дисперсия	D_v	111,1	93,3	13,1	1,3
	I_1	176,9	138,1	18,9	4,5
	χ^*	0,15	0,12	0,35	0,51
	α	79	79	75	175
Максимум	$ \bar{V} $	60	57,0	20,6	11,9

На графиках инвариантов тензора спектральной плотности (рис. 3 *в, з*) выделяются межгодовые колебания с периодом более 2 лет, годовая ритмика с пиками (примерно одинаковой высоты) на частотах годовой и полугодовой гармоник и в диапазоне 8–10 месяцев, внутрисезонные колебания с периодами 15–60 суток, связанные в первую очередь с крупномасштабными процессами (длинные атмосферные волны, цикл индекса и т.д.) и колебания синоптического масштаба с периодами 2–10 суток. Оценка спектральной функции в реальном масштабе ω (графики даны для наглядности в полулогарифмическом масштабе) показывает, что на эти диапазоны приходится 4 %, 5 %, 25 % и 55 % общей дисперсии соответственно. Вклад в дисперсию суточной ритмики составляет всего лишь около 1 %. В диапазонах внутрисезонной и синоптической изменчивости дисперсия почти полностью обусловлена изменчивостью зонального переноса ($\alpha \approx 90^\circ$, $\chi \approx 0$). На частоте годового и полугодового колебаний χ несколько увеличивается, знак $D(\omega)$ указывает на преобладание вращения по часовой стрелке на $T = 12$ месяцев и на преобладание вращения против часовой стрелки на $T = 6$ месяцев. В диапазоне межгодовых колебаний резко возрастает роль вращения (преимущественно по часовой стрелке), а направление максимальной изменчивости становится меридиональным.

В табл. 5, 6 приведены характеристики годового и суточного хода средней скорости ветра $\bar{m}_v(t)$ и оценок дисперсии $D_v(t)$ и СКО $\sigma_v(t)$ срочных значений $\bar{V}(t)$ и среднемесячного переноса $\bar{m}_v(t)$ по срокам (табл. 3) и в среднем за сутки (табл. 4). Направление $\varphi(t)$ средней скорости практически постоянно ($80-88^\circ$) в течение года и не имеет суточного хода. Годовой ход $|\bar{m}_v(t)|$ с размахом около 6 м/с имеет 2 максимума в переходные сезоны – главный в мае и вторичный в октябре и 2 минимума – главный летом и вторичный в конце зимы. Суточный $|\bar{m}_v(t)|$ ход с максимумом ночью и утром и минимумом днем и вечером проявляется только в теплый сезон, его размах достигает 1,0–1,5 м/с. Годовой ход инварианта $I_1(t)$ тензора $D_v(t)$ срочных значений имеет максимум в июне и минимум в январе–феврале, размах $I_1^{0,5}(t)$ составляет около 5 м/с. Размах суточного хода $I_1^{0,5}(t)$ изменяется от месяца к месяцу от 2 до 5,5 м/с, его форма и фаза в течение года не стабильны. Ориентация $\alpha(t)$ не имеет годового и суточного хода и почти совпадает с $\varphi(t)$ (отклонение к северу от не превышает $10-15^\circ$). Вклад вращения в общую дисперсию срочных значений $\bar{V}(t)$ необходимо учитывать, поскольку инвариант $\chi(t)$ тензора $\sigma_v(t)$ составляет 0,3–0,4 в теплый сезон и 0,4–0,5 в холодный сезон. В течение всего года $\bar{V}(t)$ неустойчив, т.к. $v(t) > 1$, и изменяется от 1,4–1,7 летом и в переходные сезоны до 1,8–2,2 зимой. Суточный ход $\chi(t)$ и $v(t)$ не выражен.

Инвариант $I_1(t)$ дисперсии среднемесячного переноса уменьшается в сравнении с дисперсией срочных значений в 5–10 раз в теплый сезон и в 10–20 раз в холодный сезон, т.е. зимой разброс направлений $\varphi(t)$ больше, чем летом. Годовой ход $I_1(t)$ имеет сложную форму – главный максимум отмечается в апреле и вторичный максимум в ноябре, главный минимум отмечается в феврале и вторичный в сентябре, размах годового хода $I_1^{0,5}(t)$ составляет 3 м/с, а размах суточного хода не превышает 2 м/с. Ориентация $\alpha(t)$ эллипса дисперсии среднемесячного переноса изменяется в течение года, так что направления максимальной изменчивости и среднего переноса в отдельные месяцы различаются на $50-70^\circ$. Вклад в дисперсию вращения среднемесячного переноса больше, чем для мгновенных значений, поскольку $\chi(t)$ изменяется от 0,4–0,6 в теплый сезон до 0,6–0,9 в холодный сезон. Среднемесячный перенос весь год устойчив – $v(t)$ составляет 0,4–0,7. Суточный ход $\alpha(t)$, $\chi(t)$ и $v(t)$ при месячном осреднении исходных данных выражен слабо.

