

УДК 551.515/4

Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью

***О.Е. Нечепуренко, В.П. Горбатенко,
Д.А. Константинова, В.В. Севастьянов***

*Национальный исследовательский Томский государственный
университет, г. Томск, Россия
o.e.nechepurenko@gmail.com*

Представлены пороговые значения четырех индексов неустойчивости атмосферы (Lifted index, Showalter index, Total Totals index, K-index) в дни развития гроз для Западной и Восточной Сибири. Определена пространственная неоднородность их пороговых значений, при достижении которых с вероятностью не менее 70 % формируются конвекция и связанные с ней грозы.

Ключевые слова: индексы неустойчивости, гроза, данные дистанционного зондирования Земли, конвекция

Instability indices and their thresholds for the forecast of thunderstorms over Siberia

***O.E. Nechepurenko, V.P. Gorbatenko,
D.A. Konstantinova, V.V. Sevastyanov***

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
o.e.nechepurenko@gmail.com*

The potential of instability indices (Lifted index, Showalter index, Total Totals index, K-index) in assessing atmospheric instability is examined for the areas of Western and Eastern Siberia. We present the thresholds of indices in the days when thunderstorm development is possible with 70% of a probability. The spatial heterogeneity of the threshold indices values was determined, when convective hazards (particularly thunderstorms) are formed.

Keywords: instability indices, thunderstorm, remote sensing data, convection

Введение

При составлении прогноза гроз используемыми на практике методами часто не представляется возможным точно спрогнозировать место их возникновения. Поэтому нередко синоптики при формировании текста прогноза пользуются терминами «местами» или «в отдельных районах», которые вызывают иронию у обывателей.

Прогноз опасных конвективных явлений (ОКЯ), в том числе гроз, осложнен тем, что диаметр конвективной ячейки, способной продуцировать такие явления, составляет не более 10 км, а «время жизни»

такой ячейки обычно не превышает 40–50 минут [14, 23]. Опасные явления, сформировавшиеся в конвективной ячейке или в совокупности таких ячеек, проявляются локально и далеко не всегда фиксируются даже наблюдателями метеорологических станций, поскольку для исследуемого региона их сеть имеет недостаточное покрытие.

Общепринятым подходом для прогноза грозы является интерпретация температурно-влажностных профилей, построенных по результатам наблюдений сетевых аэрологических станций, запуск радиозондов на которых производят два раза в сутки в стандартные аэрологические сроки: 0 и 12 ч ВСВ. Однако при редкой сети аэрологических станций в Сибири [24], ее экстраполированной информацией вынуждены пользоваться потребители огромных территорий, а пунктов радиолокационных наблюдений, которые могли бы уточнить положение грозовых очагов, также крайне мало. Так, например, прогноз развития ОЖЯ для Томской области возможен с использованием наблюдений трех аэрологических станций – Новосибирск, Александровское и Колпашево, расстояние между которыми составляет порядка 400 км. Термодинамические параметры атмосферы в районе аэрологического зондирования могут существенно отличаться от тех, что характерны для атмосферы в районе формирования опасного конвективного явления [4], удаленного от станции зондирования. Радиозонд также может не пересечь область, охваченную глубокой конвекцией, и ОЖЯ не будут спрогнозированы.

До 1990 г. аэрологическая сеть России насчитывала около 220 аэрологических станций, включая научно-исследовательские корабли и станции в Антарктиде. На 58 станциях производилось регулярное четырехразовое температурно-ветровое зондирование, на остальных станциях – по мере необходимости: от двух до четырех раз в сутки [22]. По состоянию на январь 2018 г. в Росгидромете функционирует 114 аэрологических станций [16]. Актуальным является поиск новых возможностей улучшения прогноза опасных конвективных явлений, основанных, например, на использовании данных дистанционного зондирования. Методы спутниковой идентификации грозовой облачности активно разрабатываются [2, 13, 17, 19], однако в оперативной практике прогноза используются редко.

