

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 504.35

В.П. Горбатенко, А.А. Громницкая, О.И. Золотухина

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ОПАСНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ В РАЙОНЕ КОСМОДРОМА «ВОСТОЧНЫЙ»

Результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (№ 5.628.2014/К).

Представлена временная и пространственная изменчивость грозовой активности на территории исследования; проведен сравнительный анализ индексов неустойчивости атмосферы в дни «грозы с ливнем» и «ливень»; определены интервалы значений индексов неустойчивости атмосферы, при которых можно регистрировать состояние атмосферы «гроза с ливнем» или «ливень»; проведен дискриминантный анализ для разделения этих состояний атмосферы. В работе используются несколько индексов неустойчивости атмосферы, которые характеризуют параметры конвекции в дни с опасными конвективными явлениями: *LIFT*, *SWEAT*, *KIND*, *TOTL* и *CAPE*. 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 ракет космического назначения на стартовых комплексах.

Ключевые слова: космодром «Восточный»; конвекция в атмосфере; «гроза с ливнем»; «ливень»; индексы неустойчивости атмосферы.

Введение

Опасные явления погоды, такие как грозы и ливни, связанные с зонами активной конвекции, относятся к мезомасштабным метеорологическим явлениям. Они образуются в результате сложного взаимодействия атмосферных процессов синоптического масштаба и подстилающей поверхности. Горизонтальные размеры конвективных зон во много раз меньше расстояния между метеорологическими станциями, на которых они наблюдаются, также невелика продолжительность гроз и ливней. Все это определяет трудности в регистрации, изучении и прогнозировании явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции, в том числе в рамках численных моделей атмосферы [1].

Опасные явления погоды (гроза, ливневый дождь, шквал, сильный ветер) могут оказать существенное влияние на ход выполнения работ с ракетами космического назначения (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 явлений погоды постоянно контролируют специалисты метеорологической службы космодрома. Кроме параметров конвекции необходимо учитывать влияние ветра у поверхности земли и в свободной атмосфере, поскольку каждая конкретная операция выполнения работ по подготовке и пуску РКН [2] имеет определённые ограничения по параметрам ветра либо в полной мере зависит от их численных значений.

Для сведения к минимуму воздействия опасных явлений погоды на технические средства и специалистов, выполняющих работы, необходимо с максимальной заблаговременностью предупредить должностных лиц, которые руководят подготовкой и пуском РКН. В настоящее время на территории Амур-

ской области активно строится космодром «Восточный», общая площадь которого составляет около 700 км². Целью строительства космодрома является обеспечение независимого доступа России в космическое пространство. В 2016 г. планируется первый пуск ракеты-носителя, а в 2018 г. – пилотируемого космического корабля.

В связи с вышесказанным изучение характеристик конвекции и опасных конвективных явлений погоды в районе строящегося космодрома «Восточный» является актуальным.

Целью работы является исследование повторяемости опасных конвективных явлений и термодинамических характеристик атмосферы в дни с грозой и ливнем в районе космодрома «Восточный».

В результате исследования предполагается выделить характеристики атмосферы, при которых над исследуемой территорией наблюдаются ливневые осадки и ливневые осадки в сопровождении грозы. Известно, что при наличии грозы неустойчивость атмосферы гораздо больше, чем при наличии ливневых осадков без грозы [1].

Данные о времени образования и локализации ливней и гроз за летний период (июнь–август) 1985–2013 гг. были получены с сети метеорологических станций Амурской области (Шимановск, Свободный, Мазаново, Братолюбовка и Благовещенск), а также с метеостанций Китая (Хума и Хэйхэ) [3, 4]. Все метеорологические станции находятся в радиусе 200 км от космодрома «Восточный» и территориально отнесены к ближайшей аэрологической станции Амурской области – Благовещенск.

В те дни, когда на метеостанциях регистрировались ливни и ливни с грозой, изучались термодинамические характеристики атмосферы, полученные по данным аэрологического зондирования со станции Благовещенск в сроки 00 и 12 ч всемирного скоординированного времени (BCB) [5].

