

Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири

В.П. Горбатенко, Д.А. Константинова*

*НИИ высоких напряжений при ТПУ
634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а*

Поступила в редакцию 2.10.2008 г.

Представлены исследования пяти характеристик конвекции атмосферы Западной Сибири. Исследуемые параметры охватывают четыре аспекта конвекции атмосферы: первый характеризует нестабильность состояния атмосферы как результат стратификации температуры; второй учитывает не только стратификацию температуры, но и влажность воздуха; третий характеризует энергетический потенциал атмосферы — конвективную потенциальную энергию атмосферы, четвертый — коэффициент Ричардсона, который учитывает сдвиг ветра.

Ключевые слова: конвекция, стратификация температуры, атмосфера, индекс.

Конвекция образуется в результате перегрева отдельных участков поверхности Земли и воздуха над ней, а степень ее развития целиком определяется радиационными и теплофизическими свойствами атмосферы. В результате развития конвекции образуются мощные конвективные облака, оказывающие существенное влияние на радиационный режим атмосферы и на образование таких явлений погоды, как грозы, ливни, град, шквалы.

Перспективными для изучения конвекции и опасных явлений погоды, обусловленных ее развитием, являются методы, основанные на использовании данных о состоянии атмосферы, получаемые с помощью аэрологического зондирования и характеризующие конвекцию по ряду признаков: по стратификации температуры, по влагосодержанию нижних слоев атмосферы, по ее энергетическому потенциалу и по резким изменениям характеристик ветра с высотой.

Целью настоящей работы является исследование вышеперечисленных параметров конвекции: латентной нестабильности атмосферы, конвективного потенциала атмосферы, наличия сдвигов ветра в средней тропосфере, комплексных характеристик, описывающих одновременно стабильность и влагосодержание атмосферы над юго-востоком Западной Сибири.

Состояние атмосферы исследовалось за шесть теплых сезонов года (период май—сентябрь) — 1985—1986 гг., 1995—1996 гг., 2005—2006 гг. — по данным аэрологического зондирования двух станций Западной Сибири: Новосибирск и Александровское. Поскольку зондирование производилось 2 раза в сутки в 00 и 12 ч по всемирному скоорди-

нированному времени, то состояние атмосферы анализировалось за эти же сроки. Годы выбраны с таким расчетом, чтобы охватить период, когда конвекция (судя по количеству дней с грозой над исследуемой территорией) была развита слабо (1985—1986 гг. — 20—22 дня), умеренно (1995—1996 гг. — 25—26 дней) и сильно (2005—2006 гг. — 30—33 дня).

Как известно [1], конвекция в атмосфере — это процесс, при котором частицы воздуха перемещаются по вертикали под действием силы плавучести, черпая кинетическую энергию из потенциальной энергии неустойчивой стратификации плотности воздуха. Поскольку конвекция образуется в результате перегрева отдельных масс воздуха при неустойчивой стратификации атмосферы в ее нижних слоях, то наиболее благоприятные условия для возникновения конвективных движений создаются над сушей в теплую половину года в областях пониженного давления атмосферы.

Неустойчивая стратификация возникает непосредственно над земной поверхностью при наличии притока прямой солнечной радиации. Отдельные перегретые массы воздуха при таких условиях начинают ускоренно перемещаться по вертикали вверх. Сначала подъем такой массы ненасыщенного воздуха происходит практически сухоадиабатически, но на уровне конденсации воздух достигает состояния насыщения. Выше уровня конденсации воздух поднимается влажноадиабатически. Благодаря понижению температуры происходят конденсация водяного пара и образование конвективной облачности.

Скорость восходящих потоков, вертикальная мощность и водность образующейся конвективной облачности зависят от степени неустойчивости атмосферы, а реализацию таких опасных явлений погоды, как, например, шквал, можно рассматривать как результат перехода энергии неустойчивости

* Валентина Петровна Горбатенко (gorbatenko@hvd.tpu.ru); Дарья Александровна Константинова (Konstantinova_da@bk.ru).

воздушной массы в кинетическую энергию. На этом основаны практически все существующие в настоящее время методы прогноза опасных явлений погоды, обусловленные конвекцией [2].

Характеристики полей вертикальных конвективных движений с получением сведений о скорости движений, положении уровней конденсации и конвекции, толщине конвективных слоев и связанной с ними облачности, стратификации температуры и влажности с успехом диагностируются по данным аэрологического зондирования атмосферы и значениям оперативно рассчитываемых на основе этих данных индексов [3–6].

Интенсивность развития конвективных вертикальных движений определяется, в основном, стратификацией температуры воздуха. Например, интенсивные грозы и град формируются в атмосфере с положительной энергией неустойчивости во всем слое облакообразования, когда в средней и верхней тропосфере температурные градиенты существенно превышают величину влажноадиабатического. Эту характеристику состояния атмосферы отражают значения индекса LIFT (°C) [3–5], или индекса подъема:

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

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа, °C; T_{parcel} – температура частицы на уровне 500 гПа, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы, °C.

