

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

На правах рукописи

Золотухина Ольга Ивановна

**АТМОСФЕРНЫЕ УСЛОВИЯ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПУСКИ
РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РАЙОНЕ
КОСМОДОМОВ «БАЙКОНУР» И «ВОСТОЧНЫЙ»**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология (Наука о Земле)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук,
профессор Горбатенко Валентина Петровна

Томск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 6 |
| 1 Явления погоды, представляющие опасность для пусков ракет космического назначения..... | 12 |
| 1.1 Ветер..... | 12 |
| 1.1.1 Общая характеристика ветра. Методические аспекты обработки информации..... | 12 |
| 1.1.2 Общая характеристика ветра в свободной атмосфере. Методические аспекты обработки информации..... | 18 |
| 1.1.3 Изучение ветра на территории России | 24 |
| 1.2 Опасные конвективные явления..... | 28 |
| 1.2.1 Физические условия развития, стадии и размеры конвективных облаков..... | 28 |
| 1.2.2 Явления, связанные с конвективной облачностью. Ливневые осадки и грозы..... | 32 |
| 1.2.3 Изучение условий образования опасных конвективных явлений..... | 35 |
| 2 Характеристики ветра в районе космодрома «Байконур»..... | 37 |
| 2.1 Характеристики ветра у поверхности земли..... | 37 |
| 2.2 Характеристики ветра в свободной атмосфере..... | 42 |
| 2.3 Тропопауза..... | 49 |
| 2.4 Характеристики сдвига ветра..... | 54 |
| 2.4.1 Понятие о сдвиге ветра. Условия образования сдвига ветра..... | 54 |
| 2.4.2 Методы расчета сдвига ветра..... | 56 |
| 2.4.3 Характеристики сдвига ветра в районе космодрома «Байконур»..... | 58 |
| 2.5 Характеристики ветра в дни переноса пусков ракет космического назначения..... | 63 |
| 3 Характеристики ветра в районе космодрома «Восточный»..... | 74 |
| 3.1 Характеристики ветра у поверхности земли..... | 74 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2 | Характеристики ветра в свободной атмосфере | 77 |
| 3.3 | Характеристики сдвига ветра..... | 82 |
| 4 | Тенденции характеристик ветра над районами космодромов в условиях современного климата..... | 88 |
| 4.1 | Реанализ NCEP/NCAR..... | 88 |
| 4.2 | Сравнение данных аэрологического зондирования и данных реанализа NCEP/NCAR..... | 89 |
| 4.3 | Тенденции скорости и направления ветра по данным реанализа NCEP/NCAR за период 1948-2014 гг..... | 91 |
| 4.3.1 | Космодром «Байконур»..... | 91 |
| 4.3.2 | Космодром «Восточный»..... | 93 |
| 4.3.3 | Характеристика зонального и меридионального переносов, над территориями космодромов в нижней тропосфере..... | 97 |
| 5 | Характеристики конвекции в районе космодромов..... | 99 |
| 5.1 | Динамика грозовой активности в районе космодромов «Байконур» и «Восточный»..... | 99 |
| 5.1.1 | Космодром «Байконур»..... | 99 |
| 5.1.2 | Космодром «Восточный»..... | 100 |
| 5.2 | Индексы неустойчивости атмосферы..... | 104 |
| 5.2.1 | Индексы, описывающие конвективное состояние атмосферы..... | 104 |
| 5.2.2 | Анализ термодинамических индексов атмосферы..... | 108 |
| 5.2.3 | Состояние атмосферы в дни с опасными конвективными явлениями..... | 109 |
| 5.2.4 | Пороговые значения индексов в дни «ливень» и «гроза»..... | 112 |
| 5.3 | Дискриминантный анализ индексов неустойчивости атмосферы для разделения состояния атмосферы «ливень» и «гроза» над территорией Амурской области..... | 115 |
| | Заключение..... | 122 |

| | |
|---|-----|
| Список сокращений и условных обозначений..... | 124 |
| Список использованных источников и литературы..... | 125 |
| Приложение 1 | 138 |
| Таблица 1.1 – Повторяемость (в %) направления ветра у поверхности земли по месяцам и в целом за год, за период 1956–2013 гг..... | 138 |
| Приложение 2 | 139 |
| Таблица 2.1 – Данные о средней абсолютной и средней из максимальных скоростей ветра у поверхности земли по месяцам и в целом за год, за период 1956–2013 гг | 139 |
| Приложение 3 | 140 |
| Таблица 3.1 – Повторяемость (в %) скорости ветра по румбам за период 1956–2013 гг..... | 140 |
| Приложение 4..... | 143 |
| Таблица 4.1 Характеристики используемых метеорологических станций в районе космодрома «Восточный»..... | 143 |
| Приложение 5 | 144 |
| Таблица 5.1 – Характеристики скорости ветра (м/с) от поверхности земли до 25 км над территорией космодрома «Восточный»..... | 144 |
| Положение 6 | 145 |
| Таблица 6.1 – Характеристики скорости ветра (м/с) от поверхности земли до 25 км на космодромах «Байконур» и «Восточный»..... | 145 |
| Положение 7 | 146 |
| Таблица 7.1 – Число дней с грозой за период 1985–2013 гг. на метеостанции Мазаново..... | 146 |
| Таблица 7.2 – Число дней с грозой за период 1985–2013 гг. на метеостанции Благовещенск..... | 147 |
| Рисунок 7.1 – Временной ход числа дней с грозой за период 1985–2013 гг. на метеостанции Благовещенск..... | 148 |
| Рисунок 7.2 – Временной ход числа дней с грозой за период 1985–2013 гг. в срок 00 и 12 ВСВ на метеостанции Благовещенск..... | 148 |

| | |
|---|-----|
| Рисунок 7.3 – Автокорреляционная функция (а) и частная автокорреляционная функция (б) для метеостанции Благовещенск..... | 149 |
| Рисунок 7.4 – Автокорреляционная функция (а) и частная автокорреляционная функция (б) для метеостанции Мазаново..... | 150 |
| Положение 8..... | 151 |
| Таблица 8.1 – Интервалы значений индексов для различных состояний атмосферы..... | 151 |
| Положение 9..... | 152 |
| Таблица 9.1 – Итоговая таблица дискриминантного функционального анализа значений индексов для групп «гроза» и «ливень» (шаг 1)..... | 152 |
| Таблица 9.2 – Итоговая таблица дискриминантного функционального анализа значений индексов для групп «гроза» и «ливень» (шаг 2)..... | 152 |
| Рисунок 9.1 – Диаграмма размаха LIFT (а) и KIND (б) для состояний «гроза» и «ливень»..... | 153 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В условиях меняющегося климата вызывает интерес исследование многолетних тенденций всех климатических характеристик, как в глобальном, так и в региональном масштабах [5, 30, 77, 78, 79, 81]. Параметры ветра в большей или меньшей степени влияют на все сферы человеческой деятельности, включая работы по подготовке и пуску ракет космического назначения (РКН). Значения параметров ветра, критичные для выполнения той или иной технологической операции, отражены в эксплуатационной документации на каждую РКН. Значения метеорологических параметров близких к критическим, фиксируются 5–7 раз в год, однако перенос времени даже одного пуска РКН обеспечивает огромные финансовые потери. Анализ многолетних изменений параметров ветра на территории России показал, что скорость приземного ветра в течение 1936–2006 гг. почти на всей территории России имела тенденцию к уменьшению [14, 59, 70, 71]. В то же время динамика характеристик ветра в свободной атмосфере изучалась не столь активно [66, 67, 96, 97]. Эксплуатационная документация на РКН ориентирована на повторяемость средних и максимальных характеристик ветра. Для исследуемых территорий эти характеристики определялись более 30 лет назад. На фоне наблюдающихся изменений климата характеристики ветра требуют уточнений.

Кроме параметров ветра необходимо учитывать развитие в атмосфере опасных конвективных явлений погоды (гроза, ливневый дождь), которые могут оказать существенное влияние на ход выполнения работ с РКН: в период их подготовки на техническом комплексе, транспортировки на стартовый комплекс, подготовки на стартовом комплексе и во время пуска. В связи с этим развитие конвекции и формирование опасных конвективных явлений погоды постоянно контролируют специалисты метеорологической службы космодромов для того, чтобы с максимальной заблаговременностью предупредить должностных лиц, которые руководят подготовкой и пуском РКН, для сведения к минимуму воздействия опасных явлений погоды на технические средства и специалистов,

выполняющих работы. В связи с вышесказанным изучение характеристик конвекции и опасных конвективных явлений погоды в районе космодромов является актуальным.

Цель работы – изучение особенностей многолетнего хода ветрового режима и развитой конвекции в районе космодромов «Байконур» и «Восточный».

Для достижения цели решались следующие задачи:

- Определить характеристики ветра от поверхности земли до высоты 25 км в районе космодромов «Байконур» и «Восточный».
- Выявить многолетние направленные тенденции характеристик ветра в разных слоях свободной атмосферы.
- Выявить многолетние направленные тенденции высоты и скорости ветра нижней границы полярной тропопаузы.
- Проанализировать многолетнюю изменчивость грозовой активности в районе космодромов.
- Определить значения термодинамических индексов неустойчивости атмосферы в дни с опасными конвективными явлениями и рассчитать статистические характеристики этих индексов в дни, когда наблюдается гроза и в дни, когда грозы нет, но все признаки наличия развитой конвекции (конвективные осадки) присутствуют.
- Выделить месяцы наиболее благоприятные в метеорологическом отношении для пусков РКН с территории космодромов «Байконур» и «Восточный».

Объект исследования – слой атмосферы от поверхности земли до высоты 25 км над территориями космодромов «Байконур» (Казахстан, Кызыл-Ординская область) и «Восточный» (Россия, Амурская область).

Материал и методы исследования. Исходным материалом для исследования характеристик ветра у поверхности земли в районе космодромов «Байконур» и «Восточный» послужили материалы фактических наблюдений за периоды 1956–2013 гг. и 1985–2014 гг. соответственно. Для изучения характеристик ветра в свободной атмосфере до высоты 25 км применены

уникальные данные аэрологического зондирования атмосферы на станции Байконур и данные станции Благовещенск за период 1985–2014 гг. Для изучения направленных тенденций характеристик ветра использованы данные реанализа NCEP/NCAR пространственного разрешения $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ для 17 стандартных уровней атмосферы до высоты 10 гПа с интервалом в 6 часов, за период 1948–2014 гг. Для анализа метеорологических элементов в дни, когда пуски РКН переносились по метеорологическим условиям в районе космодрома «Байконур», отработан набор синоптического материала. Рабочим материалом для выявления особенностей грозовой активности в районе космодромов «Байконур» и «Восточный» послужили данные о числе гроз, систематизированные за период 1956–2013 гг. и 1985–2013 гг.

Выводы получены при использовании синоптических методов, пакетов прикладных программ Microsoft Office, Statistica, MatLab.

Научная новизна работы.

– Получены вертикальные профили средних значений скорости и направления ветра до высоты 25 км (с разрешением в один километр). Для территории космодромов получено, что скорость приземного ветра имеет тенденцию к уменьшению.

– Выявлены многолетние направленные тенденции в изменении скорости ветра в нескольких слоях верхней тропосферы и нижней стратосферы за последние 67 лет.

– Уточнена высота и скорость ветра нижней границы полярной тропопаузы в разные месяцы года в южном районе Казахстана.

– Определены соотношения зональной и меридиональной составляющих в разные месяцы года и их многолетние изменения в районе космодромов.

– Определены динамика и структура рядов грозовой активности в районе космодромов.

– Определены пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы, при которых в атмосфере Амурской области развиваются грозы.

Научная и практическая значимость работы.

Получена картина вертикальной структуры и многолетней динамики (за последние 67 лет) распределения скорости и направления ветра в слое от поверхности земли до высоты 25 км. Выделены месяцы наиболее благоприятные в метеорологическом отношении для пусков РКН. Уточнены климатологические характеристики на уровне тропопаузы в районе космодрома «Байконур». Изучена структура и динамика грозовой активности над территориями космодромов, определены термодинамические характеристики атмосферы в дни с грозой, позволяющие идентифицировать очаги мезомасштабной конвекции, определяемые со спутников Terra и Aqua.

Результаты работы могут быть применены при проектировании РКН, при планировании пусков РКН, а так же для определения зон мезомасштабной конвекции, полученных по данным спутников Terra и Aqua. В частности, результаты работы могут быть использованы при разработке программно-алгоритмического обеспечения для проведения расчетов устойчивости возмущенного движения и управляемости ракет-носителей (РН) «Ангара – 1.2», «Ангара – А5», «Протон – М». Кроме того, результаты работы будут актуальны для расчетов устойчивости движения и управляемости РН при действии ветровых возмущений и послужат основой для статистического моделирования движения РН. О востребованности результатов исследования свидетельствуют сертификаты и дипломы, полученные от Госкорпорации «Роскосмос».

Степень достоверности расчетов, представленных в работе, подтверждается большим объемом и качеством анализируемых данных наблюдений, корректным комплексным использованием современных методов и средств математического аппарата, оценками статистической значимости результатов, а так же их апробацией на различных конференциях и семинарах.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9-ти российских и международных конференциях, в частности:

– Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Современные достижения и проблемы в области

изучения окружающей среды» (ООО «ТЛ Красный угол» – 2014), (Барнаул, 1 – 8.08.2014 г.).

– Международной школы-конференции молодых ученых «Изменения климата и природной среды северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация» (М.: ГЕОС. – 2014), (Кисловодск, 14 – 20.09.2014 г.).

– XI Международной Школы молодых ученых им. А.Г. Колесника (ТМЛ-Пресс. – 2014), (Томск, 15 – 19.09.2014 г.).

– III Всероссийской научно-практической конференция с международным участием «Современные проблемы географии и геологии» (ООО «Новые Печатные Технологии» – 2014), (Томск, 11 – 12.11.2014 г.).

– Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской Высокогорной комплексной экспедиции АН СССР (Нальчик, 7 – 9.10.2014 г.).

– Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики» (Углегорск – Благовещенск – Москва, 5 – 6.06.2015 г.).

– II Международной научной конференции «Климатология и гляциология Сибири» (Томск, 20 – 23.10.2015 г.).

– Международной конференции и школе молодых учёных по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS (Томск, 11 – 16.07.2016 г.).

– Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики» (Москва – Самара, 8 – 9.09.2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке задачи, сборе и обработке материала, расчетах и анализе полученных результатов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников, а так же приложений. Общий объём работы составляет 153 страницы, 42 рисунка, 29 таблиц и 9 приложений. Библиографический список включает 119 наименований, в том числе 14 иностранных. Обзор литературы представлен в первой главе.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю д.г.н., профессору В. П. Горбатенко за моральную поддержку, внимание и научные консультации. Благодарность всему коллективу кафедры метеорологии и климатологии Томского государственного университета за дельные рекомендации и замечания. За помощь и поддержку на разных этапах исследования Начальнику Комплекса геофизического обеспечения филиала ФГУП «ЦЭНКИ» - КЦ «Южный» П. Л. Бажину, заместителю начальника Комплекса геофизического обеспечения П. С. Богачеву, начальнику информационно-прогностического отдела Комплекса геофизического обеспечения П. А. Варенику и начальнику авиационно-метеорологического отдела Комплекса геофизического обеспечения В. В. Бровкину.

1 ЯВЛЕНИЯ ПОГОДЫ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИЕ ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ПУСКОВ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

1.1 Ветер

1.1.1 Общая характеристика ветра. Методические аспекты обработки информации

По определению, ветер – это движение воздуха относительно земной поверхности, зависящее от циркуляции атмосферы и рельефа местности. Направление и скорость ветра, его порывы необходимо знать при прогнозе погоды, оценке переноса примесей, обеспечении полетов авиации [7, 8], при строительстве (статистический анализ ветровых нагрузок на сооружения [58]) и для нужд ветроэнергетики [35, 38, 103]. Характеристики ветра рассчитывают как в пределах приземного и пограничного слоев атмосферы, так и для свободной атмосферы.

Основной причиной возникновения ветра является сила барического градиента (F_p), она возникает в результате неравномерного распределения давления вдоль земной поверхности, рассчитать её можно при помощи формулы 1:

$$F_p = 1/\rho * \Delta p / \Delta s, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; Δp – разность значений давления в двух пунктах; Δs – расстояние между пунктами.

В пограничном слое направление скорости ветра отклонено от изобар в сторону низкого давления [68]. Перемещение частиц воздуха возникает под действием определённых сил [89]. Как только частица воздуха начинает двигаться, на ее движение оказывают влияние другие силы – отклоняющая сила вращения Земли, сила трения и центробежная сила. Так как атмосфера участвует

в суточном вращении Земли, то, согласно законам механики, на движущуюся массу воздуха действует отклоняющая сила вращения Земли, которую называют силой Кориолиса. Эта сила не изменяет скорость воздушного потока, а лишь отклоняет направление его движения. Сила Кориолиса действует под прямым углом к направлению движения: вправо – в северном полушарии, влево – в южном. Чем больше скорость воздушного потока, тем больше сила Кориолиса. Она зависит также от широты места: имея наибольшее значение на полюсе, сила Кориолиса убывает с уменьшением широты, становясь равной нулю на экваторе [3]. При установившемся движении между силами барического градиента, силы Кориолиса, силы трения должно существовать равновесие, то есть векторная сумма силы трения и силы Кориолиса должна быть равна модулю силы барического градиента и противоположно ему направлена [68].

В пограничном слое атмосферы (от земной поверхности до высоты 1000 м) на прямолинейное движение воздуха влияют три силы – сила барического градиента, сила Кориолиса и сила трения. Направление силы трения противоположно направлению движения, а сила Кориолиса в северном полушарии отклоняется от него на 90° вправо, таким образом, ветер в пограничном слое должен иметь направление, составляющее с изобарой некоторый угол. Над шероховатой земной поверхностью (лес, холмы и т. д.) этот угол больше, чем над равнинной местностью и поверхностью моря. С высотой коэффициент трения, а, следовательно, и угол уменьшаются. Выше пограничного слоя сила трения практически не оказывает влияния на воздушные потоки. В этом случае при прямолинейном движении на частицы воздуха действует только сила барического градиента и сила Кориолиса. Установившееся горизонтальное движение воздуха в свободной атмосфере при отсутствии силы трения называют градиентным ветром. Он наблюдается выше пограничного слоя, т. е. на высотах более 1000 м. Вектор градиентного ветра направлен вдоль изобар. Скорость градиентного ветра зависит от горизонтального градиента давления, широты места и плотности воздуха. Скорость градиентного ветра тем больше, чем больше

горизонтальной градиент давления, т. е. чем гуще изобары на синоптической карте. При этом с уменьшением широты места она возрастает [3].

С высотой скорость и направление ветра изменяются. Приземный слой атмосферы до высоты около 30 м характеризуется возрастанием с высотой коэффициента турбулентного теплообмена. В пограничном слое выше приземного подслоя коэффициент турбулентного обмена мало меняется с высотой. Здесь скорость продолжает возрастать, причем ветер поворачивает в северном полушарии вправо, в южном – влево, до тех пор, пока не достигнет значений градиентного ветра [39]. На высоте 500 м скорость ветра примерно в 2 раза больше, чем у поверхности земли. В свободной атмосфере градиентный ветер также изменяется по направлению и скорости. Основной причиной является изменение горизонтального барического градиента под влиянием горизонтального градиента температуры [3].

В каждый физический момент и над различными пунктами значение ветра различное. Изменчивость его во времени и пространстве велика из-за постоянно наблюдаемой турбулентности различного масштаба: циклонов, антициклонов или вихрей меньшего масштаба. В результате этого имеет место постоянная смена ветра, как по направлению, так и по скорости. Так как ветер характеризуется величиной и направлением, его рассматривают как вектор. Движение воздуха обычно бывает трехмерным. Но вертикальная компонента невелика. Распределение ветра исследуется либо в векторной форме, либо отдельно по скорости (величиной вектора) и направлению. Вторая форма представления характеристики ветра наиболее распространена [34].

Основными характеристиками ветра являются направление и скорость. Направление ветра выражается в градусах или румбах той части горизонта, откуда дует ветер. Градусы отсчитываются от северного направления географического меридиана по часовой стрелке от нуля до 360° . Румбы (их 16) имеют русские и латинские наименования. Главными румбами называют направления на север (С, N), юг (Ю, S), восток (В, E), запад (З, W) [3]. При наблюдениях направления ветра в высоких слоях атмосферы, как правило,

указывается в градусах, а на наземных метеорологических станциях – в румбах горизонта. Суточный ход обнаруживается и в направлении ветра. Возрастание скорости ветра утром и днем в приземном слое над сушей сопровождается вращением ветра вправо, по часовой стрелке, убывание скорости вечером и ночью – вращением влево. В более высоких слоях происходит обратная картина. Причина суточного изменения направления ветра – суточный ход турбулентного обмена [84].

Скорость ветра измеряется в метрах в секунду (м/с) или в километрах в час (км/ч). В некоторых странах скорость ветра измеряется в узлах; 1 узел примерно равен 0,5 м/с. В морской практике скорость ветра принято выражать в условных единицах – баллах – и называть ее силой ветра, которая оценивается по 12-балльной шкале Бофорта. В обыденной жизни часто используют качественные характеристики ветра по его скорости: ветер скоростью до 3 м/с – слабый, 4–7 м/с – умеренный, 8–14 м/с – сильный, 15–19 м/с – очень сильный, 20–24 м/с – шторм, 25–30 м/с – жестокий шторм, более 30 м/с – ураган [3].

У земной поверхности скорость ветра чаще всего 4–8 м/с и редко превышает 12–15 м/с. Однако в штормах и ураганах умеренных широт он превышает 30 м/с, а при отдельных порывах достигает 50 м/с. В тропических ураганах скорость ветра доходит до 65 м/с (отдельные порывы до 100 м/с). В мезомасштабных вихрях (смерчи, тромбы) возможны скорости и более 100 м/с. В так называемых струйных течениях в верхней тропосфере и нижней стратосфере средняя скорость ветра за длительное время и на большой площади составляет 70–100 м/с.

В приземном слое минимум скорости ветра наблюдается ночью. После полудня скорость ветра и его порывистость достигают максимума. Летом такой суточный ход скорости ветра имеет место до высоты 100–300 м, а зимой – высоты 20–30 м. Причина суточного хода скорости ветра – суточное изменение интенсивности турбулентного перемешивания [84].

Ветер постоянно меняет скорость и направление, которые колеблются около средних величин, что регистрируют чувствительные самопишущие приборы.

Причиной этих колебаний является турбулентность. По скорости различают ровный и порывистый ветер, по направлению – постоянный и меняющийся. Когда направление ветра за 2 мин изменяется более чем на один румб, то такой ветер называется меняющимся. Кратковременное резкое усиление ветра до 20 м/с и более со значительным изменением его направления называется шквалом. Ветер считается порывистым, если его скорость в течение 2 мин изменяется на 4 м/с и более. [3]. Так же порывистым называют ветер с резко выраженными колебаниями скорости и направления ветра. При особенно сильной порывистости говорят о шквалистом ветре [84]. Порывистость ветра сильно зависит от скорости: чем больше скорость, тем больше порывистость [84]. Но при очень больших скоростях порывистость уже меняется мало. Порывистость также зависит от термической стратификации. В устойчивых массах ветер более ровный, а в неустойчивых порывистость его возрастает. Поэтому порывистость имеет хорошо выраженный суточный ход. В суточном ходе она увеличивается при усилении конвекции, т.е. в дневные часы. Максимум наблюдается в послеполуденное время, а минимум – ночью. В годовом ходе максимум порывистости имеет место весной, а минимум зимой. Порывистость увеличивается над участками с большой шероховатостью. По мере поднятия над земной поверхностью порывистость ветра уменьшается [33].

Изменение скорости ветра с высотой происходит вследствие постепенного трения и изменения барического поля. До высот 500–1000 м сила трения уменьшается, а скорость ветра возрастает. В свободной атмосфере, на которую не влияют силы трения, скорость ветра может возрастать и убывать. Эти особенности объясняются перестройкой барического поля, вызванной появлением горизонтальных градиентов температуры. Возникновение горизонтальных градиентов может быть вследствие притока на высотах теплого воздуха с юга и холодного – с севера. В результате на одной и той же высоте возникают перепады давлений в различных областях [90].

Климатологическую обработку ветра можно вести двумя способами: обрабатывать отдельно каждую из его составляющих (в полярных координатах

это модуль вектора, или скорость ветра и его направление) или рассматривать скорость и направление совместно.

Повторяемость различных направлений ветра вычисляют для каждого из восьми румбов и выражают в процентах к общему числу случаев, когда отмечался ветер. Штили в это число не включают. Их вычисляют отдельно и выражают в процентах от общего числа наблюдений.

Рассчитывая характеристики скорости ветра, прежде всего, следует считаться с имеющейся на всех станциях неоднородностью рядов за счет изменения методики наблюдения. В последние годы почти на всех станциях перешли к измерению скорости ветра анеморумбометром М-63М. Этот прибор показывает скорости ветра, осредненные за 10-минутный интервал, в то время как интервал осреднения флюгера всего 2 мин. Различия в скоростях ветра, определенных по флюгеру и анеморумбометру, связаны еще и с тем, что большие скорости флюгером завышаются вследствие нелинейности его шкалы [36].

Основными климатическими показателями скорости ветра служат: средняя скорость, среднее квадратическое отклонение, коэффициенты вариации, асимметрии и автокорреляционная функция скорости ветра, а также повторяемость различных градаций скорости ветра, среднее число дней с большими скоростями ветра, максимальная скорость ветра, повторяемость коэффициентов порывистости при различных скоростях ветра.

Еще одной важной характеристикой скорости ветра является коэффициент порывистости, вычисляемый совместно со скоростью ветра, при которой он наблюдается. Коэффициентом порывистости называется отношение скорости ветра в порыве за 10-минутный интервал к средней скорости за тот же интервал. Рассчитать такой коэффициент можно только за период анемометрических наблюдений. Градации коэффициента порывистости обычно задают равными 0,5 в границах 0,0–0,5; 0,5–1,0 и т. д., градации скорости ветра: 0–5; 6–9; 10–13; 14–17; 18–21 и т. д [36].

При совместной обработке скорости и направления ветра иногда вычисляют модуль и направление среднего вектора скорости ветра, а также повторяемость

векторов ветра, представляемую в виде двумерной таблицы повторяемости различных градаций скорости и направления ветра. Характеристики среднего вектора ветра получают благодаря среднему значению индивидуального вектора ветра за каждый срок наблюдения [36].

1.1.2 Общая характеристика ветра в свободной атмосфере. Методические аспекты обработки информации

Изучением особенностей изменчивости ветра в свободной атмосфере занимался К. К. Гарифулин. Он предоставляет информацию о характеристике временной и пространственной изменчивости направления и скорости ветра на основе материалов ветрового зондирования на станции вблизи Санкт-Петербурга и Владивостока, для сравнения и определения применимости результатов в условиях других физико-географических районов [15].

Характеристики изменчивости направления ветра определялись для двух промежутков времени 00 и 12 ВСВ (всемирное скоординированное время) и 26 уровней (0,1; 1; 2; 3; ...; 10; 11; 12–15, 16–25 км) отдельно по месяцам. Для каждой высоты и месяца были разбиты на подгруппы по градациям скорости ветра в исходный момент времени: 0–9; 10–19; 20–29; 30–39; 40–49; 50–59; 60–69 и более 70 м/с. Расчет характеристик производился отдельно по высотам, интервалам времени, сезонам и градациям для каждой станции в отдельности.

Важным фактором изменения модуля и направления скорости ветра по мере удаления от земной поверхности наряду с изменениями турбулентной вязкости является горизонтальная термическая неоднородность в слоях, расположенных на разных уровнях над землей, т.е. бароклинность атмосферы. Вследствие этого формируется термическая составляющая скорости ветра, или термический ветер [91].

Попытка выявить связь изменчивости направления ветра с формами барического поля у земли и на высотах оказалась безуспешной. Однако было отмечено, что определяющими различий изменений направления ветра являются

величины барического градиента на соответствующих уровнях или связанные с ними значения скорости ветра. При самых разнообразных синоптических положениях направление ветра приобретало большую устойчивость с ростом скорости [15].

Анализ графиков распределения показал, что изменчивость направления ветра данной скорости остается практически одинаковой в пределах всей тропосферы, но резко уменьшается при переходе в стратосферу. Незначительные увеличения изменчивости характеристик направления ветра наблюдались в нижних слоях (0,2–1,0 км) и в верхней тропосфере (6–9 км), заметные, в основном для больших интервалов времени и при малых скоростях ветра, что может быть объяснено не только соответствующим изменением ошибок определения ветра с высотой, но и слоистой структурой тропосферы. В слое трения и под тропопаузой более интенсивна турбулентность, на высотах 3–6 км движение атмосферы наиболее упорядоченное [15].

По графикам распределения по высоте подтвердилась отчетливо выраженная зависимость изменчивости направления от скорости ветра. С ростом скорости направление приобретает большую устойчивость во времени. При слабых ветрах относительно мелкие вихри в фиксированной области пространства сменяют друг друга. При очень сильных ветрах вихри, сравнимые по размерам с целыми континентами, могут иметь весьма устойчивые по направлению составляющие ветра. Если рассматривать изменчивость направления ветра по сезонам, то в тропосфере в целом зимой ветер несколько устойчивее по направлению, чем летом. В стратосфере направление ветра несколько устойчивее зимой и осенью. С целью проверки устойчивости полученных характеристик изменчивости ветра в пространстве были привлечены данные других станций в районе Владивостока, Минска и Свердловска. Однако во всех случаях производились сравнения самых общих характеристик, без учета особенностей ветрового режима. Выявлено, что ветер данной скорости обладает примерно одинаковой изменчивостью во времени на обширных территориях, по крайней мере, в равнинных областях умеренных широт. Точно такой же подход

применили, затем и другие авторы работы и на независимом материале подтвердили этот вывод. Заметные искажения могут быть в горных районах высот, подвергающихся возмущающему воздействию земной поверхности. Это предположение подтверждается, например, по данным М. А. Петросянца и Г. В. Грузы [15].

При анализе усредненного ветра обычно рассматривают его горизонтальные составляющие. Вертикальная составляющая ветра, как правило, много меньше горизонтальных, труднее инструментально и чаще всего оценивается теоретически на основе методов динамической метеорологии. Анализ характеристик вертикальной составляющей ветра интересен для качественного понимания закономерностей ее высотных и сезонно-широтных зависимостей [6].

Анализ изменчивости аэрологического ветра производился по методике и материалу, использованному при рассмотрении изменчивости направления ветра. Для уточнения характеристик для нижней стратосферы были дополнительно проанализированы и обработаны 1942 случая ветрового зондирования в Воейково. В отличие от направления, изменчивость скорости ветра в стратосфере такая же, как и в тропосфере. Изменчивость скорости ветра по градациям мало зависит от времени года. Рост повторяемости сильных ветров при соответствующем уменьшении слабых приводят к некоторому возрастанию скорости ветра зимой. Летом получается обратное соотношение. В стратосфере обобщенные значения изменчивости скорости ветра несколько больше осенью и зимой, меньше весной и летом. Отчетливо проявляется зависимость средней изменчивости скорости ветра от высоты. Величина скорости ветра достигает максимума на высоте 9–10 км и совпадает с уровнем максимального ветра [15].

При решении некоторых задач представляет интерес знание закономерностей и косвенных характеристик изменчивости максимального ветра и вертикальных градиентов скорости ветра. Структура максимальной скорости ветра и ее вертикального градиента автором рассматривалась по обширному материалу наблюдений на ряде станций по сезонам и с использованием различных методов обработки и анализа исходных данных. Высота появления

максимального значения скорости ветра от срока к сроку может изменяться в пределах выбранного слоя 1–16 км. Чаще всего максимальное значение скорости ветра находится на высотах от 6–7 до 11–13 км. В отличие от аэрологического и среднего ветра, изменчивость максимального ветра обнаруживает заметную зависимость от времени года и неодинакова для различных географических районов.

Согласно исследованиям автора выявлено, что определяющим в изменении направления ветра является величина барического градиента и значение скорости ветра.

Автором выявлены следующие особенности характеристик ветра на различных высотах:

- незначительные изменения характеристик ветра наблюдаются в нижних слоях (0,2–1 км) атмосферы и в тропосфере;
- отмечено, что с ростом скорости направление приобретает устойчивость;
- изменчивость скорости ветра зависит от времени года: наблюдается возрастание скорости ветра зимой;
- величина скорости ветра достигает максимума на высоте 9–10 км и совпадает с уровнем максимального ветра;
- максимальное значение скорости ветра находится на высотах от 6–7 км до 11–13 км.

При обработке наблюдений над ветром приходится вычислять большое число различных климатических показателей. Обусловлено это, во-первых, широким использованием климатических показателей ветра при изучении режима общей циркуляции атмосферы, в исследованиях по теории климата, при решении разнообразных прикладных задач. Во-вторых, ветер представляет собой векторную величину. Поэтому для описания ветрового режима требуется ряд характеристик модуля вектора скорости ветра, его направления, а также различных сочетаний скорости и направления ветра [60].

Для характеристики режима ветра в большинстве случаев используют следующие климатические показатели:

- среднюю скорость ветра;
- повторяемость различных градаций скорости ветра;
- максимальную скорость ветра;
- повторяемость различных направлений ветра (по румбам);
- среднюю скорость ветра при данном направлении (средняя скорость ветра в румбе);
- повторяемость различных направлений (румбов) ветра по градациям скорости.

Перечисленные климатические показатели вычисляют для стандартных высот или для главных изобарических поверхностей. Направления ветра, которые в первичном материале наблюдений выражены в градусах, группируют по восьми румбам и вычисляют повторяемость каждого румба [60].

Вычисления выполняют по месяцам (иногда по сезонам), используя обычные методы выборки и подсчета средних, которые принципиально ничем не отличаются от тех, какие применяются при обработке наземных данных.

В последние годы получили широкое применение и содержатся в Аэроклиматическом справочнике некоторые другие показатели ветра. К ним относятся:

- результирующий ветер (средний вектор скорости ветра на фиксированном уровне);
- среднее значение зональной составляющей ветра;
- характеристики изменчивости ветра;
- средний ветер в слое (средний вектор скорости ветра в фиксированном слое атмосферы);
- вертикальный градиент скорости ветра;
- эквивалентный ветер [60].

Результирующим ветром называется средний вектор скорости ветра, полученный путем осреднения всех векторов ветра в данном пункте за некоторый период времени. Следует различать результирующий ветер и среднюю скорость ветра. В отличие от результирующего ветра, который представляет собой

векторную величину, средняя скорость ветра есть среднее арифметическое модулей всех векторов скорости ветра за некоторый период времени и является величиной скалярной. Соотношение между этими величинами может быть различным и зависит от изменчивости ветра в данном пункте наблюдений. Модуль результирующего ветра никогда не превышает среднюю скорость ветра. Различие между ними тем больше, чем сильнее изменчивость направления ветра в данном пункте. Для ряда прикладных задач результирующий ветер может быть вычислен, если меняются данные о вероятности (повторяемости) различных направлений ветра по восьми румбам, причем для каждого румба известна средняя скорость ветра. Он может быть получен как среднее, взвешенное восьми векторов. Для получения приближенного значения результирующего ветра иногда используют средние карты абсолютной топографии изобарических поверхностей. На таких картах направление результирующего ветра примерно совпадает с касательной к изогипсам, а модуль его прямо пропорционален густоте изогипс и определяется с помощью градиентной линейки [60].

При изучении изменчивости ветра следует различать изменчивость модуля скорости ветра и изменчивость вектора ветра. В первом случае изменчивость ветра оценивается средним квадратическим отклонением скорости ветра (скалярным квадратическим отклонением), во втором случае – средним квадратическим отклонением вектора ветра (векторное квадратическое отклонение). Скалярное квадратическое отклонение является мерой отклонения индивидуальных скоростей ветра (модулей) от средней скорости ветра.

При расчете вертикальных градиентов ветра следует различать градиент модуля скорости ветра и градиент вектора скорости ветра. Скалярный вертикальный градиент скорости ветра есть разность модулей скорости ветра на двух соседних уровнях, отнесенная к единичному слою атмосферы [60].

Векторный вертикальный градиент отличается тем, что при его вычислении берется разность векторов скорости ветра. Скалярный градиент, как правило, меньше векторного. Различие между ними тем больше, чем сильнее изменяется направление ветра с высотой. В процессе обработки для каждого случая

зондирования векторные вертикальные градиенты скорости ветра вычисляются как разность векторов ветра на верхней и нижней границах некоторого слоя атмосферы.

Вычисление климатических показателей вертикального векторного градиента производится ежемесячно или по сезонам за ряд лет. При вычислении повторяемости различных значений градиента ветра за 100 % принимается число значений градиентов в данном слое за весь период наблюдений. Средний векторный градиент в данном слое вычисляется как среднее значение векторов вертикальных градиентов за весь период наблюдений. Если для станции имеются многолетние данные о результирующем ветре на различных уровнях, то средний векторный вертикальный градиент может быть получен более простым способом – как векторная разность результирующих ветров на двух соседних уровнях [60].

1.1.3 Изучение ветра на территории России

На территории России результаты об особенностях режима ветров в различных регионах нашей страны представлены во многих научных работах. В условиях меняющегося климата исследование многолетних тенденций изменения климатических характеристик в глобальном и региональном масштабах вызывает постоянный интерес. В этом направлении выполнено большое количество работ [28, 29, 69, 100], как по данным наблюдений, так и с помощью климатических моделей. Заметим, что основное внимание уделено изменению температуры воздуха, а также таким характеристикам, как облачность, осадки, снежный и ледяной покровы [95]. Значительно менее изученной величиной является скорость ветра. Имеющиеся исследования многолетних изменений ветрового режима по большей части выполнены на основе данных приземных наблюдений. Особое внимание уделено изменению ветровых характеристик над океанами [109]. В работе [119] отмечен положительный тренд ветрового напряжения и усиление скорости ветра над поверхностью южных океанов, увеличение высоты ветровых волн в умеренных широтах в зимний период за последние 45 лет в

Северной Атлантике и Тихом океане. Немногочисленные работы, выполненные на основе данных наблюдений для европейской территории Российской Федерации, показывают в среднем ослабление скорости ветра у поверхности земли. Так в работах А. В. Мещерской с соавторами [70, 71] оценены линейные тренды среднегодовой скорости ветра, повторяемости штилей и скорости ветра по градациям и показано, что на подавляющем большинстве метеорологических станций среднегодовая скорость ветра уменьшилась, особенно во внутриматериковых областях (на некоторых станциях в два раза и более). Исследование изменения скорости ветра по приземным данным в северных регионах [71] выявило повсеместное уменьшение повторяемости штилей (на о. Диксон, в Мурманске и Туруханске в 10 раз и более). В среднем на 20–40% увеличилась повторяемость слабого ветра (2–5 м/с) и уменьшилась повторяемость более сильного ветра (за исключением побережья Северного Ледовитого океана и Охотского моря). Исследования режима ветра в свободной атмосфере по большей части выполнены на основе данных реанализа и посвящены изучению связи вариаций скорости ветра с другими характеристиками [114]. В одной из немногих работ [106], основанных на данных аэрологических наблюдений, показана связь вариаций скорости ветра и температуры в свободной атмосфере над Тихим океаном, а также замедление струйного течения в средних широтах.

В связи с вышесказанным исследование изменения ветрового режима в свободной атмосфере является актуальнейшей задачей. Представляет также интерес аспект, связанный с оценкой изменения изменчивости (вариабельности) скорости ветра. Считается общепризнанным, что в последние десятилетия наряду с глобальным потеплением наблюдается усиление экстремальности климата [95].

Исследования сильных ветров в районе Черноморского побережья были проведены Оганесяном В. В. [75]. Автором исследовались временные ряды значений скорости ветра, достигших критериев ОЯ, за период с 1984 г. по 2009 г. на шести станциях (Адлер, Горный, Джубга, Лазаревское, Сочи, Туапсе) по данным ВНИИГМИ-МЦД. Было выявлено, что сильные ветра в регионе связаны с распространением глубоких барических ложбин и выходом южных циклонов. На

усиление ветра оказывают влияние конфигурация береговой линии, неоднородность рельефа, активность атмосферной циркуляции. Особое значение приобретают и местные ветры [75]. Их объединяют такие качества, как внезапность и большая сила. Скорость таких ветров достигает 40 м/с, а при порывах: 50–60 м/с. Кроме того, существует еще один вид ветра – стоковый ветер [75]. Появление его связано с нарушением статического равновесия атмосферы вблизи ледяного склона, температура которого значительно ниже температуры в свободной атмосфере на такой же высоте. Как известно, в нормальных условиях температура воздуха понижается с высотой, причем характер этого понижения зависит от широты места. Однако в отдельных районах воздух, двигаясь под действием градиента давления, над большим пространством холодного плоскогорья еще более выхолаживается и как бы проваливается ниже той отметки, на которой ему надлежит быть при нормальном профиле температуры. Создается неустойчивое состояние атмосферы, при котором скорость потока усиливается вследствие действия дополнительного горизонтального градиента давления, вызванного разностью температуры воздуха на одной и той же высоте над ледниковым куполом и над поверхностью моря. Ветер приобретает дополнительное ускорение и ураганом обрушивается на побережье [75]. Васильев Е. В. [12, 13] изучал условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов на европейской территории России. Здерева М. Я. занималась прогнозом сильного ветра на пентаду по полусуткам для территории Урало-Сибирского региона [41]. И впервые для территории Урало-Сибирского региона создала автоматизированную схему прогноза двух категорий сильного ветра, позволяющей предсказывать данное опасное явление и характер его распространения по площади района с заблаговременностью до пяти суток [41].

