

МЕТЕОРОЛОГИЯ

М.М. Борисенко, Н.В. Ширшов, Г.Г. Щукин

АЭРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРА В СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ДО 30,0 КМ В РАЙОНЕ КОСМОДРОМА «БАЙКОНУР»

M.M. Borisenko, N.V. Shirshov, G.G. Shchukin

WIND DISTRIBUTION AEROClimATIC REGULAR OCCURENCIES IN 30 KM ATMOSPHERIC LAYER FOR BAIKONUR COSMODROME REGION

Детально анализируются аэроклиматические условия ветрового климата в зоне космодрома «Байконур» как для планетарного пограничного слоя атмосферы, так и для свободной атмосферы выше 1 км над землей. Впервые дан критический анализ особенностей турбулентных параметров ветра для различных подслоев атмосферы вплоть до 30 км над космодромом.

Ключевые слова: ветер, мониторинг, прогнозирование, пограничный слой, аэрологическое зондирование.

Wind climate aeroclimatic conditions for Baikonur cosmodrome for both planetary boundary atmospheric layer as well as free atmosphere over 1 km above Earth surface are analysed in detail. A critical analysis of wind turbulence parameters features for different atmospheric sublayers up to 30 km above cosmodrome is presented for the first time.

Keywords: wind, monitoring, forecasting, boundary layer, aerological sounding.

1. Характеристика исходного материала для решения поставленной задачи

Для создания комплексного ветрового мониторинга в исследуемом районе необходимо располагать данными о климатических и аэроклиматических параметрах ветрового климата в слое атмосферы от поверхности земли до высоты 30 км.

Перечень характеристик ветра в упомянутом слое атмосферы в зависимости от их назначения целесообразно подразделить на две основные группы.

К первой группе относятся параметры ветрового климата в планетарном пограничном слое атмосферы (ППС). Сюда входят: средняя годовая и средняя месячные скорости ветра на высотах 10, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 и 1500 м над поверхностью земли [5]; вертикальный градиент скорости ветра между перечисленными выше уровнями; характеризуемая величиной параметра m в сте-

пенной функции высота $\frac{u(z)}{u(10)} = \left(\frac{z}{10}\right)^m$; доминирующее направление ветрового потока в подслоях вышеуказанного ППС ($\bar{d}_{z_2-z_1}$); вероятность различных градаций скорости ветра на уровнях ППС %; значения максимальных скоростей ветра разной повторяемости, превышаемых 1 раз в год, 5, 10, 15, 20 и 50 лет на высотах ППС атмосферы.

Для расчета ветровой нагрузки на ракетный комплекс в пределах ППС важна информация о вращении ветра (поворот ветра с высотой) в слое атмосферы мощностью 1–1,5 км. Из физических соображений следует, что в пределах приземного слоя, т.е. от уровня земли до высоты 30–50 м эффект вращения ветра с высотой отсутствует [3, 4, 5, 7, 9, 11, 12]. Такой вывод был сделан классиками в области физики атмосферы на основе теоретических исследований и эмпирических разработок.

Поскольку сведения о характере вертикальной изменчивости параметров ветра в нижнем приземном слое атмосферы необходимы для оценки атмосферных воздействий на ракетный комплекс «Протон», находящийся в стадии подготовки к запуску либо непосредственно в период его старта, авторы настоящей работы провели изучение особенностей распределения ветрового режима в упомянутом атмосферном подслое в условиях различных метеорологических режимов.

Авторами было установлено, что не во всех случаях в нижнем приземном слое атмосферы имеет место нарастание скорости ветра с высотой. Конкретно, последними исследованиями подтверждается, что в нижнем атмосферном слое до высоты 200–300 м имеет место устойчивый поворот ветра вправо лишь при слабых ветрах у земли, а именно, когда его скорость на уровне 10 м не превышает 3 м/с, причем вертикальный градиент скорости ослабевает с высотой.

При умеренных и сильных ветрах, когда U_{10} составляет ≥ 3 м/с у земли, в нижнем 100-метровом слое наблюдается аномальный эффект вращения ветра, т.е. ветер поворачивает в данном случае влево.

Этот вывод наглядно подтверждается анализом данных в табл. 1.