Величины индекса $\text{LIFT} < -9$ являются признаком крайней неустойчивости атмосферы, в интервале от -6 до -9 характеризуют атмосферу как нестабильную, в интервале $-6 < \text{LIFT} < -3$ как умеренно нестабильную, $-3 < \text{LIFT} < 0$ как находящуюся на границе с равновесием [4]. Если $\text{LIFT} > 0$, то атмосфера считается устойчивой, но при этом надо помнить, что слабая конвекция возможна и при значениях LIFT, изменяющихся в интервале от 0 до +3. Над исследуемой нами территорией

значения индекса LIFT весьма умеренные, но преобладают существенные изменения как в течение грозового сезона (от месяца к месяцу), так и в течение суток. Например, средние за грозовой сезон значения LIFT имеют тенденцию к уменьшению к вечеру для всех исследуемых станций. В целом, средние месячные значения индекса LIFT над юго-востоком Западной Сибири характеризуют атмосферу как устойчивую (табл. 1).

В то же время по южной части региона хотя и достаточно редко, но состояние атмосферы в отдельные дни можно характеризовать как нестабильное, даже крайне нестабильное. Чаще всего такие состояния атмосферы наблюдались в июле (табл. 2), причем около 70% таких случаев приходится на период 2005–2006 гг. Развитие шквалов над территорией Западной Сибири возможно, даже если по результатам предыдущего зондирования атмосферы значения индекса приходятся на интервал $-1 < \text{LIFT} < 1$.

Другим индексом, оценивающим не только статическую стабильность атмосферы, но и влажность на уровне 850 гПа (важный фактор для развития опасных явлений погоды, обусловленных конвекцией), является индекс TOTL (°C) [3, 4]:

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

где T_{850} – температура на уровне 850 гПа, °C; TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа, °C.

Согласно [4], если значения индекса TOTL изменяются в пределах 45–50 °C, то состояние атмосферы умеренно неустойчиво. При значениях TOTL в интервале 50–55 °C атмосфера влажнестойчива и вероятность развития грозы высока. Если значения TOTL составляют 55–60 °C, то состояние атмосферы крайне неустойчиво и над территорией вероятны сильные грозы. В средних значениях индекса TOTL над исследуемой нами территорией нет выраженного суточного хода, они мало меняются от месяца к месяцу (см. табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики значений индексов, описывающих состояние атмосферы в срок 12.00 ВСВ

Пункт зондирования	Индекс	Характеристика	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Новосибирск	LIFT ($\sigma = 3,0$)	среднее	6	3,51	-0,1	1,8	6
		min	-2,4	-6,3	-9,2	-6	-2,4
	TOTL ($\sigma = 4,0$)	среднее	44	44	45	43	44
		max	62	53	59	61	63
	K_{INX} ($\sigma = 5,0$)	среднее	14	19	24	30	16
		max	31	49	36	58	35
Александровское	LIFT ($\sigma = 3,5$)	среднее	11	5	2	4	9,3
		min	-5,3	-6,6	-6,8	-7,3	-3,5
	TOTL ($\sigma = 5,2$)	среднее	42	42	43	42	41
		max	50	55	60	56	60
	K_{INX} ($\sigma = 10$)	среднее	6	18	21	17	12
		max	25	44	47	36	31

Повторяемость значений индексов в обозначенных пределах за 6 летних сезонов над северными и южными районами Западной Сибири

Изменчивость значений индекса	Ст. Новосибирск			Ст. Александровское		
	Июнь	Июль	Август	Июнь	Июль	Август
LIFT < -9	1	3	0	0	0	0
LIFT - 9 ÷ - 6	1	6	3	3	3	2
LIFT - 6 ÷ - 3	7	38	21	6	13	5
K _{INX} > 30	34	115	69	25	38	26
K _{INX} ≥ 40	4	2	0	1	1	0
TOTL 45 ÷ 50	102	141	116	43	49	69
TOTL 50 ÷ 55	49	48	69	21	15	19
TOTL 55 ÷ 60	8	11	5	1	0	1
CAPE > 2500	0	1	1	1	0	0
CAPE > 2000	0	0	2	3	1	0
CAPE 1000 ÷ 2000	5	22	12	5	11	3

Области значений индекса в дни с грозами и без них часто перекрываются. По-видимому, это результат наличия высокой влажности в пограничном слое атмосферы исследуемого региона в течение всего летнего периода. Высокие значения TOTL (когда атмосфера крайне неустойчива) встречаются с одинаковой частотой (1–2 раза в месяц) во все летние месяцы (см. табл. 2). Число дней, когда атмосфере присуща значительная неустойчивость (50–55 °С) и вероятность развития гроз высока, в среднем совпадает с числом дней, когда гроза действительно над регионом регистрировалась. Шквалы над регионом образуются при значениях индекса TOTL 48–50 °С.