Так же следует отметить, что режим ветров имеет некоторые особенности в условиях городской среды. Данный вопрос исследовался немногими учеными, в частности подобное исследование проводилось В. П. Юшковым [104, 105]. Он изучал особенности ветра в районе города Москвы. В результате было выявлено быстрое увеличение скорости ветра в ночные часы при устойчивой

стратификации и более медленное в дневные часы, особенно в летнее время при неустойчивой стратификации. Амплитуда суточного хода профилей синоптической изменчивости уменьшается в зимний период одновременно с увеличением самой синоптической изменчивости. В летнее время при конвекции в дневные часы отдельные наблюдения при стационарных условиях конвекции показывают очень малое изменение скорости ветра с высотой выше уровня крыш. Среднее же, более медленное, увеличение скорости ветра с высотой объясняется постоянной сменой синоптических условий и мезомасштабной неустойчивостью конвективных движений. Существенное значение имеют микроклиматические особенности, связанные как с рельефом местности, так и с особенностями подстилающей поверхности: высотой растительности или городской застройкой. Ключевую роль в изменении профилей ветра в городской среде играет увеличение термической неоднородности и турбулентности, приводящее к увеличению как турбулентного потока тепла и импульса, так и мезомасштабной изменчивости горизонтальных компонентов скорости ветра в городской среде. Важной характеристикой профилей ветра в городской среде является так называемый слой вытеснения, который связан не только с высотой городских зданий, но и с избыточным нагревом городской среды из-за уменьшения альбедо поверхности, выбросами антропогенного тепла и соответственно с изменением стратификации температуры в нижней части атмосферного пограничного слоя (АПС). Появление слоя вытеснения приводит к более частому появлению в городской среде приподнятых инверсий температуры и существенному уменьшению скорости ветра в пределах слоя вытеснения. Для отдельных синоптических ситуаций автором было выявлено, что слой вытеснения может достигать 150–200 м и более, т.е. он значительно превосходит среднюю высоту зданий в городской среде [104, 105].

Локощенко М. А. [64, 65] исследовал ветровой режим нижнего 500-метрового слоя атмосферы над Москвой. В его работах в целом прослеживается тенденция к усилению ветра осенью и зимой. Причиной этому могут быть особенности крупномасштабной атмосферной циркуляции (частое нахождение

Москвы в холодное время года в сильных градиентных значениях). Суточный ход скорости ветра в среднем за год на высоте вплоть до 40–60 м отмечен дневным максимумом и ночным минимумом; на высоте от 80 до 120 м он выражен слабо и характеризуется утренним минимумом; начиная с высоты 140–160 м – дневным минимумом и ночным максимумом. Амплитуда суточного хода скорости ветра увеличивается с высотой приблизительно до 15 м, после чего уменьшается до 80 м, а затем вновь устойчиво растет, достигая на высоте 400 м около 4,5 м/с. Наибольшие значения скорости ветра в среднем за 10 мин в нижнем 500-метровом слое воздуха достигают 30–35 м/с [64, 65].

Изучением характеристик ветра занимались многие авторы, однако информации о параметрах ветра над интересующей нас территорией крайне мало и требует более детального изучения.

1.2 Опасные конвективные явления

1.2.1 Физические условия развития, стадии и размеры конвективных облаков

Одним из видов вертикальных движений в атмосфере является конвекция. Конвекция возникает в результате перегрева отдельных масс воздуха при неустойчивой в нижних слоях стратификации. Наиболее благоприятные условия для возникновения конвективных движений создаются над сушей в теплую половину года в областях пониженного давления. Под влиянием притока прямой солнечной радиации вблизи земной поверхности возникает неустойчивая стратификация. Отдельные перегретые массы воздуха при таких условиях начинают ускоренно перемещаться по вертикали вверх. Сначала подъем такой массы ненасыщенного воздуха происходит практически по сухой адиабате AA' , в соответствии с рисунком 1. На уровне конденсации Z_k воздух достигает состояния насыщения ($f = 100\%$). При наличии активных и достаточно крупных ядер конденсации состояние насыщения достигается несколько ниже уровня Z_k . Выше

уровня конденсации воздух поднимается по влажной адиабате [2]. Благодаря понижению температуры происходит конденсация водяного пара и образование облачности.

Представляют интерес следующие уровни, связанные с развитием конвективного облака:

- а) уровень конденсации Z_k , практически совпадающий с нижней границей облака;
- б) уровень нулевой изотермы Z_0 , отделяющей переохлажденную (верхнюю) часть облака от не переохлажденной (нижней);
- в) уровень свободной конвекции $Z_{конв}$, практически совпадающей с верхней границей облака.

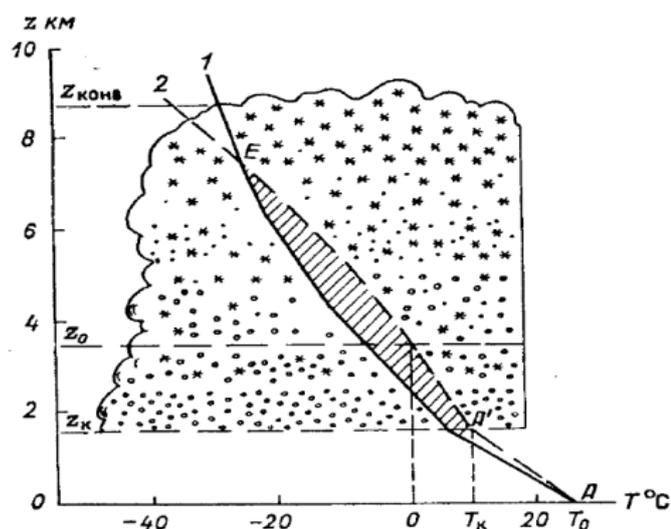


Рисунок 1 – Схема кучево-дождевого облака
(1 – кривая стратификации, 2 – кривая состояния)

Уровень свободной конвекции – это такой уровень, до которого распространяются восходящие вертикальные движения (струи), порождаемые энергией неустойчивости. Он располагается несколько выше уровня, где температура поднимающейся частицы (струи) выравнивается с температурой окружающего воздуха (точка E на рисунке 1). Объясняется это тем, что до уровня выравнивания поднимающаяся частица на любой высоте имеет более высокую температуру, чем окружающий воздух, и движется ускоренно вверх (с

нарастающей скоростью). Вблизи уровня выравнивания скорость частицы (восходящей струи) близка к максимальной. Выше этого уровня температура частицы становится ниже температуры среды, вертикальная скорость начинает уменьшаться, но частица по инерции продолжает подниматься вверх до уровня свободной конвекции, где скорость ее обращается в нуль. Наблюдения показывают, что вершины кучевых облаков при их росте испытывают колебательные (пульсационные) движения с периодом 10-11 мин. На эту основную волну накладываются колебания с периодом около 1 мин.

Уровнем конденсации принимается высота, на которой воздух при подъеме достигает насыщения. Дальнейший подъем воздуха сопровождается конденсацией водяного пара, при которой выделяется скрытая теплота конденсации, за счет чего температура будет падать медленнее, чем до начала конденсации. Понижение температуры в насыщенном воздухе на каждые 100 м подъема называется влажно-адиабатическим градиентом температуры. Уровень конденсации приблизительно совпадает с нижней границей облачности. За уровень конденсации на диаграмме принимается точка (точка А 1 на рисунке 1), где пересекаются сухая адиабата (начальный отрезок кривой состояния) с изограммой (соответствует точке росы на уровне начала подъема). Выше уровня конденсации изменение температуры в поднимающемся воздухе будет происходить влажноадиабатически.

Когда вершины C_u *cong.* проникают в слои, где температура воздуха намного ниже нуля, то происходит обледенение верхней части облака, и облако превращается в C_b . Характерной особенностью кучево-дождевых облаков является выпадение ливневых осадков, иногда града, которые достигают земной поверхности, а также развитие объемных электрических разрядов, что является причиной развития гроз.

Продолжительность жизни изолированных внутримассовых C_b составляет 30–40 мин и редко бывает 1–2 ч, за этот промежуток времени облако проходит определенные этапы развития: стадия роста, зрелости и распада. Смыкаясь друг с другом, C_b образуют группу конвективных ячеек, часть из которых разрушается,

а часть продолжает расти и развиваться далее. Поэтому однозначное определение стадии развития таких скоплений Сб невозможно. Количество индивидуальных ячеек в кучево-дождевых облаках может достигать до 8, но чаще всего оно не превышает 3–5. Направление мезомасштабных вертикальных движений внутри каждой ячейки зависит от стадии развития.

Растущие Сб имеют форму «лысых» кучево-дождевых облаков (Сб *calv.*). Их рост сопровождается увеличением напряженности электрического поля в облаке. Как правило, Сб *calv.* в 60–70 % случаев состоят из одного «основного» купола, диаметр которого в среднем близок к 10 км, и только в 10–15 % случаев число куполов может быть и больше. На поверхности «основного» купола обычно видны мелкие «холмы», число которых достигает до 5–10.

Во всей толще растущего облака наблюдаются интенсивные восходящие потоки, скорость которых максимальна в период перехода от стадии роста к стадии зрелости кучево-дождевых облаков [101].

Продолжительность стадии роста составляет 10–20 мин, за это время поперечник облака увеличивается в два раза. Наибольшая скорость роста вершины 16 км/мин наблюдается перед переходом облака в зрелую стадию, что обычно заметно по появлению у облака наковальни. Быстрое образование наковальни происходит, когда над облаком есть слой инверсии или изотермии, под которым и наблюдается растекание вершины.

Вертикальные и горизонтальные размеры Сб значительно больше, чем у Сu *cong.*, причем они максимальны летом и минимальны в холодное время года, когда в континентальных районах умеренных и тем более высоких широт Сб наблюдаются очень редко и то только во фронтальных зонах.

Вертикальная мощность (Н) Сб летом составляет в среднем 4,6 км, зимой – 1,5 км, а весной и осенью 3 и 2,6 км соответственно. Наибольшую толщину имеют грозовые облака, в которых летом в умеренных широтах величины Н часто превосходят 7–8 км, так что вершины Сб достигают уровня тропопаузы или «пробивают» ее [101].

Верхняя кромка более 60 % облаков достигает 11,7 км. Горизонтальные размеры C_b могут достигать 50–70 км и более, причем C_b *calv.* в первом приближении асимметричны, а C_b *inc.* (особенно верхняя часть) вытянуты вдоль ветра. Наибольшую длину имеют наковальни, которые могут быть велики, что закрывают видимый горизонт.

1.2.2 Явления, связанные с конвективной облачностью. Ливневые осадки и грозы

В высоких кучевых облаках благодаря их большой вертикальной мощности, сильным восходящим движениям, большой водности и концентрации капель условия как для коагуляционного, так и для конденсационного роста облачных элементов исключительно благоприятны. Из этих облаков (в умеренных широтах главным образом из C_b , а в тропических и из C_u *cong.*) выпадают относительно кратковременные, но чрезвычайно интенсивные ливневые осадки, в теплое время года это дождь (реже град) [9].

В умеренных широтах выпадение осадков обычно происходит при наличии у развитых в высоту кучевообразных облаков оледенелой перистообразной вершины. Вначале осадки образуются вблизи оси облака, там, где наблюдается максимальная скорость восходящих потоков, концентрация капель и водность облака, то есть там, где условия для укрупнения облачных элементов наиболее благоприятны. В дальнейшем область, в которой образуются осадки, постепенно растет, а район осадков на земле увеличивается благодаря тому, что дивергенция ветра, наблюдаемая под облаком, приводит к расширению зоны дождя [9].

Интенсивность дождя из высоких кучевых облаков исключительно велика. Несмотря на кратковременность ливней (продолжительность ливня из изолированных C_b редко превосходит 25–30 мин) [9], общее количество выпавших осадков может быть очень большим. Капли осадков из кучево-дождевых облаков значительно крупнее, чем из облаков других форм. В среднем радиус капель ливневых осадков составлял 1,1 мм, а грозových – 1,7 мм [9].

В процессе выпадения дождя средние размеры капель меняются. В общем, ливневые осадки обычно начинаются с выпадения редких крупных капель, затем размеры капель постепенно уменьшаются, а число их растет. Особенно мелкие капли падают непосредственно перед концом дождя [9].

Гроза – это комплексное атмосферное явление, связанное с развитием мощных кучево-дождевых облаков и характеризующееся многократными электрическими разрядами в виде молний (между облаками, внутри облаков или между облаком и землей) и звуковым эффектом, называемым громом [1].

Возникновению и развитию гроз способствуют факторы, усиливающие неустойчивость воздушных масс. К ним относятся: сходимости воздушных течений, горизонтальное сжатие и вертикальное растяжение воздушных масс в циклонических областях, подъем воздушной массы вдоль поверхности раздела (вдоль линии фронта). Одно из важнейших условий развития гроз является наличие конвекции (вертикальных движений воздуха). Именно при ее содействии происходит электризация частиц в облаках и последующее разделение зарядов в поле силы тяжести. Конвекция является следствием неустойчивости атмосферы и может возникнуть либо при сильном нагреве подстилающей поверхности, либо в результате бурного вытеснения вверх теплого воздуха холодным.

В зависимости от синоптических условий грозы обычно подразделяются на два основных типа: внутримассовые и фронтальные.

К внутримассовым грозам относятся: конвективные, адвективные и орографические грозы.

Конвективные грозы возникают во влажной воздушной массе при сильном прогреве земной поверхности. Чаще всего они отмечаются в послеполуденные часы летом в размытых барических полях, на периферии заполняющихся циклонов и в седловинах. Перемещаются со скоростью 5–25 км/ч.

Адвективные грозы отмечаются летом в быстро перемещающейся относительно холодной, но влажной воздушной массе над теплой подстилающей поверхностью. Наблюдаются над побережьем днем, над большими водоемами – ночью. Перемещаются вместе с воздушной массой.

Орографические грозы образуются при вынужденном подъеме неустойчивой воздушной массы вдоль наветренных склонов гор. Наиболее сильные грозы наблюдаются на наветренной стороне гор [7].

Фронтальные грозы могут наблюдаться в любое время суток. Смещаются такие грозы вместе с фронтом. Наиболее часто фронтальные грозы связаны с холодными фронтами и фронтами окклюзии. На холодных фронтах грозы чаще всего возникают во второй половине дня. Грозы могут возникать и на теплых фронтах (преимущественно ночью) [72].

Источниками информации о грозовой активности являются: визуальные наблюдения, информация с метеорологического радиолокатора (МРЛ) и информация с искусственных спутников Земли (ИСЗ).

Информация о грозах, поступающая при визуальных наблюдениях со станций «штормового кольца» достоверна, но позволяет использовать ее для прогноза только с малой заблаговременностью. Кроме визуальных наблюдений за грозой используют грозопеленгаторы, которые фиксируют грозовые разряды в радиусе около 50 км [21, 22].

Существующие критерии диагноза и прогноза грозовых облаков, по данным МРЛ, основаны на ряде косвенных признаков, по которым установлено, что вероятность появления грозового процесса увеличивается с ростом толщины облаков, энергии неустойчивости, концентрации и размеров частиц осадков. Современное программное обеспечение метеорологических радиолокационных станций позволяет автоматически выделять наличие сильных ливневых, грозовых и градовых очагов и их пространственное распределение. Такие очаги не следует рассматривать как зоны, в которых обязательно наблюдается грозовая деятельность, но рассматривать как грозоопасные и градоопасные зоны, в которых с разной степенью вероятности может возникнуть гроза. Исходя из этого и принимая во внимание недостаточную частоту наземных метеорологических станций, можно объяснить тот факт, что радиолокационные данные о грозовой деятельности не всегда подтверждаются данными наземных наблюдений. Это важно для оценки достоверности радиолокационной информации [21, 22].

Информация, полученная с ИСЗ, после ее обработки автоматизированными системами может быть представлена по-разному. Спутниковые наблюдения за разрядами молний проводятся более 40 лет. Первые наблюдения проводились NASA в середине 1960-х гг. [21, 22].

Временной ход многих атмосферных явлений характеризуется непериодическими изменениями с переменной амплитудой. Грозовая активность не является исключением. Во временном ходе гроз, например, в Европе выявлены циклы продолжительностью 5–6 и 11 лет [92]. Чтобы проанализировать временные вариации характеристик грозовой активности или наличие их пространственной изменчивости оперируют характеристиками числа дней с грозой в году и суммарной за год продолжительностью гроз. Эти характеристики, осредненные за достаточно большой период лет, используются и при построении карт грозовой активности, и для оценки грозоопасности той или иной территории [80].

Для оценки поражаемости наземных объектов разрядами молнии наиболее подходящей характеристикой интенсивности грозовой деятельности является средняя годовая плотность разрядов молнии в землю. Поэтому особенно актуальным является создание сети грозорегистраторов, дающих информацию о числе поражений молниями единицы поверхности земли [80].

Практически все существующие методы прогноза гроз основаны на использовании результатов аэрологического зондирования атмосферы. По результатам зондирования определяется степень неустойчивого слоя. Чем большей мощности в своем вертикальном развитии достигнут конвективные ячейки, тем интенсивнее будут опасные явления погоды, которые они продуцируют: ливни, грозы и др. [23, 24].

1.2.3 Изучение условий образования опасных конвективных явлений

Изучение условий образования опасных конвективных явлений и возможность улучшения качества их прогноза являются актуальными задачами

метеорологии. Известно, что горизонтальные размеры конвективных зон во много раз меньше расстояния между метеорологическими станциями, на которых они наблюдаются. Сравнительно невелика и продолжительность гроз и ливней. Все это определяет трудности в регистрации, изучении и в прогнозировании опасных явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции.

На основе существующих методов прогноза гроз, града, шквалов, невозможно с высокой вероятностью спрогнозировать их пространственную локализацию. Практикуемые в России методы разработаны и внедрены в практику более 30 лет назад и основаны на информации о структуре атмосферы в дни с опасными конвективными явлениями и без них [93]. В середине прошлого столетия для оценки вероятности грозы по характеристикам профиля атмосферы, получаемого в результате аэрологического зондирования, были разработаны индексы неустойчивости атмосферы, характеризующие ее термодинамические параметры [115]. Сегодня для построения моделей и составления прогнозов различных метеорологических явлений используется более 20 параметров состояния атмосферы, рассчитанных на основе аэрологического зондирования атмосферы [107, 108, 117, 110]. Данные параметры характеризуют поля вертикальных конвективных движений, скорости движений, положение уровней конденсации и конвекции, толщину конвективных слоев и связанной с ними облачности, стратификацию температуры и влажности.

Термодинамические характеристики атмосферы с большим успехом используются в численном моделировании конвективных процессов, являющихся необходимым условием возникновения гроз, града и шквала [31, 32]. В Европе разработка метода прогноза развития конвекции осуществляется по средствам статистической интерпретации численных характеристик прогностических полей по мезомасштабным моделям (например, модели MM5 V2 (PUS/NCAR) или WRF) [86]. Применение мезомасштабных негидростатических моделей для прогноза погоды в России находится на стадии адаптации к региональным особенностям.

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРА В РАЙОНЕ КОСМОДРОМА «БАЙКОНУР»

2.1 Характеристики ветра у поверхности земли

Исходным материалом для исследования являлись материалы фактических наблюдений, сведённые в месячные таблицы за 58 лет (с 1956 по 2013 годы включительно). Анализируемые метеорологические наблюдения проводились на площадке № 6 комплекса «Байконур».

В период с 1956 по 1960 годы наблюдения производились по флюгеру с легкой доской, а с 1961 по 2013 годы – по ДМС–Н-53, М–47, М–49, М–63, датчики которых установлены на высоте 10 метров. Для составления таблицы количества дней с максимальным ветром использовались результаты непрерывных наблюдений за ветром с учетом максимальных порывов (из дневника погоды АВ–6).

В Приложении 1, Таблице 1.1 представлена повторяемость различных направлений ветра у поверхности земли по месяцам и в целом за 1956–2013 гг. Получено, что в течение года над территорией космодрома «Байконур» преобладают ветра СВ и В направления.

В Приложении 2, Таблице 2.1 расположены данные о средней абсолютной и средней из максимальных скоростей ветра у поверхности земли по месяцам и в целом за период 1956–2013 гг. Анализ показывает, что наибольшие значения средней абсолютной скорости наблюдаются в марте и апреле и составляют 5,6 м/с и 5,9 м/с соответственно. Средняя максимальная скорость ветра наиболее велика в апреле (19,9 м/с), мае (19,8 м/с) и июне (20,1 м/с).

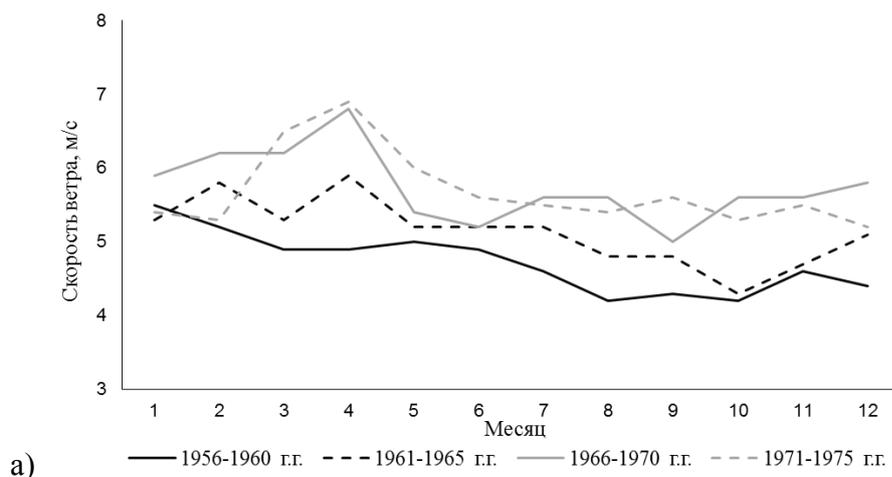
В таблице 1 отражена повторяемость (в %) скорости ветра по градациям по месяцам и в целом за год, за период с 1956 по 2013 гг. Можно сказать, что критичные для пусков РКН скорости приземного ветра (более 15 м/с) встречаются в 0,8 % случаев за год. Весенние месяцы (март, апрель и май) являются самыми неблагоприятными для пусков РКН по наличию скоростей ветра более 15 м/с.

Таблица 1 – Повторяемость (в %) скорости ветра по градациям по месяцам и в целом за год с 1956 по 2013 гг.

| Месяцы | Скорость ветра, м/с | | | | |
|--------|---------------------|-------|--------|---------|----------|
| | 0 – 1 | 2 – 5 | 6 – 10 | 11 – 15 | более 15 |
| I | 7,8 | 55,5 | 29,6 | 6,4 | 0,7 |
| II | 6,6 | 53,3 | 31,8 | 7,2 | 1,1 |
| III | 6,2 | 52,2 | 32,0 | 8,2 | 1,4 |
| IV | 5,7 | 48,2 | 34,0 | 10,3 | 1,8 |
| V | 6,3 | 54,7 | 29,5 | 8,4 | 1,1 |
| VI | 6,7 | 53,5 | 31,2 | 7,9 | 0,7 |
| VII | 7,6 | 56,1 | 28,4 | 7,4 | 0,5 |
| VIII | 6,8 | 60,5 | 26,4 | 6,0 | 0,3 |
| IX | 8,9 | 63,0 | 22,6 | 5,1 | 0,4 |
| X | 8,9 | 62,5 | 23,7 | 4,4 | 0,5 |
| XI | 7,4 | 62,3 | 24,6 | 5,2 | 0,5 |
| XII | 8,0 | 58,8 | 27,6 | 4,9 | 0,7 |
| Год | 7,2 | 56,7 | 28,5 | 6,8 | 0,8 |

В Приложении 3 Таблице 3.1 отражена повторяемость (в %) скорости ветра по румбам, по месяцам и в целом за год с 1956 по 2013 гг. Градации скорости ветра более 15 м/с у поверхности земли в районе космодрома «Байконур» чаще всего встречаются при В, ЮЗ и З направлениях.

За исследуемый период (1956–2013 гг.) наибольшие значения средней скорости ветра характерны для весенних месяцев (5,6 м/с), минимальные значения приходятся на осенне-зимний период (3,6 м/с) (рисунок 2).



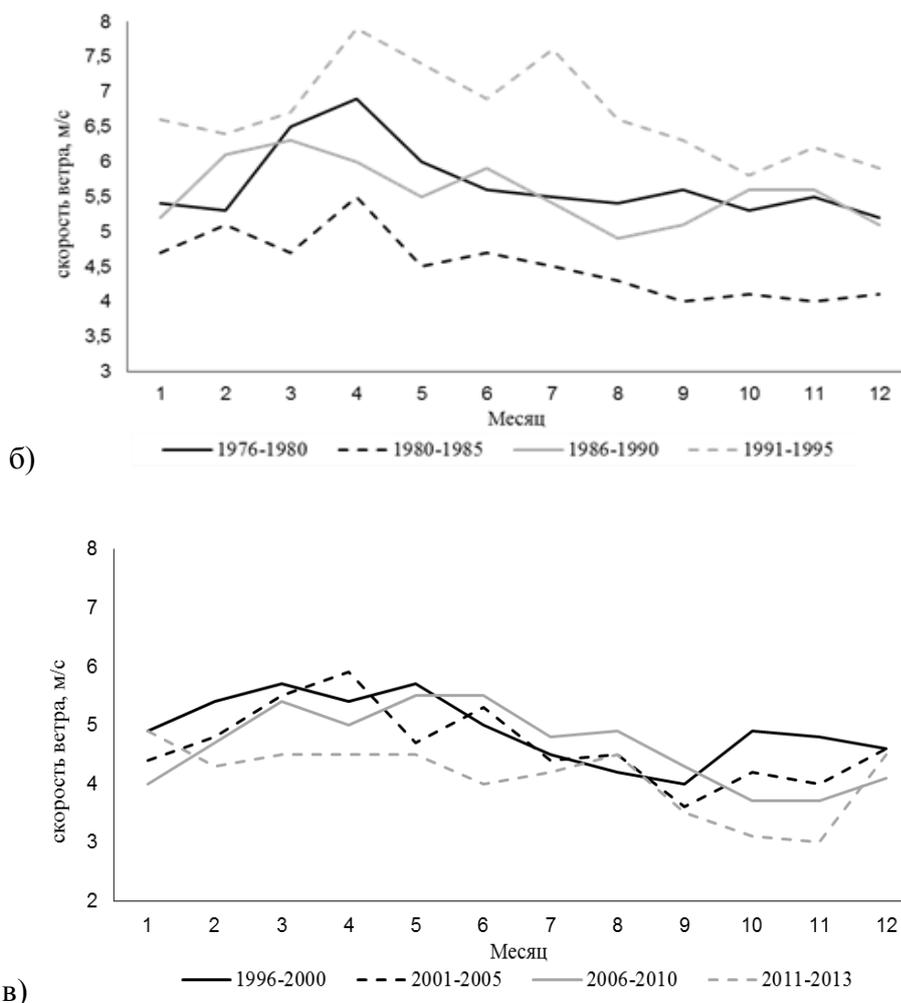
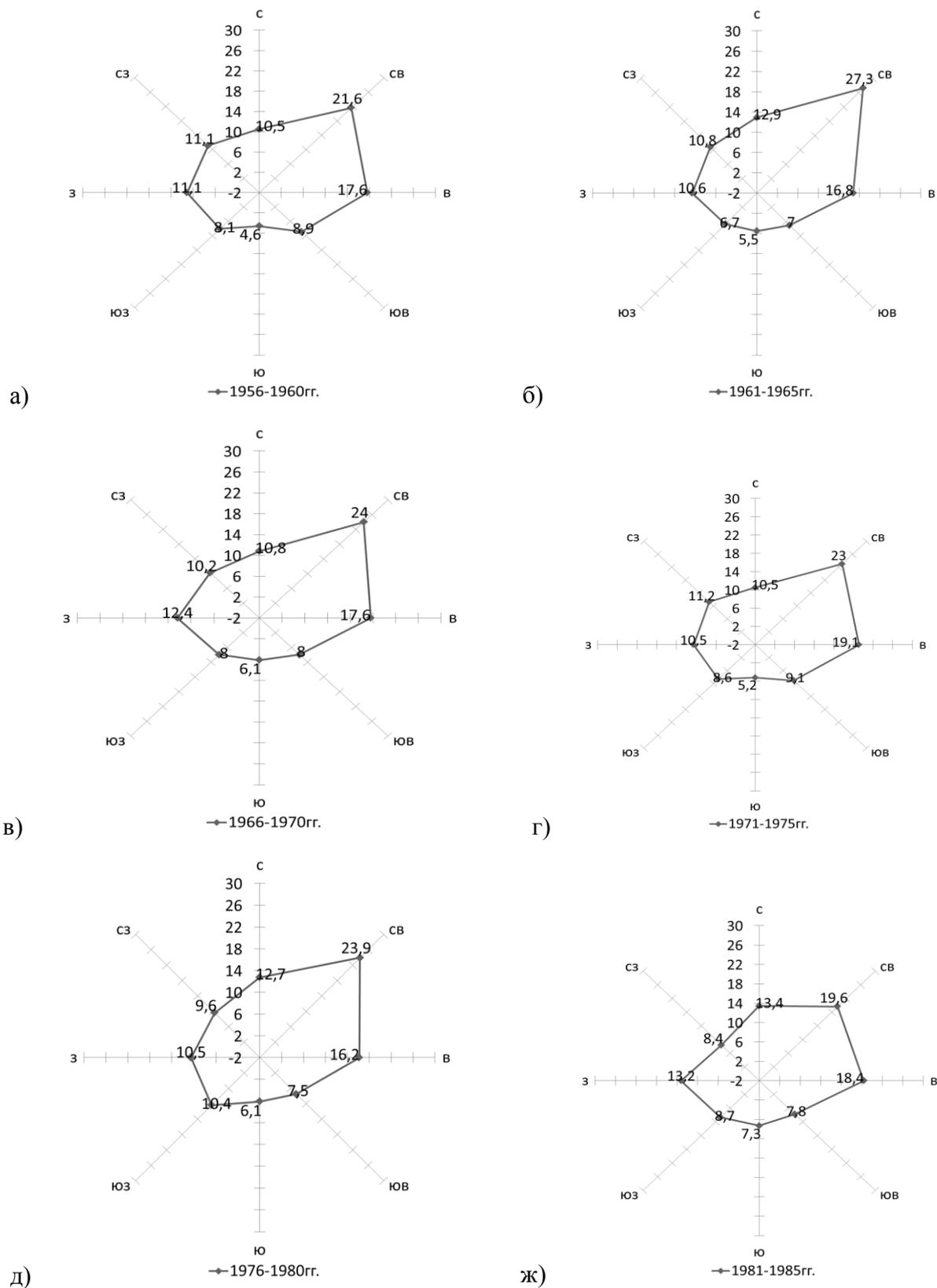


Рисунок 2 – Годовой ход многолетней средней скорости ветра 1956–1975 гг. (а), 1976–1995 гг. (б), 1996–2013 гг. (в)

Пик среднегодового значения скорости ветра приходится на период с 1991 по 1995 гг. и составляет 6,7 м/с. Последующие климатические периоды (1996–2005 гг.) характеризуются отрицательной тенденцией – значения среднегодовой скорости ветра уменьшались с 6,7 до 4,7 м/с. В период 2006–2013 гг. значение средней за год скорости ветра продолжало уменьшаться до 4,1 м/с (рисунок 2). Подтверждается вывод, что над территорией космодрома «Байконур» скорость приземного ветра имеет тенденцию к уменьшению, как и над большей частью территории России [14, 71].

В исследуемый период (рисунок 3) наблюдалась наибольшая повторяемость северо-восточных направлений ветра (22,2 %), как в целом за период, так и в режиме пятилетнего осреднения. С 1986 по 2013 гг. наблюдалась смена

наибольшей повторяемости направления ветра на восточный (21,8 %), за исключением периода 2006–2010 гг. (повторяемость северо-восточных и восточных направлений составила 21,8 и 20,4 % соответственно).



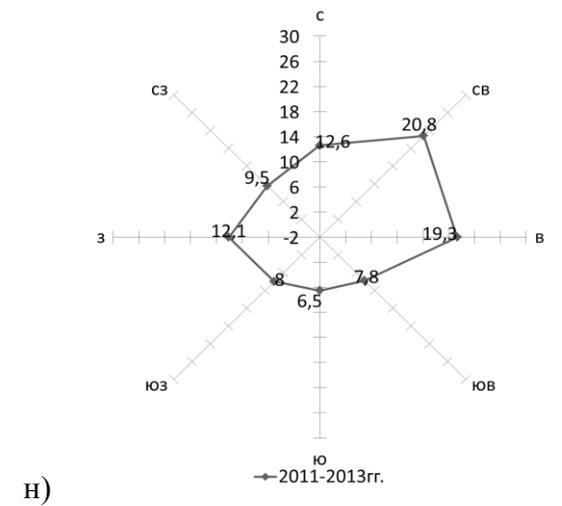
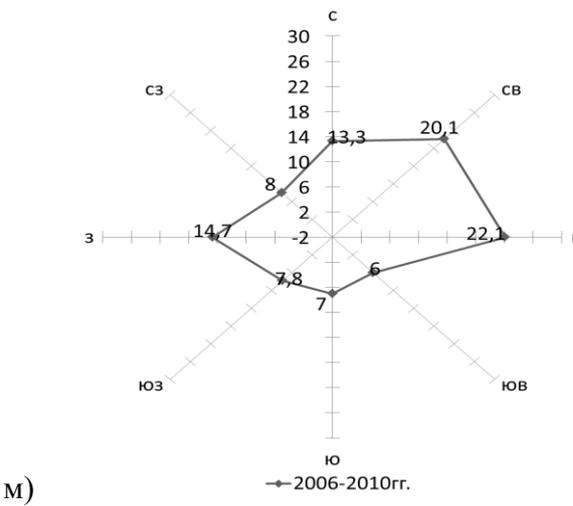
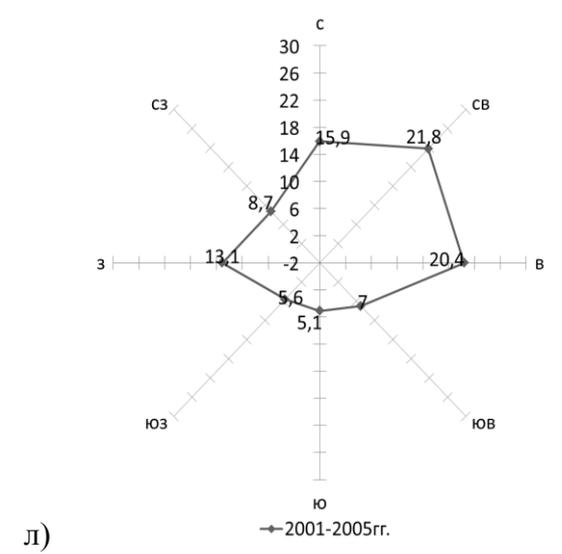
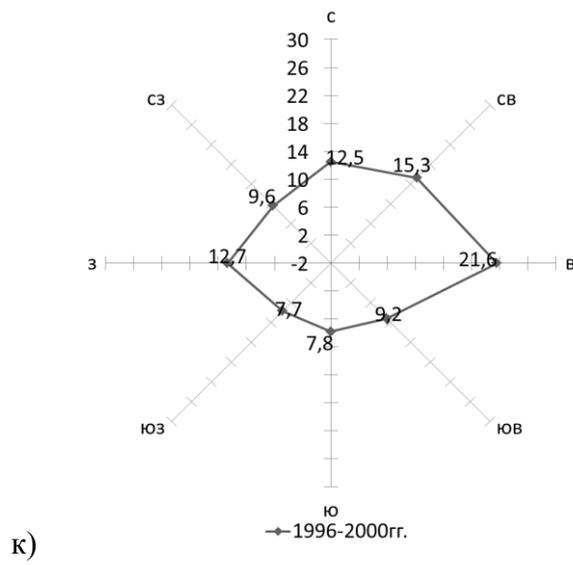
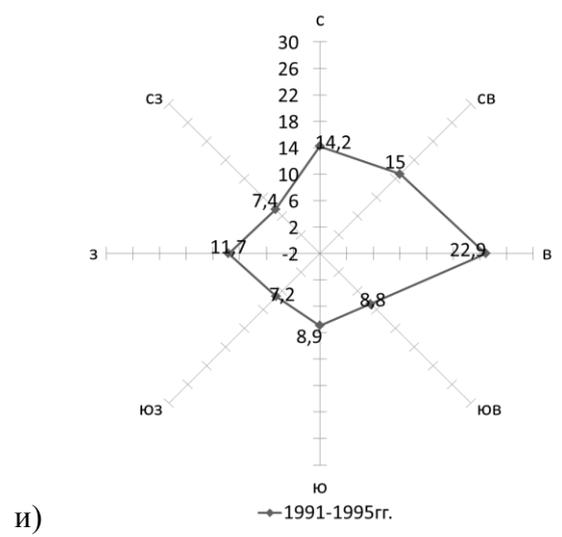
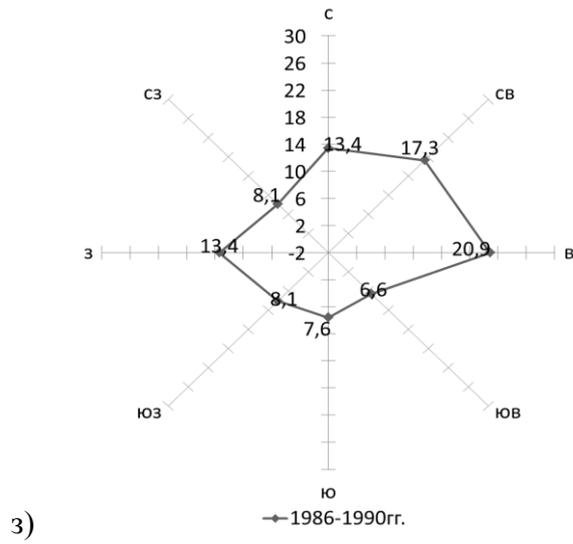


Рисунок 3 – Роза ветров за период 1956–2013 гг. в климатических периодах по 5 лет (а, б, в, г, д, ж, з, и, к, л, м, н)

Преобладание северо-восточного и восточного направлений ветра связано с преобладанием в районе космодрома «Байконур» юго-западной периферии антициклона. Наименьшая повторяемость направлений, в основном, приходится на южные ветра (5,9 %) (рисунок 3).

Таким образом, получено:

1. В течение года над территорией космодрома «Байконур» у поверхности земли преобладают ветра СВ и В направлений.
2. Наибольшие значения средней скорости ветра наблюдаются в марте и апреле, средней максимальной в апреле, мае и июне.
3. Критичные для пусков РКН скорости приземного ветра (более 15 м/с) встречаются в 0,8 % случаев за год (максимальный % наблюдается в марте, апреле и мае).
4. Градация скорости ветра более 15 м/с чаще всего встречаются при В, ЮЗ и З направлениях ветра.
5. Над территорией космодрома «Байконур» скорость приземного ветра имеет тенденцию к уменьшению.

2.2 Характеристики ветра в свободной атмосфере

Климатические характеристики ветра в свободной атмосфере над территорией космодрома «Байконур» определены за период 1985–2014 гг. Полученные результаты важны при планировании работ связанных с подготовкой к пускам РКН.

Ветровой режим региона определяется не только макромасштабной циркуляцией атмосферы, но и его орографией и мезоклиматическими особенностями, вносящими коррективы в процессы переноса воздушных масс. Основными характеристиками ветра являются его направление, скорость, порывистость, повторяемость сильных ветров [67]. При планировании пусков ракет космического назначения знание климатических характеристик ветра

необходимо не только в районе космодрома, но и по траекториям полетов, и в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей [48, 49, 51].

Ветровой режим над территорией космодрома «Байконур» изучался за период, предшествующий наблюдаемому изменению климата [66, 67, 96, 97, 98] и мог несколько измениться в последние десятилетия в связи с изменчивостью циркуляционных процессов, определяющих основные [19, 57] элементы климата. Кроме того, климатические характеристики ветра для изучаемой территории исследовались для других целей и потому в несколько в других аспектах. Согласно данным научно-прикладного справочника по климату 1989 года, скорости ветра, превышающие значение 30 м/с, у земли над территорией старта РКН встречаются не чаще одного раза в десять лет [74]. Для выявления особенностей изменения параметров ветра в свободной атмосфере в районе космодрома «Байконур» проведен анализ параметров ветра на различных высотах от поверхности земли до высоты 25 км по данным зондирования атмосферы с аэрологической станции Байконур.