Более 50 лет для оценки вероятности развития грозы по характеристикам профиля атмосферы, получаемого в результате аэрологического зондирования, идут поиски оптимальных для прогноза индексов неустойчивости атмосферы. Сегодня при разработке современных методов прогноза гроз, града, шквалов, смерчей используется более 10 параметров состояния атмосферы, рассчитанных на основе аэрологического зондирования [1, 3, 5, 9, 13]. При развитии в атмосфере глубокой конвекции значения индексов достигают значений, позволяющих судить о развитии того или иного опасного конвективного явления: грозы, града, смерча с определенной вероятностью. В результате

предварительных исследований [6, 7] было получено, что значения индексов KIND, TOTL, LIFT и SHOW (табл. 1) наиболее перспективны для разработки методов прогноза грозы над Сибирью. Эти индексы также наиболее востребованы на практике при прогнозе гроз в других регионах.

Целью настоящего исследования является определение пороговых значений индексов неустойчивости атмосферы над разными физико-географическими территориями Сибири, которые могут быть использованы на практике для прогноза грозы с разной вероятностью.

Таблица 1. Индексы неустойчивости, применяемые для оценки степени устойчивости атмосферы

Table 1. Instability indices used to assessment of atmospheric stability

Описание индексов	Название, аббревиатура	Формула для расчета	Единица измерения
Индексы, в расчете которых используется только температура	Showalter index, SHOW [39]	$SHOW = T_{500} - T_{parcel1}$	°C
	Lifted index, LIFT [30]	$LIFT = T_{500} - T_{parcel2}$	°C
Индексы, в которых кроме температуры используются характеристики влажности	Total Totals index, TOTL [37]	$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (TD_{850} - T_{500})$	°C
	K-index, KIND [31]	$KIND = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700})$	°C

Примечание: T850, T700, T500 – соответственно, температура на уровнях 850, 700 и 500 гПа; TD850, TD700 – соответственно, температура точки росы на уровнях 850 и 700 гПа; Tparcel1 – температура частицы на уровне 500 гПа, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы; Tparcel2 – температура частицы на уровне 500 гПа, поднимающейся с уровня 850 гПа.

Используемые данные и расчет индексов неустойчивости для Западной и Восточной Сибири

Факт наличия грозы, зарегистрированный наблюдателями метеостанций, послужил основой для формирования базы данных характеристик неустойчивости в дни с грозой. Данные о времени образования и пространственной локализации гроз за теплый период (март – сентябрь) с 1990 по 2015 г. получены с сети метеорологических станций [18]. Станции выбирались с тем расчетом, чтобы пункт сетевого аэрологического зондирования находился на расстоянии не дальше 100 км.

По результатам зондирования атмосферы на аэрологических станциях (табл. 2) в сроки 00 и 12 ч ВСВ были рассчитаны и проанализированы термодинамические характеристики атмосферы для тех дней, когда на метеостанциях отмечалась грозовая активность.

В результате исследований определены пределы изменчивости каждого из четырех индексов в дни с грозой и построены кумулятивные кривые с разной вероятностью обеспеченности.

Таблица 2. Регионы исследования гроз и аэрологические станции, данные которых использовались в расчетах индексов неустойчивости атмосферы
Table 2. Thunderstorm study area and upper-air stations, whose data were used in calculations of the instability indices

Регион исследования гроз	Аэрологическая станция, по данным которой рассчитывались индексы неустойчивости атмосферы	Географические характеристики аэрологических станций		
		широта, °с.ш.	долгота, °в.д.	высота, м
Омская область	Омск	54,93	73,40	90
Томская область	Колпашево	58,31	82,95	75
	Александровское	60,43	77,86	48
Новосибирская область	Барабинск	55,33	78,36	120
	Новосибирск	54,96	82,95	143
Алтайский край	Барнаул	53,35	83,81	159
Республика Горный Алтай	Горно-Алтайск	51,57	85,55	285
Республика Хакассия	Абакан	53,76	91,31	256
Республика Тыва	Кызыл	51,71	94,50	628
Красноярский край	Енисейск	58,45	92,15	79
	Емельяново	56,18	92,61	206
	Богучаны	58,38	97,45	133
Иркутская область	Братск	56,28	101,75	416
	Нижнеудинск	54,88	99,03	411

