

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ШКВАЛА НАД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-05-00668а).

Рассматриваются характеристики неустойчивости атмосферы в дни, когда над юго-восточной территорией Западной Сибири наблюдались шквалы. Данные характеристики рассчитываются на основе информации радиозондирования и позволяют определить соответствие их количественных значений и той или иной степени развития конвекции. Проведены дискриминантный, статистический анализ и оценка возможности их использования для составления альтернативных прогнозов развития шквалов над исследуемой территорией.

Ключевые слова: характеристики; неустойчивость атмосферы; Западная Сибирь.

Примерно двадцать миллиардов долларов составляют ежегодные потери народного хозяйства России от погодных условий [1. С. 105], среди которых шквал является одним из самых опасных явлений из-за аномально больших скоростей ветра и его сдвигов в сочетании с чрезвычайно интенсивным оседанием воздуха и турбулентностью. Для сельского хозяйства шквал опасен возможностью полегания посевов и как следствие – гибелью урожая. Для энергетической отрасли опасность сильного ветра заключается в том, что есть возможность выхода из строя линий электропередач из-за обрыва проводов, повреждения или опрокидывания опор ЛЭП, повреждения трансформаторных подстанций. Шквал опасен для коммунального и лесного хозяйств, для строительных организаций и организаций топливно-энергетического комплекса, а также для всех видов транспорта: авиационного, автомобильного, железнодорожного и водного [1. С. 56–57].

Шквалом называется резкое усиление ветра в течение короткого времени, сопровождающееся изменениями его направления. Скорость ветра при шквале нередко превышает 20–30 м/с, продолжительность явления обычно несколько минут, иногда наблюдаются повторные порывы шквала [2. С. 546–547]. Шквалы бывают двух видов: внутримассовые и фронтальные. Внутримассовые шквалы связаны с мощными облаками конвекции – кучево-дождевыми в местных массах в жаркую летнюю погоду над сушей или в холодных неустойчивых массах над теплой подстилающей поверхностью. Фронтальные шквалы (как правило, перед холодными фронтами) связаны с предфронтальными кучево-дождевыми облаками. В обоих случаях наблюдается вихревое движение воздуха (с горизонтальной осью) в облаках и под облаками [2. С. 546–547]. Внутримассовые и фронтальные шквалы в большинстве случаев связаны с мезомасштабными конвективными комплексами (кластерами) кучево-дождевых облаков (Cb), которые представляют собой группы из нескольких Cb, покрытых общей перистой шапкой. Наиболее мощные Cb сосредоточены в центре кластеров, на периферии высота облаков несколько меньше. Очень опасны конвективные суперъячейки – облака, состоящие из одной долгоживущей квазистационарной ячейки. Обычно с такими облаками связаны сильные ливни, град, грозы, шквалы и даже торнадо.

В настоящее время в Европе и Америке для прогноза опасных явлений, связанных с конвекцией, широко применяются аэрологические индексы (или индексы

неустойчивости), рассчитанные на основе данных радиозондирования и позволяющие определить соответствие количественных значений индексов той или иной степени развития конвекции [3. С. 327–342].

Целью данной работы является статистический и дискриминантный анализ значений индексов неустойчивости атмосферы и определение их градаций по степени развития конвекции в дни со шквалами.

Материалом для исследований являются данные АМСГ Томск (авиаметеорологическая станция в гражданском воздушном флоте) о наличии шквалов на прилегающей территории в летние месяцы с мая по август в период с 1991–2008 гг. Информацией о характеристиках состояния атмосферы в дни со шквалами над территорией Западной Сибири послужили данные аэрологического зондирования атмосферы станции Новосибирск в сроки 00 и 12 часов всемирного скоординированного времени (ВСВ) с мая по август за период 1991–2008 гг., которые были взяты на сайте <http://www.weather.uwyo.edu/>. Анализировалось состояние атмосферы за 79 дней, когда регистрировались шквалы.