Характеристика грозовой активности в районе космодрома «Восточный»

Для выявления закономерностей повторяемости гроз в районе космодрома «Восточный» послужили данные метеостанции Благовещенск, где за рассматриваемый период отмечалось ежегодно в среднем 22 дня с грозой: в среднем по 7–8 дней с грозой за каждый месяц летнего периода, при этом ночных гроз наблюдалось не более двух. На рис. 1 представлен временной ход грозовой активности и проанализирована тенденция ее увеличения к концу исследуемого периода. Очевидно, что изменчивость грозовой активности резко усилилась, тем не менее наблюдаемая тенденция роста статистически не значима с вероятностью 95%.

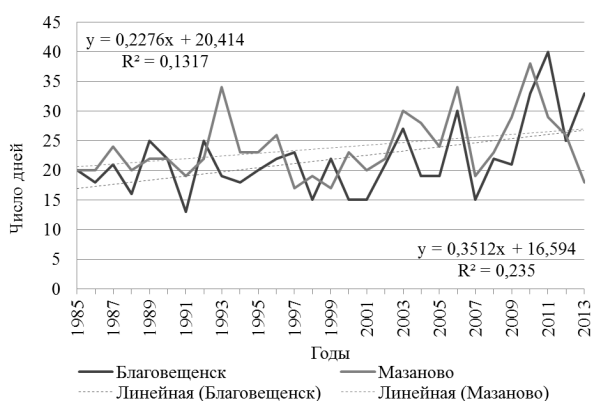


Рис. 1. Временная изменчивость грозовой активности на метеостанциях Благовещенск и Мазаново

Данные грозовой активности на станции Благовещенск коррелируют с данными метеорологических станций Шимановск, Свободный, Мазаново, Братолюбовка, Хума и Хэйхэ с вероятностью не менее 95%.

При помощи автокорреляционной функции обнаружено, что статистически значимым с вероятностью 95% является цикл грозовой активности продолжительностью 7 лет. Однако этот результат можно считать предварительным, поскольку значимых с вероятностью не менее 95% циклов в рядах грозовой активности на станции Мазаново не обнаружено. Тем не менее циклы грозовой активности могут иметь место, но для их надежного обнаружения необходимы ряды более длительных наблюдений за грозами.

Характеристики, описывающие неустойчивость атмосферы

Для описания степени развития конвекции были отобраны индексы, наиболее часто используемые в исследованиях такого рода [6–10].

В первую очередь это индекс, описывающий лагетную неустойчивость атмосферы ($LIFT$), который характеризует интенсивность вертикальных движений, обусловленных стратификацией температуры воздуха. Например, интенсивные грозы формируются в атмосфере с положительной энергией неустойчивости во всем слое облакообразования [6, 8]:

$$LIFT = T_{500} - T_{parcel} \quad (1)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа ($^{\circ}\text{C}$); T_{parcel} – температура частицы на уровне 500 гПа, поднявшейся с уровня 500 м над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы ($^{\circ}\text{C}$).

Степень развития вынужденной конвекции при влажнонеустойчивой стратификации атмосферы зависит от толщины влажнонеустойчиво стратифицированных слоев. Заметим, что наличие таких слоев является необходимым условием для развития опасных конвективных явлений. Поэтому вторую группу индексов представляют индексы, в которых кроме стратификации температуры присутствуют характеристики влажности – $KIND$, $TOTL$:

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (TD_{850} - T_{500}), \quad (2)$$

$$KIND = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700}), \quad (3)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа ($^{\circ}\text{C}$); T_{850} – температура на уровне 850 гПа ($^{\circ}\text{C}$); TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа ($^{\circ}\text{C}$); T_{700} – температура на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); TD_{700} – температура точки росы на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$).

Третья группа индексов оценивает энергию конвективного потенциала атмосферы. Величина энергии неустойчивости является неизменным предиктором в прогнозе опасных явлений, связанных с конвекцией. Высокий уровень потенциальной энергии атмосферы является неперенным условием того, что поднимающаяся частица достигнет больших высот. Эту характеристику состояния атмосферы достаточно эффективно отражает индекс $CAPE$ [6, 8]:

$$CAPE = g \int_{LFCT}^{EQLV} dz \times (T_p - T_e) / T_e, \quad (4)$$

где T_p – температура частицы, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью до уровня конденсации сухоадиабатически, выше уровня конденсации влажнотермодинамически ($^{\circ}\text{C}$); T_e – температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$); $LFCT$ – уровень, с которого начинается конвекция (гПа); $EQLV$ – уровень, равновесия, на котором конвекция прекращается (гПа); g – ускорение свободного падения (м/с^2); dz – толщина слоя между уровнями $LFCT$ и $EQLV$ (гПа).