Сопоставление изменчивости межгодового и синоптического масштаба с учетом сезонных особенностей в графической форме представлено на рис. 4 *б* совмещенными эллипсами СКО среднесуточных и среднемесячных (или среднегодо-

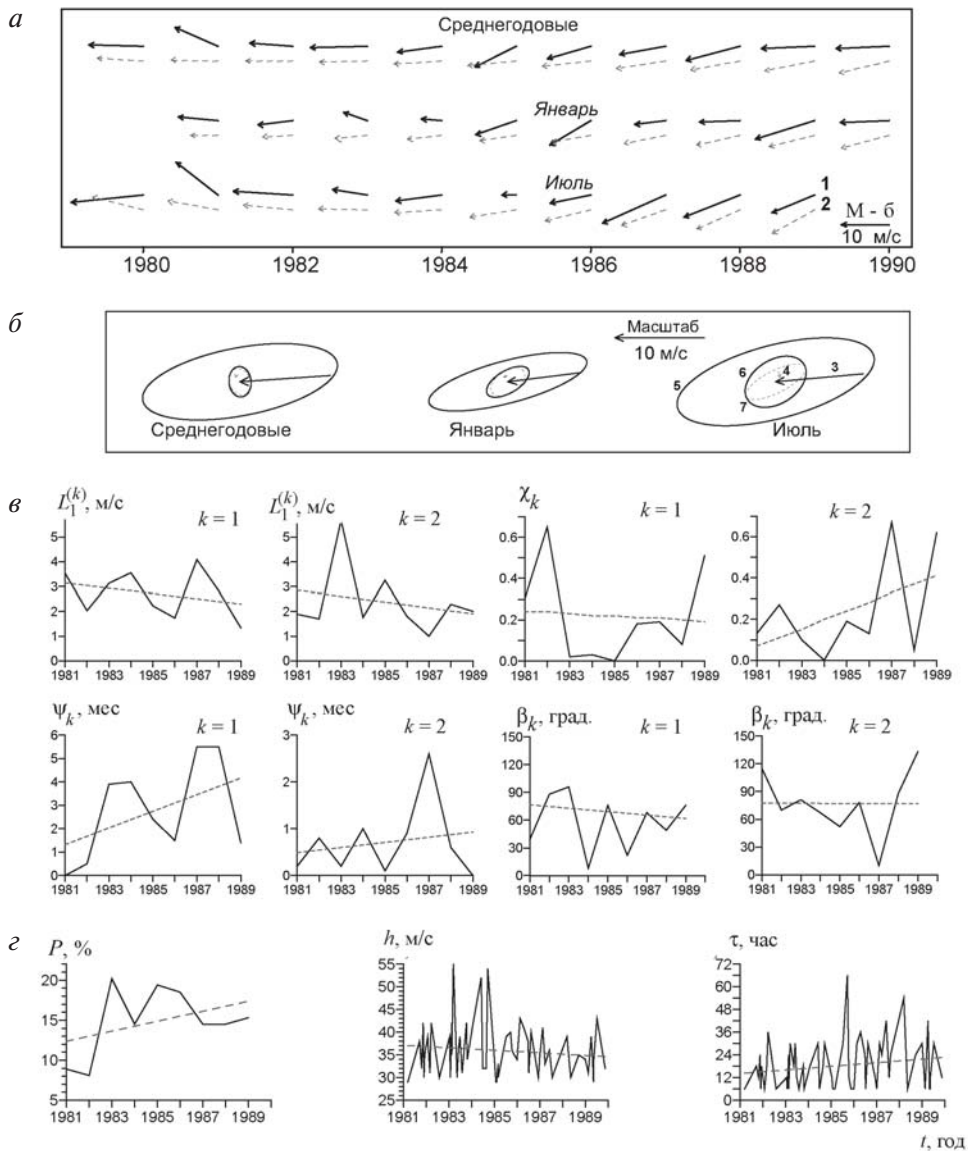


Рис. 4. Оценки вероятностных характеристик и трендов аддитивной и модуляционной составляющих межгодовой изменчивости:

a – ряды (1) и тренды (2) среднемесячной и среднегодовой скорости ветра; *б* – математическое ожидание скорости ветра и эллипсы среднеквадратического отклонения – вектор средней многолетней скорости (3), коэффициент тренда (4), эллипс среднеквадратического отклонения по среднесуточным данным (5), по среднемесячным или среднегодовым данным (6), относительно тренда (7); *в* – ряды и тренды параметров годового хода: длина большой оси $L_1^{(k)}$, вытянутость χ_k , фаза ψ_k и ориентация β_k эллипсов годовой ($k = 1$) и полугодовой ($k = 2$) гармоник; *г* – ряды и тренды общей повторяемости (P), интенсивности (h) и продолжительности (τ) индивидуальных штормов в мас

вых) данных. При различном масштабе осреднения данных эллипсы отличаются не только длиной осей, но также формой (июль) и ориентацией (среднегодовые).