Заметим, что степень развития вынужденной конвекции (при влажнонеустойчивой стратификации атмосферы) зависит от толщины влажнонеустойчиво-стратифицированных слоев. Одним из индексов, оценивающим степень развития конвекции, основанной на вертикальном градиенте температуры и вертикальной протяженности слоев высокой влажности, является индекс K_{INX} (°С) [3, 4]:

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

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

Если индекс K_{INX} принимает значения меньше 30 °С, то высока вероятность ливня, но возможны с невысокой степенью вероятности и грозы [4]. Значения K_{INX} > 30 °С свидетельствуют о наличии потенциала для развития грозы с ливнем. Если K_{INX} ≥ 40 °С, то грозы с сильным ливнем неизбежны. Над юго-востоком Западной Сибири средние за летние месяцы значения индекса K_{INX} изменяются в пределах от 18 до 30 °С и имеют выраженный внутрисезонный и внутрисезонный ход (см. табл. 1). Очень высокие значения индекса встречаются не часто – не более 1 раза в год, со значениями K_{INX} > 30 °С – 35–36 раз за лето (см. табл. 2).

Величина энергии неустойчивости является неизменным предиктором в прогнозе опасных явлений, связанных с конвекцией. Высокий уровень потенциальной энергии атмосферы является непременным условием того, что поднимающаяся частица достигнет значительно больших высот, чем уровень свободной конвекции. Эту характеристику состояния атмосферы достаточно эффективно отражают индексы CAPE и BRCH [4–6]. Значения индекса CAPE (Дж/кг) – потенциальная конвективная энергия атмосферы, определяются

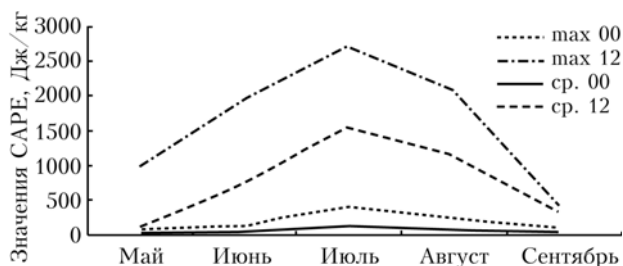
$$CAPE = g \int_{LFCT}^{EL} dz(T_p - T_e)/T_e, \quad (4)$$

где T_p – температура частицы, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью до уровня конденсации сухоадиабатически, выше уровня конденсации влажноадиабатически, °С; T_e – температура окружающей среды, °С; LFCT – уровень свободной конвекции, гПа; EL – уровень равновесия, гПа; g – ускорение свободного падения, м/с²; dz – толщина слоя между уровнями LFCT и EL.

Считается [4], что атмосфере присуща умеренная неустойчивость, если значения CAPE изменяются в пределах 0–1000 Дж/кг. Если значения CAPE принимают значения в пределах от 1000 до 2500 Дж/кг, то атмосфера неустойчива (вертикальные скорости при этом составляют около 50 м/с) и можно ожидать значительного развития конвекции и связанных с нею опасных явлений погоды. И только при наличии энергетического потенциала более чем 2500 Дж/кг атмосферу можно считать весьма неустойчивой и способной порождать крайне опасные явления, сопровождающиеся шквалами.

В результате исследований изменчивости значений индекса CAPE над территорией Западной Сибири получено, что значения, как правило, редко превышают уровень 2000 Дж/кг по северу Томской области (в районе ст. Александровское) и 2500 Дж/кг

по югу (ст. Новосибирск). Средние значения индексов CAPE максимальны в июле, минимальны в мае, высоки значения в августе (рисунок).



Изменчивость средних и максимальных значений потенциальной конвективной энергии атмосферы по данным зондирования аэрологической станции Новосибирск

Ярко выражен суточный ход, особенно в южной части территории, где в послеполуденное время значения превышают утренние в 3 раза и более. Значения CAPE более 1000 Дж/кг регистрировались, в среднем, 2–3 раза в месяц на обеих станциях. Только в июле 2005 г. (когда на исследуемой территории наблюдался пик грозовой активности) было отмечено 10 дней со значениями CAPE в интервале от 1000–2000 Дж/кг. Даже в дни с интенсивными грозами значения индекса CAPE составляют 600–800 Дж/кг. Значения индексов в дни с грозой и без грозы различаются в северной части территории меньше, чем в южной. Даже развитие шквала возможно при значениях индекса CAPE ≤ 500 Дж/кг.