Таблица 1

Значения поворота ветра с высотой (в угловых градусах)

(знак «+» означает правый, знак «-» – левый поворот направления ветра)

Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Подслоей, м				Слой атмосферы 10–220 м
	10–25	25–75	75–150	150–220	
0,0–1,9	15	13	14	8	50
2,0–2,9	2	4	8	8	22
3,0–6,9	-5	5	5	6	11
$\geq 7,0$	3	-3	2	6	8

Наличие левого поворота ветра с высотой обнаружено впервые исполнителями и может быть обусловлено согласно данным теоретических исследований О.Г. Сеттона [9], влиянием неоднородностей в характере подстилающей по-

верхности, в особенности, из-за лесных массивов, имеющих неодинаковую высоту в разных направлениях от исходного пункта. Отметим, что левый поворот ветра имеет место в **собственно приземном** подслое, т.е. ниже 100 м над землей и только при умеренных и сильных ветрах, когда в упомянутом подслое термодинамическое состояние близко к нейтральному или слабо-неустойчивому.

Практическое значение приведенных в табл. 1 данных состоит прежде всего в том, что при очень слабых ветрах у земли возможно резкое изменение направления полета стартующего с пусковой установки летательного аппарата, что может вызывать затруднение в отслеживании его полета с помощью теодолита до высоты 100–200 м. При учете возможных колебаний стартующих РН в нижней части ППС весьма ценной представляется информация об аномальных условиях ветровой обстановки в слое атмосферы до высоты 300 м. Аномальные условия в распределении ветра по высоте в этом слое практически наиболее важны для ситуаций, когда на верхней границе инверсионного слоя атмосферы (высота 250–350 м) скорость ветра превышает 25 м/с, в то время как у земли она не более 1,5–2,0 м/с. В таких случаях вертикальный градиент скорости ветра в 300-метровом слое составляет от 8 м/с и более, что вполне может привести к утрате слежения за полетом РН в нижних слоях атмосферы. Данное высказывание основано на анализе материала измерений ветра, приведенного в табл. 2.

Таблица 2

Параметры скорости ветра в слое атмосферы до 300 м при аномально сильных ветрах на его верхней границе

Характеристика	Градация скорости ветра на уровне 300 м, м/с						
	15–17	18–20	21–23	24–26	27–29	30–32	33–35
Число измерений	739	297	114	28	11	2	1
U_{300}/U_{10}	8,9	11,9	13,8	17,8	17,5	15,5	17,0
Вертикальный градиент скорости, м/с/100м	4,7	5,8	6,8	7,9	8,8	9,7	10,7
U_{10} , м/с	1,8	1,6	1,6	1,4	1,6	2,0	2,0

Основной вывод из табл. 2 состоит в том, что с усилением ветра на уровне 300 м над землей заметно растет и вертикальный градиент скорости в 300 м слое до тех пор, пока U_{300} не превысит 25 м/с. Скорость ветра ≥ 15 м/с следует характеризовать как так называемые «мезоструйные течения» пограничного слоя атмосферы [5, 6]. «Мезоструи» ППС, имеющиеся на высотах 200–400 м над землей, имеют место почти над всей равнинной частью Евразии, причем их вероятность наиболее велика в ночные и утренние часы [5, 6].

Важнейшим вопросом создания ветрового мониторинга является выбор опорной метеостанции, показания которой являются наиболее репрезентативными для условий космодрома. Упомянутый вопрос подразделяется на две части. Во-первых, пункт должен быть «репрезентативен» для условий приземного слоя воздуха, в пределах которого расположена РН на стартовом участке траектории ее следования. Во-вторых, необходим выбор наблюдательной станции, данные которой были бы репрезентативны для использования при расчетах

движения РН на активном участке траектории, т.е. начиная с высоты от 0,5 км и выше. Исполнителями установлено, что в качестве наземной метеостанции наиболее репрезентативной является ГМС Карсакпай, а в качестве станции высотных аэрологических измерений – АС Кзыл-Орда.