Четвертая группа индексов оценивает совокупность температурно-влажностных и ветровых характеристик; наиболее популярным из них является индекс «суровости погоды» ($SWEAT$). Индекс $SWEAT$ оценивает степень неустойчивости атмосферы, объединяя несколько параметров в одном индексе: толщину влажнотермодинамического слоя на уровне 850 гПа, стратификацию температуры, скорость и величину сдвига ветра в слое между поверхностями 850 и 500 гПа:

$$SWEAT = 12TD_{850} + 20(TOTL - 49) + 2SKT_{850} + SKT_{500} + SHEAR, \quad (5)$$

где TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа ($^{\circ}\text{C}$); SKT_{850} – скорость ветра в узлах на уровне 850 гПа, SKT_{500} – скорость ветра в узлах на уровне 500 гПа, $SHEAR$ – сдвиг ветра между уровнями 500 и 850 гПа.

Состояние атмосферы в дни с опасными конвективными явлениями

Для описания состояния атмосферы в дни с зарегистрированными опасными конвективными явлениями рассчитывались значения всех перечисленных выше индексов. Результаты сравнивались с данными, приведенными в [11], но рассчитанными для других регионов.

Определенной степени неустойчивости атмосферы соответствует конкретный интервал значений индексов (табл. 1). Авторами [11] качественно поделена степень развития неустойчивости атмосферы: слабо неустойчивая, неустойчивая, сильно неустойчивая, крайне неустойчивая и экстремально неустойчивая. Качественными признаками степени неустойчивости являлись гроза, град, шквал, смерч.

Таблица 1

Интервалы значений индексов для различных состояний атмосферы

Состояние атмосферы	Значения индексов				
	<i>LIFT</i> , °C	<i>SWEAT</i>	<i>KIND</i> , °C	<i>TOTL</i> , °C	<i>CAPE</i> , Дж/кг
	> 0	< 100	< 25	< 40	< 0
Слабо неустойчива (наличие ливней, отдельных гроз)	–3 ... 0	100 ... 200	25 ... 30	40 ... 45	0 ... 1 000
Неустойчива (наличие ливней и гроз)	–6 ... –3	200 ... 300	30 ... 35	45 ... 50	1 000 ... 2 000
Сильно неустойчива (на всей территории регистрируются интенсивные грозы, град, ливни)	–9 ... –6	300 ... 400	35 ... 40	50 ... 55	2 000 ... 2 500
Крайне неустойчива (гроза, град, смерч)	< –9	> 400	> 40	> 55	> 2 500

В процессе анализа пространственного распределения гроз на территории Амурской области было выявлено, что территория, охваченная грозовой деятельностью, может быть различна. Поэтому имеющаяся информация была разделена на две категории.

В первую категорию были отнесены дни, когда грозы наблюдались на одной из станций, – «отдельные грозы». Ко второй категории были отнесены дни,

когда грозы регистрировались на двух и более метеорологических станциях, – «повсеместные грозы».

Сравнивая статистические характеристики термодинамических параметров атмосферы в дни, отнесенные к категориям «отдельные грозы» и «повсеместные грозы» (табл. 2), можно сделать вывод, что значения индексов имеют незначимые с вероятностью 95% различия по критерию Пирсона.

Таблица 2

Статистические характеристики термодинамических параметров для аэрологической станции Благовещенск при состояниях атмосферы по категориям «отдельные грозы» и «повсеместные грозы» в 12 ч ВСВ

Индекс	Отдельные грозы			Повсеместные грозы		
	Среднее	σ	Экстремум	Среднее	σ	Экстремум
<i>LIFT</i> , °C	–1,5	2,5	–7,7	–1,7	2,4	–8,8
<i>SWEAT</i>	195	68	454	207	77	466
<i>KIND</i> , °C	32	5	52	33	4	43
<i>TOTL</i> , °C	49	9	47	49	4	59
<i>CAPE</i> , Дж/кг	551	608	3 502	620	682	3 078

Под экстремумами понимаются минимальные значения индекса *LIFT* и максимальные значения индексов *SWEAT*, *KIND*, *TOTL* и *CAPE*. Эти значения выбраны для анализа, поскольку являются показателями наивысшей степени развития конвекции.