На рисунках 4–7 представлены вертикальные профили средней и максимальной скоростей ветра в различные месяцы. Выявлены следующие особенности распределения характеристик ветра с высотой:

- наибольшие средние и максимальные скорости зафиксированы на высотах от 8 до 12 км;

- средняя высота слоя с наибольшими средними и максимальными скоростями ветра постепенно увеличивается от зимы (8–10 км) к лету (13–15 км) и вновь уменьшается к зиме, в соответствии с высотой тропопаузы. При этом толщина таких слоев может достигать более 10 км в любое время года, кроме зимы, когда она редко достигает толщины даже в 5 км. Наличие столь мощных слоев со скоростями ветра больше критических замечено весной в марте и апреле (рисунок 5 б), летом в июне и июле (рисунок 6 б) и осенью в октябре и ноябре (рисунок 7 б);

- максимальные скорости в течение всего года наблюдались на высоте 11 км и только в летний период на высотах 12–13 км (рисунок 6 б);

– наибольшие значения средней скорости ветра в июле и в августе достигали 30 м/с и были приурочены к высотам 12–13 км (рисунок 6 а);

– для космодрома характерно наличие двух максимумов в ходе средней максимальной скорости ветра, основного в июле и вторичного в январе. Основной летний максимум обусловлен смещением в эти широты субтропического струйного течения (субтропическое струйное течение может смещаться до широты 45–50°). Второй максимум обусловлен общим усилением активности циркуляции в холодную часть года [96];

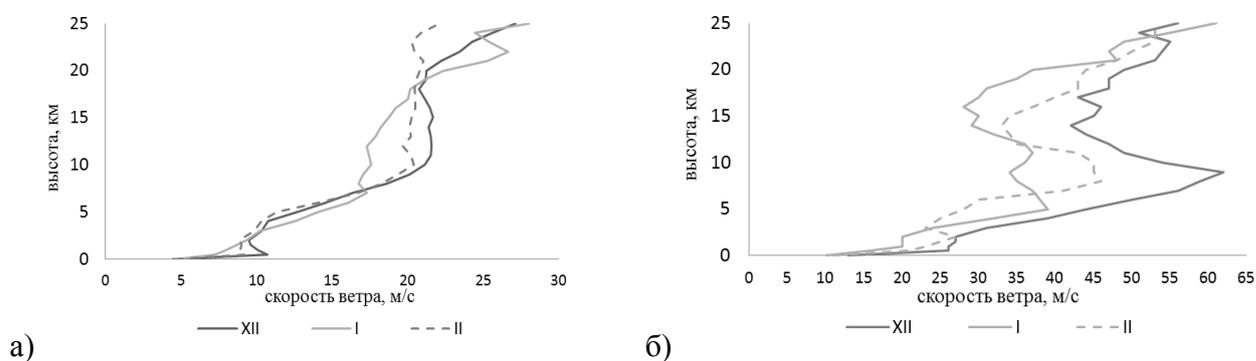


Рисунок 4 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в зимний сезон

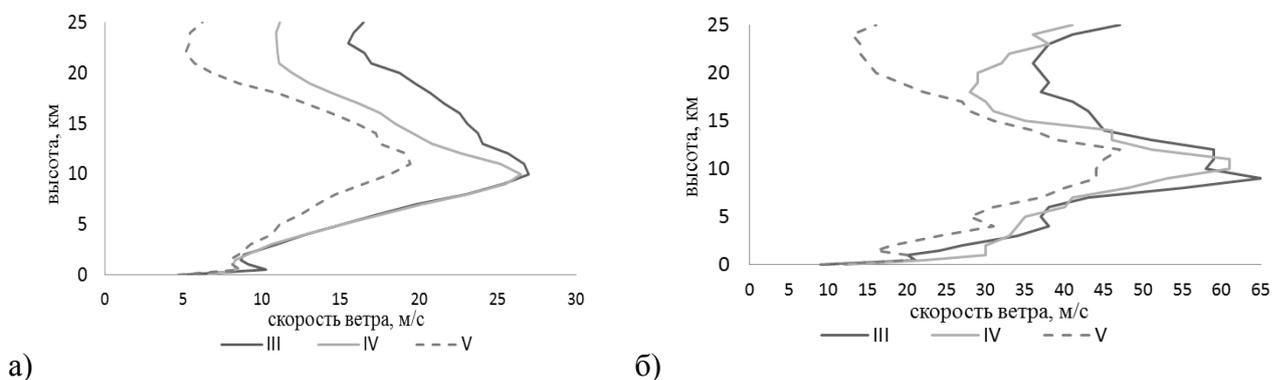


Рисунок 5 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в весенний сезон

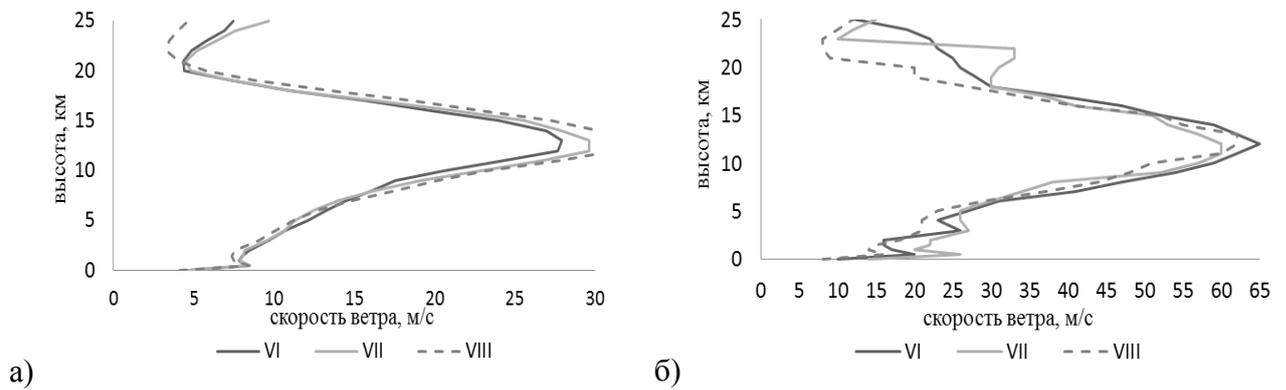


Рисунок 6 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в летний сезон

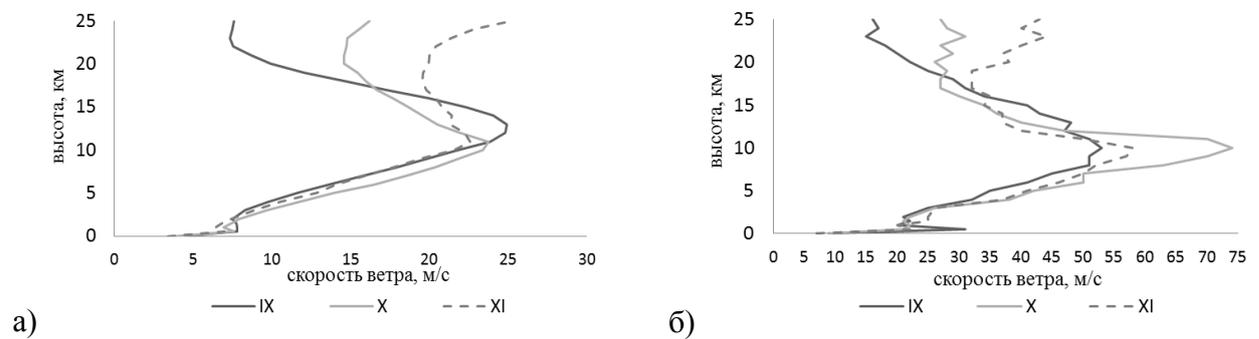


Рисунок 7 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в осенний сезон

– наименьшие значения как средней, так и максимальной скоростей ветра регистрировались в приземном слое атмосферы во все сезоны года.

В таблице 2 подробнее представлена повторяемость скоростей ветра по градациям (%) в пределах тех высот, где были замечены наибольшие средние и максимальные скорости ветра (высоты 8–12 км).

Таблица 2 – Повторяемость значений скорости ветра по градациям (%)

| Высота км | Градации скорости м/с | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 |
| | XII | | | | I | | | | II | | | |
| 8 | 17,0 | 5,0 | 3,0 | – | 13,0 | – | – | – | 13,0 | 1,0 | – | – |
| 9 | 10,0 | 9,0 | 3,0 | 1,0 | 20,0 | – | – | – | 15,0 | 4,0 | – | – |
| 10 | 12,0 | 11,0 | 3,0 | – | 13,0 | – | – | – | 20,0 | 4,0 | – | – |

| Высота км | Градации скорости м/с | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 |
| | XII | | | | I | | | | II | | | |
| 11 | 16,0 | 13,0 | – | – | 4,0 | – | – | – | 14,0 | 3,0 | – | – |
| 12 | 18,0 | 9,0 | – | – | 7,0 | – | – | – | 11,0 | – | – | – |
| | III | | | | IV | | | | V | | | |
| 8 | 18,0 | 9,0 | 5,0 | – | 21,0 | 1,0 | – | – | 7,0 | 2,0 | – | – |
| 9 | 16,0 | 13,0 | 1,0 | 4,0 | 23,0 | 6,0 | 2,0 | – | 6,0 | 4,0 | – | – |
| 10 | 20,0 | 13,0 | 6,0 | – | 30,0 | 9,0 | 3,0 | 1,0 | 8,0 | 6,0 | – | – |
| 11 | 30,0 | 9,0 | 5,0 | – | 26,0 | 7,0 | 4,0 | 1,0 | 7,0 | 8,0 | – | – |
| 12 | 21,0 | 5,0 | 3,0 | – | 22,0 | 6,0 | 2,0 | – | 7,0 | 6,0 | – | – |
| | VI | | | | VII | | | | VIII | | | |
| 8 | 4,0 | 2,0 | – | – | 5,0 | – | – | – | 4,0 | 4,0 | – | – |
| 9 | 6,0 | – | 2,0 | – | 9,0 | 2,0 | 3,0 | – | 13,0 | 5,0 | – | – |
| 10 | 10,0 | 2,0 | 2,0 | – | 16,0 | 5,0 | 5,0 | – | 14,0 | 12,0 | 3,0 | – |
| 11 | 17,0 | 5,0 | 1,0 | 2,0 | 13,0 | 14,0 | 6,0 | 1,0 | 20,0 | 11,0 | 11,0 | 1,0 |
| 12 | 26,0 | 6,0 | 4,0 | 2,0 | 17,0 | 12,0 | 9,0 | 1,0 | 17,0 | 9,0 | 10,0 | 5,0 |
| | IX | | | | X | | | | XI | | | |
| 8 | 4,0 | 3,0 | 1,0 | – | 10,0 | 2, | 2,0 | 2,0 | 5,0 | 6,0 | 1,0 | – |
| 9 | 11,0 | 2,0 | 2,0 | – | 10,0 | 3,0 | 2,0 | 1,0 | 9,0 | 7,0 | 2,0 | – |
| 10 | 15,0 | 3,0 | 2,0 | – | 12,0 | 5,0 | 2,0 | 1,0 | 22,0 | 3,0 | 2,0 | – |
| 11 | 16,0 | 7,0 | 2,0 | – | 16,0 | 2,0 | 3,0 | 1,0 | 16,0 | 9,0 | 2,0 | 2,0 |
| 12 | 20,0 | 9,0 | – | – | 18,0 | 6,0 | – | – | 18,0 | 1,0 | – | 2,0 |

Можно отметить, что только в январе максимальная скорость ветра не превышает 40 м/с, а в феврале и мае меньше 50 м/с. Во все остальные месяцы года максимальные значения скорости ветра могут достигать порога 69 м/с. Март и апрель можно отнести к месяцам с высокой повторяемостью максимальных скоростей (33–36 %) (таблица 2).

В таблице 3 представлены средние значения скорости ветра и ее изменчивость (среднее квадратическое отклонение – σ) в слоях, где отмечались значения скорости ветра больше критических. Значения σ велики, что говорит о том, что значения внутри анализируемых рядов сильно расходятся по величине со средним значением. Выделить месяцы с относительно устойчивыми значениями исследуемой характеристики практически невозможно.

Таблица 3 – Характеристики скорости ветра (м/с) на высотах, где наблюдаются наибольшие значения скорости ветра

| Месяцы | Средняя месячная скорость ветра/σ | | | | |
|--------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 8 км | 9 км | 10 км | 11км | 12 км |
| I | 17/11 | 17/11 | 18/10 | 17/7 | 17/6 |
| II | 18/10 | 19/10 | 20/11 | 20/9 | 20/7 |
| III | 21/13 | 22/15 | 23/14 | 23/12 | 23/11 |
| IV | 23/10 | 26/12 | 26/12 | 25/13 | 25/11 |
| V | 15/9 | 16/10 | 18/11 | 19/11 | 19/11 |
| VI | 16/8 | 18/9 | 21/11 | 24/12 | 27/13 |
| VII | 16/8 | 19/11 | 23/13 | 27/14 | 30/13 |
| VIII | 17/10 | 20/11 | 23/13 | 28/15 | 30/16 |
| IX | 18/10 | 20/11 | 22/11 | 24/11 | 25/11 |
| X | 20/11 | 22/12 | 23/12 | 24/12 | 22/10 |
| XI | 18/11 | 20/12 | 22/12 | 23/11 | 22/9 |
| XII | 19/13 | 20/13 | 21/13 | 22/12 | 22/11 |

Сравнивая среднюю скорость ветра в слое 8–12 км со скоростью, представленной в аэрологическом справочнике [4], который содержит информацию за период 1957–1976 гг., можно сказать, что средняя скорость ветра в слое 8–12 км над территорией космодрома «Байконур» увеличивается на 0,2 м/с/10 лет (выше точности ошибки измерения скорости ветра [85]). Это подтверждает вывод об увеличении скорости ветра в верхней тропосфере для исследуемой территории, как и для европейско-азиатского севера России [71].

Выделим преобладающее направление ветра в слоях с максимальными скоростями ветра (8–12 км) для каждого из сезонов года (таблица 4):

– В зимний, весенний и осенний периоды преобладает ЮЗ ветер (53–60 %), СЗ направление составляет около 30 %.

– В летний период на высоте 9 км преобладает ЮЗ ветер (44,7 %), на высотах 8, 10, 11 и 12 км преобладает СЗ направление ветра (47,5 %).

Таким образом, летом увеличивается вероятность наличия сдвигов ветра по направлению. В целом замечено, что опасные скорости ветра формируются в половине всех случаев на фоне юго-западного переноса, а треть случаев приходится на северо-западный перенос.

Таблица 4 – Повторяемость направлений ветра (%) в слоях с максимальной скоростью ветра

| Высота (км) | Зимний период | | | | | | | |
|-----------------|---------------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 8 | 0,4 | 5,9 | 0,0 | 9,0 | 0,0 | 54,3 | 1,7 | 28,7 |
| 9 | 0,0 | 5,8 | 0,2 | 5,8 | 1,4 | 58,5 | 0,6 | 27,7 |
| 10 | 0,6 | 5,2 | 0,0 | 3,6 | 0,0 | 59,6 | 0,4 | 30,6 |
| 11 | 0,2 | 5,2 | 0,0 | 1,8 | 0,0 | 61,0 | 2,2 | 29,6 |
| 12 | 0,0 | 2,3 | 0,0 | 3,1 | 0,0 | 62,5 | 1,2 | 30,9 |
| Весенний период | | | | | | | | |
| 8 | 0,0 | 10,4 | 1,1 | 6,1 | 0,0 | 53,9 | 1,0 | 27,5 |
| 9 | 0,0 | 9,3 | 0,7 | 3,8 | 0,3 | 54,9 | 0,5 | 30,5 |
| 10 | 0,0 | 9,1 | 0,0 | 4,4 | 0,0 | 55,7 | 2,6 | 28,2 |
| 11 | 0,0 | 9,1 | 0,0 | 2,2 | 0,0 | 59,2 | 1,2 | 28,3 |
| 12 | 0,0 | 8,1 | 0,0 | 1,8 | 0,0 | 60,8 | 0,8 | 28,5 |
| Летний период | | | | | | | | |
| 8 | 0,0 | 9,2 | 0,0 | 0,7 | 0,0 | 40,9 | 1,2 | 48,0 |
| 9 | 0,4 | 9,2 | 0,0 | 1,6 | 0,0 | 44,7 | 1,9 | 42,2 |
| 10 | 0,0 | 5,4 | 0,0 | 0,8 | 0,0 | 43,9 | 1,5 | 48,4 |
| 11 | 0,0 | 3,4 | 0,0 | 0,4 | 0,0 | 44,8 | 2,5 | 48,9 |
| 12 | 0,0 | 3,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 44,9 | 1,4 | 50,2 |
| Осенний период | | | | | | | | |
| 8 | 0,6 | 8,3 | 0,0 | 3,3 | 0,0 | 53,2 | 0,6 | 34,0 |
| 9 | 0,3 | 9,1 | 0,0 | 2,8 | 0,0 | 52,1 | 0,9 | 34,8 |
| 10 | 1,1 | 6,6 | 0,0 | 3,2 | 0,0 | 51,8 | 1,5 | 35,8 |
| 11 | 0,3 | 6,3 | 0,0 | 2,4 | 0,0 | 53,7 | 0,9 | 36,4 |
| 12 | 0,0 | 5,5 | 0,0 | 2,1 | 0,0 | 54,4 | 1,8 | 36,2 |

Получены следующие характеристики ветра в свободной атмосфере над территорией космодрома «Байконур»:

1. Над территорией космодрома «Байконур» наблюдается увеличение скорости ветра в верхней тропосфере на 0,24 м/с/10 лет. Следовательно, обнаруженная в [82] тенденция изменения скорости ветра прослеживается не только от 60 ° с. ш и до побережья Северного Ледовитого Океана, но и от 45 ° с. ш.

2. Наибольшие средние и максимальные скорости зафиксированы на высотах от 8 до 12 км.

3. Максимальные скорости в течение всего года наблюдаются на высоте 11 км, и только летний период – на высотах 12–13 км.

4. Месяцы с высокой повторяемостью максимальных скоростей (33–36 %): март и апрель.

5. Месяцы, рекомендуемые для пусков ракет космического назначения (только с учетом профиля скорости ветра): февраль и май.

2.3 Тропопауза

Тропопауза является переходным слоем в атмосфере, своеобразной границей раздела между тропосферой и стратосферой. Изучение положения высоты тропопаузы имеет множество научных и прикладных аспектов, поскольку является и следствием и причиной развития ряда атмосферных процессов. Тропопауза является основным задерживающим слоем, под которым скапливаются аэрозоли и водяной пар, способствующие образованию облаков верхнего яруса, однако она ограничивает рост облаков по вертикали. Активно изучается роль тропопаузы в процессе обмена стратосферы и тропосферы озоном и общим содержанием озона в зависимости от высоты тропопаузы [40, 63]. Вблизи тропопаузы располагается уровень максимальной скорости ветра, а внутри формируются большие вертикальные сдвиги ветра, которые приводят к болтанке самолетов. В слое тропопаузы, как правило, регистрируется минимальная температура воздуха. Известно, что разгон сверхзвукового самолета и переход к сверхзвуковому режиму полета, наиболее экономично производить при низкой температуре воздуха. Поэтому, преодолевать звуковой барьер, рекомендуется в слое тропопаузы [61].

Широкий спектр научных работ связан не только с изучением свойств и особенностей тропопаузы, но и с изучением признаков, по которым она может быть идентифицирована [55, 99] и с обнаружением факторов, провоцирующих изменения ее параметров [113]. Тем не менее, поведение тропопаузы над территорией Российской Федерации, ее структура, изменчивость, особенности распределения требуют более детального изучения. При оценке потенциального влияния характеристик ветра на пуск РКН специалисты метеорологической

службы космодрома уделяют особое внимание такой составляющей, как максимальный ветер [48, 49]. В связи с тенденциями, обнаруживаемыми в изменении климата, исследования положения высоты нижней границы тропопаузы и максимального ветра в районе космодромов является актуальной задачей.

За последние двадцать лет изменились климатические характеристики тропопаузы и продолжают изменяться, о чём свидетельствуют различные научные исследования, в том числе выполненные на основе результатов аэрологического зондирования атмосферы. Например, по результатам современных исследований высоты тропопаузы российскими [61] и зарубежными учеными обнаружены положительные многолетние тренды изменения высоты тропопаузы со скоростью 60 ± 20 м/10 лет.

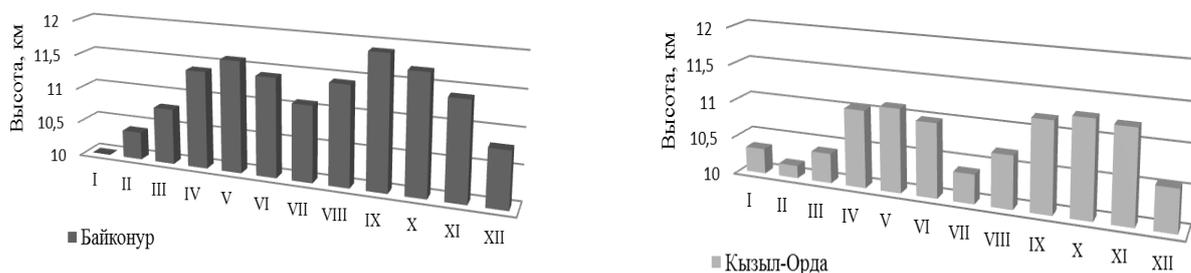
Как правило, положение термической тропопаузы определяется по данным профилей температуры воздуха, измеряемым при аэрологическом зондировании, проводимых на сети Российской Федерации дважды в сутки – в 00 и 12 часов ВСВ (Всемирного скоординированного времени). Однако при планировании и осуществлении пусков РКН, аэрологическое зондирование над территориями космодромов осуществляется по специальной программе, включающей зондирование за 7 часов, за 5 часов и за 2 часа до пуска.

Средняя высота зондирования составляет 20-25 км, иногда достигая высоты 30км. В процессе обработки результатов зондирования осуществляется проверка соответствия данных на уровне тропопаузы критерию ВМО, согласно которому тропопауза и её характер определяются по значениям и изменению вертикального градиента температуры. Таким образом, была накоплена база аэрологических данных за продолжительный период (1985–2014 гг.), позволяющая уточнить климатические характеристики тропопаузы над космодромом «Байконур».

Научные работы, связанные с изучением свойств и особенностей тропопаузы и максимального ветра над территорией Казахстана проводились Масловой Т.В. и Чередниченко В.С. [96, 97, 98]. Исследования были выполнены по материалам температурно-ветрового зондирования на сети аэрологических

станций Казахстана в 1970–1980 годы. Поэтому, поведение тропопаузы над территорией космодрома «Байконур», их структура, изменчивость, особенности распределения требуют более детального изучения.

На рисунке 8 представлены средние значения высоты полярной тропопаузы по месяцам и в целом за год. Полученный нами результат говорит о повышении высоты полярной тропопаузы за последние десятилетия в среднем на 370 м.



а)

б)

Рисунок 8 – Годовой ход высоты полярной тропопаузы в районе космодрома «Байконур» (а) и станции Кызыл-Орда (б)

Для более детального рассмотрения нижней границы полярной тропопаузы в районе космодрома «Байконур», приведена таблица 5, где представлена повторяемость различных значений высоты. Так зимой в 38 % случаев высота нижней границы полярной тропопаузы фиксируется на высоте 10 км, весной в 38 % случаев на высоте 11 км, летом и осенью на высоте 12 км фиксируется 31 % и 40 % случаев соответственно.

Таблица 5 – Повторяемость (%) различных значений высоты нижней границы полярной тропопаузы по месяцам в районе космодрома «Байконур»

| Высота (км) | Месяцы | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|----|-----|----|---|----|-----|------|----|----|----|-----|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| 8 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | - |
| 9 | 27 | 13 | 6 | 5 | 2 | - | - | 2 | 4 | 13 | 4 | 9 |
| 10 | 49 | 36 | 25 | 16 | 7 | 10 | 15 | 2 | 8 | 27 | 10 | 30 |

| Высота (км) | Месяцы | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|----|-----|----|----|----|-----|------|----|----|----|-----|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| 11 | 9 | 41 | 47 | 32 | 36 | 24 | 17 | 24 | 20 | 45 | 35 | 34 |
| 12 | 13,5 | 7 | 22 | 37 | 42 | 38 | 17 | 37 | 46 | - | 40 | 26 |
| 13 | - | 3 | - | 6 | 11 | 8 | 2 | 9 | 6 | 11 | 6 | - |
| 14 | - | - | - | 2 | 2 | - | 8 | 3 | 2 | 2 | 3 | - |

Особый интерес представляют собой случаи множественной тропопаузы. Известно, что максимум повторяемости множественной тропопаузы приходится на широты 40-60°. В этих широтах чаще, чем над другими прослеживается «разрыв тропопаузы» – расположение двух слоёв тропопаузы один над другим (соответственно тропической тропопаузы над полярной тропопаузой). При обработке данных аэрологического зондирования применен метод разделения тропопаузы на полярную и тропическую по высоте ее нижней границы [102]. Границей, разделяющей полярную и тропическую тропопаузы, нами была принята высота 14 км. Все случаи с высотой нижней границы тропопаузы до 14 км относились к полярной тропопаузе, 14 км и выше – к тропической.

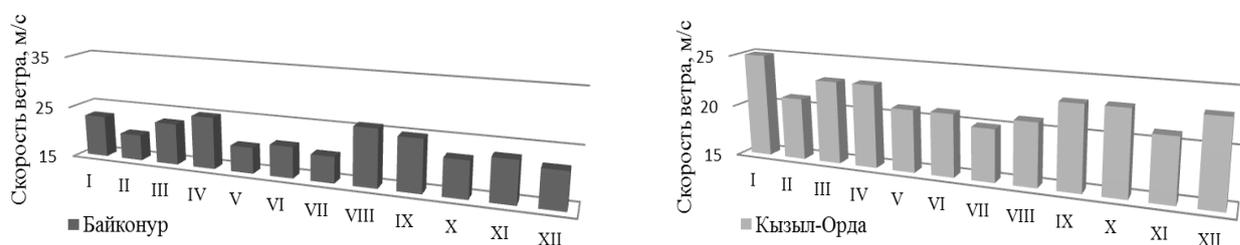
В таблице 6 представлена повторяемость различных значений высоты тропической тропопаузы. Можно сказать, что над территорией наших исследований тропопаузы чаще всего наблюдается в июне, июле, августе и сентябре месяцах.

Таблица 6 – Повторяемость (%) различных значений высоты нижней границы тропической тропопаузы по месяцам в районе космодрома «Байконур»

| Высота (км) | Месяцы | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|----|-----|----|---|----|-----|------|----|---|----|-----|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| 15 | - | - | - | 2 | - | - | 4 | 5 | 4 | - | - | 1 |
| 16 | - | - | - | - | - | - | 17 | 5 | 6 | 2 | - | - |
| 17 | - | - | - | - | - | 15 | 5 | 13 | 4 | - | - | - |
| 18 | - | - | - | - | - | 5 | 15 | - | - | - | - | - |

Изучению многолетней изменчивости параметров тропопаузы посвящен широкий спектр научных работ, как в России, так и за рубежом. Так одна из последних работ [61] посвящена изучению тропопаузы на территории России. Исследование проводилось для 92 рядов аэрологических данных со станций расположенных в различных частях территории РФ за период 1978–2007 гг. Авторы пришли к выводу, что наблюдается некоторый подъем высоты полярной тропопаузы, что подтверждается и нашими исследованиями.

Сравним скорости ветра на нижней границе полярной тропопаузы (рис. 2) по результатам работы [96] и результатам настоящих исследований.



а)

б)

Рисунок 9 – Годовой ход скорости ветра полярной тропопаузы в районе космодрома «Байконур» (а) и станции Кызыл-Орда (б)

Средняя скорость ветра на нижней границе тропопаузы (в слое от 10 до 14 км) за последние десятилетия в среднем возросла на 1,42 м/с, что подтверждает положительный коэффициент многолетнего тренда скорости ветра в среднем 0,25 м/с/10 лет над территорией космодрома «Байконур» по данным реанализа (Глава 4). Средняя мощность слоя полярной тропопаузы по данным [96] в среднем за год составляет 1,61 км (зимой 1,44 км; весной 1,36 км; летом 3,36 км; осенью 1,28 км). Так как данные настоящего исследования не позволяют использовать такой шаг, для рассмотрения изменения скорости ветра, округлим среднюю мощность слоя полярной тропопаузы до 2 км, и посмотрим, как изменяется средняя скорость ветра на 2 км выше и 2 км ниже от средней высоты полярной тропопаузы в районе космодрома «Байконур» (рисунок 10).

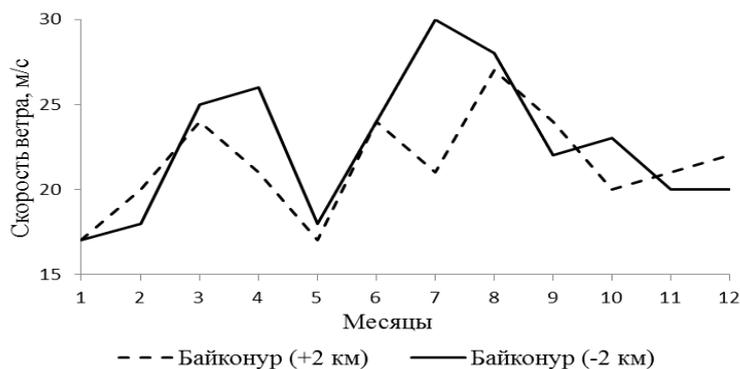


Рисунок 10 – Годовой ход скорости ветра в слое на 2 км выше и на 2 км ниже полярной тропопаузы в районе космодрома «Байконур»

В общем можно сказать, что в весенний и летний периоды скорость ветра выше (в слое находящимся на 2 км ниже уровня полярной тропопаузы), в осенний и зимний период наблюдается противоположная картина.

В результате проведенных исследований высоты и скорости полярной тропопаузы выявлено:

1. Над территорией космодрома «Байконур» замечено увеличение уровня полярной тропопаузы на 330 м за последние десятилетия.

2. Средняя скорость ветра на нижней границе полярной тропопаузы (в слое от 10 до 14 км) за последние десятилетия в среднем увеличилась на 1,4 м/с.

В дальнейшем возможно более подробное исследование термической структуры тропосферы и ее соотношение с характеристиками ветра. Особый интерес представляет соотношение высоты тропопаузы разных типов. Достойны подробного изучения случаи разрыва тропопаузы, поскольку в этих районах формируются струйные течения, и осуществляется интенсивный обмен между тропосферой и стратосферой.

2.4 Характеристики сдвига ветра

2.4.1 Понятие о сдвиге ветра. Условия образования сдвига ветра

Сдвиг ветра – изменение ветра по направлению и/или по числовой величине скорости, от одного слоя атмосферы к другому, либо в горизонтальном направлении [73]. В зависимости от расположения в пространстве двух точек, между которыми определяется сдвиг ветра, различают:

– вертикальный сдвиг ветра, описывающий изменение горизонтального движения воздуха (ветра) по вертикали (например, по данным датчиков ветра, установленных на разных высотах на мачте, башне и т.п., шаропилотным данными т.п.);

– горизонтальный сдвиг ветра – изменение движения воздуха по горизонтали [88].

С точки зрения синоптической ситуации наиболее благоприятными для усиления сдвига ветра в слое инверсии являются условия ночной приземной радиационной инверсии температуры при безоблачном (или малооблачном) небе на периферии антициклона (или циклона) при наблюдающемся в течение ночи увеличении горизонтального барического градиента в связи с приближением ложбины или фронта, особенно при адвекции тепла на верхней границе пограничного слоя атмосферы. В таких условиях во второй половине ночи могут сформироваться очень резкие вертикальные профили ветра в инверсионном слое и наиболее сильные вертикальные сдвиги ветра обычно наблюдаются в верхнем слое инверсии (выше 50–60 м от земной поверхности). Если усиление ветра (на высоте и у земной поверхности) наблюдается вечером (до захода солнца), то вследствие сильной турбулентности не происходит инверсии температуры, и в этом случае резких вертикальных сдвигов ветра не возникает [88].

При одинаковых метеорологических условиях сдвиги ветра всегда несколько больше в условиях пересеченной местности, чем над равниной. С увеличением скорости ветра влияние рельефа возрастает. При обтекании препятствия воздушным потоком, имеющим значительную скорость, на наветренной стороне (перед препятствием) формируется восходящий поток, увеличиваются горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра и турбулентность. Над вершиной скорость и сдвиги ветра еще более возрастают, а на подветренной

стороне (за препятствием) воздушный поток испытывает наибольшую деформацию – здесь встречаются самые сильные сдвиги ветра и турбулентность, причем размеры (протяженность по горизонтали) возмущенной зоны могут во много раз превышать протяженность самого препятствия [88].

Российскими учеными [104, 105] были проведены исследования сдвига скорости ветра по данным содарных измерений в атмосферном пограничном слое при устойчивой стратификации в районе города Москвы. В результате было выявлено, что наклоны линейного участка профилей скорости ветра в АПС при устойчивой стратификации лежат в достаточно узком диапазоне значений. Приближенное постоянство сдвига скорости ветра выше слоя постоянных потоков можно объяснить его независимостью от значений турбулентных потоков в приземном слое. Установлено, что выраженный линейный профиль скорости ветра образуется в АПС при большом положительном вертикальном градиенте температуры ($>1^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$).

Таким образом, наиболее сильные сдвиги ветра наблюдаются при инверсиях температуры, в условиях пересеченной местности, а также при движении грозных очагов.

2.4.2 Методы расчета сдвига ветра

Сдвиг ветра определяется как векторная разность векторов ветра, измеренная в двух точках пространства, которая отражает изменения как скорости, так и направления ветра при перемещении от одной точки к другой. В зависимости от расположения рассматриваемых точек в пространстве различают или горизонтальный, или вертикальный сдвиг ветра.

Вертикальный сдвиг ветра характеризует изменение вектора ветра с высотой. Для определения сдвига ветра необходимо знать разности векторов ветра на верхнем и нижнем уровне, а также толщину рассматриваемого слоя.

Следовательно, единицей измерения вертикального сдвига ветра является с^{-1} , однако для практических целей метеорологического обеспечения полетов

значения сдвигов ветра рассчитывают для слоя толщиной 30 м и указывают в м/с на 30 м. Иногда сдвиг ветра определяют в слое толщиной 100 м, а в международной документации и в зарубежной литературе встречаются и другие единицы измерения сдвига ветра – узлы, фут/с, мили/ч [7]. В данной работе сдвиг ветра был определен в 300-метровом слое.

Так как вертикальный сдвиг ветра опаснее горизонтального, работа посвящена расчету и выявлению особенностей вертикальных сдвигов ветра.

Сдвиг ветра рассчитывался по формуле 2:

$$\beta = \frac{\Delta V}{\Delta Z} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_1^2 - 2V_1V_2 \cos \alpha}}{\Delta Z} \quad (2)$$

где V_1 – скорость ветра в нижней точке (м/с); V_2 – скорость ветра в верхней точке (м/с); α – угол между верхней и нижней точками; Δz – расстояние между рассматриваемыми точками (м).

Для оценки интенсивности сдвига ветра использовался метод В. Г. Глазунова (рисунок 11).

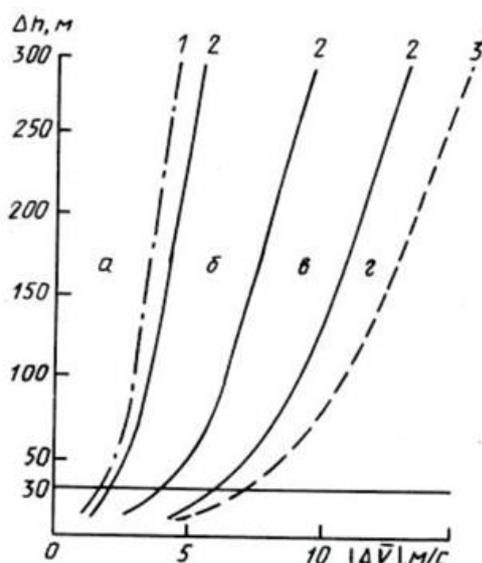


Рисунок 11 – Зависимость вертикального сдвига ветра V от толщины слоя (h) по данным высотной метеорологической мачты в г. Обнинске (по В.Г. Глазунову) [13]

Согласно рисунку 11: 1 – средняя векторная разность скоростей ветра при различной толщине слоя; 2 – векторная разность скоростей ветра, соответствующая граничным значениям зон слабого (а), умеренного (б), сильного (в) и очень сильного (г) сдвигов ветра для различной толщины слоя; 3 – максимальная векторная разность скоростей ветра для этих слоев.

Таким образом, сдвиг ветра может быть горизонтальным и вертикальным, при этом вертикальный сдвиг наиболее опасен для авиации и космонавтики. Вертикальный сдвиг представляет собой изменение скорости и направления от одного слоя к другому и может отмечаться на различных высотах. Наиболее сильные сдвиги ветра наблюдаются при инверсиях температуры, в условиях пересеченной местности, а также при движении грозных очагов.

2.4.3 Характеристики сдвига ветра в районе космодрома «Байконур»

Помимо основных характеристик ветра (направление, скорость, порывы), огромное значение приобретает знание особенностей сдвига ветра в различных слоях атмосферы.

Для выявления особенностей сдвига ветра были проанализированы данные аэрологического зондирования атмосферы на станции Байконур. Материалы систематизировались за период 1985–2014 гг. Выбиралась информация о характеристиках ветра (скорость, направление) по вертикальным слоям атмосферы до высоты 25 км.

На основе полученных данных об интенсивности сдвига ветра были рассчитаны его средние и максимальные значения за каждый месяц периода и построены графические зависимости распределения значений по высоте. Исходя из полученных результатов о средних и максимальных значениях сдвигов ветра, можно отметить следующее (рисунок 12–15):

– слабые сдвиги ветра отмечались в слое от 3 до 10 км и от 12 до 20 км. Наибольшее число дней со слабыми сдвигами ветра приходится на апрель и май;

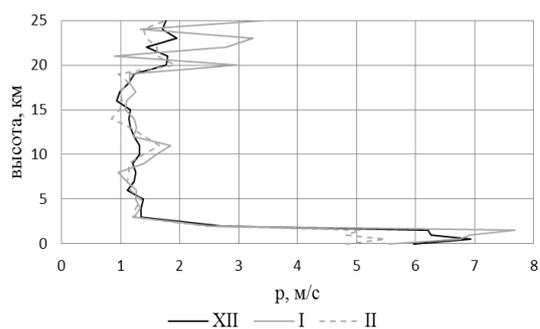
– умеренные и сильные по интенсивности сдвиги ветра отмечались в приземном слое до высоты 3 км. Наибольшее число дней с умеренными и сильными сдвигами ветра наблюдается в декабре и январе, а также в октябре и ноябре. Наименьшее число дней наблюдается в июле и сентябре.

В течение всего года были замечены дни, когда отмечались очень сильные сдвиги ветра. Можно выделить их следующие особенности:

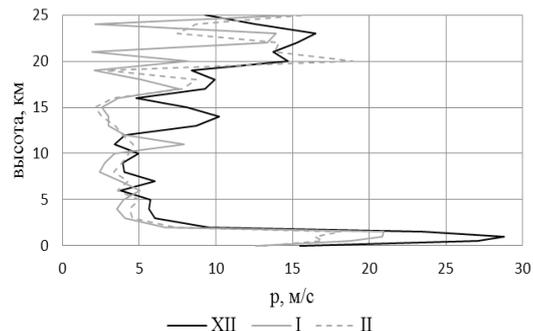
– очень сильные сдвиги ветра отмечались на трех уровнях: до высоты 3 км, в слоях 10–12 и 22–25 км;

– пики интенсивности очень сильных сдвигов ветра приходятся на месяцы: декабрь, январь, март, август и октябрь;

– наименьшее число дней очень сильных сдвигов ветра наблюдается в июле.

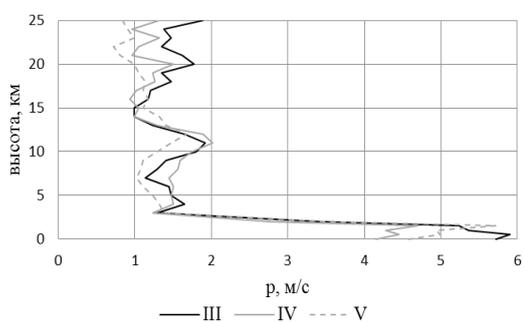


а)

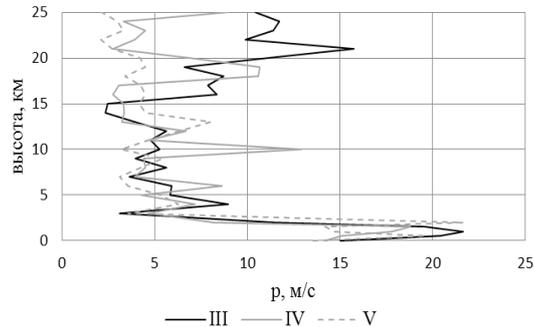


б)

Рисунок 12 – Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах зимой

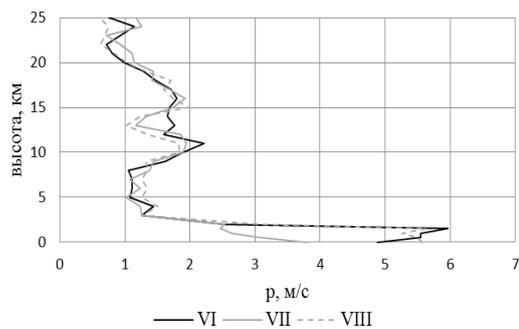


а)

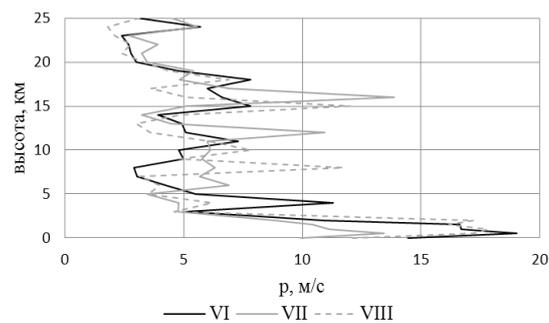


б)

Рисунок 13 – Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах весной

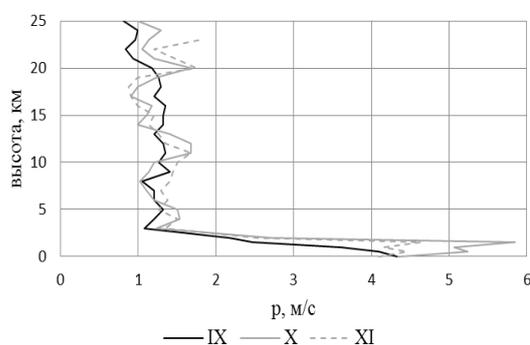


а)

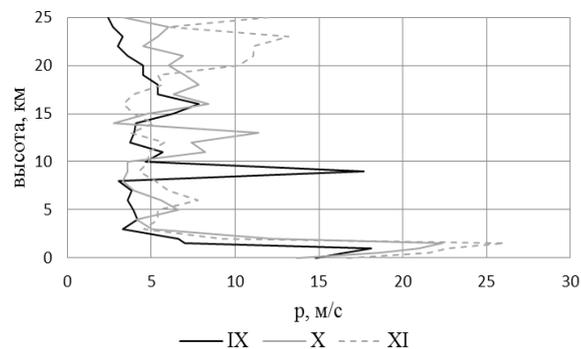


б)

Рисунок 14 – Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах летом



а)



б)

Рисунок 15 – Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах осенью

В целом замечено, что наибольшая интенсивность умеренных, сильных и очень сильных сдвигов ветра приходится на высоты до 1,5 км. Самым опасным месяцем по интенсивности сдвига ветра является декабрь, в слое от 1 до 1,5 км его средние значения достигают 5,5 м/с, а максимальные – 29 м/с, что говорит о критичности проведения пусков РКН в этот месяц.

Особый практический интерес представляет направление ветра в слоях с максимальными величинами сдвига ветра до высоты 1,5 км (таблица 7):

– В зимний период у земли преобладает ЮВ ветер (35 %), на высотах от 0,5 до 1,5 км ЮЗ (40 %).

– В весенний период на всех рассматриваемых высотах преобладает СВ направление ветра (34 %), далее ЮЗ (26 %), ЮВ (23 %).

– В летний период на всех рассматриваемых высотах преобладает СЗ направление ветра (40 %) и СВ (29 %).

– В осенний период у поверхности земли преобладает СВ ветер (30 %), на высотах от 0,5 до 1,5 км – ЮЗ направление ветра (35 %).

В результате можно сделать вывод, что в дни с наличием опасных сдвигов ветра у поверхности земли может наблюдаться ветер любого направления, в то время как на высоте от 0,5 до 1,5 км он в течение летнего сезона содержит преимущественно СЗ составляющую, а во все другие сезоны года ЮЗ.