Приведенные в табл. 3 пороговые значения индексов достаточно хорошо описывают степень неустойчивости атмосферы и позволяют определить развитие грозы с разной вероятностью. Пороговые значения индексов неустойчивости (или характеризующих их величин), при достижении которых появляется значительная вероятность развития того или иного вида конвекции с грозами, несколько отличаются для разных изучаемых регионов Сибири. Станции, принадлежащие к одному региону, например Емельяново и Енисейск (Красноярский край), имеют практически одинаковые пороговые значения индексов. Пункты, расположенные в одинаковых физико-географических условиях, имеют одинаковый тип климата – умеренно-континентальный, следовательно, нет различия в значениях термодинамических характеристик, которые важны для процесса развития конвекции. Подобное заключение можно сделать для пунктов Новосибирск и Омск (равнинные станции), Кызыл и Горно-Алтайск (горные станции). Грозы на Дальнем Востоке формируются при развитии более мощной конвекции, чем над Сибирью [32].

Таблица 3. Пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы при грозах с вероятностью 70 и 90% для 15 пунктов, расположенных на территории Сибири

Table 3. Optimal thresholds of instability indices in days with thunderstorm for 15 stations, located in Siberia. A probability of thunderstorm occurrence is 70 and 90%

Индекс	Благовещенск		Нижнеудинск		Братск		Енисейск		Абакан	
	70%	90%	70%	90%	70%	90%	70%	90%	70%	90%
SHOW (°C)	–	–	< 1	< -1	< 2	< 0	< 1,5	< -1,5	< 0,5	< -0,5
LIFT (°C)	< -4	< -6	< -0,5	< -2,5	< 0,5	< -1	< -1	< -3,5	< -1	< -2,5
KIND (°C)	> 35	> 37	> 33	> 36,5	> 31,5	> 34	> 33	> 37	> 34,5	> 37
TOTL (°C)	> 51	> 53	> 50	> 53	> 49,5	> 52,5	> 51,5	> 54	> 51,5	> 54
Индекс	Омск		Колпашево		Александровское		Барнаул		Горно-Алтайск	
	70%	90%	70%	90%	70%	90%	70%	90%	70%	90%
SHOW (°C)	< 1	< -1	–	< 2,5	< -1	–	< 2,5	< 1	< -2	< -4
LIFT (°C)	< -0,5	< -2,5	< -1	< 1	< -2,5	< 1	< 1	< -0,5	< -4	< -6
KIND (°C)	> 33	> 35	> 30	> 30	> 33	> 35	> 30	> 33	> 27	> 31
TOTL (°C)	> 50	> 53	> 48	> 49	> 50	> 53	> 49	> 50	> 47	> 50
Индекс	Барабинск		Новосибирск		Кызыл		Емельяново		Богучаны	
	70%	90%	70%	90%	70%	90%	70%	90%	70%	90%
SHOW (°C)	< 0,5	< -2	< 2,5	< 0	< 1	< -1	< 1	< -1	< 1	< -0,5
LIFT (°C)	< -1,5	< -3,5	< 0	< -2	< -1	< -3	< -1	< -3	< -0,5	< -2
KIND (°C)	> 33,5	> 35	> 31	> 34	> 33	> 36	> 33	> 36	> 32	> 35,5
TOTL (°C)	> 50,5	> 53,5	> 50	> 53	> 51	> 53	> 51	> 53	> 51	> 53,5

Анализ индексов атмосферной неустойчивости с разными физико-географическими условиями

Для выделения зон, охваченных конвекцией разной интенсивности, необходимо знание пороговых значений индексов, при преодолении которых развивается то или иное опасное конвективное явление. Обзор научной литературы позволил заметить, что пороговые значения индексов (табл. 4), которые свидетельствуют о развитии конвекции, существенно отличаются для разных географических регионов мира [25, 27–29, 33–36, 40, 41]. Анализ результатов сравнения, представленный в табл. 4, позволяет заключить, что грозы, в среднем, образуются при достижении значений индексов неустойчивости атмосферы KIND в 30 °C, TOTL – 40 °C, LIFT – при отрицательных значениях, а SHOW – в интервале от 5 до -3 °C. Как видно, интервалы значений индексов, характерных для гроз, сильно отличаются в разных регионах, поэтому для каждого региона необходимо находить свои пороговые значения индексов, с помощью которых можно прогнозировать развитие грозы с опасными конвективными явлениями.