Для выявления причины незначительных отличий термодинамических параметров атмосферы в дни, отнесенные к категориям «отдельные грозы» и «повсеместные грозы», были изучены характеристики ветра во время гроз. Замечено, что в 80% случаев всех дней с грозой преобладает ветер южных направлений. При таком направлении ветра радиозонд, выпускаемый с аэрологической станции Благовещенск, летит в направлениях с северной составляющей, т.е. в большинстве случаев траектория радиозонда пересекает очаг неустойчивости атмосферы. Поскольку большинство анализируемых метеорологических станций, наблюдающих грозы, расположены именно в этом направлении от аэрологической станции, радиозонд с большой вероятностью пересечет зону максимальной неустойчивости атмосферы. Следовательно, при определении вероятности образования грозы можно не выделять категории «отдельные грозы» и «повсеместные грозы», а давать вероятностный прогноз для общей категории «гроза».

Поскольку целью наших исследований является определение степени развития конвекции, результатом которой может быть либо ливень, либо в ливень в сопровождении грозы, необходимо определить значения индексов в дни, отнесенные к категориям «ливень» и «гроза с ливнем». В табл. 3 приведены статистические характеристики термодинамических значений для этих категорий состояния атмосферы.

Сравнивая значения индексов (табл. 3) «ливень» и «гроза с ливнем», видно, что:

- средние значения индексов *KIND* и *TOTL* в категориях «ливень» и «гроза с ливнем», которые характеризуют не только термодинамическую неустойчивость, но и влажность в слое 700–850 гПа, существенно не отличаются. Сравнивая их с интервалами табл. 1, видно, что атмосфера является неустойчивой и при таком состоянии могут наблюдаться ливни и грозы;

- среднее значение индекса *LIFT*, который характеризует разницу температур окружающей среды и поднимающейся частицы, при состоянии «гроза с ливнем» больше значения состояния «ливень», что полностью соответствует физическим процессам развития конвекции в атмосфере. По данным классифи-

кации (табл. 1), составленной для других климатических условий, при таких значениях индекса возможны не только ливни, но и отдельные грозы;

– комплексный параметр *SWEAT* «гроза с ливнем» примерно на 30 единиц превосходит тот же параметр «ливень», так как в грозовых облаках отмечаются большие скорости ветра и значительные сдвиги ветра. Согласно табл. 1 средние значения данного параметра также классифицируют атмосферу как слабо неустойчивую с возможностью развития не только ливней, но и отдельных гроз;

– потенциальная конвективная энергия атмосферы (*CAPE*) в дни с категорией «гроза с ливнем» составляет 572 Дж/кг, это в 1,5 раза больше значения индекса *CAPE* в дни с категорией «ливень». По данным табл. 1, когда

значения индекса принимают такие значения, вероятно только слабое развитие конвекции. На исследуемой территории невысокие значения индекса получены при наличии даже сильных гроз, следовательно, значения характеристики *CAPE*, регистрируемые над анализируемой территорией, значительно отличаются от значений, рассчитанных для территорий с другим климатом.

В первую очередь это можно объяснить тем, что высота, до которой может развиваться конвекция над исследуемой территорией и территориями, для которых составлена табл. 1, существенно различаются. Например, известно, что в тропиках верхняя граница тропосферы достигает высот 16–18 км, в то время как над анализируемой территорией даже в летнее время она 10–12 км [12].

Таблица 3

Статистические характеристики термодинамических индексов для аэрологической станции Благовещенск при категориях «ливень» и «гроза с ливнем» за срок 12 ч ВСВ

Индекс	Ливень			Гроза с ливнем		
	Среднее	σ	Экстремум	Среднее	σ	Экстремум
<i>LIFT</i> , °C	–0,3	2,5	–7,7	–1,6	2,4	–8,8
<i>SWEAT</i>	171	60	383	199	71	466
<i>KIND</i> , °C	30	5	50	32	5	52
<i>TOTL</i> , °C	47	4	56	49	4	59
<i>CAPE</i> , Дж/кг	350	522	3 528	577	642	3 902

Таблица 4

Статистические характеристики термодинамических параметров для аэрологической станции Новосибирск при категориях «ливень» и «гроза с ливнем» за срок 12 ч ВСВ