Индексы неустойчивости, полученные по данным зондирования атмосферы, содержат информацию о значениях давления и температуры воздуха на уровне конденсации, о термодинамических характеристиках состояния атмосферы, о влажности и сдвигах ветра в слое от 1,5 до 5,5 км, о высоте уровней конденсации и конвекции, конвективной потенциальной энергии атмосферы и наличии задерживающего слоя.

Для каждого дня, когда над юго-восточной территорией Западной Сибири наблюдался шквал, проанализированы значения следующих характеристик состояния атмосферы [4. С. 141–146; 5. С. 558–612; 6. С. 73–80]:

1. Индекс LIFT оценивает степень стабильности, которая измеряется разностью между температурами поднимающейся частицы и окружающей среды на уровне 500 гПа. Он объединяет влажность и вертикальный градиент в одном индексе, который менее чувствителен к наблюдениям только уровня давления. Однако LIFT оценивает уровень, от которого частица поднимается, и восстанавливает график температуры окружающей среды выше уровня конденсации и ниже уровня 500 гПа, который нельзя рассмотреть детально:

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

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

500 гПа, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы, °С.

2. Индекс KINX (K index) описывает температурно-влажностное состояние атмосферы в слое 850–700 гПа, °С. К оценивает возможность возникновения конвекции, основанную на вертикальном градиенте температуры и вертикальной протяженности слоя наибольшего влагосодержания:

$$KINX=(T_{850}-T_{500})+TD_{850}-(T_{700}-TD_{700}), \quad (2)$$

где T_{500} , T_{700} и T_{850} – значения температур на уровнях 500, 700 и 850 гПа, °С; TD_{700} , TD_{850} – значения температур точки росы, на уровнях 700 и 850 гПа, °С.

3. Индекс TOTL (Total Totals index) состоит из двух компонентов: Vertical Totals index и Cross Totals index. Данный индекс оценивает как статическую стабильность, так и влажность на уровне 850 гПа. Но может быть неприемлемым в случае, если уровень конвекции расположен ниже 850 гПа. К тому же конвекция может существовать вопреки высоким значениям ТТ, если наблюдается значительная инверсия в верхних слоях:

$$TOTL=(T_{850}-T_{500})+(TD_{850}-T_{500}). \quad (3)$$

4. Индекс SWEAT (Severe WEATHER Threat index) оценивает потенциал (вероятность) неблагоприятных явлений погоды, объединяя несколько параметров в одном индексе: слой наибольшего влагосодержания (точка росы на уровне 850 гПа), нестабильность (TOTL), скорость ветра на уровне 850 и 500 гПа, адвекцию теплого воздуха. Таким образом, это попытка объединить кинематическую и термодинамическую информацию в одном индексе. По-существу, SWEAT может использоваться для оценки возникновения неблагоприятных метеоусловий:

$$SWEAT=12 \cdot TD_{850}+20 \cdot (TT-49)+2 \cdot SKT_{850}+SKT_{500}+SHEAR, \quad (4)$$

где SKT_{850} и SKT_{500} – скорости ветра в узлах на уровнях 850 и 500 гПа; SHEAR – сдвиг ветра между уровнями 500 и 850 гПа.

5. Индекс CAPE (Convective Available Potential Energy) – конвективная потенциальная энергия атмосферы, Дж/кг, оценивается по следующей формуле:

$$CAPE = g \cdot \int_{LFCT}^{EQLV} \frac{T_p - T_e}{T_e} \cdot dz, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; LFCT – уровень свободной конвекции, гПа; EQLV – высота выравнивания температур, гПа; dz – толщина слоя между уровнями LFCT и EQLV, гПа. T_p – температура частицы, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью до уровня конденсации сухоадиабатически, выше уровня конденсации влажноадиабатически, °С; T_e – температура окружающей среды, °С.

6. BRCH – коэффициент Ричардсона, который является индикатором вероятности развития не только шквалов, но и турбулентности в ясном небе. Значения индекса BRCH рассчитываются по значениям индексов CAPE, отнесенных к величине сдвига ветра на высотах 500 и 6 000 м.