Поскольку территория Сибири включает в себя разнообразие ландшафтов с разными типами климата, разными свойствами подстилающей поверхности, воспользоваться результатами зарубежных исследований для прогноза ОКА над территорией Сибири невозможно.

Таблица 4. Пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы при прогнозе гроз для различных регионов исследования на основе обзора научной литературы

Table 4. Threshold values of atmospheric instability indices for thunderstorm forecast in different regions based on a review of current studies

Индекс	Регион исследования										
	Швеция	Хорватия	Нидерланды	Греция	Италия	север США	юг США	США, Флорида	Иран	Уистлер, Канада	Германия
KIND (°C)	> 20	> 35	≥ 21	10+35	34,53**	20,1*	26,5*	29,2*	30	-10,25*	≥ 33,9
LIFT (°C)	–	< -4	–	–	-3,04**	2,9*	-1,1*	-3,9*	-2	5,91	≤ -0,22
TOTL (°C)	–	–	≥ 46,7	> 40	–	–	–	43,8*	–	-7,3	≥ 48,1
SHOW (°C)	–	–	≤ 4,2	3÷5	-3,05**	–	–	0,4*	-3	3,4	≤ 2,51

Примечание. * 50%-ная вероятность развития грозы; ** 90%-ная вероятность развития грозы.

Пространственное распределение пороговых значений индексов неустойчивости атмосферы в дни с грозой над Западной и Восточной Сибирью

На основе табл. 3 построены карты распределения средних значений индексов неустойчивости для 90%-ной вероятности развития грозы (рис. 1). Их анализ позволил заметить:

1. Пространственное распределение пороговых значений индексов LIFT и SHOW, которые описывают латентную нестабильность атмосферы, определяемую стратификацией температуры воздуха, идентично. Существует ярко выраженная меридиональная неоднородность пороговых значений данных индексов. Над территориями лесостепных зон и возвышенностей пороговые значения индексов при грозе несколько ниже, чем в долине реки Обь.

2. Для индексов неустойчивости, включающих и характеристики влажности (KIND и TOTL) в слое от 1,5 до 3 и 5 км соответственно, картина пространственного распределения их пороговых значений практически одинакова. Оба индекса отражают совокупность влияния стратификации температуры и толщины влажностонеустойчиво стратифицированных слоев на неустойчивость атмосферы. В отличие от предыдущей пары индексов порог неустойчивости, при котором образуется гроза над территорией всей Западной Сибири, ниже, чем над Восточной Сибирью.

Все рассматриваемые термодинамические параметры (LIFT, SHOW, KIND и TOTL) подтверждают, что при грозе атмосфера достигает

наибольшей неустойчивости на территории предгорий Алтая и Республики Горный Алтай (аэрологические станции Барнаул, Горно-Алтайск). По-видимому, здесь велика роль вынужденного орографического подъема.