Индекс	Ливень			Гроза с ливнем		
	Среднее	σ	Экстремум	Среднее	σ	Экстремум
<i>LIFT</i> , °C	2,1	4,4	–9,2	–2,3	3,2	–10,0
<i>SWEAT</i>	133	60	320	179	83	366
<i>KIND</i> , °C	25,9	6,6	36,0	30,4	6,9	38,9
<i>TOTL</i> , °C	46,7	4,8	55,5	49,5	4,7	57
<i>CAPE</i> , Дж/кг	157	325	1842	635	567	1972

Кроме того, невысокие значения других анализируемых нами индексов обусловлены тем, что аэрологическое зондирование атмосферы в исследуемом регионе выполняется в сроки 00 и 12 ч ВСВ (что соответствует 9 и 21 ч местного времени), а в часы максимально возможного развития конвекции, т.е. 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).

Если сравнить результаты с данными по Западной Сибири (табл. 4) [13], то можно сказать, что пороговые значения индексов *LIFT*, *SWEAT*, *CAPE* и *KIND* несколько отличаются, только у индекса *TOTL* значимых различий не наблюдается. Причиной тому может стать несовпадение исследуемых периодов и разница климатов Западной Сибири и Дальнего Востока.

Пороговые значения индексов в дни «ливень» и «гроза с ливнем»

При анализе результатов аэрологического зондирования и определении вероятности развития того или иного опасного конвективного явления необходимо определить интервалы значений индексов, соответствующие значению вероятности.

С уменьшением значений индекса *LIFT* неустойчивость атмосферы увеличивается. Кумулятивная кривая (рис. 2, а) дает наглядное представление, как меняется накопленная относительная частота ливней и гроз при изменении индекса *LIFT*. Анализируя рис. 2, а, можно утверждать, что при значениях индекса *LIFT* от –9 до 0°С регистрируется не менее 75% всех ливней и 85% всех гроз.

При одинаковых значениях индексов накопленная относительная частота ливней и гроз неодинакова, следовательно, и вероятности возникновения этих явлений будут отличаться (рис. 2, б). Результатом данного исследования стали пороговые значения индексов для различных вероятностей ливней и гроз (табл. 5).

По классификации, представленной в табл. 1, пороговые значения индексов *LIFT*, *SWEAT* и *CAPE* для территорий, рассмотренных в работах [13, 14], несколько отличаются от пороговых значений, определенных в результате настоящих исследований (табл. 5). В грациях значений индексов *KIND* и *TOTL*, соответствующих разным степеням развития конвекции, значимых различий не наблюдается [15].

Используя пороговые значения индексов, анализируемых в работе, для территории Амурской области, можно прогнозировать пространственное положение

грозовых очагов с помощью негидростатических моделей типа WRF или привлекая данные метеорологи-

ческих спутников, на которых установлены спектро- радиометры MODIS [16–18].

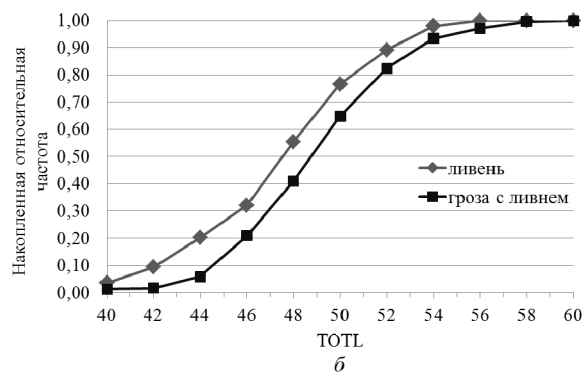
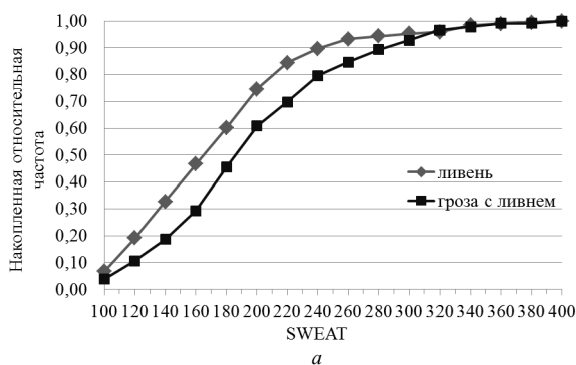