Для определения исходных параметров скорости ветра в районе космодрома Байконур рекомендуется использовать данные по метеостанции Карсакпай, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Значения скорости ветра на высоте 10 м
в месте расположения космодрома Байконур по месяцам

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср. год
Скорость ветра, м/с	4,0	4,7	5,1	4,8	4,6	4,5	4,3	4,0	3,6	4,2	4,0	4,3	4,3

Важным является учет фактора, оказывающего влияние на поведение высоких сплошностенчатых сооружений, к числу которых относится ракетный комплекс типа «Протон-М», в период подготовки последней к запуску и в момент старта. Речь идет об определении экстремальной ветровой нагрузки на РН в указанный период времени. Дело в том, что в соответствии с положениями нормативного документа [8, 10] расчет такой нагрузки обычно производится по данным о наибольших скоростях ветра редкой повторяемости. Между тем, на основе специальных научных разработок, выполненных с участием исполнителей в более ранние годы, показано, что наиболее важным метеорологическим фактором, оказывающим экстремальные воздействия на стартующую систему РН, является не самый сильный ветер, а скорости ветра, значение которых составляет примерно 2/3 от максимальной [1, 2]. Именно при скорости ветра, составляющей 2/3 от расчетного ее максимума, значение ветровой нагрузки на высокое сплошностенчатое сооружение, в данном случае ракетная система «Протон», примерно в 1,6 раз выше, чем при максимальной скорости. Объясняется это тем, что аэродинамический коэффициент C_x , входящий в формулу для определения ветровой нагрузки:

$$W_s = q_{10} k_h C_x \quad (1)$$

изменяется нелинейно с ростом давления ветра, так как зависит от числа Рейнольдса.

В формуле (1) k_h – коэффициент нарастания давления ветра с высотой; q_{10} – давление ветра на высоте 10 м по данным стандартных метеорологических измерений).

Помимо сказанного отметим, что действующими нормативными документами не учитывается роль диапазона так называемых «опасных скоростей ветра». Авторы [1, 2] показали, что при скорости ветра 5–15 м/с, составляющей указанный диапазон, в сплошностенчатых сооружениях возникают автоколебательные явления, которые и представляют собой основной источник пульсационной компоненты ветровой нагрузки.

2. Аэроклиматические особенности ветрового режима в зоне космодрома Байконур

В табл. 4 приведены сведения об изменчивости основных климатических характеристик в различных слоях атмосферы по данным измерений радиозондовым методом на АС Кзыл-Орда.

Одними из наиболее важных вопросов, имеющих непосредственное значение к выбору количества и к условиям местоположения передвижных радиозондовых станций, являются результаты исследований направлений доминирующих ветровых потоков на уровнях 30-километрового слоя атмосферы в различные сезоны года в зоне космодрома.

Такие результаты, выполненные по данным расчетов исполнителей, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Наиболее вероятные значения направления ветра (°) по месяцам и высотам (км)

Высота, км	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
10	45	43	36	36	33	27	24	34	36	31	36	35
0,2	92	76	70	65	46	37	340	28	41	57	85	87
1,5	218	199	225	194	357	352	340	10	15	270	251	214
3,0	244	243	243	241	281	279	295	308	290	271	262	251
5,5	260	257	251	252	269	270	285	288	278	273	273	264
7,0	266	262	254	254	268	272	284	284	279	277	278	269
9,0	272	266	257	254	268	273	286	284	281	280	282	274
10,0	274	267	259	254	265	275	287	281	280	282	284	274
11,5	273	271	262	257	268	275	285	279	278	281	283	276
13,5	272	273	265	263	268	273	284	277	273	279	282	276
16,0	271	273	268	265	270	272	282	275	272	277	280	276
18,0	269	273	269	269	272	271	286	273	273	276	279	274
20,0	269	273	270	273	287	83	90	56	276	275	279	269
23,5	267	270	273	281	44	83	90	93	270	271	276	269
26,0	268	270	276	283	69	83	93	90	270	269	273	266
30,0	271	261	271	277	75	86	89	91	277	272	268	259

Из упомянутой таблицы следует несколько наиболее существенных выводов прикладного характера. **Во-первых**, наиболее значительный поворот ветра с высотой происходит в ППС атмосферы, т.е. в пределах нижних 1500 м над поверхностью земли. Исключение составляют периоды времени, приходящиеся на вторую половину лета (VIII–IX месяцы), когда в слое атмосферы до 3 км доминируют ветровые потоки, имеющие направленность с севера или северо-востока. На более высоких уровнях, от 5 км и выше, вплоть до 20 км, во все месяцы года отчетливо преобладают ветры западного направления. При этом между высотами 5 и 20 км вообще отсутствует сколько-нибудь заметный поворот ветра с высотой. **Во-вторых**, своеобразными являются значения направления