В табл. 4 приведены характеристики годового и суточного хода многолетних максимумов модуля срочных и среднемесячных значений \bar{V} . Годовой ход $\max\{|\bar{V}|\}$ по срочным данным согласуется с годовым ходом $|\bar{m}_v|$, наибольшие значения отмечаются в переходные сезоны – в марте–апреле 55–60 м/с, а в сентябре–октябре – 45–55 м/с. Зимой $\max\{|\bar{V}|\}$ уменьшается до 40–50 м/с, летом до 30–40 м/с. Различия $\max\{|\bar{V}|\}$ между сроками не велики и связаны не только с суточным ходом, но и с выборочной изменчивостью времени начала и окончания штормов. Направление максимальной скорости в большинстве случаев составляет 70–90°, но в отдельных случаях имеет небольшую южную составляющую – 100–125°. Средне-суточные значения $\max\{|\bar{V}|\}$ лишь немногим меньше срочных, т.е. в каждом шторме $\varphi(t)$ почти не изменяется. Эти закономерности отмечаются и в тех случаях, когда наблюдаемые экстремумы в разные сроки отмечались в различные даты и даже годы. Следовательно, штормовые ветры в этом районе всегда формируются одним и тем же комплексом условий. Поскольку сильные и штормовые ветры отмечаются только у ветров восточных румбов и их направление в каждом шторме стабильно, значения $\max\{|\bar{V}|\}$ среднемесячного переноса также исключительно велики и составляют в апреле 20–22 м/с, в октябре 15–17 м/с и только летом уменьшаются до 10–13 м/с. Направление $\max\{|\bar{V}|\}$ всегда составляет 70–100°.

Ряд среднегодовых значений $\bar{V}(t)$ приведен на рис. 4 а. Следуя [4], будем называть его АС. Процесс $\bar{V}(t)$ устойчив, поскольку $\nu < 1$ (см. табл. 1), а большая ось эллипса D_v и вектор \bar{m}_v ортогональны (рис. 4 б). Согласно рис. 2 а, это связано с заметными выборочными отклонениями φ к югу (1985 г.) и к северу (1981 г.) при почти постоянном $|\bar{V}|$. У среднемесячных значений существенные межгодовые изменения происходят как у \bar{V} , так и у φ (см. также [17]).

Традиционным методом анализа АС является аппроксимация рядов среднегодовых значений линейным трендом. В табл. 4 и на рис. 4 а, б приведены оценки модуля $|\bar{a}|$ и направления φ_a векторного коэффициента линейного тренда (7) и инвариантов тензора дисперсии относительно тренда D_ε . Для среднегодовых значений тренд приводит к небольшому (около 0,3 м/с за год) усилению скорости ветра, что объясняет около 20 % дисперсии среднегодовых значений. В зависимости от месяца величина $|\bar{a}|$ изменяется от 0,2 до 1,0 м/с, возрастая с марта по июль. Соотношение φ_a и φ_v показывает, что с ноября по февраль тренд вызывает в основном усиление среднего ветра, а в остальные месяцы и в среднем за год приводит к левому развороту. В зависимости от месяца тренд объясняет от 3 до 30 % дисперсии среднемесячных значений, форма χ и ориентация α эллипсов D_ε и D_v близки (кроме июня по α и июля по χ). Размах годового хода \bar{a} среднемесячных значений превосходит по модулю \bar{a} среднегодовых значений, что косвенно свидетельствует о том, что модуляция годовой ритмики вносит в межгодовую изменчивость больший вклад, чем АС. Все тренды статистически не значимы на 95 % уровне. При столь непродолжительных рядах данных само понятие тренда в определенной степени условно.

В качестве индикатора годовой ритмики использована оценка $S_v(\omega)$ по среднемесячным данным в стационарном приближении (рис. 5 а), которая в основных чертах совпадает с оценкой по исходным данным (рис. 3 в, г) – годовая ритмика представлена пиками на частоте годовой и полугодовой гармоник примерно одинаковой высоты, на которых преобладает вращение противоположного направления.

Когерентные оценки годового хода модуля и направления вектора $\bar{m}_v(t)$ и инвариантов $D_v(t)$ тензора приведены на рис. 5 в, г в ПКСП-приближении, т.е. после центрирования исходных данных на АС. Годовой ход $|\bar{m}_v(t)|$ в ПКСП-приближении имеет 2 максимума – так же, как у исходных данных, а $\varphi(t)$ является

западным или восточным в зависимости от месяца. На рис. 5 d оценка $\vec{m}_v(t)$ представлена годографом, огибающая которого имеет сложную петлеобразную форму.

В стационарном приближении все процессы по определению рассматриваются как стохастические. Амплитуду $A(\omega_0)$ их колебаний в полосе частот $\delta\omega$ в окрестности ω_0 можно оценить по спектральной плотности $S(\omega)$ как [4]

$$A(\omega_0) = \sqrt{2\delta\omega S(\omega_0)}. \text{ Сопоставление этой оценки по рис. 3 а с оценками амплитуды}$$

регулярных колебаний $L_{1,2}^{(k)}$ показало, что регулярные годовые и полугодовые колебания объясняют около 80 % дисперсии колебаний в соответствующих частотных диапазонах. Столь значительное регулярное полугодовое колебание является важной отличительной особенностью режима ветра в рассматриваемом районе, т.к. для многих гидрометеорологических процессов в высоких и умеренных широтах это нехарактерно.