7. Индекс CINS (Convective Inhibition Energy) – энергия задерживающего слоя, Дж/кг, оценивается по следующей формуле:

$$CINS = g \cdot \int_{ML}^{LFCT} \frac{T_p - T_e}{T_e} \cdot dz, \quad (6)$$

где CINS – энергия задерживающего слоя (Дж/кг), T_p – температура частицы, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью до уровня конденсации сухоадиабатически, выше уровня конденсации влажноадиабатически, °С; T_e – температура окружающей среды, °С; LFCT – уровень свободной конвекции, гПа; ML – высота слоя перемешивания, гПа; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; dz – толщина слоя между уровнями LFCT и ML, гПа.

8. Индекс EQLV – высота выравнивания температур, гПа, т.е. высота верхней границы, до которой развивается конвекция, когда над исследуемой территорией было зарегистрировано наличие шквала.

9. Индекс LCLP – давление на уровне конденсации, гПа.

Проведены дискриминантный анализ и статистический анализ значений характеристик неустойчивости атмосферы и оценка возможности их использования для составления альтернативных прогнозов развития шквалов над юго-восточной территорией Западной Сибири.

Поскольку термодинамические характеристики атмосферы региона в разные месяцы различаются существенно [7. С. 17–21], ее состояние в дни со шквалами для каждого месяца изучалось отдельно.

В табл. 1 приведены средние и экстремальные значения исследованных индексов для двух сроков каждого месяца в дни со шквалом.

Обнаружено, что большая часть шквалов образовалась на фоне такого состояния атмосферы, которое по работам зарубежных авторов [4. С. 141–146; 5. С. 558–612; 6. С. 73–80], принято считать лишь умеренно неустойчивым.

При изучении условий образования шквалов особый интерес представляют индексы CAPE и BRCH, т.к. суперячейки, с которыми связаны шквалы, обладают большим запасом конвективной потенциальной энергии (CAPE) и могут пробивать тропопаузу, тогда их перистая наковальня располагается над ней. Верхняя граница этой перистой наковальни, до которой развивается конвекция, есть индекс EQLV.

Замечено, что конвективные ячейки развиваются при энергетическом потенциале атмосферы, составляющем, по меньшей мере, 2000 Дж/кг и при наличии вертикального сдвига ветра не меньше, чем 20 м/с в слое атмосферы 2,5–5 км над поверхностью земли [4. С. 141–146; 5. С. 558–612; 6. С. 73–80]. Также конвективные ячейки развиваются при значениях индекса BRCH от 10 до 45. При значениях $BRCH \geq 50$ суперячейки практически не развиваются, поэтому считается, что невозможно и развитие шквалов (следовательно, анализировать максимальные значения индекса BRCH нецелесообразно).

В результате исследования состояния атмосферы в дни, когда над юго-восточной территорией Западной Сибири наблюдались шквалы, развитие конвекции характеризовалась следующими особенностями (табл. 1):

– CAPE над исследуемым регионом в дни со шквалом не достигала высоких значений и менялась, в среднем, в интервале от 96 до 585 Дж/кг. Такое несоответствие грациям, возможно, обусловлено тем, что

аэрологическое зондирование атмосферы в нашем регионе выполняется рано утром, до начала развития конвекции (в 00 часов по всемирному скоординированному времени, что соответствует 7 часам местного времени), и вечером, когда конвекция уже ослабевает (в 12 часов всемирного скоординированного времени,

что соответствует 19 часам местного времени). В часы максимально возможного развития конвекции зондирование не производится;

– по значениям индекса BRCH можно сказать, что достаточно часто наблюдались условия, способствующие формированию суперячеек.