ветра в летние месяцы (июнь-август), когда доминируют на высотах от 20 до 30 км ветры восточного направления. В остальные месяцы года на упомянутых высотах доминируют ветры западного направления. Примечательно, что в переходные периоды (с апреля по май) происходит резкое обращение ветра: с западного на восточный. Также резко изменяется направление доминирующего потока в конце летнего периода: от августа к сентябрю в упомянутом слое (20–30 км) столь же резко изменяется направление доминирующего потока: от восточного к западному. В остальные месяцы года, конкретно, в слое атмосферы от 5 до 30 км над районом Байконура устойчиво дуют ветры западного направления, что объяснимо, если учесть роль отклоняющего действия вращения Земли для северного полушария [3, 6]. **В-третьих**, в ППС имеет место правый поворот ветра с высотой в слое от поверхности земли до высоты 2–3 км, а выше ветры принимают устойчивое западное направление.

На основании анализа приведенных выше результатов можно сформулировать рекомендации прикладного значения:

1. Для отслеживания направленности ветровых потоков в ППС (до уровня ~ 1,5 км над поверхностью земли) целесообразным является использование передвижного пункта радиозондирования, дислоцируемого в непосредственной близости от места старта ракеты, с удалением от последнего не далее 5–10 км.

2. Для фиксации местоположения радиозондов и других летательных аппаратов в слое от 5 до 20–30 км допустимо применение одной стационарной радиозондовой станции **к западу** от места пуска ракеты. Оптимальное удаление от места пуска ракеты 20–30 км.

Последние две рекомендации удобны в практическом использовании и более эффективны в оперативной деятельности, учитывая реальные возможности размещения передвижных и стационарных пунктов аэрологического зондирования. Поэтому исполнителями предлагаются использовать рекомендации 1 и 2 как окончательные.

Авторами установлено, что в слое в атмосферы над Байконуром вертикальные градиенты скорости резко уменьшаются с высотой: от 0,6 °/100 м высоты в слое 100–200 м до 0,1–0,2 °/100 м высоты в слое от 200 до 5500 м над землей [5].

В зоне субстратосферных ветровых потоков (тропосферных струйных течений – ТСТ) вертикальные градиенты скорости ветра близки к нулю. Среднее значение скорости ветра в ТСТ изменяется в пределах от 19 м/с в мае и декабре до 26–27 м/с в июле и августе. Значения скоростей с обеспеченностью 0,99 составляют от 45–50 м/с в мае и декабре до 60 м/с в июле месяце, т.е. имеет место выраженный годовой ход скорости в зоне ТСТ.

На самой ТСТ годовой ход скорости ветра отчетливо выражен, с максимумом 97 м/с в июле и минимумом 73 м/с в декабре.

Выявлены закономерности вертикальной изменчивости турбулентных характеристик ветра (интенсивности турбулентности, максимальных пульсаций скорости ветра, коэффициента порывистости). При сильных ветрах особенности

вертикальных профилей этих характеристик в нижнем 300-метровом слое существенно отличаются от профилей в более высоких слоях. В 300-метровом слое изменение турбулентных характеристик с высотой происходит по закону, близкому к логарифмическому. Выше падение интенсивности турбулентности с высотой замедляется, достигая минимума ($\sim 0,2\%$) на уровне 2 км над землей. В дальнейшем с высотой происходит медленный прирост J и на уровне 7–8 км достигает $\sim 1,0\%$. В более высоких слоях статистически значимых изменений интенсивности турбулентности не наблюдается. На высотах 10 км и более максимальный порыв ветра прямо пропорционален средней скорости ветра U_z .

На оси тропосферного струйного течения (ТСТ) годовой ход J отсутствует, а максимальный порыв ветра U_{\max} пропорционален средней скорости ветра $\bar{U}(z)$.

Установлено, что при скорости ветра у земли свыше 15–20 м/с вероятность потери шара-зонда при наблюдениями радиолокационными средствами может достигать 90 % случаев, что является препятствием для запуска радиозондов при таких ветрах вообще. При скоростях же ветра 25–30 м/с возможные старты РН типа «Протон» должны быть ограничены в виду превышения допустимых величин ветрового давления и динамических воздействий на подготовленный к старту или стартующий ракетный комплекс. Фактором, препятствующим осуществлению запусков РН, является возникновение песчаных (пыльных) бурь. В течение года насчитывается около 40 дней с такими бурями в зоне космодрома. Наиболее частыми они бывают в летние месяцы, 7–8 дней в месяц в среднем.