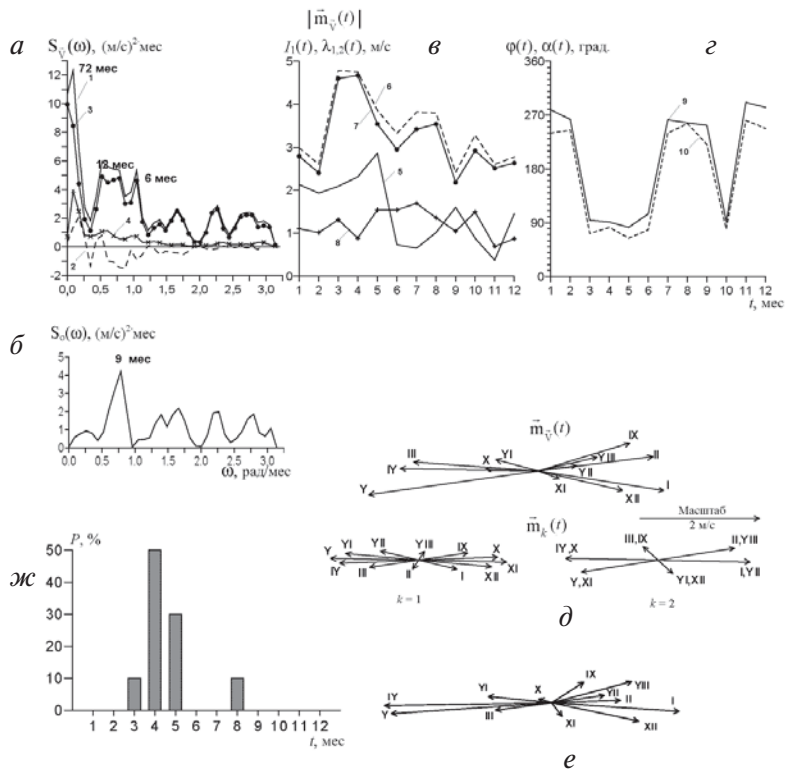


Рис. 5. Оценки вероятностных характеристик годовой ритмики среднемесячной скорости ветра в стационарном и ПКСП-приближении:

a – инварианты спектрального тензора в стационарном приближении: 1 – линейный инвариант $I_1(\omega)$, 2 – индикатор вращения $D(\omega)$, 3 – большая ось $\lambda_1(\omega)$, 4 – малая ось $\lambda_2(\omega)$; b – линейный инвариант нулевого спектрального компонента в ПКСП-приближении: 5 – модуль среднемесячной скорости ветра $|\vec{m}_v(t)|$, 6 – линейный инвариант $[I_1(t)]^{0.5}$ тензора дисперсии, 7 и 8 – инварианты $\lambda_{1,2}(t)$ тензора СКО; c – годовой ход модуля математического ожидания и инвариантов тензора СКО в ПКСП-приближении: 9 – направление среднемесячной скорости ветра $\varphi(t)$, 10 – ориентация эллипса СКО $\alpha(t)$; d – годовой ход направления математического ожидания скорости ветра и ориентации эллипса СКО в ПКСП-приближении; e – годограф годового хода математического ожидания $\vec{m}_v(t)$ в ПКСП-приближении и его годовая ($k=1$) и полугодовая ($k=2$) гармоника $\vec{m}_k(t)$; $ж$ – повторяемость $P(\%)$ по месяцам годовых максимумов среднемесячной скорости ветра

Когерентные оценки инвариантов периодического тензора $\mathbf{D}_{\bar{v}}(t)$ приведены на рис. 3 *в, г*. Годовой ход определяет в основном изменчивость большой оси эллипса дисперсии $\lambda_1(t)$, его форма сложнее, чем у дисперсии исходных данных, т.к. он имеет 3 максимума — главный в марте и вторичные — в августе и октябре. В течение всего года эллипс $\mathbf{D}_{\bar{v}}(t)$ сильно вытянут, ориентация его большой оси близка к направлению среднего переноса $\varphi(t)$. На рис. 3 *б* приведена оценка нулевого спектрального компонента в ПКСП-приближении (6), из которой следует, что после центрирования $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{v}}(t)$ на пики на частотах годовой и полугодовой гармоник исчезают, а сохраняющееся в спектре колебание с периодом 8–10 месяцев может быть связано с выборочной изменчивостью. Все это указывает на то, что МС нельзя свести к амплитудной модуляции годовой гармонике.