Таблица 7 – Повторяемость направлений ветра (%) в слоях с максимальным сдвигом

| Высота (км) | Зимний период | | | | | | | |
|-----------------|---------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 | 1,1 | 33,0 | 4,1 | 35,2 | 1,5 | 14,2 | 2,3 | 8,6 |
| 0,5 | 0,0 | 21,0 | 0,9 | 29,7 | 0,5 | 33,4 | 0,0 | 14,5 |
| 1,0 | 0,4 | 24,3 | 0,0 | 22,9 | 0,2 | 35,7 | 0,0 | 16,5 |
| 1,5 | 0,0 | 22,7 | 0,0 | 11,4 | 0,5 | 52,0 | 0,0 | 13,4 |
| Весенний период | | | | | | | | |
| 0 | 1,2 | 33,5 | 6,4 | 21,5 | 2,2 | 17,1 | 4,0 | 14,1 |
| 0,5 | 0,8 | 37,6 | 0,0 | 26,3 | 0,6 | 21,1 | 0,0 | 13,6 |
| 1,0 | 0,3 | 34,0 | 0,8 | 21,8 | 0,0 | 27,0 | 0,4 | 15,7 |
| 1,5 | 1,5 | 30,7 | 0,0 | 20,7 | 0,0 | 36,8 | 1,8 | 8,5 |
| Летний период | | | | | | | | |
| 0 | 2,9 | 26,8 | 2,4 | 9,4 | 1,3 | 17,0 | 5,5 | 34,7 |
| 0,5 | 0,5 | 33,1 | 0,0 | 9,8 | 0,0 | 15,0 | 1,6 | 40,0 |
| 1,0 | 0,3 | 29,8 | 0,3 | 9,5 | 0,0 | 20,3 | 0,4 | 39,4 |
| 1,5 | 0,0 | 25,9 | 1,3 | 7,4 | 0,0 | 18,0 | 1,9 | 45,5 |
| Осенний период | | | | | | | | |
| 0 | 0,9 | 29,9 | 5,4 | 22,7 | 1,4 | 20,7 | 4,2 | 14,8 |
| 0,5 | 0,0 | 25,5 | 0,5 | 24,3 | 0,0 | 32,8 | 0,5 | 16,4 |
| 1,0 | 0,3 | 27,8 | 0,6 | 18,9 | 0,0 | 31,6 | 1,1 | 19,7 |
| 1,5 | 1,2 | 20,8 | 0,0 | 16,1 | 0,6 | 39,8 | 0,6 | 20,9 |

Рассмотрим повторяемость значений сдвига ветра по градациям (%) на высотах с наибольшими значениями (таблица 8). Во все месяцы в слое от земли до 1,5 км преобладает умеренный, сильный и очень сильный сдвиги ветра. Максимальная повторяемость сильного сдвига ветра приходится на декабрь и январь, на всех высотах она равна примерно 41–46 %. Чуть меньше опасных сдвигов ветра приходится на март, май, июнь, август и октябрь.

Таблица 8 – Повторяемость значений сдвига ветра по градациям (%)

| Высота км | Сдвиг ветра (p) , м/с | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|-------|
| | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 |
| | XII | | | I | | | II | | |
| 0 | 11 | 21 | 42 | 14 | 21 | 48 | 24 | 18 | 38 |
| 0,5 | 20 | 10 | 39 | 31 | 10 | 41 | 35 | 13 | 30 |
| 1,0 | 31 | 7 | 40 | 24 | – | 45 | 38 | 6 | 22 |
| 1,5 | 28 | 15 | 43 | 31 | 7 | 48 | 32 | 14 | 24 |
| | III | | | IV | | | V | | |
| 0 | 20 | 16 | 48 | 28 | 18 | 26 | 26 | 25 | 31 |
| 0,5 | 31 | 8 | 41 | 31 | 9 | 26 | 39 | 5 | 35 |
| 1,0 | 35 | 19 | 20 | 21 | 19 | 23 | 18 | 11 | 38 |
| 1,5 | 31 | 19 | 33 | 28 | 12 | 30 | 27 | 11 | 42 |
| | VI | | | VII | | | VIII | | |
| 0 | 30 | 24 | 34 | 32 | 16 | 25 | 24 | 33 | 31 |
| 0,5 | 24 | 11 | 36 | 39 | 11 | 15 | 29 | 19 | 27 |
| 1,0 | 27 | 12 | 38 | 28 | 11 | 10 | 35 | 17 | 26 |
| 1,5 | 33 | 17 | 34 | 39 | 10 | 9 | 36 | 8 | 33 |
| | IX | | | X | | | XI | | |
| 0 | 25 | 28 | 18 | 37 | 15 | 28 | 32 | 21 | 24 |
| 0,5 | 26 | 18 | 24 | 26 | 10 | 32 | 26 | 18 | 25 |
| 1,0 | 32 | 20 | 21 | 26 | 8 | 29 | 33 | 18 | 22 |
| 1,5 | 39 | 13 | 15 | 22 | 11 | 33 | 38 | 12 | 26 |

Таким образом, о характеристиках сдвига ветра в районе космодрома «Байконур» можно сказать следующее:

1. Наибольшее число дней с умеренными и сильными сдвигами ветра наблюдается зимой в декабре и январе, осенью в октябре. Наименьшее число дней наблюдается в июле.

2. Очень сильные сдвиги ветра отмечаются на трех уровнях: до высоты 3 км, 10–12 и 22–25 км.

3. Пики интенсивности очень сильных сдвигов ветра приходятся на декабрь, январь март, август и октябрь.

4. Самым опасным месяцем по интенсивности сдвига ветра является декабрь.

5. Месяцы, рекомендуемые для пусков ракет космического назначения с учётом интенсивности сдвига ветра: июль и сентябрь.

2.5 Характеристики ветра в дни переноса пусков ракет космического назначения

Целью настоящей работы является изучение погодных условий и выявление наиболее общих закономерностей характеристик ветра, неблагоприятных для пуска РКН на космодроме «Байконур».

Для данной работы были детально изучены метеорологические условия и основные элементы погоды в дни переносов стартов РКН. Для анализа были выбраны четыре случая переноса пуска РКН на космодроме «Байконур» в разные времена года, которым для удобства присвоили порядковые номера: I, II, III и IV и сохраним их на протяжении всего исследования.

Поскольку анализ критических характеристик ветра невозможен без анализа синоптической обстановки над обслуживаемой территорией, динамика синоптических процессов изучалась с заблаговременностью двух дней до старта РКН во всех рассматриваемых случаях.

Случай I. В приземном слое за два дня до старта метеорологические условия в районе стартового комплекса были обусловлены влиянием центральной части антициклона, с давлением в центре 1032,6 гПа, при этом у поверхности земли преобладали ветры северного направления со скоростью 4–7 м/с. На изобарической поверхности 500 мбар территория стартового комплекса находилась под влиянием тыловой части ложбины циклона с центром в районе Омска (значение геопотенциала в центре – 537 гп. дам.); над стартовым комплексом преобладали потоки воздушных масс северо-западного направления.

За день до старта в приземном слое произошло смещение центра антициклона в район озера Тениз (давление в центре составляло 1037,8 гПа) и метеорологические условия в районе стартового комплекса стали обуславливаться периферией антициклона. Направление ветра в связи с перемещением антициклона сменилось на юго-западное. Высотный циклон в это время сместился на северо-восток Новосибирской области (геопотенциал в центре – 538 гп. дам.), ось ложбины перемещалась в восточном направлении со

скоростью около 30 км/ч. С запада, вслед уходящему циклону, сместился гребень, ось которого протянулась от Еревана до Самары. Район стартового комплекса оказался под влиянием передней части высотного гребня, северо-западное направление перемещения воздушной массы сохранялось.

В день старта метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись повышением давления в центре антициклона, который сместился в район Усть-Каменогорска (давление в центре составляло 1045,7 гПа). При этом гребень антициклона продвинулся на территорию Урала и Поволжья. У поверхности земли наблюдалось преобладание ветров юго-западного направления. Высотный гребень сменился ложбиной (ось которой расположена по направлению Москва – Ростов-на-Дону) с центром в районе Архангельска (геопотенциал в центре – 516 гп. дам.), перемещавшейся со скоростью около 60 км/ч. При этом сформировались высокие (4 гп. дам. на 100 км) градиенты геопотенциала и направление перемещения воздушной массы с северо-западного сменилось на юго-западное.

Случай II. В приземном слое за два дня до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись тыловой частью ложбины циклона. На изобарической поверхности 500 мбар метеорологические условия характеризовались передней частью ложбины циклона с центром в районе Новой Земли. Район стартового комплекса находился в зоне сгущения изогипс (4 гп. дам. на 100 км), преобладало западное направление перемещения воздушной массы.

За день до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись влиянием тыловой части ложбины. Высотный циклон стационарировал в районе Новой Земли, еще один образовался в районе Новосибирской области, при этом высокие градиенты геопотенциала ослабли (до 2 гп. дам. на 100 км) и переместились на 200 км к югу, западные направления перемещения воздушной массы сохранились.

В день старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись влиянием ложбины циклона. Высотная ложбина переместилась на восток в район Абакана, вслед за ней в район стартового

комплекса сместился деформационный гребень, направление перемещения воздушной массы изменилось на северо-западное.

Случай III. В приземном слое метеорологические условия в районе стартового комплекса за два дня до старта РКН определялись тыловой частью ложбины циклона, центр которого располагался в районе Омска. На изобарической поверхности 500 мбар район стартового комплекса находился под влиянием ложбины циклона, центр которого находился в районе Тюмени, над стартовым комплексом преобладали потоки западного направления и наблюдалась зона с высокими (6 гп. дам. на 100 км) градиентами геопотенциала.

За день до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись сменой барических образований: ложбина циклона смещалась в юго-западном направлении со скоростью около 40 км/ч, ей на смену в район стартового комплекса перемещался антициклон. На изобарической поверхности 500 мбар территория стартового комплекса оставалась под влиянием квазистационарного циклона, центр которого находился в районе Тюмени. Направление перемещения воздушной массы изменилось с западного на северо-западное, зона с высокими (6 гп. дам. на 100 км) градиентами геопотенциала над районом стартового комплекса сохранилась.

В день старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись западной периферией антициклона. Высотная зона с высокими градиентами геопотенциала сохранилась, но значения ослабли до 5 гп. дам. на 100 км. Направление перемещения воздушной массы изменилось на юго-западное.

Случай IV. В приземном слое за два дня до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса были обусловлены зоной малоградиентного барического поля пониженного давления. На изобарической поверхности 500 мбар территория стартового комплекса находилась под влиянием оси ложбины циклона, центр которого располагался над Новой Землей. При этом над территорией стартового комплекса сформировались высокие (4 гп.

дам. на 100 км) градиенты геопотенциала, направление перемещения воздушной массы – западное.

За день до старта РКН метеорологические условия в районе стартового комплекса обуславливались малоградиентным барическим полем пониженного давления. Высотная ложбина сохранялась. Градиенты геопотенциала усилились до 6 гп. дам. на 100 км, направление перемещения воздушной массы изменилось на юго-западное.

В день старта метеорологические условия в районе стартового комплекса определялись тыловой частью ложбины циклона, центр которого располагался в районе Монголии. На изобарической поверхности 500 мбар территория стартового комплекса находилась под влиянием оси ложбины, которая переместилась в восточном направлении на 320 км, направление перемещения воздушной массы приобрело северо-западную составляющую, зона с высокими (6 гп. дам. на 100 км) градиентами геопотенциала сохранялась.

Анализируя метеорологические условия, обуславливавшие характеристики ветра, которые достигали критических значений, замечено, что в рассматриваемых случаях усиление скоростей ветра происходило в результате достаточно быстрой смены циклонической циркуляции на антициклональную. Преобладающим типом циркуляции атмосферы были северо-западные европейские вторжения. При этом центры барических образований перемещались со скоростями, превышающими средние значения. Во все дни было отмечено наличие струйного течения – высокоградиентной зоны вблизи Планетарной Высотной Фронтальной Зоны (ПВФЗ). Причем во всех приведенных случаях исследуемая территория была расположена с циклонической стороны от оси струйного течения, где и следовало ожидать наибольших горизонтальных сдвигов ветра.

Анализ характеристик ветра и их изменчивости у поверхности земли осуществляется постоянно в период подготовки и пуска РКН. В соответствии с классическими методиками [34, 76] на рисунке 16 представлена изменчивость направления ветра в течение суток до пуска РКН.

В первом случае переноса старта РКН у поверхности земли наблюдалось преобладание ветра ЮВ направления, во втором и четвертом случаях – преобладание ветра СВ направления, в третьем случае – преобладание ветра ЮЗ направления. В целом направление ветра в течение суток во всех случаях было достаточно устойчивым, выявить сезонную зависимость направления ветра на данном материале не представляется возможным.

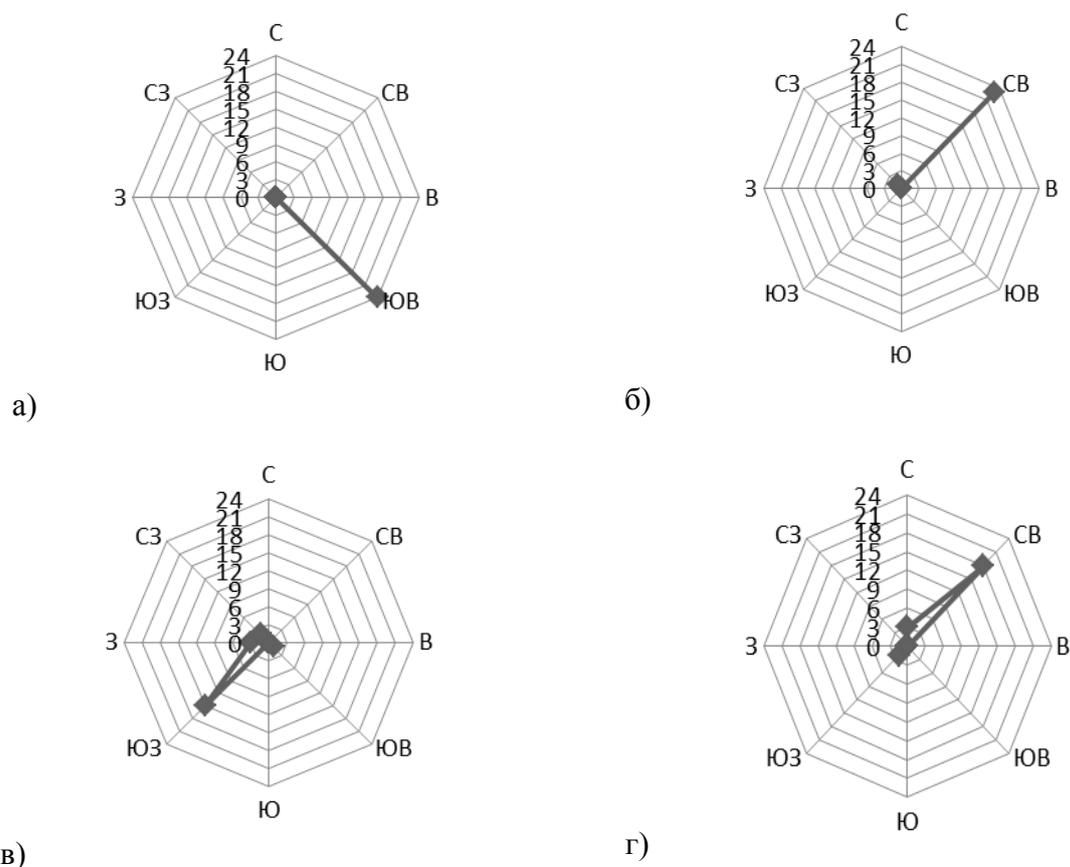


Рисунок 16 – Направление ветра у поверхности земли в течение суток для каждого из случаев переноса пуска РКН

Поскольку при подготовке РКН в стартовый день проводится комплексное радиозондирование атмосферы, у нас есть возможность проследить изменения скорости ветра с высотой. На рисунке 17 приведены изменения скорости ветра с высотой по данным радиозондирования атмосферы в соответствии с общепринятыми методиками их представления [15]. Зависимость величины максимальной скорости ветра от уровня его расположения обнаружить не

удалось. Во всех рассматриваемых случаях максимальные скорости ветра наблюдались в пределах от 30 до 52 м/с и зафиксированы на высотах 10–12 км. Высокие значения скорости ветра наблюдались в толще атмосферы от 2 до 5 км на высотах 10–16 км. При этом соблюдалась зависимость: чем больше скорость максимального ветра, тем более протяженным по вертикали был слой, в котором ветер со скоростью более 30 м/с регистрировался. Толщина этого слоя, несомненно, зависит от анализируемого времени года, однако для данного исследования не принципиальна.

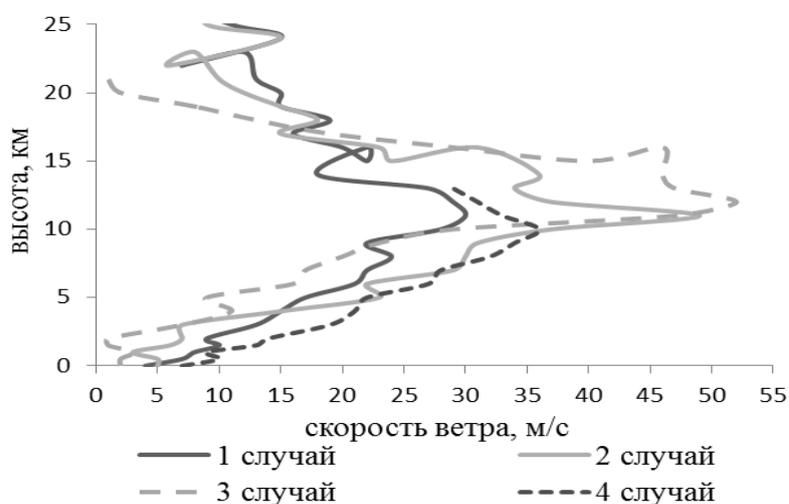


Рисунок 17 – Изменение скорости ветра с высотой

Направление ветра при максимальных скоростях в каждом из рассматриваемых случаев было следующим:

– в первом случае при максимальной скорости ветра 30 м/с на высоте 11 км наблюдалось СЗ направление;

– во втором случае при максимальной скорости ветра 49 м/с на высоте 11 км наблюдалось ЮЗ направление;

– в третьем случае при максимальной скорости ветра 52 м/с на высоте 12 км наблюдалось ЮЗ направление;

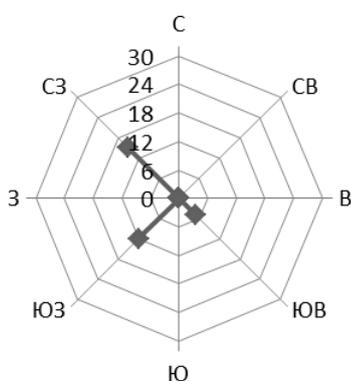
– при четвертом случае при максимальной скорости ветра 36 м/с на высоте 10 км наблюдалось СЗ направление.

Можно заметить, что при ЮЗ направлении скорости максимального ветра в 1,5 и более раз превышали нижнее значение скорости ветра на оси струйного течения (30 м/с) и были зарегистрированы в теплый период года.

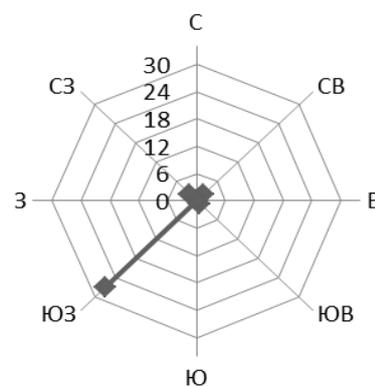
На рисунке 18 детально представлена изменчивость направлений ветра от земли до высоты 25 км. Повторяемость регистрации радиозондами преобладающего направления ветра на высотах в процентном соотношении выглядит следующим образом:

- в первом случае преобладание СЗ ветра зарегистрировано в 46 % измерений;
- во втором случае преобладание ЮЗ ветра отмечалось в 85 % случаев;
- в третьем случае преобладание ЮЗ ветра регистрировалось в 80 % случаев;
- в четвертом случае преобладание СЗ ветра зафиксировано в 63 % случаев.

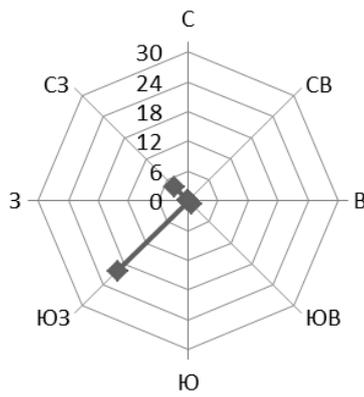
Таким образом, замечено, что в случае юго-западных переносов, наблюдавшихся в теплое полугодие, направление ветра во всей толще исследуемого слоя было относительно устойчивым, а в случае СЗ направление ветра менялось. В связи с этим представляет интерес изменчивость направления ветра в зависимости от высоты.



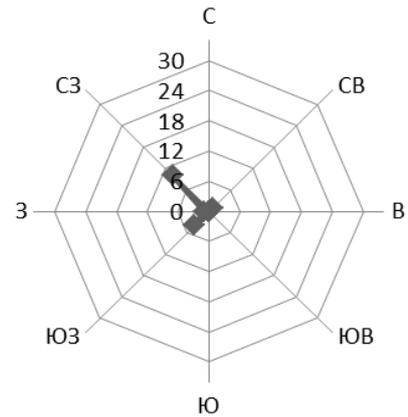
а)



б)



в)



г)

Рисунок 18 – Преобладающее направление ветра в слое: от 0,5 до 25 км
(По шкале отложено число замеров ветра в рассматриваемом слое)

На рисунке 19 представлены изображения поворота ветра в градусах ($^{\circ}$) на каждый километр полета радиозонда. Замечено, что максимальный поворот ветра вне зависимости от сезона года наблюдался, в основном, в слое от 1 до 3 км, однако:

- в первом случае поворот ветра составил 65° ;
- во втором случае максимальный поворот ветра достиг 83° ;
- в третьем случае максимальный поворот произошел на 64° ;
- в четвертом случае ветер был достаточно устойчив в течение всего полета радиозонда и менял направление в пределах, не превышающих 27° .

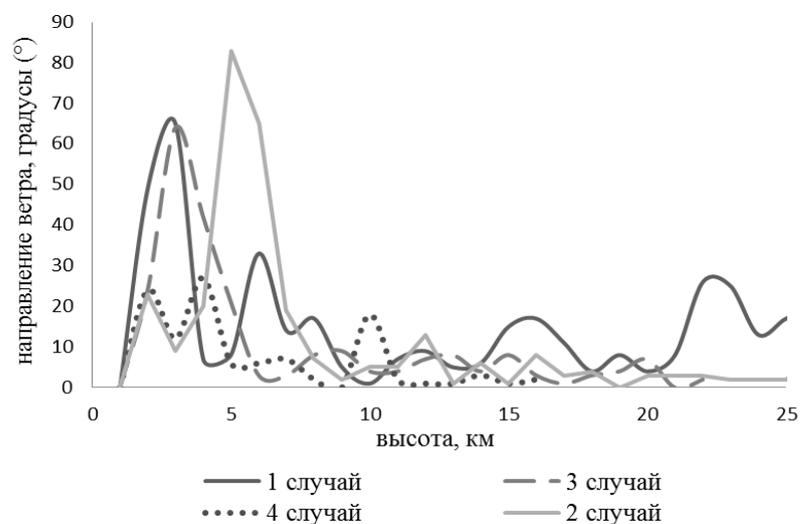


Рисунок 19 – Поворот ветра в слое от земли до 25 км

Известно, что в областях струйных течений велики как вертикальные, так и горизонтальные сдвиги ветра. Причем горизонтальный сдвиг ветра слева от оси струйного течения, т. е. на циклонической стороне, гораздо больше, чем справа от нее, на антициклонической стороне. Поскольку интересующий нас район в каждом из случаев был расположен на циклонической стороне струйного течения, представляется возможным оценить значения сдвига ветра в дни переноса пусков.

На рисунке 20 представлено распределение сдвига ветра с высотой в интересующие нас дни. Как и ожидалось, значения сдвига ветра привязаны к высотам максимального ветра и расположены на высотах 10–12 км. При оценке интенсивности сдвига ветра замечено наличие сильных сдвигов (изменение вертикального сдвига ветра от 2,5 до 5 м/с на каждые 300 м) и очень сильных (изменение вертикального сдвига ветра на каждые 300 м от 5 до 10 м/с).

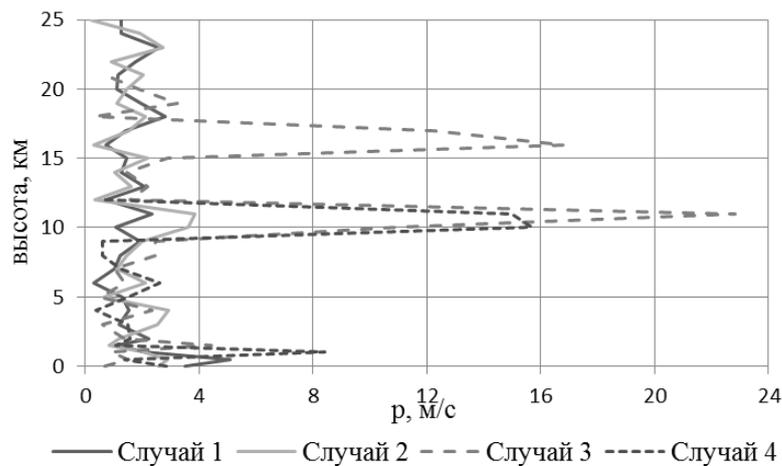


Рисунок 20 – Распределение интенсивности сдвига ветра на высотах

Чем сильнее струйное течение, тем больше вертикальный сдвиг ветра в нем. Рассмотрим случай 3, при котором наблюдались максимальные скорости ветра 52 м/с в слое 10–12 км. Градиенты геопотенциала были высокими (5 гп. дам. на 100 км). При этом средний вертикальный сдвиг ветра на 1 км в слое 0,5–25 км составлял 12,8 м/с, максимальный вертикальный сдвиг ветра в слое 0,5–25 км составлял 55,3 м/с (слой 11–12 км).

В таблице 9 приведены обобщенные характеристики ветра, наблюдавшиеся в рассмотренных выше случаях переносов пусков РКН.

Таблица 9 – Обобщенные характеристики ветра для случаев переноса пусков РКН

| Исследуемая характеристика | Результат |
|---|-----------|
| Преобладающее направление ветра у поверхности земли | СВ |
| Преобладающее направление ветра в слое от земли до 29 км | СЗ |
| Направление ветра при максимальной скорости | СЗ |
| Высота, на которой наблюдались максимальные скорости ветра (км) | 10–12 |
| Слой, в котором наблюдались очень сильные сдвиги ветра (км) | 10–12 |
| Слой, в котором наблюдался максимальный поворот ветра (км) | 1–3 |

В результате проведенного исследования получено:

1. При комплексном обзоре синоптической обстановки в районе стартового комплекса вне зависимости от сезона года наибольшее внимание следует уделять СЗ европейскому вторжению, на фоне которого формируется ПВФЗ и струйное течение с критичными значениями характеристик ветра.

2. При преобладании в тропосфере ЮЗ направления переноса воздушной массы максимальные скорости ветра в области струйных течений в 1,5 раза больше, чем при СЗ. Сезонный ход направления переноса воздушных масс: в летний период преобладает СЗ направление ветра, в зимний, весенний и осенний периоды – ЮЗ.

3. Максимальные скорости и сдвиг ветра наблюдаются в слое 10–12 км.

При изучении характеристик ветра у поверхности земли и в свободной атмосфере в районе космодрома «Байконур» было получено:

1. Над территорией космодрома «Байконур» скорость приземного ветра имеет тенденцию к уменьшению.

2. Над территорией космодрома «Байконур» наблюдается увеличение скорости ветра в верхней тропосфере на 0,24 м/с/10 лет. По-видимому, тенденция

увеличения скорости ветра в свободной атмосфере имеет место во всем диапазоне широт, от 45 ° с. ш. до побережья Северного Ледовитого Океана.

3. Максимальные значения скорости ветра наблюдаются в слое 8–12 км.

4. В слое с максимальными значениями скорости ветра в зимний, весенний и осенний периоды преобладает ЮЗ ветер, в летний период на высотах преобладает СЗ направление ветра.

5. Максимальные сдвиги ветра наблюдаются в слоях 0,5–1,5 км и 10–12 км.

6. В слое с максимальным сдвигом ветра 0,5–1,5 км летом преобладают ветра преимущественно СЗ направления, а в другие сезоны года ЮЗ направления. В слое 10–12 км в зимний, весенний и осенний сезоны преобладают ветра ЮЗ направления, а в летний сезон процентное соотношение ветров ЮЗ и СЗ направлений примерно одинаково.

7. Проанализировав характеристики ветра (скорость, направление, сдвиг ветра), можно утверждать, что самыми благоприятными месяцами для запусков ракет космического назначения над территорией космодрома «Байконур» являются: февраль, май, июль и сентябрь.

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРА В РАЙОНЕ КОСМОДРОМА «ВОСТОЧНЫЙ»

3.1 Характеристики ветра у поверхности земли

Для выявления особенностей ветра в районе космодрома «Восточный» послужили данные о его характеристиках (скорость, направление) по наблюдениям метеорологических станций Амурской области и близлежащей территории Китая. Для исследования приземного ветра были взяты ближайšie к космодрому метеорологические станции (Свободный, Шимановск и Хума), что обусловлено отсутствием продолжительных наблюдений за характеристиками атмосферы в районе строящегося космодрома и тем фактом, что территория космодрома подвержена более частой смене циркуляционных процессов [83], чем территория космодрома «Байконур». Информация о характеристиках станций представлена в Приложении 4 Таблице 4.1. Все перечисленные станции расположены в пределах равнин.

Информация о характеристиках ветра получена на основе данных сервера Института космических исследований РАН «Погода России» за период 1985–2014 гг. [92]. Выявлены следующие особенности характеристик приземного ветра (таблица 9):

- среднегодовые значения скорости ветра изменялись в пределах 1–4 м/с;
- наибольшие значения среднемесячной скорости ветра отмечены в апреле и составляют 4 м/с;
- наименьшая средняя скорость ветра наблюдается в январе и в июле (таблица 10);
- по сравнению с другими метеорологическими станциями для станции Хума характерны наименьшие значения скорости ветра;
- выделены периоды наибольших значений средней скорости ветра: март–май, сентябрь–ноябрь, причем средняя скорость ветра в осенний период несколько меньше, чем в весенний.

Таблица 10 – Средние и максимальные скорости ветра в районе космодрома «Восточный»

| Станция | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|-----------|---------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|
| Свободный | среднее | 1,5 | 1,5 | 1,9 | 2,3 | 2,1 | 1,4 | 1,1 | 1,5 | 1,6 | 2,2 | 1,5 | 1,8 |
| | max | 6,0 | 10,0 | 9,0 | 8,0 | 7,0 | 6,0 | 6,0 | 7,0 | 5,0 | 16,0 | 6,0 | 8,0 |
| Шимановск | среднее | 1,2 | 1,2 | 1,6 | 1,8 | 1,7 | 1,3 | 0,8 | 1,3 | 1,3 | 1,7 | 1,2 | 1,5 |
| | max | 6,0 | 9,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 8,0 | 4,0 | 8,0 | 6,0 | 8,0 | 6,0 | 7,0 |
| Хума | среднее | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,4 | 1,0 | 0,9 |
| | max | 5,0 | 4,0 | 7,0 | 5,0 | 6,0 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | 4,0 | 6,0 | 5,0 | 4,0 |

Максимальные скорости приземного ветра изменяются в пределах от 4 до 16 м/с, при этом:

– на станции Свободный максимальная скорость ветра в 39 % случаев наблюдалась при 3 направлениях, 31 % при СЗ, 1,5 % при В и СВ;

– для метеостанции Шимановск максимальные скорости ветра в 29 % случаев наблюдаются при СЗ направлении, при этом минимальное число случаев максимальных скоростей регистрируется при В ветре;

– на станции Хума 31 % приходится на ветер С направления, а наименьшее количество случаев наблюдается при ЮЗ направлении ветра;

– для станции Свободный за исследуемый период максимальная скорость ветра отмечалась в октябре и составила 16 м/с при В направлении ветра, на станции Шимановск 10 м/с – в мае при 3 направлениях, для станции Хума 9 м/с – в мае, также при 3 направлениях ветра;

– весенним и осенним сезонам соответствуют наибольшие значения максимальной скорости ветра (рисунок 21 б).

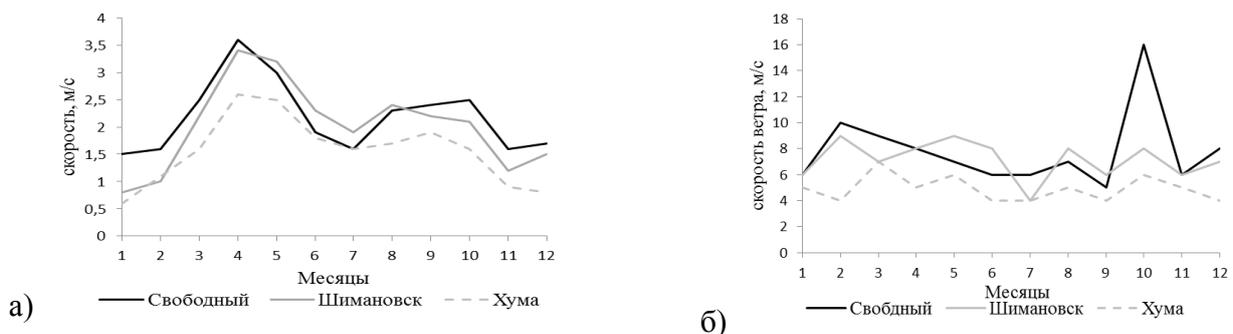


Рисунок 21 – Средняя (а) и максимальная (б) скорость ветра

Климатические периоды (1985–1999 гг.) характеризуются положительной тенденцией – значения среднегодовой скорости ветра увеличились (с 1,5 до 3 м/с). В период 2000–2014 гг. значение средней за год скорости ветра уменьшились до 2,3 м/с (рисунок 22). Подтверждается вывод, что над территорией космодрома «Восточный» скорость приземного ветра так же имеет тенденцию к уменьшению [71].

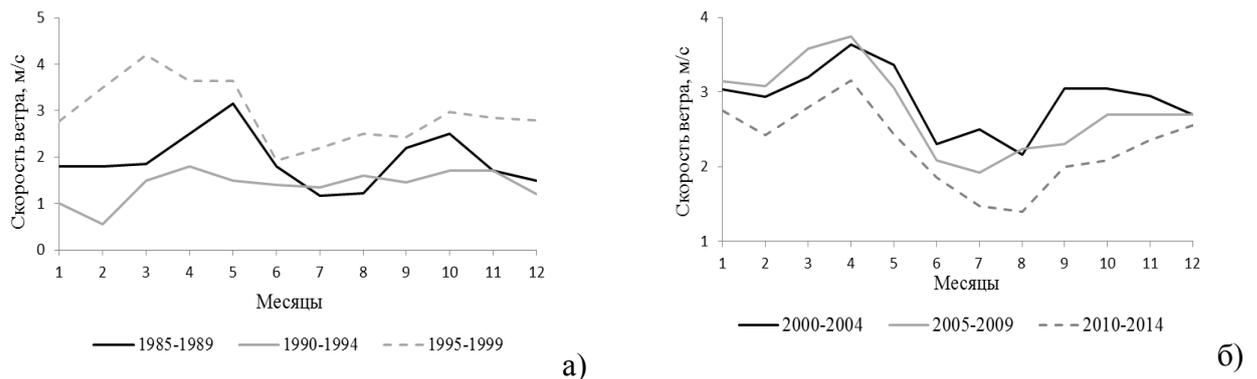


Рисунок 22 – Годовой ход многолетней средней скорости ветра 1985–1999 гг. (а), 2000–2014 гг. (б)

Помимо информации о скорости ветра систематизировались данные о направлении ветра. Получено:

- за исследуемый период на станции Свободный преобладает ветер западного направления (34,4 %);
- на станции Шимановск преобладает северо-западное (20,8 %) и северное (19,7 %) направление ветра;
- на станции Хума преобладает ветер северного направления (31,7 %);
- если рассматривать особенности направления ветра по сезонам года, то на станции Свободный за исследуемый период для зимнего, весеннего и осеннего сезонов характерно преобладание западных ветров, а летом – южных;
- на станции Шимановск в зимний и осенний периоды преобладает ветер северо-западного направления, а в весенний и летний северный;
- по данным станции Хума во все сезоны года, за исключением летнего, преобладают ветры северного направления, летом южные.

Отметим следующие особенности характеристик ветра у поверхности земли в районе космодрома «Восточный»:

1. Среднегодовая скорость ветра меняется от 1 до 4 м/с.

2. Наибольшие значения средней скорости ветра соответствуют переходным сезонам. Так, среднемесячная скорость ветра наибольшая весной (4 м/с). Для зимы и лета характерны наименьшие значения скорости ветра.

3. В исследуемом районе наблюдается преобладание западных и северо-западных ветров зимой, южных – летом.

4. Над территорией космодрома «Восточный» скорость приземного ветра имеет тенденцию к уменьшению: за последние 10 лет скорость ослабла на 0,7 м/с.

Полученные результаты могут быть использованы при старте РКН с разных площадок, расположенных в том или ином направлении от территории космодрома «Восточный».

3.2 Характеристики ветра в свободной атмосфере

Для выявления особенностей изменения ветра в свободной атмосфере в районе строящегося космодрома «Восточный» послужила информация о скорости ветра на высотах от поверхности земли до высоты 25 км по данным радиозондирования атмосферы аэрологической станции Благовещенск за период 1985–2014 гг.

На рисунке 23–26 представлены результаты сравнений средних и максимальных значений скорости ветра в разные сезоны года. По данным, представленных в Приложении 5 Таблицу 5.1 и рисункам 29–32 выявлены следующие особенности распределения характеристик ветра с высотой [45, 52, 53, 54, 82]:

– наибольшие средние и максимальные скорости ветра зафиксированы на высотах от 7 до 14 км;

– по числу дней со скоростями ветра, превышающими критические значения, самыми спокойными являются летний и весенний сезоны. Средние

скорости ветра в летние месяцы в слое от поверхности земли до 25 км не превышают 23 м/с;

– наибольшая средняя скорость ветра замечена в октябре на высоте 8–9 км и достигает 25 м/с (Приложение 5 Таблица 5.1);

– максимальные скорости в течение всего года наблюдались на высоте 7–11 км (рисунок 23–26);

– наименьшие значения как средней, так и максимальной скоростей ветра регистрировались в приземном слое атмосферы во все сезоны года.

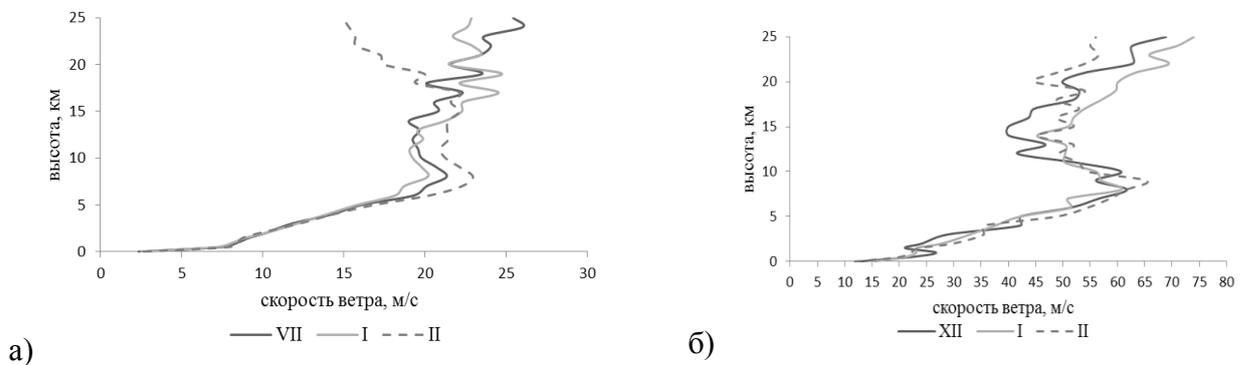


Рисунок 23 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в зимний сезон

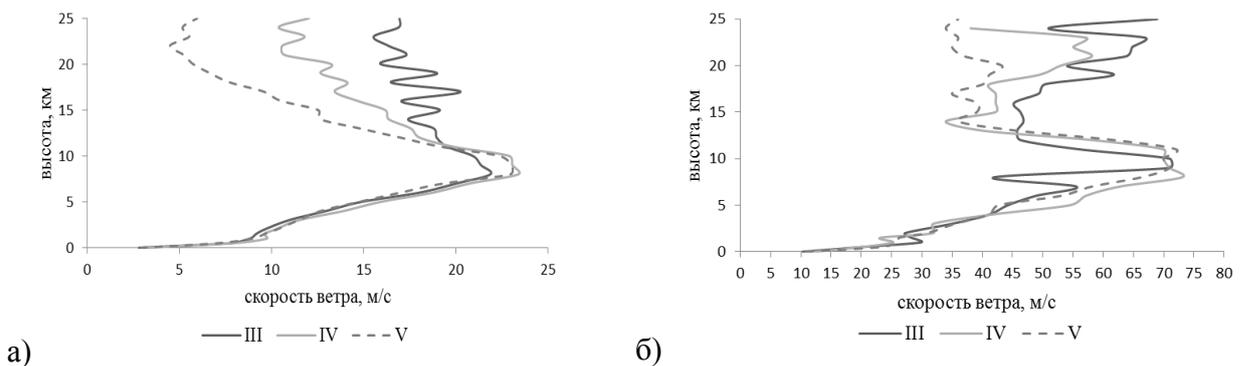


Рисунок 24 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в весенний сезон

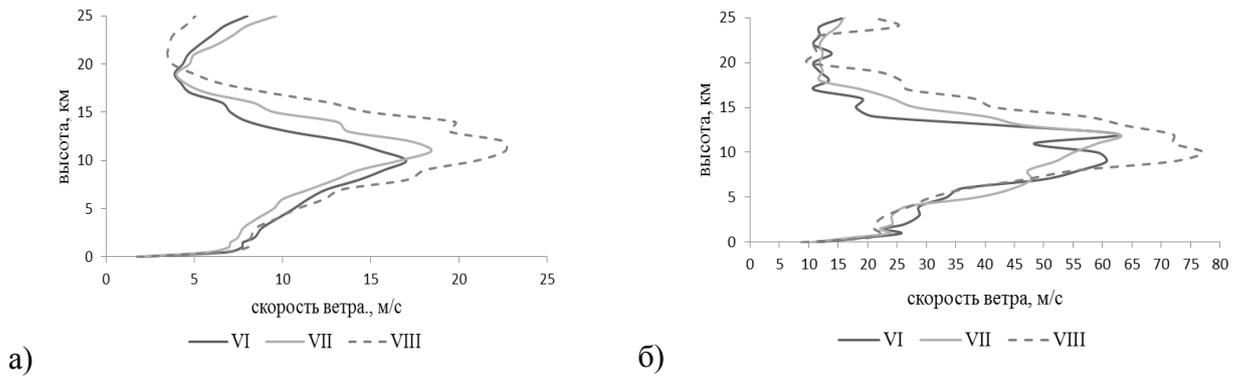


Рисунок 25 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в летний сезон

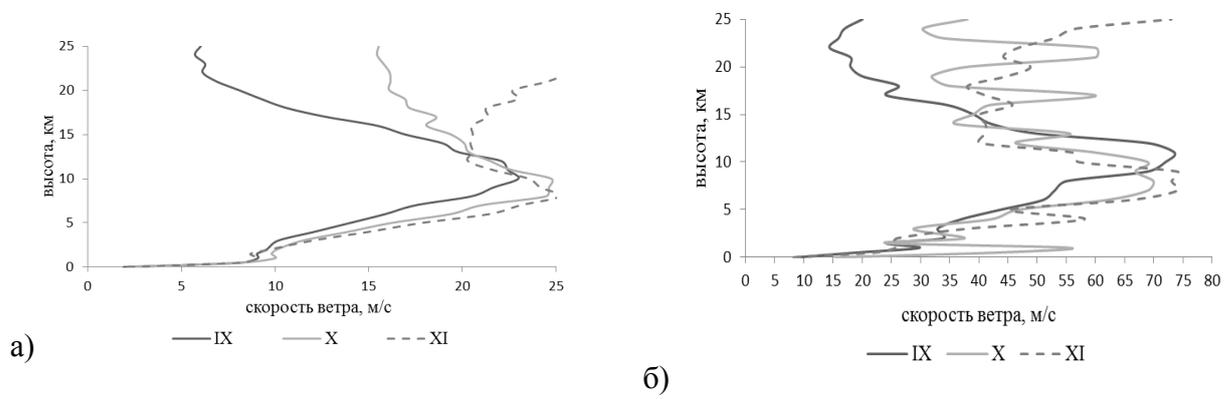


Рисунок 26 – Изменение средней скорости ветра (а) и максимальной скорости ветра (б) с высотой в осенний сезон

Сравнивая повторяемость скоростей ветра по градациям (таблица 11) в пределах высот, где были замечены наибольшие средние и максимальные скорости ветра (7–14 км), можно сказать что, для района космодрома «Восточный» месяцами с минимальной повторяемостью опасных скоростей ветра (6–9 %) являются июнь и июль, месяцами с высокой повторяемостью: февраль, октябрь и ноябрь (18–21 %). Максимальная повторяемость всех опасных по скорости ветра градаций в течение года наблюдается на высоте 8 и 10 км.