Таблица 1

Значения индексов неустойчивости атмосферы в дни со шквалами

Индекс		Май		Июнь		Июль		Август	
		00 ч	12 ч	00 ч	12 ч	00 ч	12 ч	00 ч	12 ч
LIFT ($\sigma = 3,2$)	Среднее	4,5	3,2	1,7	0,3	1,2	-1,9	1,5	-0,2
	Минимальное	-6,9	-6,1	-2,5	-4	-4,6	-5,9	-4,7	-3,9
SWEAT ($\sigma = 52$)	Среднее	159	176	145	151	160	173	181	202
	Максимальное	422	278	334	256	300	336	355	284
KINX ($\sigma = 5,4$)	Среднее	22,1	23,5	25,5	27,1	27,5	28,5	27,1	28
	Максимальное	40,7	29,7	34,6	32,3	38,6	36,4	38,7	32,3
TOTL ($\sigma = 3,3$)	Среднее	46,5	47,5	48,3	48,2	47,4	46,9	47,8	46,7
	Максимальное	60,8	54,6	53,4	52,8	53,1	53,8	55	50,2
CAPE ($\sigma = 269$)	Среднее	96	300	98	187	150	585	163	536
	Максимальное	1800	1560	460	1100	1200	1450	1030	1210
LCLP ($\sigma = 35$)	Среднее	858	785	878	823	884	862	875	834
	Минимальное	671	708	797	727	829	756	825	788
BRCH ($\sigma = 52$)	Среднее	7	15	3,8	60,4	67,5	90,2	11,2	57,2

Высота верхней границы конвекции (EQLV) достигала уровня 10–12 км, хотя средние значения высот составляли в разные месяцы 6–8 км, причем наибольших значений высота развития конвекции достигала в августе (табл. 2).

В табл. 3 приведена повторяемость шквалов при значениях индексов, характеризующих разную степень неустойчивости атмосферы.

Проведен анализ значений индексов неустойчивости атмосферы для юго-восточной территории Запад-

ной Сибири. Определены градации изменчивости индексов для дней со шквалами и произведено сравнение значений индексов с результатами, полученными зарубежными авторами. По значениям индексов SWEAT, KINX, TOTL, CAPE, BRCH, характеризующих разную степень неустойчивости атмосферы, можно заключить, что большая часть шквалов образовалась на фоне такого состояния атмосферы, которое, по зарубежным классификациям принято считать [4. С. 141–146; 5. С. 558–612; 6. С. 73–80] умеренно неустойчивым.

Таблица 2

Индекс EQLV в дни со шквалами

Месяц	EQLV, гПа	
	Среднее	Максимальное
Май	470	280
Июнь	415	281
Июль	446	247
Август	358	206

Таблица 3

Повторяемость значений индексов в дни со шквалами, %

Состояние атмосферы	Срок, часы (BCB)	LIFT	SWEAT	KINX	TOTL	CAPE	BRCH
Неустойчива		-6 ÷ -3	300 ÷ 400	30 ÷ 40	50 ÷ 55	10 ³ ÷ 2500	10 ÷ 45
	00	45,1	3,8	32,9	25,3	3,8	11,4
	12	13,9	1,3	15,2	13,9	11,4	7,6
Умеренно неустойчива		-3 ÷ 0	< 300	< 30	45 ÷ 50	0 ÷ 10 ³	0 ÷ 10
	00	25,3	93,7	63,3	46,8	53,2	39,2
	12	16,5	48,1	34,2	26,6	31,6	20,3

При крайне неустойчивом состоянии атмосферы сформировалось не более 2% от всех шквалов. Это говорит о том, что условия развития шквалов в Европе и Америке отличаются от условий развития в исследуемом регионе, следовательно, для юго-восточной территории Западной Сибири необходима корректировка пределов изменчивости индексов, соответствующих определенной степени устойчивости атмосферы. Лишь значения индекса LIFT говорят о том, что шквалы образовывались при неустойчивом состоянии атмосферы,

и не требуют значительной корректировки для использования в прогнозировании шквалов для данной территории. Интервал значений индекса BRCH следует увеличить для составления прогноза шквалов над исследуемой территорией. А градации индексов KINX, SWEAT, CAPE, напротив, гораздо ниже интервалов, рассчитанных для европейской территории.