Для анализа эволюции МС во времени используем разложение (4) исходных данных на годовых отрезках. Квантили параметров разложения приведены в табл. 6, из которой следует, что все параметры всего за 10 лет изменялись в широких пределах. Особенно сильно изменялись длины большой $L_1^{(k)}$ и малой $L_2^{(k)}$ полуосей эллипсов годовой ($k = 1$) и полугодовой ($k = 2$) гармоник. Ширина интерквартильного расстояния Q межгодовых изменений $L_1^{(1)}$ и $L_1^{(2)}$ примерно одинакова, внутри него (а также для 25 % аномально малых значений) выполняется условие $L_1^{(1)} > L_1^{(2)}$. Размах R межгодовых изменений $L_1^{(1)}$ в 1,7 раза больше, чем размах $L_1^{(1)}$, для аномально больших значений выполняется условие $L_1^{(1)} < L_1^{(2)}$. Заметно меняется от года к году и соотношение длин $L_1^{(k)}$ и $L_2^{(k)}$, ширина Q и R параметра χ_k при $k = 1$ и при $k = 2$ примерно одинакова, в 75 % $\chi_k < 0,3$, однако в отдельные годы χ_k достигал значения 0,65. Отметим, что сильно изменяется от года к году спектральный состав годового хода — медиана параметра μ_k составляет примерно 0,35 при $k = 1$ и 0,25 при $k = 2$, что значительно меньше, чем у регулярного годового хода $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{v}}(t)$ (табл. 4), а в отдельные годы вклад в результирующий годовое ход уменьшался до 20 % при $k = 1$ и до 5 % при $k = 2$. Интересно, что заметно изменяется и ориентация β_k эллипсов годового и полугодового колебаний (причем $Q_{\beta_1} > Q_{\beta_2}$, но $R_{\beta_1} > R_{\beta_2}$), и направление обхода (в 8 случаях за 10 лет отмечалось вращение против часовой стрелки как при $k = 1$, так и при $k = 2$, хотя $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{v}}(t)$ регулярного годового хода обходит эллипс по часовой стрелке).

Временные ряды параметров разложения (4) и их аппроксимация линейным трендом приведены на рис. 4 *в*, а параметры тренда даны в табл. 6. Из них следует, что из-за очень сильных межгодовых изменений параметров МС при малой длине ряда идентификация тенденций межгодовой изменчивости как трендов неочевидна даже в тех случаях, когда его формальная оценка объясняет около 25 % дисперсии. Все тренды не значимы на 95 % уровне.

На рис. 5 *ж* приведена диаграмма повторяемости P годовых максимумов среднемесячных значений $|\bar{\mathbf{m}}_{\bar{v}}|$. Годовой ход $P(t)$ согласуется с годовым ходом $\bar{\mathbf{m}}_{\bar{v}}(t)$ — максимальные среднемесячные значения скорости отмечались только с марта по май и в августе, максимум $P(t)$ приходится на апрель.

Наиболее значимой является изменчивость синоптического масштаба, объясняющая более 50 % дисперсии (табл. 7). Общая характеристика ее сезонной модуляции и межгодовой изменчивости дана в терминах инвариантов тензор-функции внутримесячной дисперсии $\mathbf{D}_{\bar{v}}^{(m)}(t)$, срочных значений $\bar{\mathbf{V}}^0(t)$, центрированных на АС и годовое ход. Графики временных (по месяцам t) рядов инвариантов $\lambda_{1,2}(t)$ приведены на рис. 6 *а*. Из этого рисунка следует, что при всех t выполняется неравенство $\lambda_1(t) \gg \lambda_2(t)$, ряд $\lambda_1(t)$ можно рассматривать как реализацию ПКСП с годовой ритмикой, параметры которой сильно изменяются от года к году. Расчет показал, что почти всегда $\alpha(t) \cong 90^\circ$ и никогда не выходит за границы интервала 70–120°.

На рис. 5 *б* годовая ритмика $\mathbf{D}_{\bar{v}}^{(m)}(t)$ представлена квантилями межгодовой изменчивости $\lambda_1(t)$ по месяцам. Оценки по 10-летнему ряду имеют существенную

Таблица 8

Оценки наклона A тренда и дисперсионного вклада аномалий относительно тренда D_e/D (%) параметров модуляционной составляющей межгодовой изменчивости скорости ветра и годового хода повторяемости штормов

k	Параметры компонентов скорости ветра годового хода							
	$L_1^{(k)}$, м/с		χ_k		ψ_k , мес.		β_k , град.	
	A	D_e/D , %	A	D_e/D , %	A	D_e/D , %	A	D_e/D , %
1	-0,105	91	-0,006	99	0,36	78	-1,9	97
2	-0,118	85	0,043	77	0,06	96	-0,1	99

Амплитуда A_k и фаза ψ_k компонентов годового хода инвариантов тензора внутримесячной дисперсии и повторяемости штормов P

k	$\lambda_1^{(k)}$				P_k , %			
	A_k		ψ_k		A_k		ψ_k	
	A	D_e/D , %	A	D_e/D , %	A	D_e/D , %	A	D_e/D , %
0	0,03	100	—	—	0,25	90	—	—
1	1,47	94	-0,05	99	0,28	90	0,21	77
2	-2,89	68	0,06	97	-0,28	88	0,24	80