Если характеризовать сезоны года в целом, то в качестве относительно спокойного можно выделить летний сезон, повторяемость дней с опасными скоростями составляет 9 %.

Таблица 11 – Повторяемость значений скорости ветра по градациям (%)

| Высота (км) | Градации скорости м/с | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|
| | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 | ≤70 | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 | ≤70 | 30-39 | 40-49 | 50-59 | 60-69 | ≤70 |
| | XII | | | | | I | | | | | II | | | | |
| 7 | 13 | 5 | 0,6 | – | – | 9 | 4 | 0,7 | 0,1 | – | 14 | 8 | 2 | 0,2 | – |
| 8 | 14 | 7 | 1 | 0,2 | – | 14 | 5 | 0,8 | 0,3 | – | 14 | 7 | 3 | 0,3 | – |
| 9 | 13 | 5 | 1 | – | – | 12 | 3 | 1 | – | – | 15 | 5 | 2 | 0,3 | – |
| 10 | 10 | 3 | 0,7 | 0,2 | – | 11 | 3 | 0,3 | 0,1 | – | 12 | 4 | 1 | – | 0,4 |
| 11 | 9 | 1 | 0,4 | – | 0,2 | 10 | 1 | 0,2 | – | – | 12 | 2 | 0,5 | – | 0,3 |
| 12 | 8 | 0,3 | – | – | – | 13 | 1 | 0,1 | – | – | 14 | 3 | – | – | 0,4 |
| 13 | 8 | 1 | – | – | – | 12 | 2 | 0,2 | – | – | 15 | 1 | 0,2 | – | 0,2 |
| 14 | 9 | 0,7 | – | – | – | 19 | 3 | 0,3 | – | 0,3 | 13 | 2 | 0,3 | – | 0,3 |
| | III | | | | | IV | | | | | V | | | | |
| 7 | 12 | 6 | 2 | 0,4 | – | 11 | 6 | 1 | 0,6 | – | 12 | 4 | 1 | 0,1 | – |
| 8 | 13 | 6 | 2 | 0,5 | 0,3 | 14 | 9 | 3 | 1 | 0,4 | 14 | 9 | 3 | 1 | – |
| 9 | 12 | 4 | 2 | 0,8 | 0,3 | 12 | 10 | 2 | 2 | 0,3 | 2 | 1 | 0,3 | 0,1 | – |
| 10 | 13 | 5 | 1 | 0,8 | 0,5 | 12 | 8 | 4 | 2 | – | 12 | 7 | 3 | 2 | – |
| 11 | 12 | 1 | – | – | 0,1 | 11 | 5 | 1 | 0,2 | – | 8 | 6 | 2 | 0,3 | 0,1 |
| 12 | 10 | 1 | – | – | – | 6 | 2 | 1 | – | – | 6 | 2 | 1 | 0,2 | – |
| 13 | 9 | 1 | – | – | – | 5 | 1 | – | – | – | 5 | 1 | – | – | – |
| 14 | 8 | 1 | – | – | – | 4 | – | – | – | – | 2 | – | – | – | – |
| | VI | | | | | VII | | | | | VIII | | | | |
| 7 | 3 | 1 | – | – | – | 3 | 1 | 0,3 | – | – | 3 | 1 | – | – | – |
| 8 | 5 | 2 | 1 | – | – | 5 | 2 | – | 0,2 | – | 8 | 2 | 1 | – | – |
| 9 | 6 | 3 | 1 | – | – | 6 | 4 | 0,4 | 0,1 | – | 9 | 4 | 1 | – | – |
| 10 | 6 | 4 | 1 | – | – | 8 | 5 | 1 | 0,4 | – | 10 | 8 | 3 | – | – |
| 11 | 6 | 3 | – | – | – | 10 | 5 | 3 | – | – | 12 | 8 | 4 | 0,5 | – |
| 12 | 4 | 1 | – | – | – | 10 | 3 | 1 | – | – | 12 | 7 | 3 | 0,3 | – |
| 13 | 0,4 | 0,1 | – | – | – | 4 | 1 | – | – | – | 9 | 3 | 1 | – | – |
| 14 | 0,2 | – | – | – | – | 3 | 1 | – | – | – | 8 | 3 | 1 | – | – |
| | IX | | | | | X | | | | | XI | | | | |
| 7 | 9 | 2 | – | – | – | 12 | 4 | 1 | 0,7 | – | 15 | 8 | 1 | 0,8 | – |
| 8 | 17 | 5 | 2 | – | – | 18 | 9 | 3 | 1 | 0,1 | 18 | 11 | 2 | 1 | 0,2 |
| 9 | 15 | 7 | 2 | 0,3 | – | 16 | 9 | 3 | 1 | 0,2 | 3 | 2 | – | – | – |
| 10 | 16 | 6 | 3 | 0,6 | 0,1 | 17 | 9 | 3 | 1 | 0,2 | 17 | 6 | 3 | – | 0,2 |
| 11 | 15 | 5 | 1 | 0,6 | 0,3 | 15 | 5 | 1 | – | 0,3 | 13 | 3 | – | 0,2 | – |
| 12 | 12 | 4 | 1 | 0,4 | – | 13 | 3 | – | – | – | 11 | 1 | – | – | – |
| 13 | 10 | 2 | – | – | – | 9 | 1 | – | – | – | 8 | 1 | – | – | – |
| 14 | 6 | 1 | – | – | – | 10 | – | – | – | – | 10 | 1 | – | – | – |

В Приложении 5 Таблица 5.1 представлена изменчивость (σ) средней скорости в разные месяцы года в слое от поверхности земли до высоты 25 км. Значение σ во всем рассматриваемом слое велико, что свидетельствует о неустойчивости средних значений. Выделить месяцы с относительно

устойчивыми значениями исследуемой характеристики оказалось практически невозможным.

Определим преобладающее направление ветра в слоях с максимальными скоростями ветра (7–14 км) для каждого из сезонов года (таблица 12):

– В зимний и весенний периоды преобладает ветер СЗ направления (46–59 %), ЮЗ направление составляет около 30 %.

– В летний период на всей высоте рассматриваемого слоя преобладает ЮЗ ветер (40,2 %), СЗ направление ветра составляет 32,8 %.

– В осенний период процентное соотношение СЗ и ЮЗ ветров одинаково и составляет 44 %.

Таблица 12 – Повторяемость направлений ветра (%) в слоях максимальной скоростью ветра

| Высота (км) | Зимний период | | | | | | | |
|----------------|-----------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 7 | 1,7 | 12,4 | 0,7 | 7,4 | 0,1 | 19,7 | 3,1 | 54,9 |
| 8 | 1,3 | 10,4 | 0,2 | 6,0 | 0,2 | 21,2 | 2,7 | 58,0 |
| 9 | 1,1 | 8,0 | 0,3 | 4,2 | 0,1 | 21,1 | 3,6 | 61,6 |
| 10 | 0,5 | 5,4 | 0,2 | 3,3 | 0,1 | 23,2 | 3,8 | 63,5 |
| 11 | 0,8 | 2,8 | 0,1 | 2,5 | 0,0 | 25,6 | 5,0 | 63,2 |
| 12 | 0,0 | 1,7 | 0,0 | 1,3 | 0,0 | 30,0 | 6,5 | 60,5 |
| 13 | 0,0 | 0,4 | 0,6 | 2,5 | 0,2 | 34,7 | 6,0 | 55,6 |
| 14 | 0,1 | 0,6 | 0,0 | 1,8 | 0,0 | 41,4 | 5,7 | 50,4 |
| | Весенний период | | | | | | | |
| 7 | 1,6 | 13,1 | 0,1 | 9,6 | 0,8 | 29,3 | 2,8 | 42,7 |
| 8 | 2,0 | 10,6 | 0,1 | 8,7 | 0,6 | 29,2 | 2,9 | 45,9 |
| 9 | 1,1 | 9,8 | 0,2 | 8,1 | 0,5 | 30,9 | 2,9 | 46,5 |
| 10 | 1,5 | 8,0 | 0,3 | 7,6 | 0,4 | 31,6 | 4,1 | 46,5 |
| 11 | 0,8 | 5,8 | 0,0 | 4,3 | 0,4 | 33,4 | 5,4 | 49,9 |
| 12 | 2,2 | 4,9 | 0,1 | 2,6 | 0,4 | 38,2 | 4,8 | 46,8 |
| 13 | 1,3 | 3,3 | 0,2 | 2,1 | 0,3 | 36,4 | 7,8 | 48,6 |
| 14 | 4,1 | 1,9 | 0,0 | 3,0 | 0,2 | 43,7 | 4,4 | 42,7 |
| | Летний период | | | | | | | |
| 7 | 2,2 | 13,9 | 0,7 | 17,1 | 0,8 | 33,5 | 2,0 | 29,8 |
| 8 | 1,4 | 13,8 | 0,2 | 17,3 | 0,4 | 36,4 | 1,8 | 28,7 |
| 9 | 1,3 | 12,2 | 0,8 | 15,3 | 0,6 | 38,4 | 1,9 | 29,5 |
| 10 | 1,3 | 11,1 | 1,1 | 13,5 | 1,3 | 39,0 | 1,8 | 30,9 |
| 11 | 1,0 | 9,9 | 0,5 | 11,9 | 0,9 | 40,2 | 2,4 | 33,2 |
| 12 | 1,1 | 8,5 | 0,3 | 9,6 | 0,5 | 44,4 | 2,8 | 32,8 |
| 13 | 1,6 | 5,6 | 0,2 | 6,0 | 0,3 | 44,8 | 3,8 | 37,7 |
| 14 | 1,8 | 3,7 | 0,0 | 5,0 | 0,5 | 45,4 | 3,9 | 39,7 |

| Осенний период | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 7 | 1,1 | 7,9 | 0,4 | 3,8 | 0,5 | 36,4 | 3,5 | 46,4 |
| 8 | 0,8 | 8,2 | 0,4 | 4,2 | 0,6 | 35,5 | 2,9 | 47,4 |
| 9 | 0,7 | 6,4 | 0,3 | 3,9 | 0,2 | 37,2 | 4,3 | 47,0 |
| 10 | 0,6 | 5,0 | 0,1 | 3,2 | 0,4 | 40,1 | 4,3 | 46,3 |
| 11 | 0,6 | 3,0 | 0,0 | 1,7 | 0,1 | 43,5 | 5,6 | 45,5 |
| 12 | 0,2 | 1,1 | 0,0 | 1,3 | 0,2 | 49,9 | 4,4 | 42,9 |
| 13 | 0,1 | 0,4 | 0,0 | 0,4 | 0,2 | 50,3 | 6,6 | 42,0 |
| 14 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 0,2 | 58,5 | 4,8 | 35,9 |

По результатам анализа характеристик в свободной атмосфере над территорией космодрома «Восточный» получено:

1. Максимальные значения скорости ветра наблюдаются в слое 7–14 км.
2. Месяцами с минимальной повторяемостью опасных скоростей ветра (6–9 %) являются июнь и июль, месяцами с высокой повторяемостью: февраль, октябрь и ноябрь (18–21 %).
3. Опасные скорости ветра формируются, в половине всех случаев на фоне северо-западного переноса.
4. Высота и скорость максимального ветра за последнее 30 лет имели тенденцию к повышению.
5. Месяцы, рекомендуемые для пусков ракет космического назначения (только с учетом профиля скорости ветра): июнь, июль и август.

3.3 Характеристики сдвига ветра

Информацией, выявляющей особенности сдвига ветра в районе исследования, послужили данные аэрологической станции Благовещенск. Материалы систематизировались за срок 00 ч ВСВ за период 1985–2014 гг. Была отобрана информация о характеристиках ветра (скорость, направление) по слоям атмосферы до высоты 25 км.

Сдвиг ветра, представляющий собой изменение вектора ветра от одной точки пространства до другой, выражается разностью между векторами ветра в

двух точках. Интенсивность сдвига ветра рассчитывается путем деления разности между векторами в двух точках на расстояние между ними (формула 2).

Исходя из полученных результатов о средних и максимальных значениях сдвигов ветра, можно отметить следующее:

– слабые и умеренные сдвиги ветра отмечались в слоях от 3 до 5 км и от 15 до 20 км. Наибольшее число дней со слабыми и умеренными сдвигами ветра приходится на летний период (рисунок 27–30);

– максимальное число сильных и очень сильных сдвигов ветра зарегистрировано в слоях 0,5–2 км и 8–12 км (рисунок 27–30);

– пики интенсивности очень сильных сдвигов ветра приходятся на месяцы: декабрь, февраль, апрель, октябрь и ноябрь;

– наименьшее число дней очень сильных сдвигов ветра наблюдается в июле.

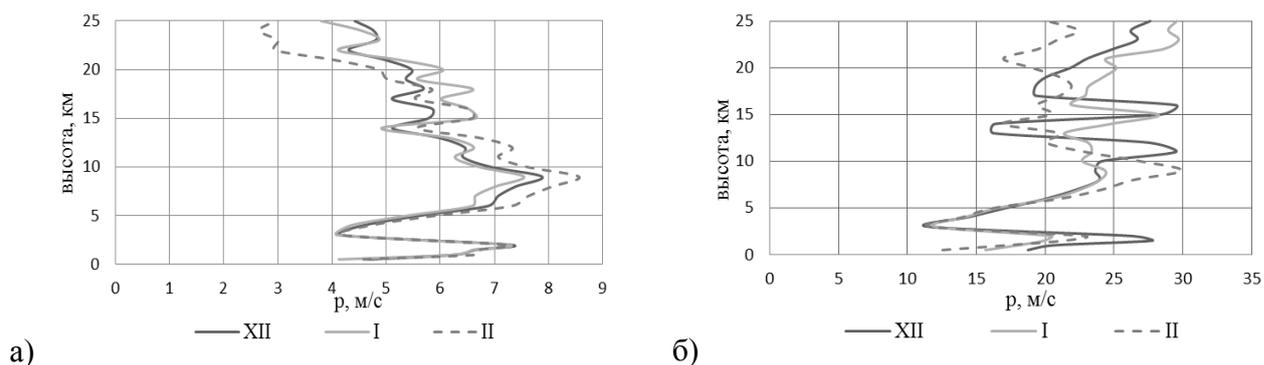


Рисунок 27 – Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах в зимний сезон

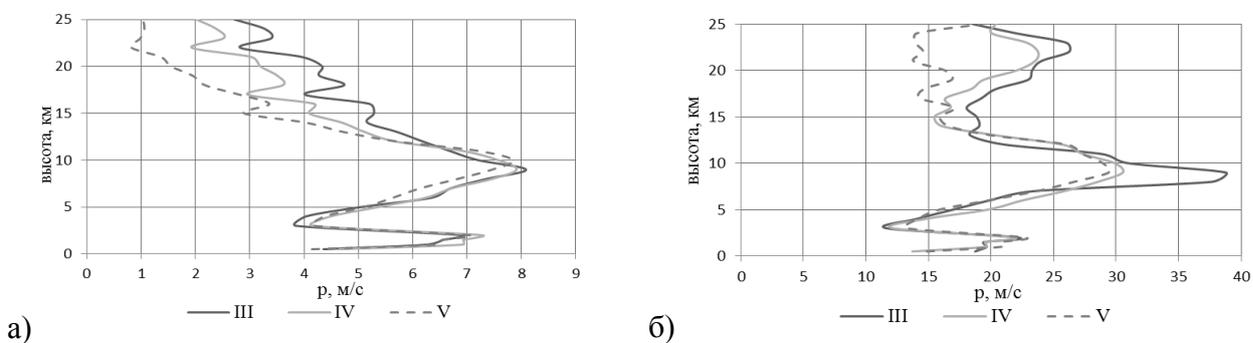


Рисунок 28 – Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах в весенний сезон

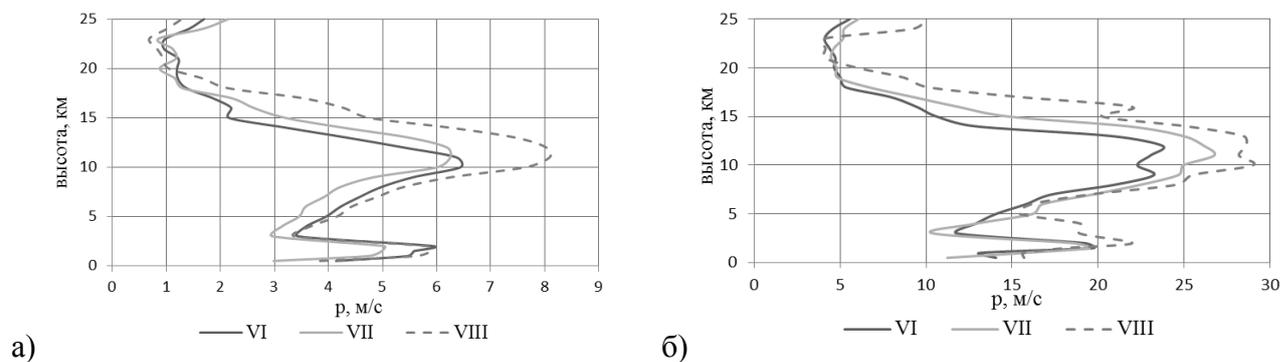


Рисунок 29– Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах в летний сезон

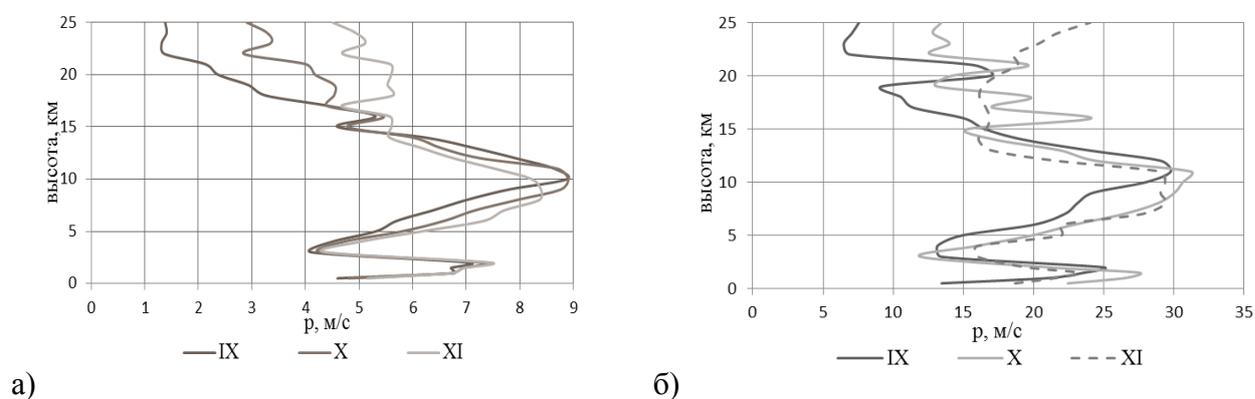


Рисунок 30 – Распределение интенсивности среднего (а) и максимального (б) сдвигов ветра на высотах в осенний сезон

В слое с максимальным сдвигом ветра (0,5–2 км) в течение всего года преобладают ветра СЗ направлений (таблица 13).

Таблица 13 – Повторяемость направлений ветра (%) в слоях с максимальным сдвигом

| Высота (км) | Зимний период | | | | | | | |
|-----------------|---------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 | 23,3 | 4,6 | 0,5 | 2,2 | 0,1 | 4,6 | 2,0 | 62,7 |
| 0,5 | 2,7 | 16,9 | 0,1 | 4,2 | 0,1 | 10,3 | 0,5 | 65,2 |
| 1,0 | 2,9 | 17,6 | 0,1 | 3,7 | 0,3 | 12,8 | 1,3 | 61,3 |
| 1,5 | 1,8 | 15,7 | 0,2 | 3,5 | 0,2 | 13,8 | 1,3 | 63,5 |
| 2,0 | 1,3 | 15,0 | 0,6 | 3,6 | 0,2 | 11,9 | 1,3 | 66,1 |
| Весенний период | | | | | | | | |
| 0 | 23,2 | 9,1 | 0,7 | 11,0 | 0,3 | 7,8 | 2,5 | 45,4 |
| 0,5 | 3,0 | 19,5 | 0,7 | 11,3 | 0,7 | 16,8 | 1,1 | 46,9 |
| 1,0 | 3,3 | 17,6 | 0,6 | 11,6 | 0,4 | 21,8 | 0,7 | 44,0 |
| 1,5 | 3,3 | 18,8 | 0,6 | 11,0 | 0,5 | 20,8 | 0,8 | 44,2 |

| Высота (км) | Весенний период | | | | | | | |
|----------------|-----------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 2,0 | 1,8 | 16,9 | 0,4 | 10,1 | 0,5 | 21,3 | 1,2 | 47,8 |
| Летний период | | | | | | | | |
| 0 | 28,6 | 11,9 | 2,6 | 16,2 | 0,6 | 10,5 | 1,8 | 27,8 |
| 0,5 | 3,6 | 23,0 | 0,5 | 23,0 | 0,9 | 20,6 | 0,8 | 27,6 |
| 1,0 | 2,1 | 20,1 | 1,2 | 26,0 | 0,7 | 25,5 | 1,2 | 23,2 |
| 1,5 | 2,3 | 19,2 | 0,6 | 24,9 | 0,6 | 28,7 | 1,1 | 22,6 |
| 2,0 | 1,9 | 18,5 | 0,8 | 23,7 | 0,6 | 28,1 | 1,0 | 25,4 |
| Осенний период | | | | | | | | |
| 0 | 21,6 | 5,3 | 1,1 | 8,5 | 0,8 | 10,3 | 2,5 | 49,9 |
| 0,5 | 2,0 | 13,5 | 0,3 | 8,5 | 0,5 | 22,4 | 1,2 | 51,6 |
| 1,0 | 1,8 | 12,7 | 0,1 | 7,3 | 0,3 | 27,8 | 2,3 | 47,7 |
| 1,5 | 1,4 | 11,3 | 0,2 | 5,1 | 0,6 | 30,1 | 1,9 | 49,4 |
| 2,0 | 0,9 | 8,8 | 0,2 | 4,3 | 0,4 | 29,9 | 2,3 | 53,2 |

Рассмотрим повторяемость значений сдвига ветра по градациям (%) на высотах с наибольшими значениями (таблица 14). Во все месяцы в слое от земли до 2 км преобладает умеренный, сильный и очень сильный сдвиг ветра. Максимальная повторяемость сильного сдвига ветра приходится на февраль и ноябрь, на всех высотах она равна примерно 57–60 %. Чуть меньше опасных сдвигов ветра приходится на декабрь, апрель и октябрь.

Таблица 14 – Повторяемость значений сдвига ветра по градациям (%)

| Высота км | Сдвиг ветра ρ , м/с | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|-------|
| | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 |
| | XII | | | I | | | II | | |
| 0 | 21 | 22 | 42 | 22 | 24 | 37 | 20 | 24 | 45 |
| 0,5 | 10 | 20 | 60 | 11 | 21 | 61 | 9 | 23 | 63 |
| 1,0 | 6 | 19 | 68 | 9 | 19 | 64 | 6 | 23 | 64 |
| 1,5 | 4 | 15 | 73 | 6 | 15 | 72 | 4 | 16 | 75 |
| 2,0 | 22 | 35 | 35 | 21 | 36 | 33 | 19 | 37 | 37 |
| | III | | | IV | | | V | | |
| 0 | 16 | 22 | 43 | 16 | 26 | 45 | 21 | 27 | 36 |
| 0,5 | 11 | 18 | 61 | 7 | 18 | 66 | 11 | 21 | 59 |
| 1,0 | 8 | 22 | 62 | 6 | 20 | 66 | 10 | 22 | 60 |
| 1,5 | 6 | 19 | 69 | 4 | 18 | 71 | 8 | 17 | 67 |
| 2,0 | 25 | 37 | 27 | 23 | 35 | 33 | 23 | 35 | 32 |
| | VI | | | VII | | | VIII | | |
| 0 | 26 | 28 | 29 | 27 | 26 | 18 | 23 | 27 | 29 |
| 0,5 | 17 | 25 | 49 | 19 | 27 | 41 | 17 | 24 | 49 |

| Высота км | Сдвиг ветра ρ , м/с | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|-------|
| | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 | 1,25–3 | 3,0–5,0 | > 5,0 |
| | VI | | | VII | | | VIII | | |
| 1,0 | 13 | 24 | 54 | 16 | 24 | 47 | 14 | 27 | 51 |
| 1,5 | 9 | 22 | 60 | 12 | 26 | 47 | 10 | 24 | 56 |
| 2,0 | 30 | 35 | 23 | 36 | 32 | 15 | 33 | 36 | 19 |
| | IX | | | X | | | XI | | |
| 0 | 23 | 26 | 43 | 16 | 24 | 45 | 16 | 30 | 44 |
| 0,5 | 10 | 20 | 63 | 10 | 19 | 63 | 8 | 20 | 66 |
| 1,0 | 11 | 20 | 63 | 8 | 21 | 63 | 5 | 16 | 72 |
| 1,5 | 6 | 20 | 68 | 5 | 15 | 73 | 4 | 13 | 79 |
| 2,0 | 24 | 38 | 33 | 20 | 34 | 38 | 19 | 36 | 40 |

Таким образом, о характеристиках сдвига ветра в районе космодрома «Восточный» можно сказать следующее:

1. Максимальное число сильных и очень сильных сдвигов ветра наблюдается в слоях 0,5–2 км и 8–12 км.

2. В слое с максимальным сдвигом ветра (0,5–2 км) в течение всего года преобладают ветра СЗ. В слое 8–12 км зимой и весной преобладает СЗ направление ветра, летом ЮЗ, осенью процентное соотношение преобладания СЗ и ЮЗ направления ветра одинаково.

3. Пик интенсивности очень сильных сдвигов ветра приходится на месяцы: декабрь, февраль, апрель, октябрь и ноябрь.

4. Благоприятные месяцы для пусков ракет космического назначения: июль и август.

При изучении характеристик ветра у поверхности земли и в свободной атмосфере в районе космодрома «Восточный» было получено:

1. Над территорией космодрома «Восточный», скорость приземного ветра имеет тенденцию к уменьшению на 0,7 м/с/10 лет.

2. Максимальные значения скорости ветра наблюдаются на высотах 7–14 км.

3. В слое с максимальными значениями скорости ветра в зимний и весенний периоды преобладает ветер СЗ направления, в летний преобладает ЮЗ

ветер, в осенний период процентное соотношение СЗ и ЮЗ ветров одинаково. В целом замечено, что опасные скорости ветра формируются, в половине всех случаев на фоне северо-западного переноса.

4. Максимальные сдвиги ветра наблюдается в слоях 0,5–2 км и 8–12 км.

5. В течение всего года в слое с максимальным сдвигом ветра (0,5–2 км) преобладают ветра СЗ направлений: в зимний период (63,8 %), в весенний период (45,7 %), в летний период (25,3 %), в осенний период (50,3 %).

6. Проанализировав характеристики ветра (скорость, направление, сдвиг ветра) самыми благоприятными месяцами для запусков ракет космического назначения над территорией космодрома «Восточный» являются: июнь, июль, и август.

4 ТЕНДЕНЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА НАД РАЙОНАМИ КОСМОДРОМОВ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

4.1 Реанализ NCEP/NCAR

Реанализ NCEP/NCAR – это совместный проект американских Национальных Центров Предсказания Окружающей Среды (National Centers for Environmental Prediction – NCEP) и Национального Центра Изучения Атмосферы (National Center for Atmospheric Research – NCAR).

Цель проекта – создание массивов данных состояния атмосферы, используя исторические данные, а также анализ текущего состояния атмосферы. Усилия кооперации NCEP/NCAR направлены на сбор сухопутных, судовых, радиовеетровых, шаропилотных, самолетных, спутниковых и других данных. Для контроля качества и ассимиляции этих данных используется система CDAS (Система усвоения климатических данных – Climate Data Assimilation System), которая остаётся неизменной на протяжении всего периода реанализа [110].

В реанализе используется сетка пространственного разрешения $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, 17 вертикальных уровней от 1000 до 10 гПа в стандартные 6-часовые сроки, за период 1948–2014 гг.

Основные усвояемые данные наблюдений следующие:

- радиозондовые наблюдения за температурой, горизонтальным ветром и удельной влажностью верхних слоёв атмосферы;
- температурное зондирование над сушей;
- ветер, определяемый по перемещению облачности с геостационарных спутников;
- авиационные наблюдения за ветром и температурой;
- поверхностные данные (с суши и моря) наблюдений за давлением, температурой, горизонтальным ветром и удельной влажностью [111].

Для выявления долгопериодных тенденций в характеристиках ветра над районами Казахстана и Амурской области результаты фактических характеристик

ветра сравнивались с данными реанализа NCEP-NCAR. Архивы реанализов широко используются в научных исследованиях подобного рода [17, 42, 43, 81,115].

4.2 Сравнение данных аэрологического зондирования и данных реанализа NCEP/NCAR

Характеристики скорости ветра от поверхности земли до 25 км на космодромах «Байконур» и «Восточный» представлены в Приложении 6, Таблица 6.1. Значение σ во всем рассматриваемом слое, на обоих космодромах велико, что свидетельствует о неустойчивости средних значений. Выделить месяцы с относительно устойчивыми значениями исследуемой характеристики оказалось практически невозможным.

В целом для запусков РКН с космодромов «Байконур» и «Восточный» опасны слои 0,5-2 км (пограничный слой) и 8-14 км (верхняя тропосфера) (что изложено в Главе 2 и Главе 3). Актуально знание особенностей ветра и в слое 14-20 км (нижняя стратосфера), который является важным при полете РКН и постоянно контролируется специалистами метеорологической службы [48, 49, 53, 54].

Полученную многолетнюю динамику характеристик ветра по данным аэрологического зондирования (1985-2014 гг.) сравним с данными реанализа (1985-2014 гг.) в двух точках: станция Байконур (45° 57' 58" N, 63° 18' 28" E) и Благовещенск (50° 15' 28" N, 127° 32' 11" E). Возможность сравнения обусловлена тем, что точность измерения характеристик ветра [85] варьирует: для скорости ветра от $\pm 0,05$ м/с до $\pm 0,2$ м/с, а для направления от $\pm 1\%$ до $\pm 3\%$.

В таблице 15 представлены среднесезонные значения скорости ветра и их σ по данным аэрологического зондирования и данных реанализа. Среднегодовые значения скорости ветра демонстрируют убедительное соответствие результатов аэрологического зондирования и данных реанализа. Из общей картины над территорией космодрома «Байконур» выбивается весенний сезон (разница 1-3

м/с), над территорией космодрома «Восточный» зимний и весенний сезоны (разница 1-2 м/с). Среднее квадратическое отклонение данных реанализа в несколько раз меньше, чем данных аэрологического зондирования, что говорит, о необходимости осторожного подхода к оценке вариативности данных при численном моделировании характеристик ветра. Сравнение средних значений по критерию Пирсона статистически значимых расхождений не обнаружило. Следовательно, можно ожидать, что данные реанализа NCEP/NCAR позволяют выявить наличие или отсутствие долговременных тенденций в характеристиках ветра над исследуемыми районами.

Таблица 15 – Средние значения скорости ветра и среднее квадратическое отклонение по аэрологическим данным (B_a – «Байконур»; V_a – «Восточный») и данным реанализа (B_p – «Байконур»; V_p – «Восточный») за период 1985-2014 гг.

| Слой (км) | Средняя сезонная скорость ветра (м/с)/ σ | | | | | | | | | |
|--------------|---|--------|--------------|--------|----------------|--------|--------------|--------|---------------|--------|
| | Год | | Зимний сезон | | Весенний сезон | | Летний сезон | | Осенний сезон | |
| | B_a | B_p | B_a | B_p | B_a | B_p | B_a | B_p | B_a | B_p |
| 0,5-2 | 9/4 | 8/0,6 | 9/5 | 8/0,7 | 8/4 | 8/0,5 | 7/4 | 7/0,6 | 8/4 | 7/0,6 |
| 7-10 | 18/10 | 19/1,3 | 18/11 | 19/2 | 20/11 | 18/2,2 | 17/9 | 18/2,6 | 21/9,5 | 19/2,3 |
| 10-14 | 23/11 | 23/1,9 | 20/8,6 | 21/2,3 | 23/11 | 20/2,8 | 27/16 | 27/4 | 22/10 | 23/3 |
| 14-20 | 16/6,5 | 15/1,5 | 20/9 | 20/3,5 | 15/7 | 13/2,2 | 12/5 | 10/1,5 | 17/5,5 | 16/2 |
| | V_a | V_p | V_a | V_p | V_a | V_p | V_a | V_p | V_a | V_p |
| 0,5-2 | 7/4 | 7/0,4 | 7/4 | 7/0,5 | 8/4 | 7/0,4 | 6/4 | 6/0,4 | 7/4 | 8/0,5 |
| 7-10 | 20/11 | 19/1,3 | 21/11 | 20/2,2 | 22/13 | 21/2,2 | 16/10 | 15/1,9 | 22/12 | 22/2,1 |
| 10-14 | 19/10 | 19/1,3 | 20/9 | 20/2,5 | 18/10 | 20/2,5 | 16/10 | 17/2,7 | 21/9 | 22/2,5 |
| 14-20 | 15/7 | 14/2,2 | 22/9 | 21/3,5 | 14/8 | 13/2,5 | 7/4 | 7/0,9 | 16/6 | 17/2 |

В результате этого этапа исследования, получено:

1. Среднегодовые значения скорости ветра демонстрируют убедительное соответствие результатов аэрологического зондирования и данных реанализа (разница составляет 1 м/с).

2. Данные реанализа NCEP/NCAR могут быть в дальнейшем использованы для исследований подобного рода и выявлении многолетних тенденций в характеристиках ветра.

4.3 Тенденции скорости и направления ветра по данным реанализа NCEP/NCAR за период 1948-2014 гг.

4.3.1 Космодром «Байконур»

Анализ характеристик ветра (таблица 16) представленных по данным реанализа, свидетельствует, что скорость ветра над территорией космодрома «Байконур» в пограничном слое (0,5-2 км) меняется не значительно. В слое 3-20 км прослеживается статистически значимая тенденция увеличения скорости ветра (в среднем от 0,1 до 0,5 м/с/10 лет).

Таблица 16 – Коэффициенты многолетних трендов скорости и направления ветра по данным реанализа космодром «Байконур», за период 1948-2014 гг.

| Слой | Коэффициенты многолетних трендов скорости ветра (м/с за 10 лет) | | | | |
|--|--|-----------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| | Год | Зимний сезон | Весенний сезон | Летний сезон | Осенний сезон |
| 0,5-2 | -0,01 | 0,01 | <i>0,1</i> | <i>-0,1</i> | -0,04 |
| 7-10 | 0,17 | 0,27 | <i>0,45</i> | -0,03 | -0,04 |
| 10-14 | <i>0,26</i> | <i>0,4</i> | <i>0,53</i> | 0,11 | -0,28 |
| 14-20 | <i>0,5</i> | <i>0,48</i> | <i>0,54</i> | <i>-0,14</i> | -0,02 |
| Преобладающее направление ветра и тренд (‰ за 10 лет) | | | | | |
| 0,5-2 | ВСВ-3 0,01 | В-ЗЮЗ <i>-0,05</i> | В-З 0,02 | СВ <i>-0,14</i> | В-З <i>-0,02</i> |
| 7-10 | 3 | ЗЮЗ | ЗЮЗ | 3 | 3 |
| | - | - | - | - | - |
| 10-14 | 3 <i>0,04</i> | 3 <i>0,17</i> | 3 <i>0,05</i> | 3 | 3 |
| 14-20 | 3 <i>0,12</i> | 3 <i>0,43</i> | 3 <i>0,12</i> | 3 | 3 |
| <i>Примечание: полужирным курсивом выделены значения значимые с вероятностью не менее 95 %; знаком «-» показано отсутствие статистически значимых трендов.</i> | | | | | |

Сравнивая полученные результаты с данными аэрологического зондирования, полученными для 23 станций европейско-азиатского севера России [82] можно заметить, что для территории космодрома «Байконур» в слое около 1,5 км скорость ветра так же практически не меняется. Более того, над космодром «Байконур» в слоях около 5 и 9 км как и в [71] наблюдается положительная

статистически значимая тенденция к увеличению скорости ветра (в среднем на 0,2 м/с/10 лет).

Поскольку большая часть переносов пусков по метеорологическим условиям на космодроме «Байконур» приходится на декабрь и январь [48], рассмотрим характеристики ветра в эти месяцы более детально (рисунок 31).

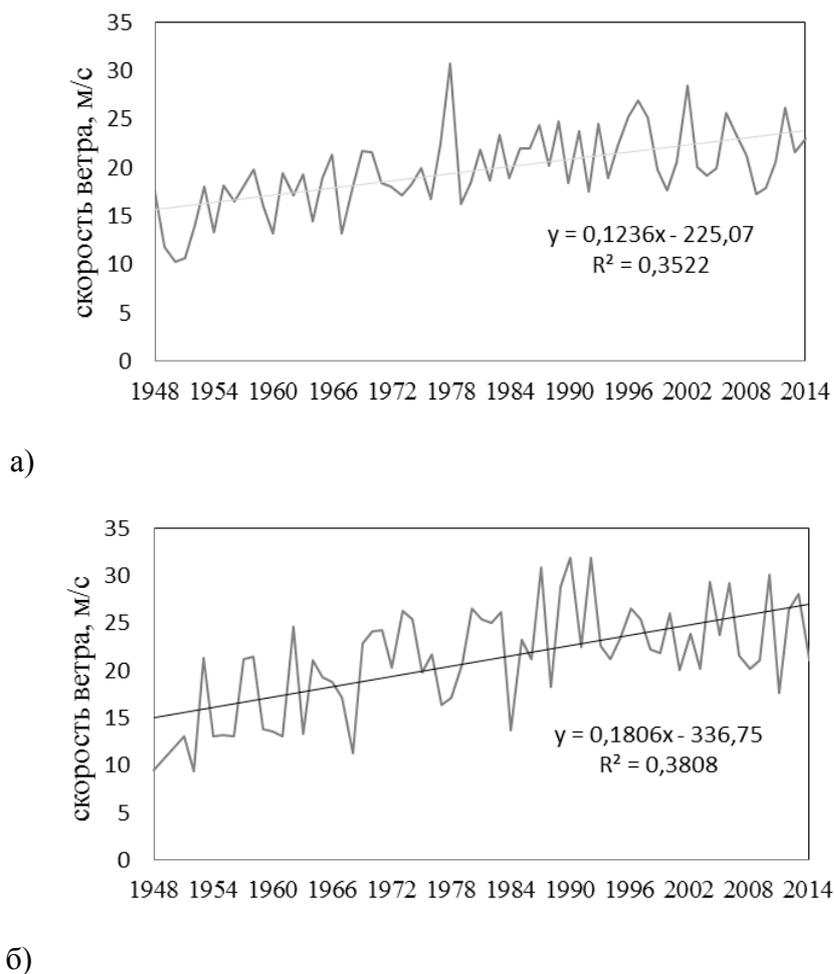


Рисунок 31 – Интегральные характеристики ветра и их динамика над территорией космодрома «Байконур» в декабре (а) и январе (б) (слой 18-20 км)

По результатам реанализа NCEP/NCAR в декабре и январе (рисунок 31), в слое 18-20 км, наблюдается максимальный положительный статистически значимый тренд скорости ветра 1,2-1,4 м/с/10 лет (декабрь) и 1,7-2 м/с/10 лет (январь).