Для всех индексов был проведен дискриминантный анализ за три летних месяца (июнь, июль, август), построены графики статистического распре-

ления (рис. 1). Большинство индексов хорошо делятся на две группы: состояние атмосферы в дни со шквалом (sq) и с грозой (g), интервалы стандартных

ошибок у которых не перекрываются. В результате уравнения для всех месяцев вошли только индексы LIFT и SWEAT.

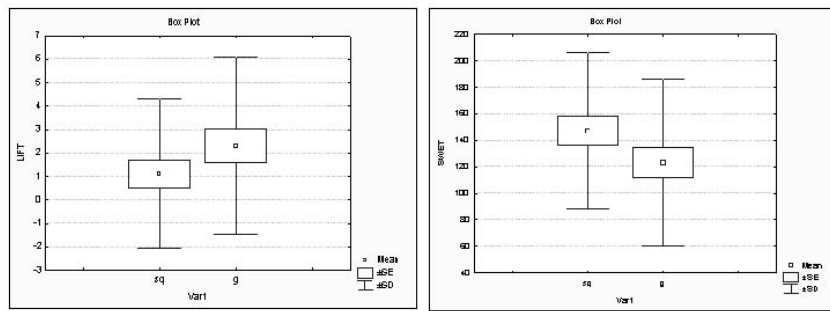


Рис. 1. Статистическое распределение индексов LIFT (слева) и SWEAT (справа) в июне для станции Новосибирск

Несмотря на то что качественных уравнений дискриминации, отвечающих требованиям практики, на основе проанализированных характеристик получить не удалось, были определены пределы изменчивости индексов неустойчивости атмосферы в дни со шквалами.

Как известно, задерживающий слой – это слой атмосферы, имеющий стратификацию настолько устойчивую, что он задерживает распространение конвекции из нижележащих слоев вверх; динамическая турбулентность в нем также ослаблена. Задерживающими слоями являются слои с температурной инверсией, изотермией или с малыми вертикальными градиентами температуры [2. С. 151–152]. Казалось бы, развитие шквала при таких условиях невозможно, однако замечено [8. С. 156–157], что при наличии в атмосфере задерживающих слоев, уменьшающихся в результате быстрого прогрева и увлажнения воздуха, можно ожидать более серьезного развития опасных конвективных явлений, чем при начальном отсутствии задерживающих слоев в атмосфере исследуемого района. В этом случае образование мощных кучево-дождевых облаков происходит «взрывным» образом и может обеспечить развитие опасных конвективных явлений погоды, в том числе шквалов. Но при наличии мощных задерживающих слоев вероятность

развития шквала и других опасных явлений, связанных с конвекцией, невелика. Энергию таких слоев атмосферы, обладающих отрицательной плавучестью, характеризует индекс CINS, который оценивают [9. С. 870–877] по формуле (6). Отрицательная энергия плавучести – это результат подъема частицы, являющейся более прохладной, чем воздух, который окружает эту частицу и заставляет ускоряться вниз. Слой воздуха в области с энергией CINS более устойчив, чем слои выше или ниже.

Эта энергия растет в зонах фронтов вследствие натекания теплого воздуха на нижерасположенный холодный воздух или в результате орографического подъема, а также при наличии мезомасштабной конвергенции типа бриза или фена.

При обработке результатов зондирования атмосферы Западной Сибири в дни, когда над юго-восточной частью территории наблюдались шквалы, было замечено (табл. 4), что:

- во все месяцы в дневное время чаще всего (75–90% случаев) формировался задерживающий слой;
- в июне и в июле (в оба срока) наличие задерживающего слоя в дни со шквалами отмечалось в три раза чаще, чем его отсутствие.