Таблица 9

Оценки наклона A тренда и дисперсионного вклада аномалий относительно тренда D_e/D (%) инвариантов тензора внутримесячной дисперсии скорости ветра, повторяемости (P), интенсивности (h) и продолжительности (τ) штормов

Месяц	$D_{\bar{V}}^{(m)}(t)$, λ_1 , (м/с) ²		Штормовая активность					
	A	D_e/D , %	P , %		h , м/с		τ , час	
			A	D_e/D , %	A	D_e/D , %	A	D_e/D , %
I	1,62	97	0,18	97	< 0,1	100	< 1	99
II	-1,40	95	0,13	97	< 0,1	100	< 1	100
III	-6,70	88	-1,47	76	< 0,1	97	< 1	95
IV	2,42	98	1,27	85	< 0,1	97	< 1	100
V	0,05	100	0,62	84	< 0,1	99	< 1	97
VI	3,02	76	0,28	96	< 0,1	100	< 1	92
VII	1,60	98	0,85	83	< 0,1	96	< 1	97
VIII	3,46	93	0,54	90	< 0,1	98	< 1	96
IX	5,24	74	0,70	69	< 0,1	95	< 1	86
X	-2,35	97	0,08	88	< 0,1	100	< 1	96
XI	-6,61	57	-0,32	89	< 0,1	97	< 1	98
XII	0,16	100	0,17	99	< 0,1	100	< 1	99
Год	0,03	100	0,25	90	< 0,1	100	< 1	100

Таблица 10

Повторяемость штормов 10% обеспеченности* по месяцам и по румбам

Месяц	Румб								Всего
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
I	—	—	2,7	—	—	—	—	—	2,7
II	—	—	1,8	—	—	—	—	—	1,8
III	—	0,5	8,5	—	—	—	—	—	9,0
IV	0,1	0,4	11,2	0,2	—	—	—	—	11,9
V	0,1	0,8	12,9	0,8	—	—	—	—	14,6
VI	—	0,3	10,2	1,3	0,1	—	—	—	11,9
VII	—	0,8	8,7	0,4	—	—	—	—	9,9
VIII	—	0,4	9,0	0,1	—	—	—	—	9,5
IX	0,1	0,5	6,7	0,7	—	—	—	—	8,0
X	—	0,3	9,9	0,6	—	—	—	—	10,6
XI	—	0,1	5,5	—	—	—	—	—	5,6
XII	—	0,1	4,4	—	—	—	—	—	4,5
Всего	0,3	4,2	91,3	4,1	0,1	—	—	—	100

Примечание: 10 % обеспеченности соответствует скорость ветра с модулем $V > 28$ м/с, повторяемость определена как отношение количества сроков с $V > 28$ м/с к общему числу сроков

выборочную изменчивость, поэтому ограничимся констатацией того, что размах годового хода велик (соизмерим с медианным значением), не симметричен и характеризуется усилением изменчивости в холодный и переходные сезоны.

В табл. 9 приведены оценки параметров тренда $\lambda_1(t)$ по месяцам и в среднем за год. В годовом ходе наклон тренда является знакопеременным, а его дисперсионный вклад в большинстве месяцев не превышает 10 %. Оценки трендов параметров разложения $\lambda_1(t)$ в ряд Фурье на годовых отрезках приведены в табл. 8, из которой следует тенденция к упрощению спектра годового хода. В период с 1980 по 1990 г. амплитуда годовой гармоники имела положительный тренд, а амплитуда полугодовой гармоники – отрицательный. Все тренды в табл. 8–9 статистически незначимы на 95 % уровне. Расчет показал, что дисперсия процессов синоптического масштаба более чем на 80 % обусловлена сезонной модуляцией.

Особый интерес представляют оценки сильных и штормовых ветров. В табл. 10 приведена оценка повторяемости по румбам и месяцам скорости ветра 10 % обеспеченности ($|\bar{V}| > 28$ м/с, что почти совпадает с критерием ООЯ – $|\bar{V}| \geq 30$ м/с). Из таблицы следует, что 99,6 % штормовых ветров имеют восточную составляющую, причем в восточный сектор (при градации по 8 румбам) попадает более 90 %. Повторяемость штормов P усилена в холодный и переходные сезоны, главный максимум приходится на март–май, а вторичный максимум – на октябрь. Параметры среднего многолетнего годового хода $m_p(t)$ приведены в табл. 7. Большое сходство годового хода $m_{\lambda_1}(t)$ тензора $\mathbf{D}_{\bar{V}}^{(m)}(t)$ и $m_p(t)$ позволяет считать, что