С середины 1970-х годов замечено усиление зонального переноса [29, 30, 87], которое можно обнаружить и в данных реанализа, для территории космодрома «Байконур» в слое 10-20 км.

Анализ характеристик ветра (таблица 15) демонстрирует, что в пограничном слое над территорией космодрома «Байконур» ветер меняется от ВСВ до З. В слое 7-14 км преобладает западное направление ветра (тренд составляет 0,04 %/10 лет). В слое 14-20 км преобладание западных ветров сохраняется и составляет в среднем 0,15 %/10 лет. Полученные результаты подтверждают вывод об общем увеличении числа дней, с западной составляющей ветра в верхней тропосфере и нижней стратосфере [95].

4.3.2 Космодром «Восточный»

Анализ характеристик ветра (таблица 17) представленных по данным реанализа, свидетельствует, что скорость ветра над территорией космодрома «Восточный» в пограничном слое (0,5-2 км) меняется не значительно, так же как и для космодрома «Байконур». В слое около 3-5,5 км наблюдается статистически значимый тренд скорости ветра (0,1 м/с/10 лет). В слое 5,5-8 км скорость ветра не меняется, в слое около 9 км наблюдается положительный тренд скорости ветра, в слое 10-16 км скорость ветра постоянна и с 16 км наблюдается повсеместно статистически значимая тенденция увеличения скорости ветра (в среднем на 0,4 м/с/10 лет).

Таблица 17 – Коэффициенты многолетних трендов скорости и направления ветра по данным реанализа космодром «Восточный», за период 1948-2014 гг.

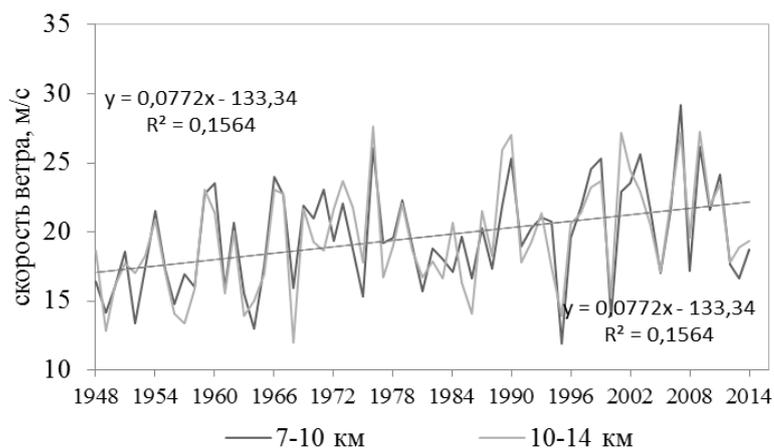
| Слой | Коэффициенты многолетних трендов скорости ветра (м/с за 10 лет) | | | | |
|-------|--|--------------|----------------|--------------|---------------|
| | Год | Зимний сезон | Весенний сезон | Летний сезон | Осенний сезон |
| 0,5-2 | 0,02 | -0,03 | 0,02 | 0,03 | -0,02 |
| 7-10 | 0,19 | 0,43 | -0,4 | -0,-3 | 0,36 |
| 10-14 | 0,09 | 0,37 | -0,25 | -0,4 | 0,29 |
| 14-20 | 0,36 | 0,73 | 0,34 | 0,22 | 0,38 |

| Слой | Преобладающее направление ветра и тренд (‰ за 10 лет) | | | | |
|-------|--|------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| | ССЗ | ССЗ | ССЗ | Ю | СЗ |
| 0,5-2 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | -0,16 | 0,07 |
| 7-10 | 3 -0,08 | СЗЗ - | 3 -0,16 | 3 -0,18 | 3 - |
| 10-14 | 3 -0,09 | ЗСЗ - | 3 -0,1 | ЗЮЗ -0,08 | 3 - |
| 14-20 | 3 0,1 | 3 0,19 | 3 - | 3 - | 3 0,23 |

Примечание: полужирным курсивом выделены значения значимые с вероятностью не менее 95 %; знаком «-» показано отсутствие статистически значимых трендов.

Сравнивая полученные выводы с результатами, полученными для европейско-азиатского севера России можно заметить, что для слоя около 9 км в среднегодовых значениях, как и в [71] наблюдается положительная статистически значимая тенденция к увеличению скорости ветра (в среднем на 0,2 м/с/10 лет).

В результате предварительного исследования (см. Главу 3) определены слои с максимальной скоростью и повторяемостью максимальных значений скорости ветра (7-14 км) в районе космодрома «Восточный». При детальном рассмотрении данного слоя, были выявлены месяцы (февраль, май и сентябрь) с максимальными трендами скорости ветра (рисунок 32).



a)

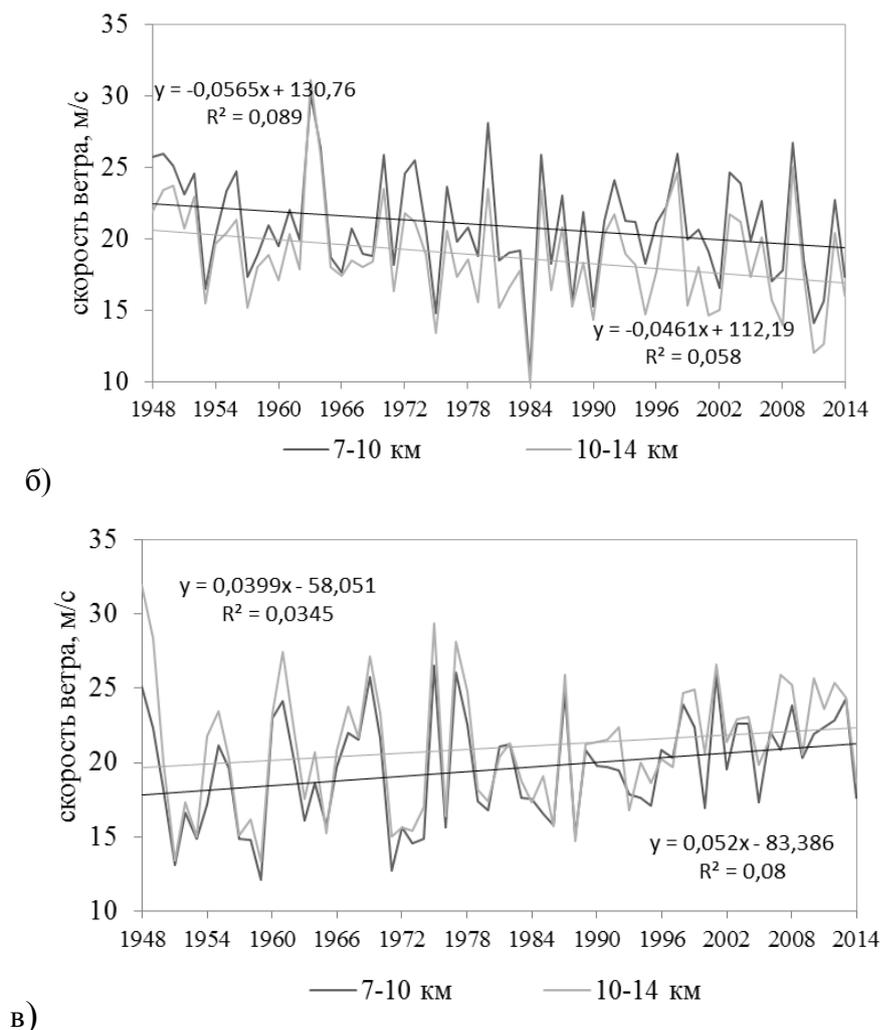


Рисунок 32 – Интегральные характеристики ветра и их динамика над территорией космодрома «Восточный» в феврале (а), мае (б) и сентябре (в) (слой 7-14 км)

Так в феврале и сентябре наблюдается максимальный положительный статистически значимый тренд скорости ветра 0,5-0,8 м/с/10 лет, причем за счет усиления меридионального переноса (его ЗСЗ составляющей). В мае максимальный отрицательный значимый тренд скорости ветра (-0,5 м/с/10 лет) наблюдается за счет ослабления западного переноса.

На фоне общей тенденции увеличения скорости ветра в феврале и сентябре можно заметить наличие некоторой квазициклической составляющей. При помощи автокорреляционной функции, обнаружено, что статистически значимыми с вероятностью 95 % являются циклы продолжительностью 13 лет и 24 года, как в среднегодовом значении скорости ветра, так и в месячном. Однако этот результат можно считать предварительным, так как для обнаружения циклов

необходимы ряды более длительных (более 60 лет) наблюдений за скоростью ветра.

Согласно [81] с середины 1970-х годов на территории Российской Федерации замечено усиление зонального переноса. По данным настоящих исследований в районе космодрома «Восточный» в слое 7-14 км в среднем годовом масштабе преобладает западный ветер, но с отрицательным значимым трендом ($-0,1\%/10$ лет). Однако в нижней стратосфере (в слое 14-20 км) над исследуемой территорией отчетливо прослеживается тренд усиления ветров западного направления в среднем на $0,15\%/10$ лет (причем все значения трендов являются значимыми).

В результате исследований, выявлено:

1. Прослеживается динамика увеличения скорости ветра в верхней тропосфере и нижней стратосфере над территорией космодрома «Байконур» (на $0,5$ м/с/10 лет) и «Восточный» (на $0,4$ м/с/10 лет).

2. В некоторых слоях выявлена динамика значимых отрицательных значений трендов скорости ветра:

- Над территорией космодрома «Байконур» в сентябре в слое 16-25 км ($-0,3$ м/с/10 лет), в июле и августе в слое 19-21 км ($-0,2$ м/с/10 лет), в октябре на высоте 14 км ($-0,5$ м/с/10 лет). При этом ослабевает зональная составляющая ($-0,16\%/10$ лет).

- Над территорией космодрома «Восточный» в мае на высотах 7-14 км ветер уменьшается на $-0,5$ м/с/10 лет, в июне и июле на высотах 14-18 км на $-0,3$ м/с/10 лет. При этом во все месяцы наблюдается ослабление западной составляющей (в среднем на $-0,21\%/10$ лет) за счет увеличения северных направлений в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Это происходит по видимому потому, по той причине, что над Дальневосточным регионом наблюдается ячейка обратной меридиональной циркуляции, которая характеризуется в летние месяцы южными потоками в слое от подстилающей поверхности до уровня 2-3 км и северными потоками в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

4.3.3 Характеристика зонального и меридионально переносов, над территориями космодромов в нижней тропосфере

Сравним полученные результаты по характеристиками величин зонального и меридионального переносов с результатами [17].

Авторы [17] анализируют соотношение зональной и меридиональной составляющей скорости ветра в пределах 60-92.5 °в.д. и 50-70 ° с.ш. за период с 1957-2002 гг., на изобарических поверхностях 850 гПа, 500 гПа и 200 гПа. В результате исследований, авторы, отмечают наличие ярко выраженных отрицательных значений тренда зональной составляющей скорости ветра к концу исследуемого периода, причем во всей толще тропосферы. Это говорит о том, что к концу периода исследований междуширотный обмен усиливался, причем особенно заметно в переходные месяцы года: в марте и сентябре [17].

Сравним соотношение меридиональной и зональной составляющих в районе космодромов «Байконур» и «Восточный» на изобарических поверхностях 850 гПа и 500 гПа по сезонам (таблица 18 и таблица 19).

Таблица 18 – Коэффициенты многолетних трендов по данным реанализа космодрома «Байконур», за период 1948-2014 гг.

| Изобарические поверхности (гПа) | Зима | Весна | Лето | Осень |
|---|---|--------------------|-------------------|--------------------|
| | Преобладающее направление ветра и тренд (‰ за 10 лет) | | | |
| 850 | ЮЗ (0,06) | ЮЗ (0,1) | З (0,09) | ЮЗ (0,08) |
| 500 | СЗ (0,05) | ЮЗ (0,07) | З (0,06) | ЮЗ (0,06) |
| <i>Примечание: полужирным курсивом выделены значения значимые с вероятностью не менее 95 %.</i> | | | | |

Над территорией космодрома «Байконур» в нижней тропосфере фиксируется положительный значимый тренд увеличения ЮЗ переноса (таблица 18).

Таблица 19 – Коэффициенты многолетних трендов по данным реанализа космодрома «Восточный», за период 1948-2014 гг.

| Изобарические поверхности (гПа) | Зима | Весна | Лето | Осень |
|---|---|-----------------|-------------------|------------------|
| | Преобладающее направление ветра и тренд (‰ за 10 лет) | | | |
| 850 | СЗ (0,2) | С (0,05) | ССВ (0,1) | СЗ (0,08) |
| 500 | СЗЗ (0,05) | С (0,05) | ССЗ (0,11) | ССЗ (0,05) |
| <i>Примечание: полужирным курсивом выделены значения значимые с вероятностью не менее 95 %.</i> | | | | |

Над территорией космодрома «Восточный» в нижней тропосфере положительный значимый тренд усиления С и СЗ направлений ветра (таблица 19).

В результате проведенных сравнений, можно сказать, что над территорией космодромов «Байконур» и «Восточный» в нижней тропосфере прослеживается усиление межширотного обмена, аналогично [17].

5 ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕКЦИИ В РАЙОНЕ КОСМОДРОМОВ

5.1 Динамика грозовой активности в районе космодромов «Байконур» и «Восточный»

5.1.1 Космодром Байконур»

Для выявления особенностей грозовой активности в районе космодрома «Байконур» послужили данные о числе гроз систематизированные за период с 1956 по 2013 годы включительно. В результате анализа грозовой активности в районе космодрома «Байконур» были сделаны следующие выводы: наиболее активная грозовая деятельность с июня по август; среднее многолетнее число дней с грозой: 3,1 – в июне, 2,8 – в июле, 1,7 – в августе (рисунок 33).

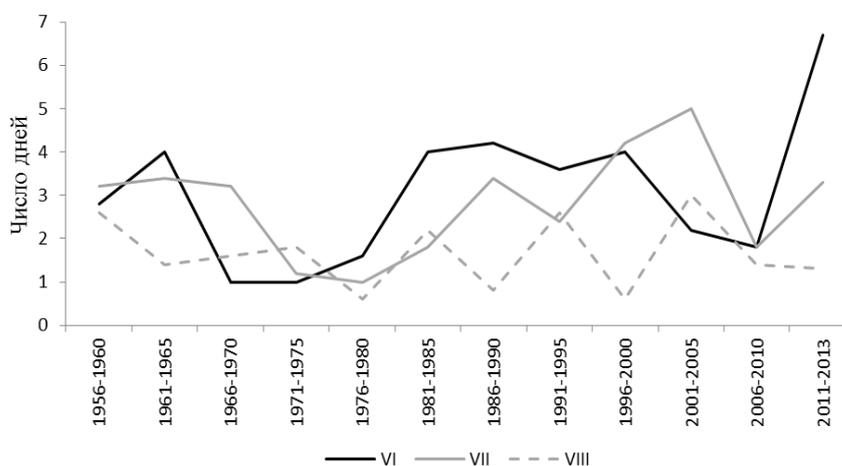


Рисунок 33 – Среднее число дней с грозой в июне, июле и августе за период 1956-2013 гг.

Рассмотрим среднее число дней с грозой по месяцам и в целом за год с 1956 – 2013 гг. в климатических периодах по 5 лет (таблица 20):

Период 1956 – 1970 гг.: среднее за месяц число дней с грозой (2,7 дня) превышает средние многолетние значения (1,0 день). Период 1971 – 1985 гг. наблюдается тенденция к снижению грозовой активности (0,8 дня); в последующий период среднее за месяц число дней с грозой увеличивалось (1,5

дня). Период 2006 – 2013 гг., в марте, среднее за месяц число дней с грозой составило 0,2 дня. Период 2011 – 2013 гг. грозы отмечались в декабре, максимум грозовой деятельности (5,1 дня) отмечен в период 2011 – 2013 гг. в июне. Период 2006 – 2013 гг. произошло заметное изменение в годовом ходе среднего за месяц числа дней с грозой: грозовая деятельность отмечалась в марте и декабре (в среднем 0,3 дня), чего не отмечалось ранее в течение всего периода наблюдений. В целом отмечается увеличение среднего за месяц числа дней с грозой, за исключением периода апрель – май и август.

Таблица 20 – Среднее число дней с грозой по месяцам и в целом за год с 1956-2013 гг. в климатических периодах по 5 лет

| Период | Месяц | | | | | | | | | | | | Год |
|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | |
| 1956-1960 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,6 | 2,8 | 3,2 | 2,6 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,8 |
| 1961-1965 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 2,8 | 4,0 | 3,4 | 1,4 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,2 |
| 1966-1970 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 3,4 | 1,0 | 3,2 | 1,6 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 9,8 |
| 1971-1975 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 1,6 | 1,0 | 1,2 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,4 |
| 1976-1980 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 2,2 | 1,6 | 1,0 | 0,6 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 7,2 |
| 1981-1985 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,6 | 2,2 | 4,0 | 1,8 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 11,2 |
| 1986-1990 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,8 | 4,2 | 3,4 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 11,6 |
| 1991-1995 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 3,4 | 3,6 | 2,4 | 2,6 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,0 | 14,0 |
| 1996-2000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 2,8 | 4,0 | 4,2 | 0,6 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 12,6 |
| 2001-2005 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 | 3,2 | 2,2 | 5,0 | 3,0 | 0,0 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 14,6 |
| 2006-2010 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 2,4 | 3,0 | 1,8 | 1,8 | 1,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 10,6 |
| 2011-2013 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 1,3 | 1,3 | 6,7 | 3,3 | 1,3 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,3 | 15,3 |

5.1.2 Космодром «Восточный»

Если над территорией космодрома «Байконур» опасные конвективные явления отмечаются не более 15 раз в году, то территория космодрома «Восточный» расположена в климатических условиях, где образования опасных конвективных явлений наблюдаются чаще и требует дополнительного изучения [25, 50].

Для выявления особенностей грозовой активности в районе космодрома «Восточный» послужили данные с метеостанций Амурской области, были взяты

метеостанции Мазаново и Благовещенск. Информация о числе дней с грозой и основные статистические характеристики представлены в Приложение 7, Таблица 7.1 и Таблица 7.2. Данные о числе гроз систематизировались за период 1985 – 2013 гг. с июня по август и за срок 00 и 12 ч ВСВ [56, 94].

В среднем на метеостанции Мазаново отмечалось 24 дня с грозой в год, самым грозовым годом был 2010, число дней составило 38 (рисунок 34). Самыми спокойными были 1997 и 1999 гг., когда происходило 17 грозовых дней. Наиболее опасным месяцем, связанным с высокой грозовой активностью традиционно является июль, количество дней с грозой в среднем составило 9. Рекордным в этом отношении был июль 1993 и 2006 гг., когда было зарегистрировано 17 дней с грозой. В июне и августе в среднем отмечалось 8 и 7 дней с грозой соответственно.

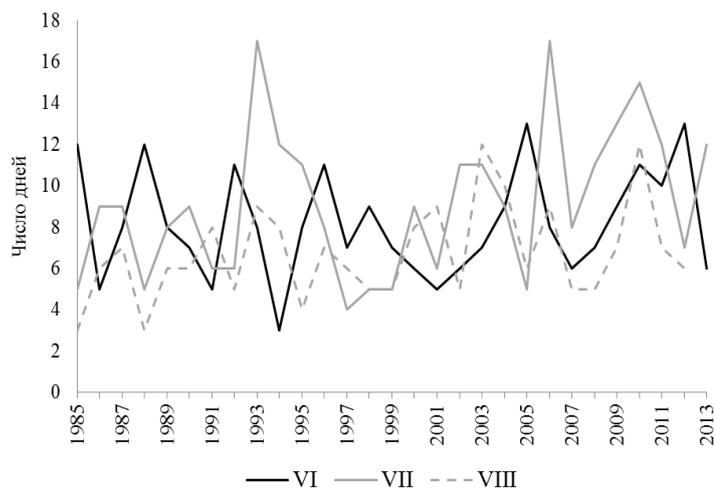


Рисунок 34 – Временной ход числа дней с грозой за период 1985-2013 гг.
на метеостанции Мазаново

В срок 00 ч ВСВ в среднем наблюдалось 3 дня с грозой за весь рассматриваемый период. Год с максимальным числом дней с грозой (10 дней) 2010 г. (рисунок 40). Минимальное количество дней с грозой составило 1 (Приложение 7, Таблица 7.1).

В срок 12 ч ВСВ за период 1985 – 2013 гг. на метеостанции Мазаново в среднем было зарегистрировано 11 дней с грозой, максимальное значение

отмечалось в 1993 и 1996 гг., 21 и 20 соответственно (рисунок 35). Наиболее спокойным был 1991 г., когда было зарегистрировано 6 дней с грозой (Приложение 7, Таблица 7.1).

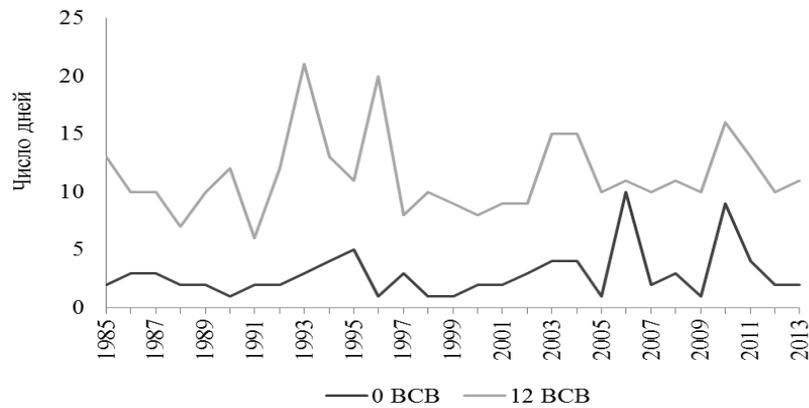


Рисунок 35 – Временной ход числа дней с грозой за период 1985-2013 гг. за срок 00 и 12 ВСВ на метеостанции Мазаново

За период 1985 – 2013 гг. на метеостанции Благовещенск в среднем отмечалось 22 дня с грозой (Приложение 7, Таблица 7.2, Рисунок 7.1). В последние годы наблюдается максимальная грозовая активность (в 2011 г., количество дней с грозой составило 40). Самым спокойным за весь рассматриваемый период был 1991 г., когда среднее число дней с грозой составило 13. Среднее число дней с грозой, по месяцам: июнь и июль – 8, август – 7 дней.

За срок 00 ч ВСВ в среднем наблюдалось 2 дня с грозой. Годом с максимальной грозовой активностью был 2005 г., когда отмечалось 5 случаев с грозой. Минимальное число дней с грозой составило 1. Также наблюдались годы, когда грозы не были зарегистрированы на метеостанции Благовещенск (Приложение 1, Таблица 7.2, Рисунок 7.2).

В среднем за срок 12 ч ВСВ на метеостанции Благовещенск было зарегистрировано 8 дней с грозой, максимальное число дней с грозой отмечалось в 2013 г., составило 17. Наиболее спокойным был 1995 г., когда было зарегистрировано всего 2 дня с грозой (Приложение 7, Таблица 7.2, Рисунок 7.2).

На рисунке 36 представлен временной ход грозовой активности, из которого видно, что наблюдается не значимая с вероятностью 95 % тенденция роста грозовой активности. Данные анализируемых станций коррелируют между собой, коэффициент корреляции составляет 0,47 и является значимым с вероятностью не менее 95 %.

При помощи автокорреляционной функции, обнаружено, что статистически значимым с вероятностью 95 % является цикл грозовой активности продолжительностью 7 лет (Приложение 7, Рисунок 7.3 и Рисунок 7.4) [10, 11]. Однако этот результат можно считать предварительным, поскольку значимых циклов в рядах грозовой активности на станции Мазаново не обнаружено. Тем не менее, циклы в рядах обеих станций могут иметь место, но для их обнаружения необходимы ряды более длительных наблюдений за грозами.

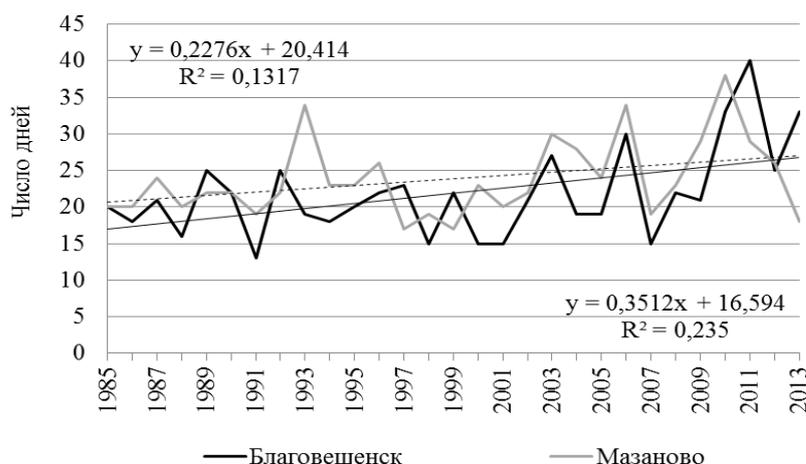


Рисунок 36 – Временная изменчивость грозовой активности на метеостанциях Благовещенск и Мазаново

В результате проведенных исследований, получено [46, 47]:

1. В период, когда строилась карта грозовой активности над территорией Казахстана, среднее число дней с грозой в районе Космодрома «Байконур» составляло 8. За последние десятилетия число дней с грозой удвоилось. Тем не менее, 15 дней в году, это не большая грозовая активность и существующие

методы прогноза вероятности гроз могут спрогнозировать с высокой точностью данное опасное конвективное явление в исследуемом районе.

2. Среднее число с грозой в районе космодрома «Восточный» – 22 дня.

5.2 Индексы неустойчивости атмосферы

Основная проблема качественного прогноза развития конвективных явлений – это трудности в создании физической основы для численного моделирования конвективных процессов. Для разработки методов прогноза развития конвекции применяется несколько подходов, из которых наиболее распространенным за рубежом является статистическая интерпретация численных характеристик прогностических полей по той или иной действующей модели.

В мезомасштабных моделях MM5 и WRF для прогноза развития конвекции, например гроз, практикуется использование значений индексов [116], характеризующих конвекцию по ряду параметров [112].

5.2.1 Индексы, описывающие конвективное состояние атмосферы

В первую очередь индекс, описывающий латентную неустойчивость атмосферы: Lifted index.

Интенсивность развития конвективных вертикальных движений определяется, в основном, стратификацией температуры воздуха. Например, интенсивные грозы формируются в атмосфере с положительной энергией неустойчивости во всём слое облакообразования, когда в средней и верхней тропосфере температурные градиенты существенно превышают величину влажноадиабатического. Эту характеристику состояния атмосферы на уровне 500 гПа отражают значения индекса Lifted index (LIFT), или индекса подъема:

$$\text{LIFT} = T_{500} - T_{\text{parcel}}, \quad (3)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа, °С;

T_{parcel} – температура частицы на уровне 500 гПа, поднимающейся с уровня 500 метров над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы.

Величины индекса $LIFT < -9$ °С являются признаком крайней нестабильности атмосферы, в интервале от -6 до -9 °С характеризуют атмосферу как нестабильную, в интервале $-6 < LIFT < -3$ °С как умеренно нестабильную, $-3 < LIFT < 0$ °С находящуюся на границе с равновесием. Если $LIFT > 0$ °С, то атмосфера считается устойчивой, но при этом надо помнить, что слабая конвекция возможна и при значениях $LIFT$, изменяющихся в интервале от 0 до +3 °С.

Вторую группу индексов представляют индексы, в которых кроме стратификации температуры, присутствуют характеристики влажности, это K index (KIND) и Totals totals index (TOTL).

Параметр KIND оценивает степень развития конвекции, основанной на вертикальном градиенте температуры и вертикальной протяженности слоев высокой влажности [117]:

$$KIND = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700}), \quad (4)$$

где T_{700} – температура на уровне 700 гПа, °С;

TD_{700} – температура точки росы, на уровне 700 гПа, °С.

Если индекс KIND принимает значения в интервале 25-30 °С, то это указывает на слабо неустойчивое состояние атмосферы. При значениях от 30 до 35 °С состоянии атмосферы неустойчивое и высока вероятность ливня, также возможны грозы с невысокой степенью вероятности. Значения индекса в интервале 35-40 °С, свидетельствуют о сильно неустойчивом состоянии атмосферы и наличии потенциала для развития грозы с ливнем, а при значениях индекса больше 40 °С атмосфера крайне неустойчива, и грозы с сильным ливнем и градом неизбежны.

Другим параметром, оценивающим не только статическую стабильность атмосферы, но и влажность на уровне 850 гПа (важный фактор для развития молнии в конвективных облаках), является параметр TOTL [117]:

$$\text{TOTL} = (T_{850} - T_{500}) + (\text{TD}_{850} - T_{500}), \quad (5)$$

где T_{850} – температура на уровне 850 гПа, °С;

TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа, °С.

Если значения параметра TOTL изменяются в пределах 40-45 °С, то состояние атмосферы слабо неустойчивое. При значениях TOTL в интервале 45-50 °С атмосфера неустойчива. Если значения TOTL составляют 50-55 °С, то состояние атмосферы сильно неустойчивое и вероятность развития грозы высока, при значениях индекса TOTL более 55 °С атмосфера крайне неустойчива и над территорией вероятны сильные грозы, град.

Третья группа индексов – это индексы, оценивающие энергию конвективного потенциала и энергию задерживающего слоя атмосферы, это параметр Convective Available Potential Energy (CAPE).

Величина энергии неустойчивости является неизменным предиктором в прогнозе опасных явлений, связанных с конвекцией. Высокий уровень потенциальной энергии атмосферы является неременным условием того, что поднимающаяся частица достигнет значительно больших высот, чем уровень свободной конвекции. Эту характеристику состояния атмосферы достаточно эффективно отражает параметр CAPE. Значения CAPE (Дж/кг) – потенциальная конвективная энергия атмосферы, определяются по следующей формуле [117]:

$$\text{CAPE} = g \int_{\text{LFCT}}^{\text{EQLV}} dz * (T_p - T_e) / T_e, \quad (6)$$

где T_p – температура частицы, поднимающейся с уровня 500 метров над земной поверхностью до уровня конденсации сухоадиабатически, выше уровня конденсации влажноадиабатически, ($^{\circ}\text{C}$);

T_e – температура окружающей среды, ($^{\circ}\text{C}$);

LFCT (Level of Free Convection) – уровень свободной конвекции, (гПа);

EL (Equilibrium Level) – уровень равновесия, (гПа);

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; dz – толщина слоя между уровнями LFCT и EL.

Высоты верхнего уровня развития конвекции (EQLV) и ее нижняя граница (LFCT) часто используются и как самостоятельные (дополнительные) характеристики мощности конвективно неустойчивого слоя атмосферы.

Считается, что атмосфере присуща слабая неустойчивость, если значения CAPE изменяются в пределах от 0 до 1000 Дж/кг. Если значения CAPE принимают значения в пределах от 1000 до 2000 Дж/кг, атмосфера неустойчива, при значениях индекса 2000-2500 Дж/кг состояние атмосферы сильно неустойчивое. И только при наличии энергетического потенциала более чем 2500 Дж/кг, атмосферу можно считать крайне неустойчивой и способной порождать крайне опасные явления, сопровождающиеся шквалами.

Level of Free Convection (LFCT) – уровень свободной конвекции, является высота в атмосфере, на которой насыщенный воздух становится теплее, чем окружающий воздух и поднимается свободно. Это происходит наиболее легко в условно неустойчивой атмосфере.

К четвертой группе индексов относится индекс SWEAT, оценивающий температурно-влажностные и ветровые характеристики атмосферы.

Индекс SWEAT – «суровости погоды» оценивает вероятность развития неблагоприятных явлений погоды, объединяя несколько параметров: характеристики влажности и температуры, а также скорость, направление и сдвиг ветра на высотах 1,5 и 5,5 км (850 и 500 гПа):

$$\text{SWEAT} = 12 \times \text{TD}_{850} + 20 \times (\text{TOTL} - 49) + 2 \times \text{SKT}_{850} + \text{SKT}_{500} + \text{SHEAR}, \quad (7)$$

где TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа, ($^{\circ}C$);

SKT_{850} и SKT_{500} – скорость ветра в узлах (1 узел = 0,5 м/с) на уровнях 850 и 500 гПа соответственно;

$SHEAR$ – сдвиг ветра между уровнями 850 и 500 гПа.

По европейским расчетам при значениях индекса SWEAT превышающих 300 наблюдаются грозы, а при значениях более 400 возможно развитие торнадо.

В моделях типа WRF прогноз опасных явлений делается на основе расчета прогностических значений температуры и влажности воздуха на соответствующих уровнях (например, T_{500} , входящие в индекс LIFT, так же T_{850} , T_{700} , T_{500} , TD_{850} , TD_{700} , TD_{500} – используемые в индексах KINX, TOTL и т.д.). Кроме того значения могут быть использованы при анализе результатов спутникового зондирования для определения профилей температуры и влажности воздуха. По рассчитанным значениям индексов можно определить районы локализации конвективных очагов, в которых могут развиваться гроза, град или шквал. Однако для того чтобы правильно выявить локализацию этих очагов необходимо определить пороговые значения индексов, при которых в атмосфере исследуемого региона можно с определенной вероятностью эти явления прогнозировать.

5.2.2 Анализ термодинамических индексов атмосферы

Для описания состояния атмосферы в дни с зарегистрированными опасными конвективными явлениями рассчитывались значения всех перечисленных выше индексов и их средние значения сравнивались с приведенными в литературе [16, 18, 20]. Пороговые значения неустойчивости (или характеризующих ее величин), начиная с которых появляется значительная вероятность развития той или иной формы конвекции, зависят от местных условий [20].

Интервалам значений индексов, приведенных в литературе, соответствует определенное состояние атмосферы (Приложение 8, Таблица 8.1). Авторами [20]

качественно поделена степень развития неустойчивости на ряд этапов: слабо неустойчивая, неустойчивая, сильно неустойчивая, крайне неустойчивая и экстремально неустойчивая. Качественным признаком степени неустойчивости являлись гроза, град, шквал, смерч.

5.2.3 Состояние атмосферы в дни с опасными конвективными явлениями

Состояние атмосферы исследовалось с июня по август 1985-2013 гг., по данным аэрологического зондирования на станции Благовещенск в сроки 00 и 12 ч ВСВ, в дни с наличием опасных конвективных явлений (ливней и гроз) на территории в радиусе 200 км от космодрома «Восточный» [118].

По данным аэрологической станции Благовещенск были рассчитаны и проанализированы статистические характеристики индексов за 12 ч ВСВ [26, 27, 44].

При наличии гроз территория, охваченная конвективной деятельностью, может быть различна, поэтому имеющаяся информация была разделена на две группы: дни, когда наблюдались «отдельные грозы» только на одной из станций, входящих в радиус наших исследований и дни, когда грозы регистрировались на двух и более метеорологических станциях – «повсеместные грозы».

Сравнивая статистические характеристики термодинамических параметров «отдельные грозы» и «повсеместные грозы» (таблица 21) можно сделать вывод, что значения индексов имеют незначимые с вероятностью 95 % различия по критерию Пирсона.

Таблица 21 – Статистические характеристики термодинамических индексов для аэрологической станции Благовещенск при «отдельные грозы» и «повсеместные грозы»

| Отдельные грозы | | | | | Повсеместные грозы | | | |
|-----------------|---------|----------|------|------|--------------------|----------|------|------|
| Индекс | Среднее | σ | Макс | Мин | Среднее | σ | Макс | Мин |
| LIFT, °C | -1,5 | 2,5 | | -7,7 | -1,7 | 2,4 | | -8,8 |
| SWEAT | 195 | 68 | 454 | | 207 | 77 | 466 | |

| Отдельные грозы | | | | | Повсеместные грозы | | | |
|-----------------|-----|-----|------|-----|--------------------|-----|------|-----|
| KIND, °C | 32 | 5 | 52 | | 33 | 4 | 43 | |
| TOTL, °C | 49 | 9 | 47 | | 49 | 4 | 59 | |
| CAPE, Дж/кг | 551 | 608 | 3502 | | 620 | 682 | 3078 | |
| LFCT, гПа | 768 | 81 | 933 | 499 | 750 | 88 | 891 | 313 |

Для выявления возможной причины незначительных отличий термодинамических параметров в случае «отдельные грозы» и «повсеместные грозы» были изучены характеристики ветра во время гроз. Замечено, что около 80 % случаев дней с грозой преобладает ветер южного, юго-западного и юго-восточного направлений.

При таком направлении ветра радиозонд, выпускаемый с аэрологической станции Благовещенск, летит в направлениях с северной составляющей, то есть в большинстве случаев траектория радиозонда пересекает очаг неустойчивости атмосферы, и основные ее характеристики могут быть определены. Следовательно, при определении вероятности образования грозы можно не выделять категории «отдельные грозы» и «повсеместные грозы», а давать вероятностный прогноз для общей категории «гроза».

В дальнейшем неустойчивое состояние атмосферы делилось на две группы: «ливень» и «гроза».

В таблице 22 приведены статистические характеристики термодинамических значений для этих категорий состояния атмосферы.

Таблица 22 – Статистические характеристики термодинамических индексов для аэрологической станции Благовещенск «ливень» и «гроза»

| Индекс | Ливень | | | | Гроза | | | |
|----------|---------|----------|------|------|---------|----------|------|------|
| | Среднее | σ | Макс | Мин | Среднее | σ | Макс | Мин |
| LIFT, °C | -0,3 | 2,5 | | -7,7 | -1,6 | 2,4 | | -8,8 |
| SWEAT | 171 | 60 | 383 | | 199 | 71 | 466 | |
| KIND, °C | 30 | 5 | 50 | | 32 | 5 | 52 | |

| Индекс | Ливень | | | | Гроза | | | |
|-------------|---------|----------|------|-----|---------|----------|------|-----|
| | Среднее | σ | Макс | Мин | Среднее | σ | Макс | Мин |
| TOTL, °C | 47 | 4 | 56 | | 49 | 4 | 59 | |
| CAPE, Дж/кг | 350 | 522 | 3528 | | 577 | 642 | 3902 | |
| LFCT, гПа | 776 | 103 | 941 | | 762 | 84 | 933 | |

Сравнивая значения индексов (таблица 22) «ливень» и «гроза» видно, что:

- средние значений индексов KIND и TOTL «ливень» и «гроза», которые характеризуют не только термодинамическую неустойчивость, но и влажность в слое 700-850 гПа, существенно не отличаются. Сравнивая их с интервалами, Приложение 8 Таблицы 8.1 видно, что атмосфера является неустойчивой и при таком состоянии могут наблюдаться ливни и грозы;

- уровень свободной конвекции (LFCT) в грозовых облаках выше, чем в ливневых примерно на 500 м;

- средние значение индекса LIFT, который характеризует разницу температур окружающей среды и поднимающейся частицы, при состоянии «гроза» больше значения состояния «ливень». По данным классификации Приложение 8 Таблицы 8.1 при таких значениях индекса возможно наличие ливней и отдельных гроз;

- комплексный параметр SWEAT «гроза» примерно на 30 единиц превосходит тот же параметр «ливень», так как в грозовых облаках отмечаются большие скорости ветра и значительные сдвиги ветра. Средние значений данного параметра также классифицируют атмосферу как слабо неустойчивую, при которых могут наблюдаться ливни и отдельные грозы;

- потенциальная конвективная энергия атмосферы (CAPE) «гроза» составляет 572 Дж/кг, это в 1,5 раза больше значения индекса CAPE «ливень» По данным классификации Приложение 8 Таблицы 8.1, когда значения индекса принимают такие значения, наблюдается слабое развитие конвекции, а на исследуемой нами территории наблюдались грозы.

Невысокие значения индексов обусловлены тем, что аэрологическое зондирование атмосферы в исследуемом регионе выполняется в 00 и 12 ч ВСВ (что соответствует 9 и 21 ч местного времени), а в часы максимально возможного развития конвекции, то есть в послеполуденные часы, зондирование не производится. Для получения информации о максимально возможных значениях характеристик конвекции над данным регионом необходимы специальные исследования с помощью аэрологических радиозондов, которые необходимо выпускать в срок 09 ч ВСВ (18 ч по местному времени).

5.2.4 Пороговые значения индексов в дни «ливень» и «гроза»

С уменьшением значений индекса LIFT неустойчивость атмосферы увеличивается. Кумулятивная кривая (рисунок 37) дает наглядное представление, как меняется накопленная относительная частота ливней и гроз при изменении индекса LIFT. Можно утверждать, что около 75 % всех ливней случается при значениях LIFT от -9 до 0 °С, а с грозой – 85 %.

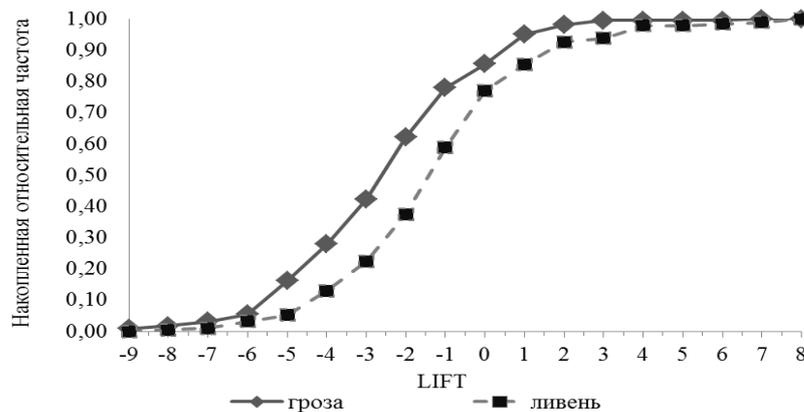


Рисунок 37 – Кумулятивная кривая за срок 12 ч ВСВ индекс LIFT

При одинаковых значениях индексов накопленная относительная частота ливней и гроз не одинаковая, следовательно, и вероятность возникновения этих явлений будет отличаться (рисунок 38, рисунок 39, рисунок 40, рисунок 41).