Показано, что между приземным слоем атмосферы (30–50 м) и верхней границей пограничного слоя атмосферы (1,5–3 км) происходит изменение доминирующего направления ветра на прямо противоположное. Снос радиозонда к востоку в холодный сезон года и наоборот к югу в теплый сезон года в течение 5–10 мин после его запуска составляет 2,5–5 км. Из этого следует практическая рекомендация о целесообразности размещения и использования аэрологических комплексов в холодный сезон в 3–4 км к востоку от пункта запуска, а в остальные месяцы на таком же расстоянии к югу или юго-востоку от площадки запуска.

Поскольку в слое выше ППС доминируют ветры западных направлений, авторы пришли к выводу о необходимости размещения стационарного пункта наблюдения к востоку от площадки запуска РН на удалении 18–20 км от последней.

На основании разработок авторов в табл. 5 представлены вычисленные методом «скользящего осреднения» по 10-летнему интервалу ожидаемые значения поправок к расчетным скоростям ветра для 25-летнего периода (2006–2030 гг.).

Из табл. 5 следует, что на протяжении периода спада скорости ветра в прогнозируемом цикле ветровой активности погодные значения скоростей ветра во все годы выше, чем в среднем за 100-летний период (1901–2000 гг.). Превышение в среднем составляет 10% для холодного и 9% для теплого сезонов года.

Прогнозируемые значения ветровой активности над Байконуром на период до 2030 г. (нормированные на среднее из 100-летнего ряда)

Годы, i	$\frac{u_i}{\bar{u}}(100\text{-летн.})$		Годы, i	$\frac{u_i}{\bar{u}}(100\text{-летн.})$	
	ХП	ТП		ХП	ТП
1	2	3	4	5	6
2006	1,12	1,11	2019	1,10	1,10
2007	1,12	1,11	2020	1,10	1,10
2008	1,12	1,11	2021	1,10	1,10
2009	1,12	1,11	2022	1,10	1,10
2010	1,11	1,11	2023	1,10	1,10
2011	1,11	1,11	2024	1,10	1,10
2012	1,11	1,10	2025	1,09	1,09
2013	1,11	1,10	2026	1,09	1,09
1	2	3	4	5	6
2014	1,10	1,10	2027	1,09	1,09
2015	1,10	1,10	2028	1,09	1,08
2016	1,10	1,10	2029	1,08	1,08
2017	1,10	1,10	2030	1,08	1,08
2018	1,10	1,10			

Примечания: 1: Обозначение ХП и ТП соответствуют холодному и теплому сезонам года.

2. В таблице приведены нормированные на 100-летний ряд наблюдений значения скоростей ветра, полученные методом «скользящего осреднения» по 10-летнему интервалу времени. Указанный прием использован с целью устранения так называемого «белого шума» в циклах ветровой активности, иными словами, снивелировать роль случайных междугодовых колебаний скорости ветра.

Литература

1. *Беспрозванная И.М., Соколов А.Г., Фомин Г.М.* Воздействие ветра на высокие сплошностенчатые сооружения. – М.: Стройиздат, 1976. – 184 с.
2. *Борисенко М.М.* Методы определения климатических характеристик ветра для строительного проектирования. – *Zeitschrift für Meteorologie*, Bd.37, 1987, Heft 4, p. 223-228.
3. *Лайхтман Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 340 с.
4. *Матвеев Л.Т.* Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1965, с. 265-307.
5. *Новый аэроклиматический справочник свободной атмосферы над СССР.* Том II, книга вторая. – М., 1979, с. 201-400.
6. *Орленко Л.Р.* Строение пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 342 с.
7. *Прох Л.З.* Словарь ветров. – Л.: Гидрометеоздат, 1983, с. 290-291.
8. РД. Методические рекомендации по определению расчетных скоростей ветра для оценки особых воздействий на конструкции, здания и сооружения атомных станций. – Л.: Ргп.ГГО, 1990. – 45 с.
9. *Сеттон О.Г.* Микрометеорология. – Л.: Гидрометеоздат, 1958. – 335 с.
10. *Строительные нормы и правила.* Нагрузки и воздействия. СНиП 201.07-85. – М.: Госстройиздат, 1986.
11. *Хайруллин К.Ш.* Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь, т. II. – СПб.: Летний сад, 2009, с. 290.
12. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеоздат, 1974, с. 368.