Рис. 2. Кумулятивная кривая за срок 12 ч ВСВ индекса *LIFT* (а) и индекса *TOTL* (б)

Таблица 5

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

Индекс	50%	70%	90%
	Ливень		
<i>LIFT</i>	< –1	< –2	< –4
<i>SWEAT</i>	> 170	> 200	> 240
<i>KIND</i>	> 31	> 33	> 36
<i>TOTL</i>	> 48	> 49	> 52
<i>CAPE</i>	> 200	> 400	> 900
Индекс	Гроза		
	50%	70%	90%
<i>LIFT</i>	< –3	< –4	< –6
<i>SWEAT</i>	> 190	> 220	> 280
<i>KIND</i>	> 32	> 35	> 37
<i>TOTL</i>	> 49	> 51	> 53
<i>CAPE</i>	> 350	> 700	> 1 300

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

Для разделения состояния атмосферы по категориям «ливень» и «гроза с ливнем» по значениям индексов целесообразно провести дискриминантный анализ.

С помощью дискриминантного анализа на основании некоторых признаков (независимых переменных) каждое конкретное состояние атмосферы может быть причислено к одной из двух заданных заранее категорий. То есть по значениям индексов можно оценить, какое будет наблюдаться явление над исследуемой нами территорией: «ливень» или «гроза с ливнем».

Дискриминантное уравнение позволит оценить, можно ли статистически надежно разделить состоя-

ние атмосферы на две анализируемые категории по значениям анализируемых нами индексов.

Для получения коэффициентов дискриминантной функции нужен статистический критерий различения групп. Очевидно, что классификация переменных будет осуществляться тем лучше, чем меньше рассеяние точек относительно центроида внутри группы и чем больше расстояния между центроидами групп. Расстояние между центрами групп успешно оценивается с помощью обобщенного расстояния Махаланобиса, которое характеризует усредненное расстояние групповых средних от общего среднего [19, 20], которым мы и воспользуемся в настоящей работе.

В табл. 6 представлены характеристики дискриминантной функции, которая достаточно хорошо делит исследуемый массив на две группы: «ливень» и «гроза с ливнем».

Таблица 6

Итоговая таблица дискриминантного анализа значений индексов для групп «ливень» и «гроза с ливнем»

N = 256	Wilks' Lambda (λ): 0,41433 approx. F (2,253) = 178,81 p < 0,0000					
	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove	p-level	Toler.	1-Toler.
<i>LIFT</i>	0,640651	0,646736	138,1954	0,000000	0,951213	0,048787
<i>KIND</i>	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 изменяются в интервалах от 0 до 1, при этом значения λ , близкие к 0,

свидетельствуют о хорошей дискриминации, а значения λ , близкие к 1, свидетельствуют о плохой дискриминации. В наших исследованиях значение $\lambda = 0,41$. При разделении массива значений между категориями «ливень» и «гроза с ливнем» это гово-

рит о том, что мощность дискриминации не особенно велика.

Полученные в результате дискриминантного анализа соотношения значений индексов *LIFT* и *KIND* могут быть использованы в практике прогноза грозы и ливня.

Выводы

В результате проведенных исследований получено:

1. Над территорией Амурской области в летние месяцы в среднем наблюдаются 22 дня с грозой, при этом к концу исследуемого периода изменчивость грозовой активности увеличивается и в отдельные сезоны могут наблюдаться до 40 дней с грозой. Замечена семилетняя квазициклическая изменчивость 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 (табл. 1), имеют существенные разли-