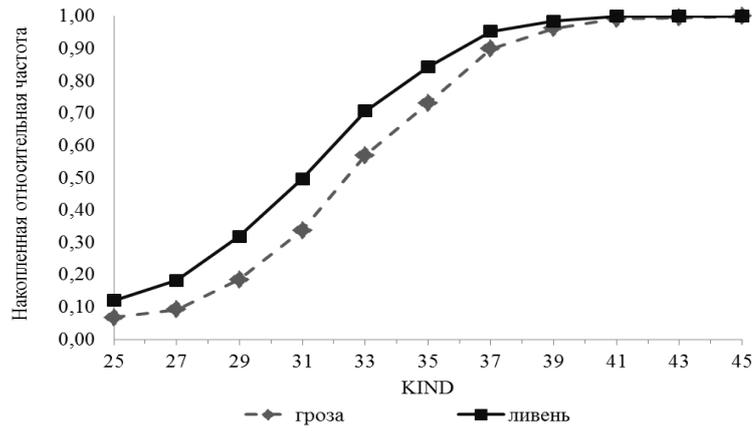


Рисунок 38 – Кумулятивная кривая за срок 12 ч ВСВ индекс KIND

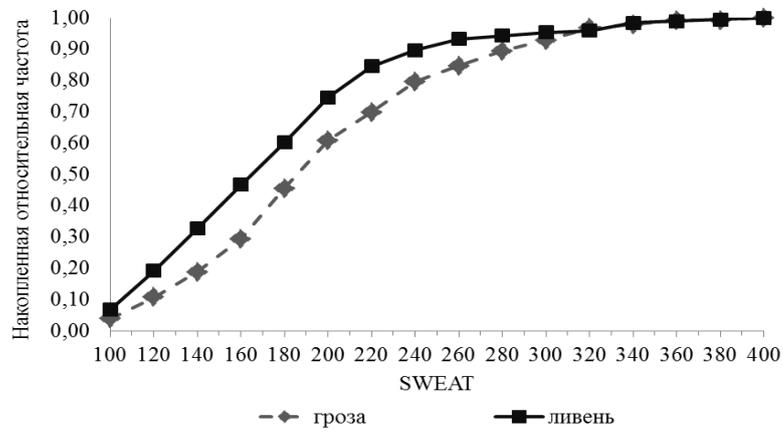


Рисунок 39 – Кумулятивная кривая за срок 12 ч ВСВ индекс SWEAT

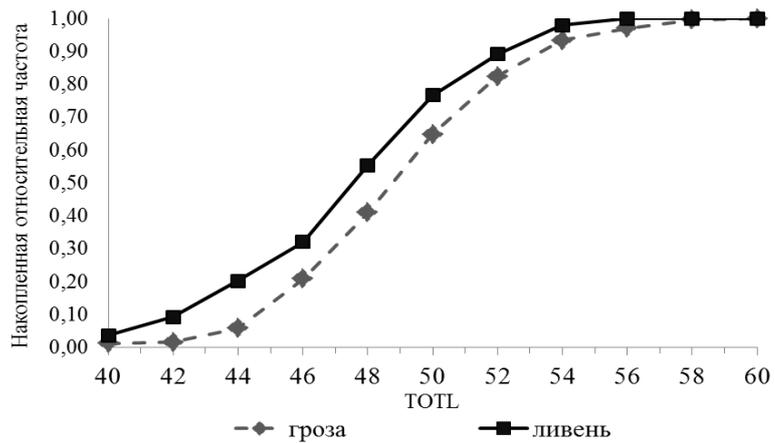


Рисунок 40 – Кумулятивная кривая за срок 12 ч ВСВ индекс TOTL

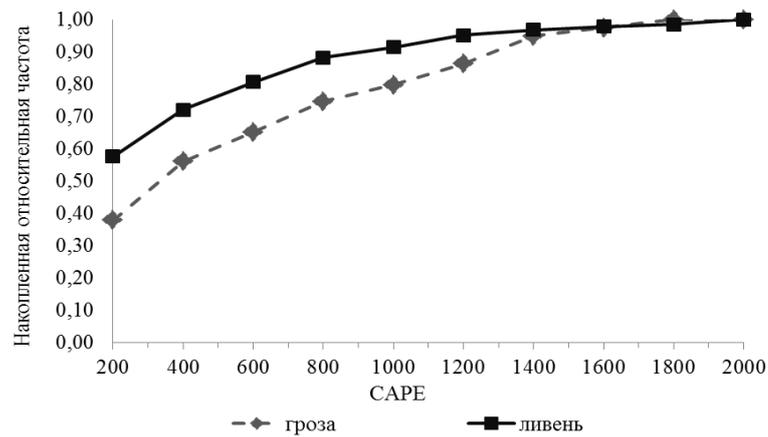


Рисунок 41 – Кумулятивная кривая за срок 12 ч VCB индекс CAPE

Результатом данного исследования, стали пороговые значения индексов, для различной вероятности ливней и гроз (таблица 23).

По зарубежной классификации значения индекса LIFT от -6 до -3 °C характеризуют атмосферу как «неустойчивая» (Приложение 8, Таблица 8.1) и регистрируются ливни и грозы, а при значениях <-6 °C («сильно неустойчивая») на всей территории регистрируются интенсивные ливни, грозы, град. Для территории Амурской области градация значения индекса LIFT начинается с пределов от -4 до -2 °C, при этих значениях регистрируется ливень, от -6 до -4 °C – гроза.

Таблица 23– Пороговые значения индексов для различной повторяемости ливней и гроз для территории Амурской области

| Индекс | 50% | 70% | 90% |
|--------|--------|--------|--------|
| | Ливень | | |
| LIFT | <-1 | <-2 | <-4 |
| SWEAT | >170 | >200 | >240 |
| KIND | >31 | >33 | >36 |
| TOTL | >48 | >49 | >52 |
| CAPE | >200 | >400 | >900 |
| Гроза | | | |
| LIFT | <-3 | <-4 | <-6 |

| Индекс | 50% | 70% | 90% |
|--------|-------|------|-------|
| | Гроза | | |
| SWEAT | >190 | >220 | >280 |
| KIND | >32 | >35 | >37 |
| TOTL | >49 | >51 | >53 |
| CAPE | >350 | >700 | >1300 |

Таким образом, сравнивая пороговые значения индексов, полученные для других климатических условий (Приложение 8 Таблица 8.1), можно сказать, что они имеют существенные различия с представленными в настоящей работе. Причиной тому могут быть различия в мощности конвективно-неустойчивого слоя, верхняя граница которого над исследуемой территорией на 5 км и более ниже, чем в тропиках.

Сравнение пороговых значений индексов, характеризующих атмосферу в дни с наличием опасных конвективных явлений над территориями Западной Сибири [18, 24] и Амурской области, показало, что существенных отличий не наблюдается.

В результате проведенных исследований, можно сказать, что:

Используя впервые полученные, пороговые значения индексов в районе космодрома «Восточный», можно прогнозировать пространственное положение грозовых очагов с помощью негидростатических моделей типа WRF или привлекая данные метеорологических спутников, на которых установлены спектрорадиометры MODIS.

5.3 Дискриминантный анализ индексов неустойчивости атмосферы для разделения состояния атмосферы «ливень» и «гроза» над территорией Амурской области

Для решения задачи данного исследования, с помощью дискриминантного анализа на основании некоторых признаков (независимых переменных) каждое

конкретное состояние атмосферы может быть причислено к одной из двух заданных заранее групп. То есть можно оценить по значениям индексов, какое наблюдалось явление над исследуемой нами территорией.

Целью является определение таких соотношений независимых переменных, чтобы по их значениям можно было с максимальной четкостью провести разделение исследуемой выборки по группам.

Требуется определить, насколько хорошо эти признаки помогают провести дискриминацию и позволяют отличить опасные явления друг от друга (то есть «ливень» от «грозы»). Для решения поставленной задачи располагаем информацией о нескольких индексах, характеризующих состояние атмосферы.

Для получения коэффициентов дискриминантной функции нужен статистический критерий различения групп. Очевидно, что классификация переменных будет осуществляться тем лучше, чем меньше рассеяние точек относительно центра внутри группы и чем больше расстояния между центрами групп. Расстояние между центрами групп успешно оценивается с помощью обобщенного расстояния Махаланобиса, которое характеризует усредненное расстояние групповых средних от общего среднего. В настоящей работе отбор лучших предикторов производился с помощью определения расстояния Махаланобиса и весового коэффициента предикторов.

Далее найдены характеристики дискриминантных функций, которые хорошо разделяют исследуемый массив на две группы «ливень» и «гроза» (таблица 24).

Таблица 24 – Итоговая таблица дискриминантного функционального анализа значений индексов для групп «ливень» и «гроза»

| N=256 | Wilks' Lambda: ,41433 approx. F (2,253)=178,81 p<0,0000 | | | | | |
|-------|---|----------------|----------|----------|----------|----------|
| | Wilks' Lambda | Partial Lambda | F-remove | p-level | Toler. | 1-Toler. |
| LIFT | 0,640651 | 0,646736 | 138,1954 | 0,000000 | 0,951213 | 0,048787 |
| KIND | 0,468092 | 0,885150 | 32,8273 | 0,000000 | 0,951213 | 0,048787 |

Статистика лямбда Уилкса (λ) вычисляется как отношение детерминанта матрицы внутригрупповых дисперсий/ковариаций к детерминанту общей ковариационной матрицы. Значения λ принадлежат интервалу $[0, 1]$. Значения λ , лежащие около 0, свидетельствуют о хорошей дискриминации, а значения λ , лежащие около 1, свидетельствуют о плохой дискриминации. Значение λ равно 0,41, в разделении между категориями «ливень» и «гроза», это говорит о том, что мощность дискриминации хорошая. В таблице 25 приведено значение кумулятивной доли объясненной дисперсии (Cum.Prop.), накопленное функцией 1. Функция 1 объясняет 100 % дисперсии.

Таблица 25 – Таблица стандартизованных коэффициентов дискриминантной функции

| | Функция 1 |
|----------|-----------|
| LIFT | -0,44902 |
| KIND | 0,10548 |
| Постоянн | -3,86377 |
| Eigenval | 1,41353 |
| Cum.Prop | 1,00000 |

Функции классификации – это линейные функции, которые вычисляются для каждой группы и могут быть использованы для классификации наблюдений (явлений). Явление приписывают той группе, для которой классификационная функция имеет наибольшее значение. В таблице 26 приведены коэффициенты и свободные члены при переменных линейных функций.

Таблица 26 – Таблица с коэффициентами функции классификации

| | Г p=,52344 | Л p=,47656 |
|------------|---------------|---------------|
| LIFT | 0,0626 | 1,1273 |
| KIND | 1,8783 | 1,6282 |
| Постоянная | -33,1431 | -24,2071 |

Матрица классификации (таблица 27) содержит информацию о количестве и проценте корректно классифицированных наблюдений в каждой группе. Строки матрицы – исходные классы, столбцы – предсказанные классы. Как видно из таблицы, исходные и предсказанные классы полностью не совпали.

Таблица 27 – Матрица классификации

| | Процент исправления | Г p=,52344 | Л p=,47656 |
|------|------------------------|---------------|---------------|
| Г | 97,76119 | 131 | 3 |
| Л | 92,62295 | 9 | 113 |
| Итог | 95,31250 | 140 | 116 |

В таблице 28 представлена часть данных таблицы квадратов расстояний Махалобиса, эти расстояния аналогичны квадратам евклидовых расстояний, но учитывают корреляции между переменными в модели. Наблюдение приписывают группе, к которой оно ближе всего. Наблюдения, которые не удалось правильно классифицировать, также помечены *. Число не классифицированных наблюдений составляет 5 % от общего количества.

Таблица 28 – Квадратов расстояний Махалобиса каждого наблюдения от центра до группы

| | Измеренн | Л | Г |
|----|----------|---------|---------|
| 1 | Г | 0,32352 | 6,69317 |
| 2 | Г | 1,18344 | 8,69994 |
| 3 | Г | 0,42699 | 3,64274 |
| 4 | Г | 0,96390 | 8,14713 |
| 5 | Г | 0,07181 | 4,94949 |
| 6 | Г | 0,19831 | 7,93237 |
| 7 | Г | 2,96129 | 3,15691 |
| 8 | Г | 0,87714 | 2,56154 |
| 9 | Г | 1,57757 | 3,26317 |
| 10 | Г | 0,76972 | 3,78941 |

| | Измеренн | Л | Г |
|----|----------|---------|----------|
| 11 | Г | 2,52637 | 5,66901 |
| 12 | Г | 1,19711 | 2,13783 |
| 13 | Г | 1,63043 | 10,12385 |
| 14 | Г | 0,95478 | 2,54276 |
| 15 | Г | 0,28159 | 3,60180 |
| 16 | Г | 0,91680 | 4,19402 |
| 17 | Г | 0,99006 | 2,12825 |
| 18 | Г | 1,19300 | 11,89736 |
| 19 | Г | 0,52452 | 4,62477 |
| 20 | Г | 1,37860 | 2,01658 |

В заключении дискриминантного анализа была получена таблица значений апостериорных вероятностей (таблица 29).

Таблица 29– Значения апостериорных вероятностей

| | Измеренн | Л | Г |
|----|----------|----------|----------|
| 1 | Г | 0,963689 | 0,036311 |
| 2 | Г | 0,979206 | 0,020794 |
| 3 | Г | 0,845756 | 0,154244 |
| 4 | Г | 0,975528 | 0,024472 |
| 5 | Г | 0,926400 | 0,073600 |
| 6 | Г | 0,981309 | 0,018691 |
| 7 | Г | 0,547762 | 0,452238 |
| 8 | Г | 0,718294 | 0,281706 |
| 9 | Г | 0,718417 | 0,281583 |
| 10 | Г | 0,832530 | 0,167470 |
| 11 | Г | 0,840926 | 0,159074 |
| 12 | Г | 0,637419 | 0,362581 |
| 13 | Г | 0,987138 | 0,012862 |
| 14 | Г | 0,708437 | 0,291563 |

| | Измеренн | Л | Г |
|----|----------|----------|----------|
| 15 | Г | 0,852447 | 0,147553 |
| 16 | Г | 0,849723 | 0,150277 |
| 17 | Г | 0,659914 | 0,340086 |
| 18 | Г | 0,995705 | 0,004295 |
| 19 | Г | 0,895102 | 0,104898 |
| 20 | Г | 0,601761 | 0,398239 |

На рисунке 42 представлен результат разделения значений по полученной дискриминантной функции (Приложение 9.1 Таблица 9.1, Рисунок 9.1).

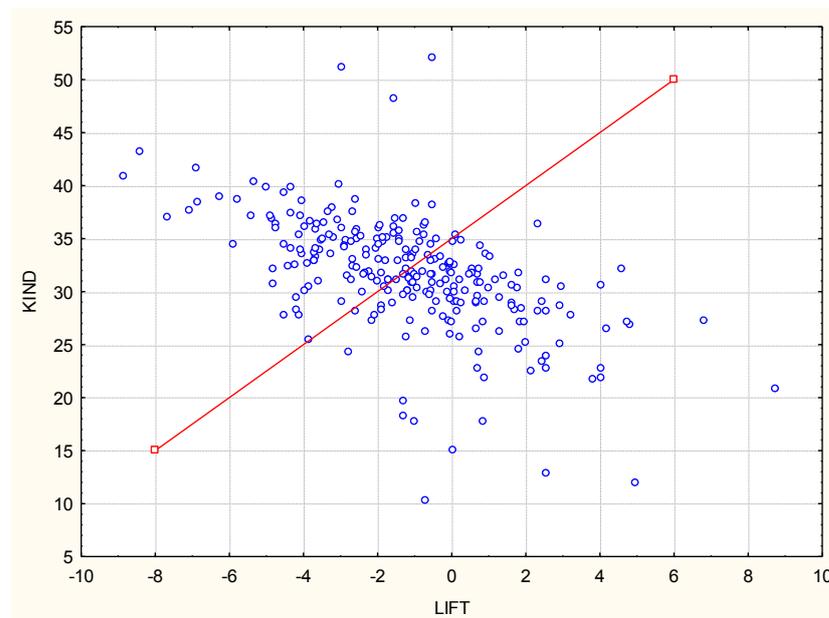


Рисунок 42 – Диаграмма рассеяния индексов KIND и LIFT для категорий «гроза» и «ливень»

В результате проведенных исследований получено:

1. Над территорией Амурской области в летние месяцы в среднем наблюдается 22 дня с грозой, при этом к концу исследуемого периода изменчивость грозовой активности увеличивается, и в отдельные сезоны может наблюдаться до 40 дней с грозой. Замечена семилетняя квазицикличность в интенсивности гроз.

2. Сравнение пороговых значений индексов, характеризующих атмосферу в дни с наличием опасных конвективных явлений над территориями Западной Сибири и Амурской области, показало, что существенных отличий не наблюдается. Однако пороговые значения индексов, полученные для других климатических условий, имеют существенные различия с представленными в настоящей работе. Причиной тому могут быть различия в мощности конвективно-неустойчивого слоя, верхняя граница которого над исследуемой территорией на 5 км и более ниже, чем в тропиках.

3. При сравнении средних значений индексов в дни, отнесенных к категориям: «ливень» и «гроза» над территорией Амурской области, обнаружены статистически значимые различия между значениями индексов LIFT, SWEAT и CAPE.

4. Определены значения индексов, при которых с вероятностью 70 % и 90 % наблюдается развитие ливней или грозы с ливнем.

5. Получено дискриминантное уравнение, позволяющее разделить состояние атмосферы по категориям «ливень» и «гроза» на основе рассчитанных значений индексов LIFT и KIND.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки альтернативных методов прогноза опасных конвективных явлений в радиусе 200 км над территорией космодрома «Восточный», а также при подготовке и запуске РКН на стартовых комплексах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании особенностей ветрового режима и развитой конвекции в районе космодромов «Байконур» и «Восточный» получены климатические характеристики на фоне глобального изменения климата за последние 30 лет. Сделаны следующие выводы:

1. Критические для пусков РКН характеристики ветра над территориями обоих космодромов наблюдаются в слоях 0,5–2 км и 7–14 км. Месяцы с высокой повторяемостью максимальных сдвигов ветра над Байконуром: декабрь и январь (41–46 %), Восточным: февраль и ноябрь (57–60 %).

2. Скорость приземного ветра над обеими территориями уменьшается.

3. Над территорией космодрома «Байконур» замечено увеличение уровня полярной тропопаузы на 370 м за последние десятилетия. Средняя скорость ветра на уровне полярной тропопаузы увеличилась на 1,42 м/с.

4. Над территорией космодрома «Байконур» весной, осенью и зимой максимальные сдвиги ветра формируются при преобладании ЮЗ направлений (26–40 %). Летом опасные сдвиги могут сформироваться и при СЗ направлениях ветра (в 40 % случаев). В слоях с максимальной скоростью над территорией космодрома в летний период преобладает СЗ направление (47,5 %), в весенний, осенний и зимний периоды ЮЗ направление ветра (53–60 %).

5. Над территорией космодрома «Восточный» максимальные сдвиги ветра формируются на фоне СЗ направления во все сезоны года: в зимний период (63,8 %), в весенний период (45,7 %), в летний период (25,3 %), в осенний период (50,3 %). В слое с максимальными скоростями ветра преобладание СЗ и ЮЗ направлений над территорией космодрома одинаково (в зимний и весенний периоды ветер СЗ 46–59 %, ЮЗ составляет около 30 %.; в летний период ЮЗ ветер 40,2 %, СЗ составляет 32,8 %; в осенний период процентное соотношение СЗ и ЮЗ ветров одинаково и составляет 44 %).

6. Благоприятными месяцами для пусков ракет космического назначения над территорией космодрома «Байконур», учитывая все изученные характеристики

ветра, являются: февраль, май и сентябрь. Для космодрома «Восточный»: июнь–август и сентябрь.

7. Прослеживается устойчивая динамика увеличения скорости ветра в верхней тропосфере и нижней стратосфере над территорией космодрома «Байконур» (на 0,5 м/с/10 лет) и «Восточный» (на 0,4 м/с/10 лет).

8. Над территориями космодромов «Байконур» и «Восточный» в нижней тропосфере прослеживается усиление меридионального переноса и увеличение зонального переноса в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

9. Над территорией Кызыл-Ординской области (согласно данным ближайшей метеорологической станции к космодрому «Байконур») с конца 70-х годов XX века наблюдается устойчивое увеличение числа дней с грозой, достигающее к концу исследуемого периода 15 дней. Над территорией Амурской области в среднем наблюдается 22 дня с грозой, при этом к концу периода изменчивость грозовой активности увеличивается, и в отдельные сезоны может наблюдаться до 40 дней с грозой. Замечено наличие квазиципериодичности в рядах повторяемости гроз.

10. Определены пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы для разной вероятности образования (%) гроз над территорией Амурской области.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

РКН – ракета космического назначения

РН – ракета-носитель

РБ – разгонный блок

АПС – атмосферный пограничный слой

Cu – кучевые облака

Cu cong. – кучевые мощные облака

Cb – кучево-дождевые облака

Cb calv. – «лысые» кучево-дождевые облака

Cb inc. – кучево-дождевые облака с наковальной

H – вертикальная мощность облака

МРЛ – метеорологический радиолокатор

ИСЗ – искусственный спутник Земли

ПВФЗ – Планетарная Высотно Фронтальная Зона

ДА – дискриминантный анализ

λ – лямбда Уилкса

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева А. А. Летние конвективные явления / А. А. Алексеева, А. А. Васильева / Под ред. Г. А. Голицына. – М. : 2001. – 172 с.
2. Арабаджи В. И. Грозы и грозовые процессы / В. И. Арабаджи. – Минск : Изд-во Белгосуниверситета имени В.И. Ленина. – 1960. – 230 с.
3. Астапенко П. Д. Погода и полеты самолетов и вертолетов / П. Д. Астапенко, А. М. Баранов. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 277 с.
4. Аэроклиматическое описание аэродрома «Крайний». – Ленинск, 1984. – С. 78–89.
5. Баранова А. А. Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине XX века / А. А. Баранова, М. П. Голод, А. В. Мещерская // Труды ГГО. – 2007. – № 556. – С. 116-138.
6. Береснев С. А., Анализ характеристик вертикальной скорости ветра в стратосфере / С. А. Береснев, В. И. Грязин, К. Г. Грибанов // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 11. – С. 37-47.
7. Богаткин О. Г. Анализ и прогноз погоды для авиации / О. Г. Богаткин, В.Д. Еникеева. – Л. : 1985. – 231 с.
8. Богаткин О. Г. Авиационная метеорология / О. Г. Богаткин. – СПб. : РГГМ, 2005. – 328 с.
9. Боровиков А. М. Физика облаков / А. М. Боровиков, А. Х. Хргиан. – Л. : Гидрометиздат, 1961. – 457 с.
10. Боровиков В. И. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows / В. И. Боровиков, Г. И. Ивченко. – М. : Финансы и статистика. – 1999. – 382 с.
11. Боровиков В. И. Statistica : Статистический анализ данных и обработка данных в среде Windows / В. И. Боровиков, И. П. Боровиков – М. : Финансы и статистика. – 1999. – 384с.
12. Васильев Е. В. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов на Европейской территории России / Е. В. Васильев. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата

географических наук, специальность: 25.00.30/ М. : Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 2009. – 26 с.

13. Васильев Е. В. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов / Е. В. Васильев, А. А. Алексеева, Б. Е. Песков // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 1. – С. 5-15.

14. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – М. : Росгидромет. – 2014. – 61 с.

15. Гарифулин К. К. Изменчивость ветра в свободной атмосфере / К. К. Гарифулин, Р. Л. Каган – Л. : Гидрометеиздат, 1967. – 141 с.

16. Горбатенко В. П. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность / В. П. Горбатенко, А. А. Дульзон // География и природные ресурсы. – 1997. – № 2. – С. 142-146.

17. Горбатенко В. П. Интегральные характеристики ветра в тропосфере над Западной Сибирью / В. П. Горбатенко, И. И. Ипполитов, Е. А. Дюкарев, Н. В. Поднебесных // Шестое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Материалы совещания / Под ред. М. В. Кабанова. – Томск. – 2005. – С.12-16.

18. Горбатенко В. П. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири / В. П. Горбатенко, Д. А. Константинова // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – № 12. Т. 22. – С. 17-21.

19. Горбатенко В. П. Роль циркуляционных факторов в потеплении климата Сибири / В. П. Горбатенко, И. И. Ипполитов, С. В. Логинов, Н. В. Поднебесных, Е. В. Харюткина // Вестник ТГУ. – 2011. – № 346. – С. 174-80.

20. Горбатенко В. П. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере западной Сибири / В. П. Горбатенко, Д. А. Константинова, О. И. Золотухина, Е. Л. Тунаев // Известия ВУЗов. Физика. – 2011. – Т. 54. – №11/3. – С. 148-155.

21. Горбатенко В. П. Молния как звено глобальной электрической цепи : Монография / В. П. Горбатенко, Т. В. Ершова. – Томск : Издательство ТГПУ, 2011. – 204 с.

22. Горбатенко В. П. Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям / В. П. Горбатенко, Т. В. Ершова // Вестник ТГПУ. – 2011. – №107 (5). – С. 150-154.

23. Горбатенко В. П. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях / В. П. Горбатенко, Т. В. Ершова, О. А. Клипова // Вестник ТГПУ. – 2012. – №122 (7). – С. 9-13.

24. Горбатенко В. П. Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования / В. П. Горбатенко, С. Ю. Кречетова, М. Ю. Беликова, О. В. Разумова // Вестник ТГУ. – 2012. – № 365. – С. 169-174.

25. Горбатенко В. П. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома «Восточный» / В. П. Горбатенко, А. А. Громницкая, О. И. Золотухина // Вестник ТГУ. – 2015. – № 400. С. 330-336.

26. Громницкая А. А. Термодинамические характеристики атмосферы в районе космодрома «Восточный» в дни с опасными конвективными явлениями / А. А. Громницкая, О. И. Золотухина // Международная конференция молодых ученых «Изменения климата и природной среды Северной Евразии: анализ прогноз, адаптация» / Сборник тезисов докладов. – М. : ГЕОС. – 2014. – С. 73-75.

27. Громницкая А. А. Термодинамические характеристики атмосферы в дни с грозой на космодроме «Восточный» / А. А. Громницкая, В. П. Горбатенко // Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: «CITES-2015» – Томск. – 2015. – С. 33-35.

28. Груза Г. В. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 4. – С 50-66.

29. Груза Г. В. Оценка изменений климата на территории Российской Федерации / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова // Метеорология и Гидрология. – 2009. – № 11. – С.15-29.
30. Груза Г. В. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России : температура воздуха / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова. – М. : ИГКЭ, 2012. – 193 с.
31. Губенко И. М. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности / И. М. Губенко, К. Г. Рубинштейн // Метеорология и гидрология. – 2014. – №5. – С. 40-50.
32. Губенко И. М. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW / И. М. Губенко, К. Г. Рубинштейн // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 1. – С. 27-37.
33. Гуральник И. И. Метеорология / И. И. Гуральник, Г. П. Дубинский, В. В. Ларин, С. В. Мамиконова. – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 442 с.
34. Гутерман И. Г. Распределение ветра над Северным полушарием / И. Г. Гутерман. – Л. : Гидрометеиздат, 1965. – 250 с.
35. Дробышев А. Д. Ветровые условия Сибири и Дальнего Востока для ветроэнергетики / А. Д. Дробышев, Л. И. Курыгиной, В. Д. Чижиковым // Труды ЗапСибНИГШ. – М. : Гидрометеиздат. – 1990. – Вып. 91. – С. 40-55.
36. Дроздов О. А. Климатология / О. А. Дроздов и др. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 567 с.
37. Дульзон А. А. Исследование характеристик интенсивности грозовой деятельности / А. А. Дульзон, Ф. А. Гиндуллин, В. П. Горбатенко // Изв. ВУЗов. Физика. – Томск : ТГУ. – 1996. – № 4. – С. 87-98.
38. Журавлёв Г. Г. Оценка ветро-энергетического потенциала Томской области / Г. Г. Журавлёв // Вестник ТГУ. – 2001. – № 274. – С. 141-147.
39. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Издание второе: переработанное и дополненное / А. С. Зверев. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 712 с.

40. Звягинцев А. М. Изменчивость трендов вертикального распределения озона в стратосфере и их связи с долговременными изменениями высоты тропопаузы / А. М. Звягинцев, Г. М. Крученицкий, А. А. Черников // Известия РАН. ФАО. – 2005. Т. 41. – № 4. – С. 476-486.

41. Здерева М. Я. Прогноз сильного ветра на пентаду по полусуткам для территории Урало-Сибирского региона / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Специальность: 11.00.09 / М. : Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации. – 2000. – 21 с.

42. Золотов С. Ю. Сравнение данных реанализа NCEP/NCAR профилей температуры почвы с данными измерений сети станций на территории Западной Сибири / С. Ю. Золотов, И. И. Ипполитов, С. В. Логинов, И. О. Лучицкая, Н. И. Белая // Криосфера Земли. – 2011. – Том XV. – № 2. – С. 14-23.

43. Золотов С. Ю. Особенности изменений характеристик субтропических струйных течений северного и южного полушарий за последние 65 лет / С. Ю. Золотов, И. И. Ипполитов, С. В. Логинов // Одиннадцатое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : Материалы российской конференции. – Томск. – 2015. – С.26-27.

44. Золотухина О. И. Термодинамические характеристики атмосферы в районе космодрома «Восточный» с дни с грозой и ливнем / О. И. Золотухина, А. А. Громницкая // Научный журнал «Естественные и технические науки». Материалы XII Международной научно-практической конференции «Науки о Земле на современном этапе». – М. : Изд-во "Спутник+". – 2014. – С. 22-24.

45. Золотухина О. И. Характеристики опасных явлений погоды в районе космодрома «Восточный» / О. И. Золотухина, О. В. Петухова, А. А. Громницкая // Материалы III международной научно-практической конференции с элементами школы-семинара для студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск : ООО «Новые Печатные Технологии». – 2014. – С. 532-535.

46. Золотухина О. И. Характеристики конвекции в районе космодрома «Восточный» в дни с грозой / О. И. Золотухина, О. В. Петухова, А. А. Громницкая

// Материалы XI Международной Школы молодых ученых им. А.Г. Колесника. – Томск : ТМЛ-Пресс. – 2014. – С. 70-73.

47. Золотухина О. И. Характеристики опасных конвективных явлений погоды в районе космодрома «Восточный» / О. И. Золотухина, О. В. Петухова, А. А. Громницкая // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской Высокогорной комплексной экспедиции АН СССР Нальчик. – 2014. – С. 257-261.

48. Золотухина О. И. Характеристики ветра в дни пусков ракет космического назначения на космодроме «Байконур» / О. И. Золотухина, В. П. Горбатенко, П. А. Вареник // Труды ГГО. – 2015. – № 576. – С. 114-129.

49. Золотухина О. И. Характеристики ветра в свободной атмосфере над территорией космодрома «Байконур» / О. И. Золотухина, В. П. Горбатенко, П. А. Вареник // Труды ГГО. – 2015. – № 578. – С. 174-191.

50. Золотухина О. И. Характеристики опасных конвективных явлений в районе космодрома «Байконур» и «Восточный» / О. И. Золотухина, А. А. Громницкая, Н. Т. Дарибаева // «Климатология и гляциология Сибири»: материалы Международной научной конференция. Томск. – 2015. – С. 56-59.

51. Золотухина О. И. Характеристики ветра в свободной атмосфере на космодроме «Байконур» / О. И. Золотухина, О. В. Петухова // «Климатология и гляциология Сибири»: материалы Международной научной конференция. – Томск. – 2015. – С. 59-62.

52. Золотухина О. И., Разработка методических основ анализа и обработки метеорологической информации в интересах космодрома «Восточный» / О. И. Золотухина, В. П. Горбатенко, П. А. Вареник // Всероссийская молодёжная научно-практическая конференция «Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики» Тезисы докладов. Углегорск – Благовещенск – Москва. – 2015. – С.167-169.

53. Золотухина О. И. Тенденции ветрового режима над территорией космодрома «Восточный» / О. И. Золотухина, С. Ю. Золотов, В. П. Горбатенко //

Международная конференция и школа молодых учёных по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS 2016. Избранные труды. – Томск. – 2016. – С.25-29.

54. Золотухина О. И. Скорость ветра в свободной атмосфере над территорией космодрома «Восточный» / О. И. Золотухина // Международная конференция и школа молодых учёных по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS 2016. Избранные труды. – Томск. – 2016. – С.48-52.

55. Иванова А. Р. Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации / А. Р. Иванова // Метеорология и гидрология. –2013. – № 12. – С. 23-36.

56. Институт космических исследований РАН «Погода России»: Архив погоды [Электронный ресурс] // Институт космических исследований РАН «Погода России» – Режим доступа: http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r_sel_stn.sht?adm=554

57. Ипполитов И. И. Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим Сибири / И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, С. В. Логинов, Н. В. Поднебесных, Е. В. Харюткина, В. П. Горбатенко // Оптика атмосферы и океана. – 2011. Т. 24. – № 1. – С. 15-21.

58. Капля Е. В. Статистическая модель динамики скорости и направления ветра // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 12. – С 29-34.

59. Кижнер Л. И. Изменение режима ветра в Томске в начале XXI века / Л. И. Кижнер, Н. Ю. Серая // Труды ГГО – 2015. – № 576. – С. 102-113.

60. Кобышева Н. В. Климатическая обработка метеорологической информации / Н. В. Кобышева, Г. Я. Наровлянский, Г.И. Слабкович – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 296 с.

61. Козлова Л. Ф. Исследование многолетней изменчивости параметров тропопаузы над территорией РФ по радиозондовым данным / Л. Ф. Козлова, А. И. Стерин // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2014. – №178. [Электронный ресурс]

62. Кононова Н. К. Изменения циркуляции атмосферы северного полушария в XX-XXI столетиях и их последствия для климата / Н. К. Кононова // Фундаментальная и прикладная климатология – 2015. – № 1. – С. 133-162.

63. Куколева А. А. Оценки потоков озона через тропопаузу в планетарных высотных фронтальных зонах Северного полушария / А. А. Куколева // Известия РАН. ФАО. – 2002. Т. 38. – № 2. – С. 376-387.

64. Локощенко М. А. О ветровом режиме нижней атмосферы над Москвой по данным многолетнего акустического зондирования / М. А. Локощенко // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 4. – С 19-31.

65. Локощенко М. А. Направление ветра в Москве / М. А. Локощенко // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 10. – С 5-15.

66. Лутфиев Х. Л. Особенности распределения температурных инверсий и сдвигов ветра в нижнем слое атмосферы над Средней Азией / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Специальность: 11.00.09 / М. : Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. – 1990. – 19 с.

67. Лутфиев Х. Л. Вертикальные сдвиги ветра на территории Средней Азия / Х. Л. Лутфиев // Труды СЛШГШ. – 1998. – № 130. – С. 63-65.

68. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев, В.Г. Морачевский – Л. : Гидрометеиздат. – 1984. – 751 с.

69. Мелешко В. П. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей / В. П. Мелешко, С. Г. Голицын, В. А. Говоркова // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 4. – С 38-49.

70. Мещерская А. В. Мониторинг скорости ветра на водосборе Волги и Урала в XX веке / А. В. Мещерская, И. Ф. Гетман, М. М. Борисенко, Э. И. Шевкунова // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 3. – С. 83-97.

71. Мещерская А. В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным / А. В. Мещерская, В. В. Еремин, А. А. Баранова, В. В. Майстрова // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 9. – С. 46-58.

72. Назаренко А. В. Опасные природные явления / А. В. Назаренко // Опасные явления погоды конвективного происхождения. Ч.3. – Воронеж: Изд-во ВГУ. – 2008. – 62 с.

73. Наровлянский Г. А. Авиационная климатология / Г. А. Наровлянский, А. М. Баранов. – Л. : Гидрометеиздат. – 1968. – 266 с.

74. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 18. Казахская ССР. Книга 2. Части 1 – 6. – Л. : Гидрометеиздат. – 1989. – 440 с.

75. Оганесян В. В. Зависимость сильных осадков и скорости ветра от высоты расположения метеорологических станций на Черноморском побережье Краснодарского края / В. В. Оганесян // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 10. – С 40-44.

76. Орленко Л.Р. Строение пограничного слоя атмосферы / Л.Р. Орленко // Л. : Гидрометеиздат. – 1979. – 167 с.

77. Оценочный доклад об изменениях климата на территории Российской Федерации. Том I. – М. : Росгидромет, 2008. – 227 с.

78. Оценочный доклад об изменениях климата на территории Российской Федерации. Том II. – М. : Росгидромет, 2008. – 288 с.

79. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. – М. : Росгидромет, 2008. – 89 с.

80. Павлова Г. П. Изменение грозовой деятельности от периода МГГ к периоду МГСС по наблюдениям метеорологических станций СССР / Г. П. Павлова // Труды ГГО. – 1969. – №. 242. – С. 118-124.

81. Переведенцев Ю. П. Динамика тропо-стратосферы и изменения современного климата / Ю. П. Переведенцев, К. М. Шанталинский // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – Том 1. – С. 221-231.

82. Петухова О. В. Характеристики опасных явлений погоды в районе космодрома «Восточный» / О. В. Петухова, А. А. Громницкая, О. И. Золотухина // Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции с

международным участием «Современные достижения и проблемы в области изучения окружающей среды». Барнаул : ООО «ТЛ Красный угол». – 2014. – С. 72-75.

83. Петухова О. В. Результаты изменчивости ветра в приземном слое атмосферы в районе территории космодрома «Восточный» // Современное состояние науки и проблемы в области изучения окружающей среды. Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор Н. Ф. Харламова. Барнаул: ООО «ТЛ Красный угол». – 2014. – С. 75-78.

84. Пиловец Г. И. Метеорология и климатология / Г. И. Пиловец – М. : ИНФРА-М. – 2013. – 399 с.

85. Плотников А. Д. Сравнительный анализ приборов и методов измерения скорости и направления ветра / А. Д. Плотников, Л. И. Сучкова // Ползуновский альманах. – 2010. – №2. – С.119–122.

86. Погода и климат Тосканы [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.lamma.rete.toscana.it/meteo/modelli>

87. Попова В. В. Циркуляционные механизмы крупномасштабных аномалий температуры воздуха в северной Евразии в конце XX столетия / В. В. Попова, А. Б. Шмакин // Метеорология и Гидрология. – 2006. – № 12. – С.15-24.

88. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами. Методическое пособие. Третье издание, переработанное и дополненное. – М. : АНО «Метеоагентство Росгидромета». – 2009. – 107 с.

89. Савичев А. И. Синоптические методы анализа атмосферных процессов / А. И. Савичев – Л. : Гирометеоиздат. – 1980. – 100 с.

90. Селезнев В. П. Метеорологическое обеспечение полетов. Издание 2-е исправленное / В. П. Селезнев – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2010. – 192 с.

91. Семенченко Б. А. Физическая метеорология /Б. А. Семенченко – М. : Аспект Пресс. – 2002. – 415 с.

92. Сервер Института космических исследований «Погода России». [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.meteo.inospace.ru

93. Токарева Ю. В. Опасные явления погоды для авиации и расчетные методы их прогноза, используемые в филиале Новосибирского ЗАМЦ [Электронный ресурс] / Ю. В. Токарев Методический кабинет Гидрометцентра России. Режим доступа : <http://method.hydromet.ru/event/dec05/doklad1/doklad1.html>

94. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» : Специализированные массивы для климатических исследований [Электронный ресурс] / ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – Режим доступа : <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>

95. Хохлова А. В. Многолетние изменения ветрового режима в свободной атмосфере над европейской территорией России / А. В. Хохлова, А. А. Тимофеев // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 4. – С 21-32.

96. Чередниченко В. С. Тропопауза и максимальный ветер над Казахстаном (справочное пособие) / В. С. Чередниченко // Алма-Ата. – Изд-во: УГМС КазССР. – 1975. – 204 с.

97. Чередниченко В. С. Максимальный ветер и ветер на полярной тропопаузе над территорией Казахстана / В. С. Чередниченко // Труды КазНИП/И. – 1976. – № 57. – С. 19-23.

98. Чередниченко В. С. Пути повышения эффективности метеорологического обеспечения полетов авиации (на примере Казахстана). Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук, специальность: 11.00.09 / М. : МГУ. – 1992. – 31 с.

99. Шакина Н. П. Опыт использования потенциального вихря для расчета карт топографии тропопаузы / Н. П. Шакина, В. В. Борисова // Метеорология и гидрология. – 1992. – № 9. – С. 57-65.

100. Шерстюков Б. Г. Парниковый эффект и изменение теплообмена между океаном и атмосферой как факторы современных изменений климата. Анализ изменений климата и их последствий / Б. Г. Шерстюков // – Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2007. – № 173. – С. 3-37.

101. Шметер С. М. Физика конвективных облаков / С. М. Шметер // Л. : Гидрометиздат. – 1972. – 232 с.
102. Шметер С. М. Новые данные о мезомасштабных и турбулентных пульсациях температуры и ветра в зоне тропической тропопаузы / С. М. Шметер, А. А. Постнов, Г. Н. Шур // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 3. С. 25-37
103. Шталь В. А. Прикладная климатология / В. А. Шталь // – Л. : Гидрометеиздат. – 1981. – 166 с.
104. Юшков В. П. Синоптические флуктуации скорости ветра в пограничном слое атмосферы / В. П. Юшков // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 4. – С. 17-28.
105. Юшков В. П. Сдвиг скорости ветра при устойчивой стратификации и масштабы теории подобия / В. П. Юшков // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 3. – С. 37-51.
106. Allen R. J. and Sherwood S. C. Utility of radiosonde wind data in representing climatological variations of tropospheric temperature and baroclinicity in the Western Tropical Pacific // J. Climate. – 2007. – vol. 20, № 4. – P. 5229–5243.
107. Andersson T. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden / T. Andersson, Andersson M., Jacobsson C., Nilsson S // Meteorol. Mag. – 1989. – № 116. – P. 141-146.
108. Dai J. A comparison of lightning activity and convective indices over some area of China / J. Dai, Y. Wang, J. Gu, L. Chen, Z. Wang // Proceeding of the 13 International conference on atmospheric Electricity, August 13-17. – 2007. – Beijing, China. – P. 1781-1785.
109. Gulev S.K. and Grigorieva V. Variability of the winter wind waves and swell in the North Atlantic and North Pacific as revealed by the voluntary observing ship data // J. Climate. – 2006. – vol. 19, № 21. – P. 5667-5685.
110. Jerusalem Weather Station [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.02ws.com/station.php?section=radiosonde.php&lang=0>

111. Kalnay E. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay M. Kanamitsu, R. Kistler et al. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1996. – vol. 77, № 3. – P. 437-471.
112. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci.7. – P. 327-342.
113. Sausen R. Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate / R. Sausen, B. Santer // Meteorolog. Z. 2003. – № 12. P. 131-136.
114. Seiki A. and Takayabu Yu. N. Westerly wind bursts and their relationship with intraseasonal variations and ENSO // Part I: Statistics. – Mon. Wea. Rev. – 2007. – vol. 135, №. 10. – P. 3325-3345.
115. Serreze M.C. Observational evidence of recent change in the Northern high-latitude environment / M.C. Serreze, J.E. Walsh, III F.S. Chapin II et al. // Climate Change. – 2000. – vol. 46, P. 159-207.
116. Showalter A. A stability index for thunderstorm forecasting / A. Showalter // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1953. – № 34. – P. 250-252.
117. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado / P. Schulz // Wea. Forecasting. – 1989. – № 4. – P. 73-80.
118. University of Wyoming: Department of Atmospheric Science [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding>
119. Yang X.-Y. Decadal changes of wind stress over the Southern Ocean associated with Antarctic ozone depletion / X.-Y. Yang, R.X. Huang, D.X. Wang // J. Climate. – 2007. – vol. 20, № 14. – P. 3395-3410.