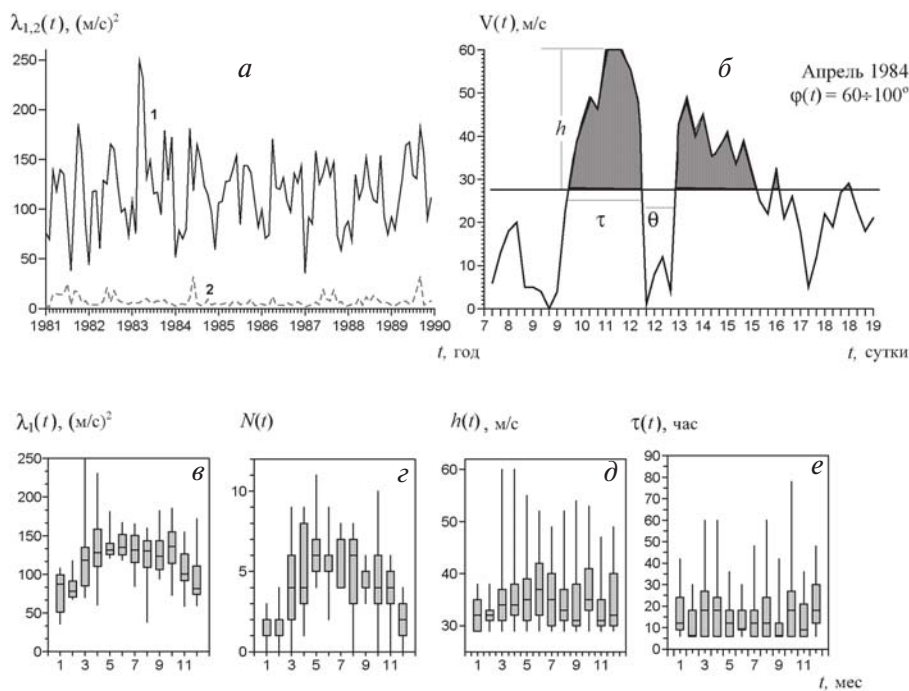


Рис. 6. Оценки вероятностных характеристик изменчивости скорости ветра в синоптическом масштабе:

a – ряды длин большой λ_1 (1) и малой λ_2 (2) полуосей эллипса внутримесячной дисперсии; b – параметры случайного импульса; c – e – годовой ход квантилей межгодовой изменчивости λ_1 , количества N , интенсивности h и продолжительности τ штормов

внутримесячная дисперсия в большой мере обусловлена аномально сильным ветром. В табл. 5 приведены оценки квантилей параметров разложения $P(t)$ в ряд Фурье на годовых отрезках, указывающие на сильную межгодовую изменчивость среднегодовых значений и амплитуд годовой и полугодовой гармоник при относительно стабильных фазах (особенно у годовой гармоники). Оценки параметров тренда $P(t)$ по месяцам и в среднем за год приведены в табл. 9. Для всех месяцев (кроме марта и ноября) и в среднем за год отмечается тенденция к увеличению повторяемости штормов с 1980 по 1990 г., однако вклад трендовой составляющей, статистически незначимой на 95 % уровне, почти во все месяцы менее 20 %. Ряд значений $P(t)$ для мая и его аппроксимация трендом приведен на рис. 4 г. Из анализа этого рисунка следует, что из-за сильной выборочной изменчивости указанные тенденции не могут быть однозначно идентифицированы как тренд.

Дальнейший анализ выполним в терминах параметров модели случайного импульсного процесса [15] – количества N , мощности h и продолжительности τ выбросов $|\bar{V}^0|$ за уровень 10 % обеспеченности – рис. 6 б. Оценки квантилей N , h и τ по месяцам приведены на рис. 6 г–е. Основные свойства годовой ритмики $N(t)$ в целом совпадают с $P(t)$. У параметра $h(t)$ годовая ритмика хотя и заметна, но не столь отчетлива – она проявляется прежде всего в годовом ходе 25 % наиболее мощных выбросов, показанных на рис. 6 д верхним «усом» «ящика с усами» [14]. Еще менее четко выражена годовая ритмика параметра $\tau(t)$. Рис. 6 е показывает, что 75 % штормов имеют продолжительность в зависимости от месяца не более 6–30 ч (2–5 сроков измерений). Наиболее аномальные по продолжительности шторма отмечались марте, апреле и августе (60 ч – 10 сроков измерения) и в октябре (78 ч – 13 сроков измерения). Отметим, что наиболее сильные ветры характерны для продолжительных штормов, поскольку корреляция между h и τ составляет $r = 0,85$.

Оценки параметров тренда по месяцам и за год приведены в табл. 9 и на рис. 4 г, они указывают на стационарный (по математическому ожиданию) характер межгодовой изменчивости $h(t)$ и $\tau(t)$.

ВЫВОДЫ

1. Для вероятностного поддиапазонного описания скорости приземного ветра использован векторно-алгебраический метод в стационарном и ПКСП-приближении в терминах вектора математического ожидания и инвариантов тензоров дисперсии и спектральной плотности. Для описания экстремумов в синоптическом диапазоне использована модель случайного импульсного процесса в терминах силы и продолжительности штормов и окон погоды.