чия 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, отнесенные к категориям «ливень» и «гроза с ливнем» 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 с ливнем» 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 ракет космического назначения (РКН) на стартовых комплексах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–38.
2. Золотухина О.И., Горбатенко В.П., Вареник П.А. Характеристики ветра в дни пусков ракет космического назначения на космодроме «Байконур» // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2015. № 576. С. 114–129.
3. Институт космических исследований РАН «Погода России»: Архив погоды / Институт космических исследований РАН «Погода России». Электрон. дан. М., 2011. URL: http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r_sel_stn.sht?adm=554 (дата обращения: 13.10.2013).
4. Специализированные массивы для климатических исследований / ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Обнинск, 2008. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 9.02.2015).
5. University of Wyoming: Department of Atmospheric Science / University of Wyoming. Электрон. дан. Вайоминг, 2010. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 20.03.2015).
6. Andersson T.A. M. J. C. N. S.: Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // Meteorol. Mag. 1989. № 116. P. 141–146.
7. Johns R.H., Doswell C.A. Severe local storms forecasting // Wea. Forecasting. 1992. P. 558–612.
8. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // Wea. Forecasting. 1989. № 4. P. 73–80.
9. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 1989. № 7. P. 327–342.
10. Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A. Mesoscale convection and dangerous weather phenomena in southeast of Western Siberia // 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning. November 1–4, 2011, Chengdu, China. Beijing: Tsinghua University, 2011. P. 160–164.
11. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере западной Сибири // Известия ВУЗов. Физика. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 148–155.
12. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1984. 751 с.
13. Ершова Т.В., Горбатенко В.П., Клипова О.А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 7. С. 9–14.
14. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Разумова О.В. Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 169–174.
15. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 17–21.
16. Асмус В.В., Кровотынец В.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б. Использование спутниковых данных в Росгидромете для мониторинга опасных явлений и чрезвычайных ситуаций // Сборник тезисов Восьмой всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2010. С. 5–6.
17. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 337. С. 189–193.
18. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–18.
19. Боровиков В.И. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. М.: Финансы и статистика, 1999. 382 с.
20. Боровиков В.И. Statistica: Статистический анализ данных и обработка данных в среде Windows. М.: Финансы и статистика, 1999. 384 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 26 ноября 2015 г.

THERMODYNAMIC CONDITIONS OF HAZARDOUS CONVECTIVE PHENOMENA AT THE VOSTOCHNY COSMODROME

Tomsk State University Journal, 2015, 400, 330–336. DOI: 10.17223/15617793/400/53

Gorbatenko Valentina P. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: vpgor@tpu.ru

Zolotukhina Olga I. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zolot_o@sibmail.com

Gromnitskaya Alyona A. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: alena-grom@mail.ru

Keywords: Vostochny cosmodrome; convection in atmosphere; thunderstorm with heavy rain; heavy rain; indices of atmospheric instability.

The wind parameters at the earth's surface and in the free atmosphere can have a significant impact on the progress with space rocket (SR) in the period of the preparation at the launch site, the launch processing and flight. Therefore, the above parameters are reflected in the operational documentation for each SR as critical and are constantly monitored by meteorological services of a spaceport at all stages of preparation and launch of the space rocket, as the cost of transferring one start of a space rocket is quite a significant amount of money. In connection with the construction of the new cosmodrome Vostochny, Amur Oblast should have a more detailed study of the state of the atmosphere in the days with dangerous convective phenomena. For this study, a database of thunderstorm days above the meteorological stations in the area of the cosmodrome Vostochny for 1985–2013 was made. It was found that Amur Oblast is characterized by a moderate thunderstorm activity. During the summer every year there are 20–25 days with thunderstorms. An increase in the variability of thunderstorm activity and a tendency to thunderstorm activity increase have been determined. Forecast of such dangerous convective phenomena like thunderstorms, hail, heavy rainfall is based on the analysis of the profiles of atmospheric temperature and humidity, which are recorded by aerological radiosondes. According to the results sensing characteristics of atmospheric instability are calculated: Indexes LIFT SWEET, KIND, TOTL and CAPE. The values of the index assesses the set of temperature and humidity of the atmosphere and wind parameters that are important signs of development of convection. By variability index values probability of dangerous convective phenomena is estimated. The second objective of the present study was to determine the possibility of using these indexes to determine the degree of stability of the atmosphere in the forecast of thunderstorms over Amur Oblast. According to the upper-air sounding, index values were calculated of atmospheric instability in days with thunderstorms and heavy rain. A comparative analysis of the indexes of atmospheric instability in the days classified as "thunderstorms and rain" and "heavy rain" are presented. The values of the probability of thunderstorms and rain storms without different values of the indexes of atmospheric instability are calculated. An analysis of the differences in the values of the index volatility typical for Amur Oblast and the values obtained for other territories is presented. Discriminant analysis of instability index to separate these two categories of dangerous convective phenomena in the atmosphere is made.