Таблица 4

Наличие задерживающего слоя в дни со шквалами

Месяц	Срок, ч ВСВ	Число дней со шквалами	CINS = 0		CINS < 0	
			число дней	%	число дней	%
Май	00	23	16	69,5	7	30,5
	12	12	3	25	9	75
Июнь	00	18	4	22,2	14	77,8
	12	12	1	8,3	11	91,7
Июль	00	23	5	21,8	18	78,2
	12	12	2	16,6	10	83,4
Август	00	15	8	53,3	7	46,7
	12	5	1	20	4	80

Согласно исследованиям, проведенным в других регионах, индексу CINS в диапазоне $-50 \div 0$ Дж/кг соответствует слабая устойчивость атмосферы [10. С. 15]. Однако большинство шквалов над исследуемой территорией развивалось именно при этих условиях (табл. 5). В интервале $-199 \div -51$ Дж/кг атмосфера свойственна умеренная устойчивость. Меньше -200 Дж/кг соответствует сильная устойчивость, кото-

рой, считается, достаточно, чтобы предотвратить конвекцию в атмосфере, что подтверждается нашими результатами за срок 12 часов ВСВ (табл. 5).

В итоге проделанной работы получено, что в дни со шквалом лишь градации индекса LIFT не требуют корректировки применительно к юго-восточной территории Западной Сибири, и его значения могут быть использованы для составления прогноза шквалов. Однако

знания величины одного этого индекса будет недостаточно для прогнозирования шквала; кроме характеристики интенсивности подъема объема воздуха необходимо учитывать и наличие сдвигов ветра и его скорость и некоторые другие характеристики атмосферы, а следовательно, и другие индексы. Интервал значений индекса BRCH следует увеличить для составления прогноза шквалов над исследуемой территорией. А градации индексов KINX, SWEAT, CAPE, напротив, гораздо ниже интервалов, рассчитанных для европейской территории.

Полученные градации индексов по степени развития конвекции в дни со шквалами будут использоваться для составления альтернативных прогнозов развития шквалов над территорией Западной Сибири.

Результатами данной работы подтверждается предположение о том, что при наличии в атмосфере незначительных задерживающих слоев, уменьшающихся в результате быстрого прогревания и увлажнения воздуха, можно ожидать более серьезного развития опасных конвективных явлений, чем при их начальном отсутствии.

Таблица 5

Повторяемость значений индекса CINS при шквалах

Пределы индекса	Срок 00 часов ВСВ							
	Май		Июнь		Июль		Август	
	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%
-50 ÷ 0	17	74	7	39	6	26	8	53
-199 ÷ -50	4	17	5	28	11	48	3	20
< -200	2	9	6	33	6	26	4	27
Пределы индекса	Срок 12 часов ВСВ							
	Май		Июнь		Июль		Август	
	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%	Число случаев	%
-50 ÷ 0	8	67	8	67	12	100	3	60
-199 ÷ -50	4	33	4	33	0	0	2	40
< -200	0	0	0	0	0	0	0	0

В подготовке базы данных и статистических расчетах активное участие приняли студенты кафедры

метеорологии и климатологии ТГУ: Шутова Е.В., Санина М.А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богаткин О.Г., Тараканов Г.Г. Основы метеорологии. СПб.: РГМУ, 2007. 232 с.
2. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь / Под ред. В.И. Кузьменко. Л.: Гидрометеодат, 1974. 568 с.
3. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2007. № 7. P. 327–342.
4. Andersson T.A. M. J. C. N. S.: Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // Meteorol. Mag. 1989. № 116. P. 141–146.
5. Johns R.H., Doswell C.A. Severe local storms forecasting // Wea. Forecasting. 1992. № 11. P. 558–612.
6. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // Wea. Forecasting. 1989. № 4. P. 73–80.
7. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. № 1, т. 22. С. 17–21.
8. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Шутова Е.В. Особенности развития шквалов в атмосфере юго-востока Западной Сибири // Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Материалы рос. конф. / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Агаф-пресс, 2009. С. 156–157.
9. David O. Blanchard. Assessing the Vertical Distribution of Convective Available Potential Energy // Weather and Forecasting. 2000. № 13 (3). P. 870–877.
10. Haby J. Ingredients for Thunderstorms and Severe Thunderstorms // The Weather Prediction. Com. 2006. Retrieved on August 22.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 14 декабря 2009 г.