Таблица 1.1 – Повторяемость (в %) направления ветра у поверхности земли по месяцам и в целом за год, за период 1956–2013 гг.

| Месяц | Направление ветра, румбы | | | | | | | | |
|-------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ | Штиль |
| I | 7,2 | 17,3 | 24,8 | 11,2 | 11,3 | 11,4 | 8,3 | 4,6 | 3,8 |
| II | 9,5 | 21,0 | 24,2 | 9,6 | 8,3 | 10,1 | 8,5 | 5,5 | 3,3 |
| III | 10,2 | 24,6 | 23,6 | 7,3 | 6,3 | 8,2 | 9,9 | 6,9 | 2,9 |
| IV | 11,7 | 21,8 | 24,1 | 7,6 | 4,9 | 8,3 | 11,2 | 7,6 | 2,9 |
| V | 13,6 | 20,5 | 19,8 | 7,0 | 4,8 | 7,4 | 14,0 | 10,1 | 2,9 |
| VI | 15,4 | 19,3 | 14,5 | 6,1 | 4,2 | 6,2 | 16,4 | 14,6 | 3,3 |
| VII | 20,7 | 18,4 | 10,6 | 4,6 | 2,9 | 4,5 | 17,3 | 17,5 | 3,6 |
| VIII | 20,2 | 24,4 | 12,9 | 4,1 | 2,8 | 4,2 | 14,1 | 13,7 | 3,5 |
| IX | 15,2 | 25,0 | 15,3 | 5,3 | 4,1 | 5,2 | 13,3 | 12,4 | 4,2 |
| X | 10,9 | 19,4 | 16,0 | 8,7 | 7,7 | 10,3 | 14,2 | 9,2 | 3,7 |
| XI | 9,3 | 19,1 | 21,5 | 10,5 | 9,3 | 10,6 | 9,7 | 7,3 | 2,8 |
| XII | 7,5 | 18,2 | 24,0 | 12,1 | 10,8 | 9,9 | 8,8 | 5,1 | 3,8 |
| Год | 12,6 | 20,8 | 19,3 | 7,8 | 6,5 | 8,0 | 12,1 | 9,5 | 3,4 |

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 2.1 – Данные о средней абсолютной и средней из максимальных скоростей ветра (V) у поверхности земли по месяцам и в целом за год, за период 1956–2013 гг.

| м/с | Месяц | | | | | | | | | | | | Год |
|-------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | |
| Ср. V ветра | 5,2 | 5,4 | 5,6 | 5,9 | 5,5 | 5,4 | 5,2 | 4,9 | 4,6 | 4,6 | 4,8 | 4,9 | 5,2 |
| Абсолютный максимум V ветра | 25 | 27 | 32 | 32 | 29 | 37 | 25 | 32 | 23 | 23 | 24 | 25 | 37 |
| Ср. из макс. V ветра | 17,0 | 18,0 | 18,7 | 19,9 | 19,8 | 20,1 | 18,5 | 17,1 | 17,2 | 17,0 | 16,9 | 16,5 | 23,5 |
| Ср. число дней со V ветра ≥ 15 | 2,8 | 2,9 | 4,1 | 5,5 | 6,2 | 6,1 | 4,9 | 3,2 | 3,2 | 3,0 | 2,2 | 2,2 | 46,3 |

Таблица 3.1 – Повторяемость (в %) скорости ветра по румбам за период 1956–2013 гг.

Январь

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,7 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 2 – 5 | 5,4 | 11,1 | 12,6 | 8,4 | 6,7 | 5,8 | 4,3 | 3,6 |
| 6 – 10 | 1,3 | 5,6 | 9,2 | 2,9 | 3,3 | 4,4 | 3,0 | 1,0 |
| 11 – 15 | 0,1 | 0,7 | 2,7 | 0,1 | 0,8 | 1,3 | 0,7 | 0,1 |
| более 15 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |

Февраль

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| 2 – 5 | 6,7 | 10,3 | 11,9 | 7,1 | 5,5 | 4,3 | 4,7 | 3,9 |
| 6 – 10 | 2,6 | 8,5 | 9,1 | 2,7 | 2,8 | 3,7 | 2,9 | 1,5 |
| 11 – 15 | 0,2 | 1,5 | 2,6 | 0,2 | 0,6 | 1,3 | 0,8 | 0,3 |
| более 15 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0,2 | 0,0 |

Март

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,4 |
| 2 – 5 | 6,7 | 12,9 | 11,0 | 5,2 | 4,1 | 4,0 | 5,2 | 4,7 |
| 6 – 10 | 2,9 | 9,4 | 9,6 | 1,9 | 1,4 | 2,8 | 3,2 | 1,8 |
| 11 – 15 | 0,4 | 2,0 | 2,6 | 0,4 | 0,4 | 1,0 | 1,2 | 0,3 |
| более 15 | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 0,4 | 0,3 | 0,1 |

Апрель

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 |
| 2 – 5 | 6,8 | 10,7 | 10,6 | 4,5 | 3,0 | 3,7 | 5,6 | 4,9 |
| 6 – 10 | 4,0 | 8,9 | 9,4 | 2,3 | 1,3 | 3,0 | 3,8 | 2,1 |
| 11 – 15 | 0,9 | 2,2 | 3,6 | 0,5 | 0,3 | 1,2 | 1,1 | 0,5 |
| более 15 | 0,1 | 0,2 | 0,8 | 0,0 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,0 |

Продолжение таблицы 3.1

Май

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,5 | 0,4 |
| 2 – 5 | 7,8 | 11,6 | 10,9 | 5,0 | 3,6 | 3,8 | 7,3 | 6,4 |
| 6 – 10 | 4,5 | 6,9 | 6,4 | 1,6 | 0,8 | 2,4 | 4,6 | 3,0 |
| 11 – 15 | 0,9 | 1,5 | 1,9 | 0,4 | 0,2 | 0,8 | 1,8 | 0,9 |
| более 15 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,3 | 0,1 |

Июнь

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,3 |
| 2 – 5 | 8,4 | 11,2 | 9,5 | 4,3 | 3,0 | 3,1 | 7,0 | 7,6 |
| 6 – 10 | 5,6 | 6,5 | 4,0 | 1,5 | 0,8 | 2,3 | 6,6 | 5,7 |
| 11 – 15 | 1,7 | 1,4 | 0,7 | 0,4 | 0,2 | 0,7 | 2,2 | 1,4 |
| более 15 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,5 | 0,2 |

Июль

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,5 | 0,7 |
| 2 – 5 | 12,3 | 11,8 | 7,8 | 3,5 | 2,2 | 2,7 | 8,3 | 9,6 |
| 6 – 10 | 6,6 | 5,4 | 2,2 | 0,9 | 0,3 | 1,5 | 5,9 | 6,5 |
| 11 – 15 | 1,7 | 1,1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 2,3 | 1,7 |
| более 15 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,0 |

Август

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,4 |
| 2 – 5 | 13,1 | 16,6 | 8,9 | 3,4 | 2,0 | 2,6 | 7,6 | 8,6 |
| 6 – 10 | 5,9 | 7,1 | 3,3 | 0,6 | 0,4 | 1,2 | 4,5 | 4,3 |
| 11 – 15 | 1,2 | 1,0 | 0,9 | 0,1 | 0,0 | 0,3 | 1,5 | 0,9 |
| более 15 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 |

Сентябрь

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,9 | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,8 | 0,6 |
| 2 – 5 | 11,1 | 17,9 | 10,4 | 4,3 | 3,0 | 3,2 | 7,7 | 8,2 |
| 6 – 10 | 3,2 | 5,9 | 3,8 | 0,9 | 0,7 | 1,8 | 3,8 | 3,5 |
| 11 – 15 | 0,8 | 1,0 | 1,1 | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 1,2 | 0,6 |
| более 15 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,1 |

Продолжение таблицы 3.1

Октябрь

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 1,1 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,4 |
| 2 – 5 | 7,5 | 14,2 | 11,1 | 7,1 | 5,3 | 5,8 | 8,3 | 5,7 |
| 6 – 10 | 2,3 | 4,7 | 4,0 | 1,3 | 2,0 | 3,5 | 4,1 | 2,6 |
| 11 – 15 | 0,4 | 0,4 | 0,8 | 0,1 | 0,3 | 0,8 | 1,4 | 0,6 |
| более 15 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |

Ноябрь

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| 2 – 5 | 7,0 | 12,6 | 13,5 | 8,2 | 6,3 | 5,8 | 6,0 | 4,9 |
| 6 – 10 | 1,5 | 5,6 | 6,3 | 2,0 | 2,2 | 3,3 | 2,4 | 1,8 |
| 11 – 15 | 0,3 | 0,8 | 1,5 | 0,3 | 0,4 | 0,9 | 0,8 | 0,3 |
| более 15 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |

Декабрь

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 2 – 5 | 5,8 | 11,4 | 13,8 | 9,4 | 7,4 | 5,4 | 5,2 | 3,7 |
| 6 – 10 | 1,6 | 5,8 | 8,1 | 2,8 | 2,6 | 3,4 | 2,5 | 1,2 |
| 11 – 15 | 0,2 | 0,7 | 1,8 | 0,2 | 0,4 | 1,0 | 0,7 | 0,1 |
| более 15 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,0 |

Год

| Скорость ветра, м/с | Направление ветра, румбы | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
| 0 – 1 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,4 |
| 2 – 5 | 8,2 | 12,7 | 11,0 | 5,9 | 4,3 | 4,2 | 6,4 | 6,0 |
| 6 – 10 | 3,5 | 6,7 | 6,3 | 1,8 | 1,6 | 2,8 | 3,9 | 2,9 |
| 11 – 15 | 0,7 | 1,2 | 1,7 | 0,3 | 0,3 | 0,8 | 1,3 | 0,6 |
| более 15 | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |

Таблица 4.1 – Характеристики используемых метеорологических станций в районе космодрома «Восточный»

| Регион | Название станции | Высота над уровнем моря | Географические координаты |
|--------|------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Россия | Благовещенск | 132 м | 50° 16' с.ш. 127° 30' в.д. |
| | Шимановск | 281 м | 51° 59' с.ш. 127° 39' в.д. |
| | Свободный | 179 м | 51° 26' с.ш. 128° 07' в.д. |
| Китай | Хума | 179 м | 51° 43' с.ш. 126° 39' в.д. |
| | Хэйхэ | 166 м | 50° 15' с.ш. 127° 27' в.д. |

Таблица 5.1 – Характеристики скорости ветра (м/с) в слое от поверхности земли до высоты 25 км в районе космодрома «Восточный»

| Высо- та (км) | Средняя месячная скорость ветра/среднее квадратическое отклонение | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | XII | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | Год |
| 0 | 2/2 | 2/2 | 2/2 | 2/2 | 3/2 | 3/2 | 2/1 | 2/2 | 2/2 | 2/2 | 2/2 | 2/2 | 2/2 |
| 0,5 | 8/4 | 7/5 | 8/4 | 7/5 | 8/4 | 7/4 | 6/5 | 6/4 | 6/4 | 8/4 | 8/5 | 7/4 | 7/4 |
| 1 | 8/4 | 9/6 | 9/4 | 9/5 | 10/5 | 9/5 | 8/4 | 7/4 | 8/6 | 9/5 | 10/5 | 8/5 | 9/5 |
| 1,5 | 9/4 | 9/4 | 9/4 | 9/4 | 10/5 | 9/5 | 8/4 | 7/4 | 8/4 | 9/5 | 10/4 | 8/4 | 9/4 |
| 2 | 10/4 | 10/4 | 10/4 | 10/4 | 10/5 | 10/5 | 9/5 | 8/4 | 8/4 | 10/5 | 10/5 | 9/5 | 9/5 |
| 3 | 12/6 | 12/5 | 12/5 | 11/5 | 11/6 | 11/6 | 9/5 | 8/5 | 9/5 | 11/5 | 12/5 | 11/7 | 11/5 |
| 4 | 14/7 | 14/7 | 14/7 | 13/7 | 13/8 | 12/7 | 10/5 | 9/5 | 10/5 | 13/6 | 14/7 | 13/7 | 12/7 |
| 5 | 16/8 | 16/8 | 17/8 | 15/8 | 15/9 | 14/8 | 11/6 | 10/6 | 11/8 | 14/7 | 17/8 | 15/9 | 14/8 |
| 6 | 19/10 | 18/10 | 20/10 | 18/10 | 18/11 | 16/10 | 12/7 | 10/7 | 12/8 | 16/9 | 20/10 | 17/11 | 16/9 |
| 7 | 20/11 | 19/11 | 22/12 | 20/12 | 20/12 | 18/11 | 13/8 | 12/8 | 13/8 | 18/10 | 21/11 | 19/12 | 18/10 |
| 8 | 21/11 | 20/11 | 22/12 | 22/13 | 23/13 | 22/14 | 15/10 | 13/10 | 16/11 | 21/12 | 24/13 | 21/13 | 20/12 |
| 9 | 21/11 | 20/10 | 22/11 | 22/12 | 23/14 | 22/14 | 16/10 | 15/11 | 18/12 | 22/12 | 25/13 | 22/12 | 20/12 |
| 10 | 19/10 | 19/10 | 21/10 | 21/12 | 23/14 | 22/13 | 17/11 | 17/12 | 21/14 | 23/12 | 25/12 | 22/12 | 21/12 |
| 11 | 19/9 | 19/9 | 21/9 | 20/9 | 20/11 | 19/12 | 16/10 | 18/12 | 22/14 | 23/11 | 22/10 | 21/9 | 20/11 |
| 12 | 19/8 | 20/9 | 22/9 | 19/8 | 18/10 | 17/10 | 13/9 | 17/11 | 21/13 | 22/10 | 21/9 | 20/8 | 19/9 |
| 13 | 19/8 | 20/9 | 21/9 | 19/8 | 17/8 | 15/8 | 10/6 | 13/9 | 18/10 | 20/8 | 20/8 | 19/8 | 18/8 |
| 14 | 19/8 | 22/9 | 22/8 | 18/8 | 16/8 | 13/7 | 8/5 | 13/8 | 19/9 | 19/7 | 20/7 | 19/8 | 17/8 |
| 15 | 20/9 | 23/9 | 22/8 | 19/9 | 16/8 | 12/8 | 7/4 | 9/5 | 14/6 | 17/6 | 19/7 | 18/7 | 16/7 |
| 16 | 20/9 | 23/10 | 22/8 | 17/9 | 15/8 | 11/6 | 6/4 | 8/4 | 12/6 | 15/6 | 18/7 | 17/7 | 15/7 |
| 17 | 22/9 | 25/10 | 22/9 | 20/10 | 14/8 | 9/7 | 5/3 | 5/3 | 9/4 | 12/5 | 18/6 | 17/7 | 15/7 |
| 18 | 21/9 | 23/11 | 19/8 | 17/9 | 14/8 | 8/6 | 4/2 | 4/2 | 6/3 | 10/4 | 17/6 | 16/7 | 13/6 |
| 19 | 23/10 | 26/12 | 20/10 | 19/11 | 13/9 | 7/7 | 4/2 | 4/2 | 4/3 | 9/4 | 17/5 | 16/7 | 13/7 |
| 20 | 21/10 | 22/11 | 17/9 | 16/9 | 13/9 | 6/5 | 4/2 | 5/2 | 4/2 | 8/5 | 16/6 | 15/8 | 12/7 |
| 21 | 23/12 | 24/13 | 17/9 | 16/11 | 11/9 | 5/5 | 5/2 | 5/2 | 3/2 | 7/4 | 16/6 | 15/9 | 12/7 |
| 22 | 24/13 | 24/14 | 15/10 | 17/11 | 11/9 | 5/5 | 5/2 | 6/2 | 4/2 | 6/3 | 16/7 | 15/9 | 12/7 |
| 23 | 23/14 | 22/14 | 15/10 | 16/12 | 12/9 | 5/5 | 6/2 | 7/2 | 4/2 | 6/4 | 15/6 | 15/10 | 12/8 |
| 24 | 25/15 | 24/15 | 14/11 | 17/10 | 11/8 | 5/5 | 7/2 | 8/2 | 5/3 | 6/3 | 15/6 | 14/11 | 12/8 |
| 25 | 25/16 | 23/15 | 14/11 | 16/10 | 12/9 | 6/7 | 8/3 | 10/2 | 5/3 | 6/4 | 15/7 | 15/12 | 13/8 |

Таблица 6.1 – Характеристики скорости ветра (м/с) от поверхности земли до 25 км на космодромах «Байконур» и «Восточный»

| Высота (км) | Средняя сезонная скорость ветра/среднее квадратическое отклонение | | | | | | | | | |
|----------------|---|-------|-----------------|-------|-------------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|
| | Год | | Зимний сезон | | Весенний сезон | | Летний сезон | | Осенний сезон | |
| | Б | В | Б | В | Б | В | Б | В | Б | В |
| 0 | 5/2 | 2/2 | 5/2 | 2/2 | 5/2 | 3/2 | 4/2 | 2/2 | 4/2 | 2/2 |
| 0,5 | 9/4 | 7/4 | 9/5 | 8/4 | 9/4 | 8/4 | 8/4 | 6/4 | 7/4 | 8/4 |
| 1 | 8/4 | 9/5 | 9/5 | 9/5 | 8/4 | 9/5 | 8/4 | 7/5 | 7/4 | 9/5 |
| 1,5 | 8/4 | 9/4 | 9/5 | 9/4 | 8/4 | 9/5 | 8/4 | 8/4 | 7/4 | 9/4 |
| 2 | 8/5 | 9/5 | 9/5 | 10/4 | 9/5 | 10/5 | 8/4 | 8/4 | 8/5 | 10/5 |
| 3 | 10/6 | 11/5 | 10/6 | 12/5 | 10/6 | 11/5 | 9/5 | 9/5 | 9/5 | 11/6 |
| 4 | 11/7 | 12/7 | 11/7 | 14/7 | 12/7 | 13/7 | 11/5 | 10/5 | 11/7 | 13/7 |
| 5 | 13/7 | 14/8 | 13/8 | 16/8 | 14/8 | 15/8 | 12/6 | 11/7 | 13/8 | 15/8 |
| 6 | 15/8 | 16/9 | 15/9 | 19/10 | 16/8 | 18/10 | 13/7 | 11/7 | 15/9 | 18/10 |
| 7 | 16/9 | 18/10 | 17/10 | 20/11 | 18/9 | 20/12 | 14/8 | 13/8 | 17/10 | 19/11 |
| 8 | 18/10 | 20/12 | 18/11 | 21/11 | 20/11 | 22/13 | 17/9 | 15/10 | 19/11 | 22/12 |
| 9 | 20/11 | 20/12 | 19/12 | 21/11 | 22/12 | 22/13 | 19/10 | 16/11 | 21/11 | 23/12 |
| 10 | 22/12 | 21/12 | 20/11 | 20/10 | 24/12 | 22/13 | 22/12 | 18/12 | 22/12 | 23/12 |
| 11 | 23/12 | 20/11 | 20/9 | 20/9 | 24/12 | 20/11 | 26/14 | 19/12 | 23/12 | 22/10 |
| 12 | 24/11 | 19/9 | 20/8 | 20/8 | 23/11 | 18/9 | 29/14 | 17/11 | 23/10 | 21/9 |
| 13 | 23/10 | 18/8 | 20/7 | 20/8 | 21/9 | 17/8 | 30/13 | 14/8 | 22/9 | 20/8 |
| 14 | 23/9 | 17/8 | 20/7 | 21/9 | 20/8 | 16/8 | 28/12 | 13/7 | 22/8 | 19/8 |
| 15 | 21/8 | 16/7 | 20/7 | 22/9 | 19/8 | 16/8 | 26/10 | 10/5 | 21/7 | 18/7 |
| 16 | 20/7 | 15/7 | 20/8 | 22/9 | 18/7 | 14/8 | 21/9 | 9/4 | 19/6 | 17/7 |
| 17 | 18/7 | 15/7 | 21/8 | 23/9 | 17/7 | 14/9 | 17/7 | 6/3 | 18/5 | 16/6 |
| 18 | 16/6 | 13/6 | 20/8 | 21/9 | 15/6 | 13/8 | 12/5 | 5/3 | 17/5 | 14/6 |
| 19 | 15/6 | 13/7 | 21/9 | 23/10 | 14/7 | 13/9 | 8/4 | 4/2 | 16/5 | 14/6 |
| 20 | 13/6 | 12/7 | 21/10 | 20/10 | 13/7 | 12/8 | 5/3 | 4/2 | 15/5 | 13/6 |
| 21 | 13/7 | 12/7 | 23/12 | 21/11 | 11/7 | 11/8 | 4/3 | 4/2 | 14/5 | 13/6 |
| 22 | 13/7 | 12/7 | 24/12 | 21/13 | 11/7 | 11/8 | 4/3 | 5/2 | 14/5 | 12/7 |
| 23 | 13/7 | 12/7 | 23/14 | 20/13 | 11/7 | 11/9 | 5/2 | 6/2 | 15/5 | 12/6 |
| 24 | 14/7 | 12/8 | 24/14 | 21/14 | 11/7 | 11/8 | 6/3 | 7/2 | 15/5 | 11/7 |
| 25 | 15/8 | 13/8 | 26/15 | 20/14 | 11/8 | 11/9 | 7/2 | 8/2 | 16/6 | 12/8 |

Таблица 7.1 – Число дней с грозой за период 1985–2013 гг. на метеостанции Мазаново

| Год | Месяц | | | Общее | Срок (ВСВ) | |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | VI | VII | VIII | | 0 | 12 |
| 1985 | 12 | 5 | 3 | 20 | 2 | 13 |
| 1986 | 5 | 9 | 6 | 20 | 3 | 10 |
| 1987 | 8 | 9 | 7 | 24 | 3 | 10 |
| 1988 | 12 | 5 | 3 | 20 | 2 | 7 |
| 1989 | 8 | 8 | 6 | 22 | 2 | 10 |
| 1990 | 7 | 9 | 6 | 22 | 1 | 12 |
| 1991 | 5 | 6 | 8 | 19 | 2 | 6 |
| 1992 | 11 | 6 | 5 | 22 | 2 | 12 |
| 1993 | 8 | 17 | 9 | 34 | 3 | 21 |
| 1994 | 3 | 12 | 8 | 23 | 4 | 13 |
| 1995 | 8 | 11 | 4 | 23 | 5 | 11 |
| 1996 | 11 | 8 | 7 | 26 | 1 | 20 |
| 1997 | 7 | 4 | 6 | 17 | 3 | 8 |
| 1998 | 9 | 5 | 5 | 19 | 1 | 10 |
| 1999 | 7 | 5 | 5 | 17 | 1 | 9 |
| 2000 | 6 | 9 | 8 | 23 | 2 | 8 |
| 2001 | 5 | 6 | 9 | 20 | 2 | 9 |
| 2002 | 6 | 11 | 5 | 22 | 3 | 9 |
| 2003 | 7 | 11 | 12 | 30 | 4 | 15 |
| 2004 | 9 | 9 | 10 | 28 | 4 | 15 |
| 2005 | 13 | 5 | 6 | 24 | 1 | 10 |
| 2006 | 8 | 17 | 9 | 34 | 10 | 11 |
| 2007 | 6 | 8 | 5 | 19 | 2 | 10 |
| 2008 | 7 | 11 | 5 | 23 | 3 | 11 |
| 2009 | 9 | 13 | 7 | 29 | 1 | 10 |
| 2010 | 11 | 15 | 12 | 38 | 9 | 16 |
| 2011 | 10 | 12 | 7 | 29 | 4 | 13 |
| 2012 | 13 | 7 | 6 | 26 | 2 | 10 |
| 2013 | 6 | 12 | | 18 | 2 | 11 |
| всего | 237 | 265 | 189 | 691 | 84 | 330 |
| среднее | 8 | 9 | 7 | 24 | 3 | 11 |
| max | 13 | 17 | 12 | 38 | 10 | 21 |
| min | 3 | 4 | 3 | 17 | 1 | 6 |

Таблица 7.2 – Число дней с грозой за период 1985–2013 гг. на метеостанции Благовещенск

| год | месяц | | | общее | срок (BCB) | |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | VI | VII | VIII | | 0 | 12 |
| 1985 | 9 | 4 | 7 | 20 | 2 | 8 |
| 1986 | 7 | 7 | 4 | 18 | 1 | 4 |
| 1987 | 3 | 10 | 8 | 21 | | 13 |
| 1988 | 7 | 4 | 5 | 16 | 2 | 4 |
| 1989 | 9 | 10 | 6 | 25 | 3 | 10 |
| 1990 | 8 | 9 | 5 | 22 | | 9 |
| 1991 | 4 | 4 | 5 | 13 | | 6 |
| 1992 | 10 | 11 | 4 | 25 | | 9 |
| 1993 | 4 | 10 | 5 | 19 | 4 | 5 |
| 1994 | 6 | 6 | 6 | 18 | | 6 |
| 1995 | 9 | 5 | 6 | 20 | 3 | 2 |
| 1996 | 9 | 7 | 6 | 22 | 2 | 9 |
| 1997 | 7 | 8 | 8 | 23 | 3 | 9 |
| 1998 | 10 | 3 | 2 | 15 | 1 | 6 |
| 1999 | 8 | 8 | 6 | 22 | 1 | 5 |
| 2000 | 4 | 6 | 5 | 15 | 1 | 5 |
| 2001 | 4 | 7 | 4 | 15 | | 6 |
| 2002 | 7 | 9 | 5 | 21 | 5 | 6 |
| 2003 | 7 | 11 | 9 | 27 | 1 | 8 |
| 2004 | 4 | 9 | 6 | 19 | | 7 |
| 2005 | 10 | 4 | 5 | 19 | | 9 |
| 2006 | 9 | 15 | 6 | 30 | 1 | 7 |
| 2007 | 7 | 2 | 6 | 15 | 3 | 5 |
| 2008 | 6 | 8 | 8 | 22 | 3 | 5 |
| 2009 | 8 | 6 | 7 | 21 | 2 | 8 |
| 2010 | 10 | 15 | 8 | 33 | 2 | 14 |
| 2011 | 12 | 15 | 13 | 40 | 4 | 14 |
| 2012 | 9 | 12 | 4 | 25 | 3 | 9 |
| 2013 | 7 | 11 | 15 | 33 | 2 | 17 |
| всего | 214 | 236 | 184 | 634 | 49 | 225 |
| среднее | 7 | 8 | 6 | 22 | 2 | 8 |
| max | 12 | 15 | 15 | 40 | 5 | 17 |
| min | 3 | 2 | 2 | 13 | 1 | 2 |

Рисунок 7.1 – Временной ход числа дней с грозой за период 1985–2013 гг. на метеостанции Благовещенск

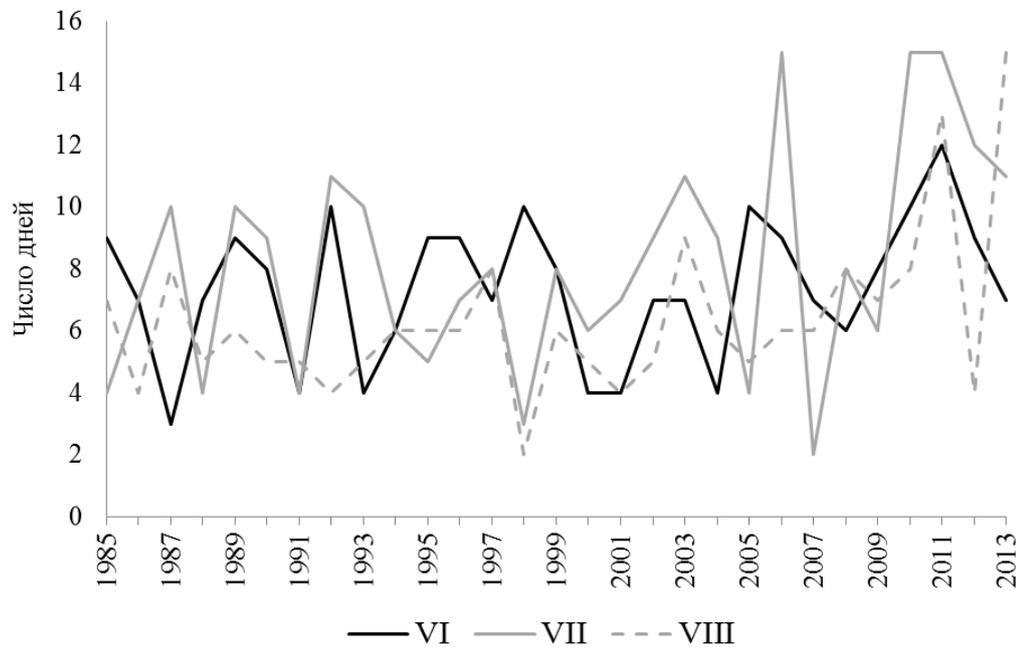


Рисунок 7.2 – Временной ход числа дней с грозой за период 1985–2013 гг. в срок 00 и 12 ВСВ на метеостанции Благовещенск

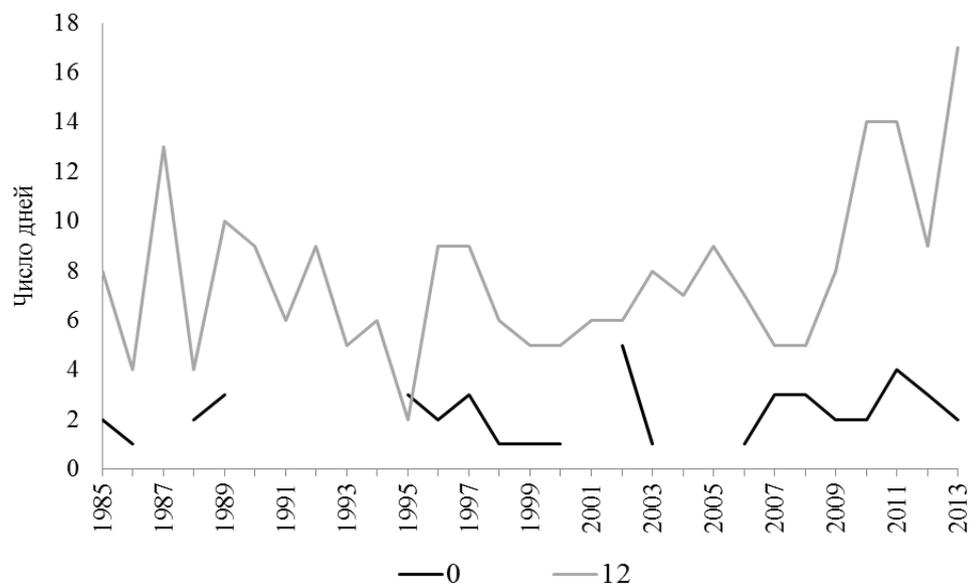


Рисунок 7.3 – Автокорреляционная функция (а) и частная автокорреляционная функция (б) для метеостанции Благовещенск

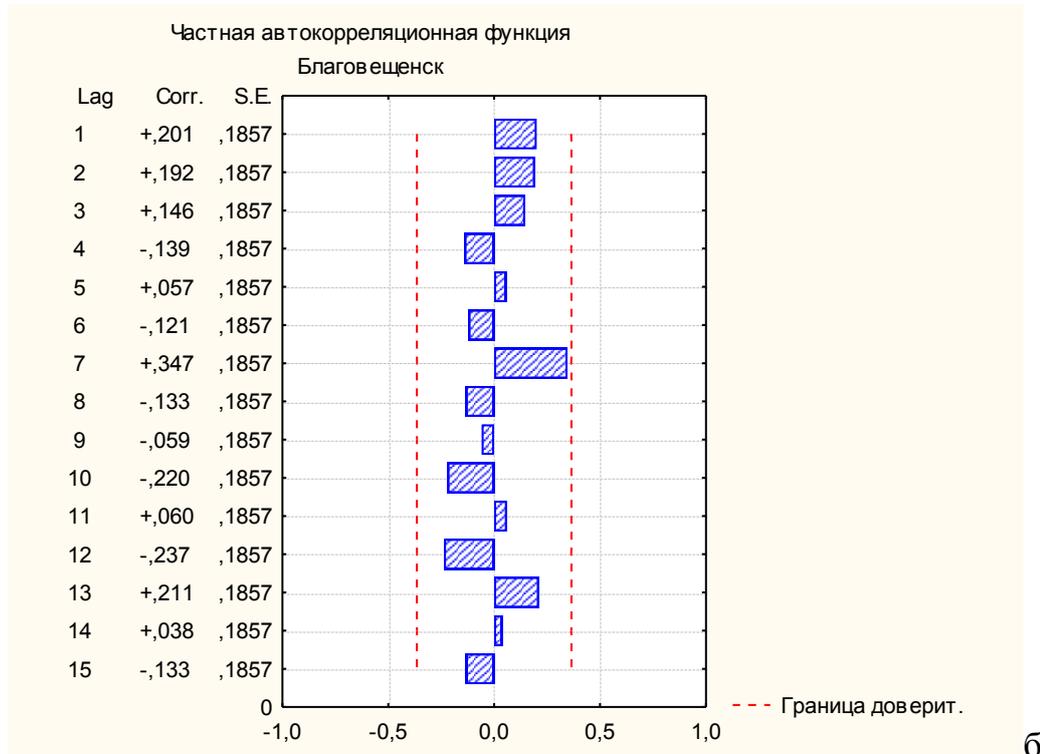
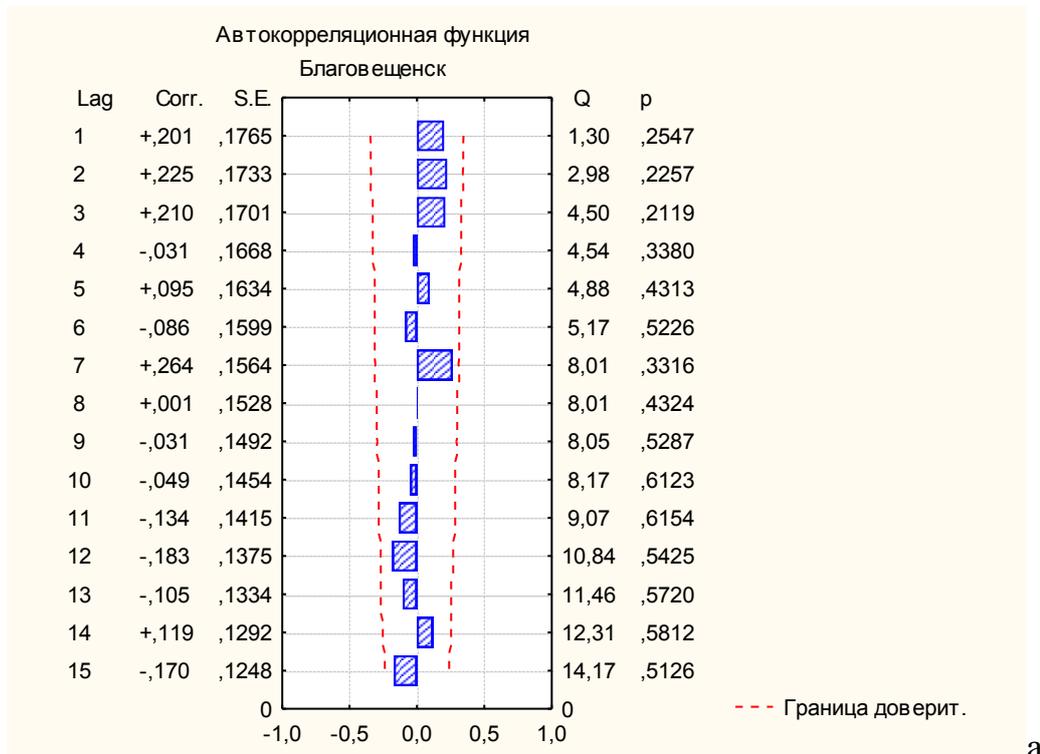


Рисунок 7.4 – Автокорреляционная функция (а) и частная автокорреляционная функция (б) для метеостанции Мазаново

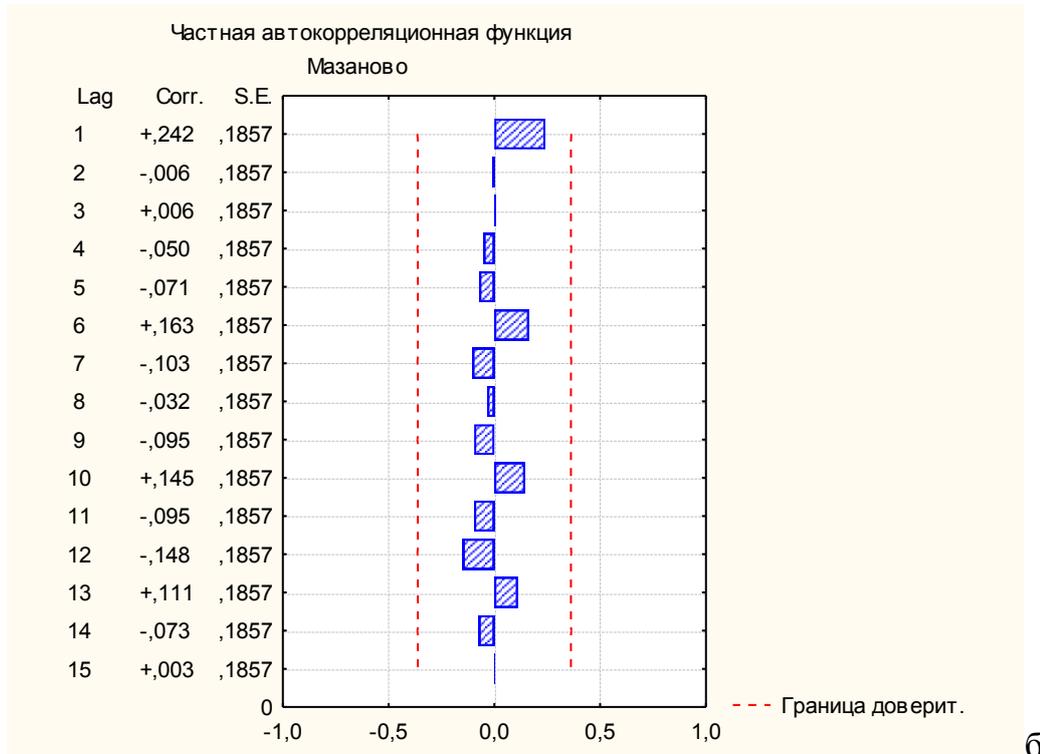


Таблица 8.1 – Интервалы значений индексов для различных состояний атмосферы

| Состояние атмосферы | Значения индексов | | | | |
|---|-------------------|-------------|-----------|-----------|---------------|
| | LIFT, °C | SWEAT | KIND, °C | TOTL, °C | CAPE, Дж/кг |
| Слабо неустойчива (наличие ливней, отдельных гроз) | -3 ... 0 | 100 ... 200 | 25 ... 30 | 40 ... 45 | 0 ... 1000 |
| Неустойчива (наличие ливней и гроз) | -6 ... -3 | 200 ... 300 | 30 ... 35 | 45 ... 50 | 1000 ... 2000 |
| Сильно неустойчива (на всей территории регистрируются интенсивные грозы, град, ливни) | -9 ... -6 | 300 ... 400 | 35 ... 40 | 50 ... 55 | 2000 ... 2500 |
| Крайне неустойчива (гроза, град, смерч) | < -9 | > 400 | > 40 | > 55 | > 2500 |

Таблица 9.1 – Итоговая таблица дискриминантного функционального анализа значений индексов для групп «ливень» и «гроза» (шаг 1)

| N=380 | Wilks' Lambda: ,80568 approx. F (5,374)=18,041 p< ,0000 | | | | | |
|--------------|---|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Wilks' Lambda | Partial Lambda | F-remove | p-level | Toler. | 1-Toler. |
| LIFT | 0,858560 | 0,938403 | 24,54922 | 0,000001 | 0,341733 | 0,658267 |
| KIND | 0,819218 | 0,983470 | 6,28634 | 0,012590 | 0,769420 | 0,230580 |
| LFCT | 0,810234 | 0,994374 | 2,11619 | 0,146587 | 0,892629 | 0,107371 |
| CAPE | 0,812587 | 0,991495 | 3,20806 | 0,074085 | 0,342704 | 0,657296 |
| SWEAT | 0,810798 | 0,993683 | 2,37777 | 0,123919 | 0,740058 | 0,259942 |

Таблица 9.2 – Итоговая таблица дискриминантного функционального анализа значений индексов для групп «ливень» и «гроза» (шаг 2)

| N=380 | Wilks' Lambda: ,81692 approx. F (3,376)=28,088 p< ,0000 | | | | | |
|-------|---|----------------|----------|----------|----------|----------|
| | Wilks' Lambda | Partial Lambda | F-remove | p-level | Toler. | 1-Toler. |
| LIFT | 0,876907 | 0,931594 | 27,60930 | 0,000000 | 0,345311 | 0,654689 |
| KIND | 0,837333 | 0,975622 | 9,39510 | 0,002333 | 0,820700 | 0,179301 |
| CAPE | 0,825376 | 0,989756 | 3,89173 | 0,049257 | 0,370311 | 0,629689 |

Рисунок 9.1 – Диаграмма размаха индексов LIFT (а) и KIND (б) для состояний «гроза» и «ливень»