REFERENCES

1. Gubenko, I.M. & Rubinshteyn, K.G. (2015) Analysis of Results of Thunderstorm Forecasting Based on Atmospheric Instability Indices Using the WRF-ARW Numerical Model Data. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1. pp. 27–38. (In Russian).
2. Zolotukhina, O.I., Gorbatenko, V.P. & Varenik, P.A. (2015) Kharakteristiki vetra v dni puskov raket kosmicheskogo naznacheniya na kosmodrome "Baykonur" [Wind characteristics in the days of space rockets launch at the Baikonur cosmodrome]. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I.Voeykova*. 576. pp. 114–129.
3. Space Research Institute "Russia's Weather". (2011) *Arkhiv pogody* [Weather archive]. Moscow Available from: http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r_sel_stn.sht?adm=554. (Accessed: 13 October 2013).
4. FGBU "VNIIGMI-MtsD". (2008) *Spetsializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy* [Specialized arrays for climate research]. Obninsk. Available from: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>. (Accessed: 09 February 2015).
5. University of Wyoming. (2010) *Department of Atmospheric Science*. Available from: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. (Accessed: 20 March 2015).
6. Andersson, T.A.M.J.C.N.S. (1989) Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden. *Meteorol. Mag.* 116. pp. 141–146.
7. Johns, R.H. & Doswell, C.A. (1992) Severe local storms forecasting. *Wea. Forecasting*. pp. 558–612.
8. Schulz, P. (1989) Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado. *Wea. Forecasting*. 4. pp. 73–80.
9. Kunz, M. (2007) The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 7. pp. 327–342.
10. Gorbatenko, V.P. & Konstantinova, D.A. (2011) Mesoscale convection and dangerous weather phenomena in southeast of Western Siberia. *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*. November 1–4, 2011, Chengdu, China. Beijing: Tsinghua University. pp. 160–164. DOI: 10.1109/APL.2011.6111094
11. Gorbatenko, V.P. et al. (2011) Termodinamicheskie usloviya formirovaniya mezomasshtabnoy konveksii v atmosfere zapadnoy Sibiri [Thermodynamic conditions of formation of mesoscale convection in the atmosphere of Western Siberia]. *Izvestiya VUZov. Fizika*. 54:11/3. pp. 148–155.
12. Matveev, L.T. (1984) *Kurs obshchey meteorologii. Fizika atmosfery* [Course of general meteorology. The physics of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometizdat.
13. Ershova, T.V., Gorbatenko, V.P. & Klipova, O.A. (2012) Termodinamicheskie parametry atmosfery pri grozakh i livnyakh [The thermodynamic parameters of the atmosphere during thunderstorms and showers]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta – Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 7. pp. 9–14.
14. Gorbatenko, V.P. et al. (2012) Identification of mesoscale convection and thunderstorms by space platform data. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Tomsk State University Journal*. 365. pp. 169–174. (In Russian).
15. Gorbatenko, V.P. & Konstantinova, D.A. (2009) Konveksiya v atmosfere nad yugo-vostokom Zapadnoy Sibiri [Convection in the atmosphere over the south-east of Western Siberia]. *Optika atmosfery i okeana*. 22:1. pp. 17–21.
16. Asmus, V.V. et al. (2010) [The use of satellite data in Rosgidromet monitoring of hazards and emergencies]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from outer space]. Abstracts of the Eighth All-Russia open annual conference. Moscow. pp. 5–6. (In Russian).
17. Konstantinova, D.A. & Gorbatenko, V.P. (2010) Conditions of squall formation in the south-eastern territory of Western Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Tomsk State University Journal*. 337. pp. 189–193. (In Russian).
18. Gorbatenko, V.P. et al. (2015) The Comparison of Atmospheric Instability Indices Retrieved from the Data of Radio Sounding and MODIS Spectroradiometer on Thunderstorm Days over West Siberia. *Meteorologiya i gidrologiya*. 5. pp. 10–18. (In Russian).
19. Borovikov, V.I. (1999) *Prognostirovanie v sisteme Statistica v srede Windows* [Forecasting in the Statistica, Windows]. Moscow: Finansy i statistika.
20. Borovikov, V.I. (1999) *Statistica: Statisticheskiy analiz dannykh i obrabotka dannykh v srede Windows* [Statistica: statistical data analysis and data processing in Windows]. Moscow: Finansy i statistika.

Received: 26 November 2015