2. Наиболее выраженными особенностями ветрового режима в районе антарктической станции Русская является преобладание ветров восточной четверти и большая повторяемость сильных и штормовых ветров, причем все без исключения сильные ветры имеют восточную составляющую. Особенности годового хода и межгодовой изменчивости скорости ветра формируются процессами синоптического масштаба, которые ответственны более чем за 50 % общей дисперсии.

3. Векторно-алгебраический метод, адекватно описывающий совместную изменчивость модуля и направления скорости ветра, позволил существенно детализировать представления о синоптической изменчивости скорости приземного ветра. Неучет синоптических колебаний приводит к почти двукратному занижению дисперсии, даже в районах, где наблюдается устойчивые по направлению ветровые потоки. Значительная синоптическая изменчивость скорости ветра в районе станции Русская, приводящая к формированию штормовых условий, обусловлена взаимодействием систем циклонической циркуляции с локальными стоковыми переносами и имеет выраженную сезонную модуляцию.

Данное исследование поддержано подпрограммой «Изучение и исследование Антарктики» Федеральной целевой программы «Мировой океан».

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г.В., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А. Распределение годовых экстремумов температуры воздуха // Известия РГО. 1999. Т. 131. Вып. 4. С. 26–30.
2. Бельшиев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 264 с.
3. Боков В.Н., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А. Пространственно-временная изменчивость поля ветра в умеренных широтах Северного полушария // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 2. С. 170–181.
4. Боков В.Н., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Оценки межгодовой изменчивости скорости ветра над морем // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 1993. Т. 29. № 3. С. 253–289.
5. Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н. Вероятностный анализ ритмики океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 319 с.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика. 1986. Т. 1. 366 с.
7. Иванов Н.Е., Рожков В.А. Вероятностный анализ ритмики векторных гидрофизических процессов // Измерительная техника. 1994. № 1. С. 48–51.
8. Иванов Н.Е., Рожков В.А. Компонентное описание ритмики гидрометеорологических процессов // Известия СПбГУ. 1996. Серия 7. Вып. 2. № 14. С. 66–74.
9. Колосова Н.В. Структура приземного ветра в Антарктиде. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 174 с.
10. Лагун В.Е. Климатическая изменчивость атмосферы южной полярной области в двадцатом столетии // Всемирная конференция по климату (WCCC 2003). Москва. 29 сентября – 3 октября 2003 г. Тезисы докладов. С. 416. (См. также Природа. 2004. № 2. С. 84–85).
11. Лагун В.Е., Иванов Н.Е. О статистической структуре поля приземной температуры воздуха и давления на уровне моря в районе Антарктического полуострова (по данным российской станции Беллинсгаузен) // Квартальный бюллетень РАЭ. 2001. № 4 (17). С. 32–38.
12. Луценко Э.И., Федосов М.К. О формировании климатических циклонов в атмосфере Антарктики // Информ. бюл. САЭ. 1989. № 111. С. 9–12.
13. Рожков В.А. Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Книга II. СПб.: Прогресс-Погода, 1996. 559 с.
14. Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Кн. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 340 с.
15. Рожков В.А., Лопатухин Л.И., Лавренов И.В., Дымов В.И., Бухановский А.В. Моделирование штормового волнения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 5. С. 689–699.
16. Справочник по климату Антарктиды. Т. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 272 с.
17. Ivanov N.E., Lagun V.E. Study of statistical structure of surface wind speed vector in Western Antarctica // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/ JSC Working Group on Numerical Experimentation Report (Ed. Ritchie H.). 2004. № 34, WMO/TD. P. 2-03–2-04.
18. Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan-Cope T., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V.E., Reid P.A., Iagovkina S. The SCAR READER project: Towards a high-quality data base of mean Antarctic meteorological observations // Journal of Climate. 2004. Vol. 17. №. 14. P. 2890–2898.
19. Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan-Cope T., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V.E., Reid P.A., Iagovkina S. Antarctic climate change during the last 50 years // International Journal of Climatology. 2005. Vol. 25. No. 2. P. 279–294.
20. Van Lipzig N.P.M., Turner J., Colwell S.R., Van Den Broeke M.R. The near-surface wind field over the Antarctic continent // International Journal of Climatology. 2004. Vol. 24. № 15. P. 1973–1982.

N.YE.IVANOV, V.YE.LAGUN, E.I.LUTSENKO

**ABOUT CLIMATE REGIME OF RUSSKAYA STATION AREA
(WESTERN ANTARCTICA)**

Statistical analysis of surface wind velocity is executed on the base of current observations (four-times a day) at Russkaya station, located in Western Antarctica for period from 1980 to 1990. Estimates of interannual variability parameters, parameters of annual rhythms, processes of synoptic scale and diurnal variability with account of low frequency modulation are obtained in terms of mathematics expectation vector and of invariant of dispersion tensor and spectral density in suggestion of stationary and periodic correlation vector stochastic process. For parameterization of synoptic scale variability the model of stochastic impulse process is applied. Recommendations for applied climatic manuals are presented.

Keywords: Western Antarctic, surface wind speed, climate variability, spectral analysis, katabatic flows