Значения индекса CAPE, превышающие значение 2000 Дж/кг, встречаются по северу территории 2–3 раза за 5 лет, по югу 2–3 раза в год (см. табл. 2). При этом заметим, что аэрологическое зондирование атмосферы в нашем регионе выполняется рано утром до начала развития конвекции и вечером, когда конвекция уже ослабевает (в 00 и 12.00).

В часы максимально возможного ее развития аэрологическое зондирование над Западной Сибирью не производится. Ярко выражен суточный ход (особенно в южной части территории), где значения в послеполуденное время превышают утренние в 3 раза и более. Следовательно, максимально возможные значения конвективного потенциала в нашем регионе по данным аэрологического зондирования оценить невозможно.

Коэффициент Ричардсона (индекс BRCH) является индикатором вероятности развития не только штормов, связанных с грозами, но и турбулентности в ясном небе. Значения индекса BRCH рассчитываются по значениям индексов CAPE, отнесенных к величине сдвига ветра на высотах 500 и 6000 м. Замечено [3], что конвективные ячейки, с которыми связаны шквалы, развиваются при энергетическом потенциале атмосферы, составляющем, по меньшей мере, 2000 Дж/кг и при наличии вертикального сдвига ветра не менее 20 м/с в слое

атмосферы 2,5–5 км над поверхностью земли. Когда значения индекса BRCH ниже 10, но в наличии существенные вертикальные сдвиги ветра даже при небольших значениях CAPE, этого достаточно, чтобы поддержать конвективные восходящие потоки и способствовать развитию гроз.

Значения индекса BRCH от 10 до 45 ассоциируются с развитием обширной конвективной «суперячейки». С суперячейками обычно связаны самые сильные грозы, град, штормовое усиление ветра. Значения индекса BRCH ≥ 50 при высоких значениях индекса CAPE и относительно небольших значениях вертикального сдвига ветра приводят к тому, что очень вероятно развитие множества конвективных ячеек. Иногда и при значениях индекса BRCH = 50 возможно развитие суперячейки [5].

Значения BRCH намного большие 50 никогда не приводят к генерации суперячейки, а следовательно, к опасным явлениям.

Согласно нашим результатам над юго-восточной территорией Западной Сибири достаточно часто наблюдаются условия, способствующие формированию суперячеек и связанных с ними опасных явлений, например средние значения индекса во время гроз на севере области составляют 45, на юге 36. Но особенно часто наблюдаются условия, благоприятные для развития турбулентности в атмосфере. В июне и в августе шквалы над исследуемой территорией развиваются при значениях индекса BRCH, изменяющихся в интервале 40–50, в июле же могут развиваться и на фоне значений BRCH ≥ 50 .

Согласно полученным результатам конвективный потенциал атмосферы над юго-востоком Западной Сибири весьма умеренный, однако даже при невысоких значениях индекса CAPE есть условия для развития как отдельных обширных конвективных суперячеек, так и областей со множеством конвективных ячеек и зон повышенной турбулентности.

Таким образом, в результате проведенных исследований определены численные значения изменчивости некоторых параметров конвекции в атмосфере Западной Сибири, характеризующие ее по стратификации температуры, по влагосодержанию, энергетическому потенциалу и сдвигам ветра. Повторяемость значений индексов, характеризующих тот или иной параметр конвекции по степени ее развития и возможности образования опасных явлений погоды, связанных с конвекцией, существенно отличается от значений, полученных для других регионов.

Отсутствие информации о состоянии атмосферы в срок, близкий к максимуму развития конвекции, создает проблемы как в применении существующих методов прогноза опасных явлений погоды, так и в создании новых.

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

ТГУ: Е.А. Войлокова, С.А. Сорокина, Н.С. Алексеева, Е.В. Шутова, М.А. Санина.

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

1. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеондат, 1984. 751 с.
2. *Шакина Н.П.* Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеондат, 1990. 309 с.

3. *Andersson T.* Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // *Meteorol. Mag.* 1989. V. 116. P. 141–146.
4. *Kunz M.* The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007. N 7. P. 327–342.
5. *Schulz P.* Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // *Wea. Forecasting.* 1989. N 4. P. 73–80.
6. *Johns R.H., Doswell C.A.* Severe local storms forecasting // *Wea. Forecasting.* 1992. N 3. P. 558–612.

V.P. Gorbatenko, D.A. Konstantinova. **Convection in the atmosphere above south-east of the Western Siberia.**

The commonly used 5 convective parameters of atmosphere above Western Siberia are considered. The convection parameters represent four aspects of convective characteristics. The first focus is conditional stratified instability (Lifting index). The second describes the situation of the temperature stratification and vapor (K index and TOTL index). The third one is the instability energy such as Convective Available Potential Energy. The last one shows the wind shear Bulk Richardson number.