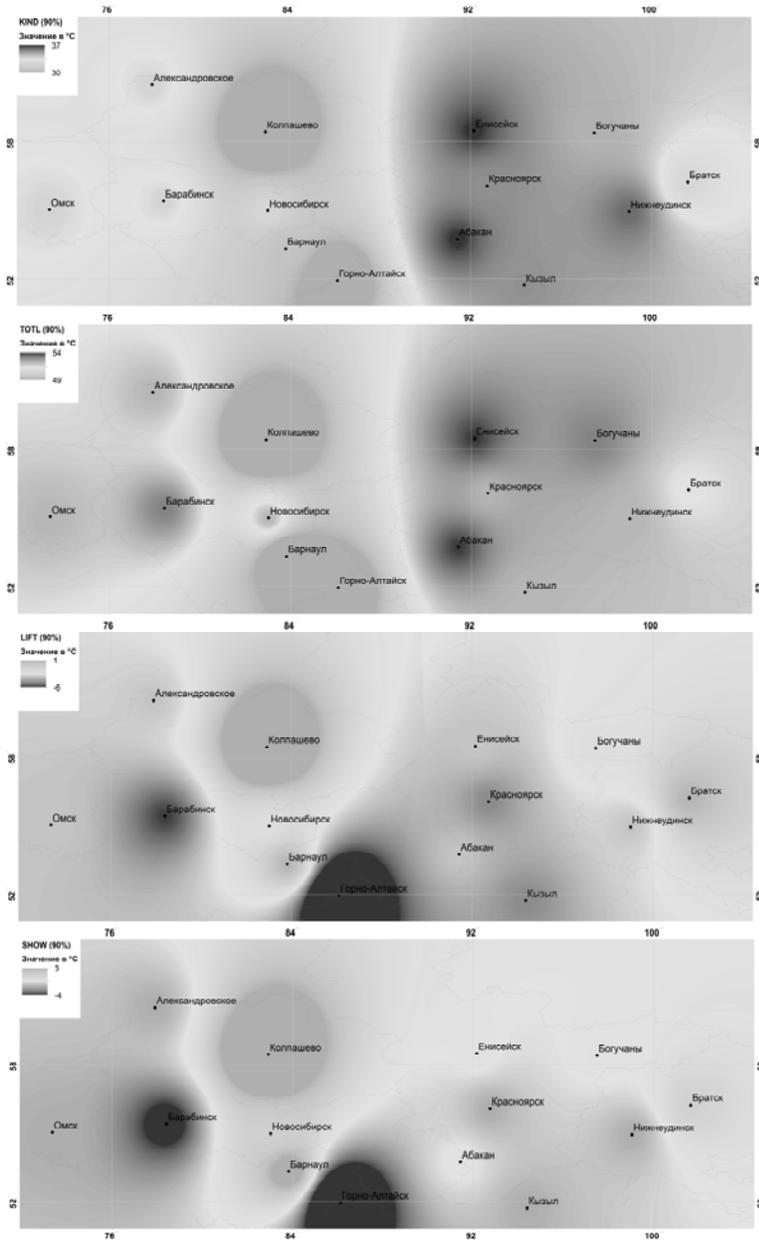


Рис. 1. Распределение индексов неустойчивости атмосферы в дни с грозой (с 90%-ной вероятностью).
Fig. 1. Spatial distribution of various instability indices in days with thunderstorm (90% of probability).

Известно, что развитие грозы обуславливает совокупность параметров системы «атмосфера – подстилающая поверхность» и пространственному распределению климатических характеристик грозовой активности свойственна мезомасштабная неоднородность. Даже на фоне одних и тех же синоптических процессов повторяемость гроз над отдельными территориями может в 2 раза превышать средний по региону уровень грозовой активности, что было замечено в долине реки Обь [4]. Установлено [21], что район междуречья Обь – Иртыш, центром которого является большое Васюганское болото, является областью активного циклогенеза и представляет собой огромную территорию, на которой расположены около 800 тысяч небольших озер и множество рек, увеличивающих контрасты температур, обусловленных наличием столь сложной подстилающей поверхности. Наличие циклонической кривизны обеспечивает конвергенцию горизонтальных приземных потоков, необходимых для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками. Этот процесс обеспечивает достаточно быстрое образование облачности с выделением скрытого тепла и может привести к развитию глубокой конвекции.

Очаг повышенной конвективной неустойчивости, расположенный в районе Алтая, по-видимому, обусловлен орографией. Даже небольшие возвышенности на местности приводят к усилению конвекции за счет вынужденного подъема. Исследователи отмечают, что для территории Алтая характерна повышенная грозовая активность [12].

Что касается очагов в районе станций Абакан и Енисейск, то повышенные значения индексов, характеризующих влажность на определенных уровнях (KIND и TOTL), могут быть вызваны разными причинами. Известно, что температурно-влажностный режим пограничного слоя атмосферы Восточной Сибири характеризуется наличием локальных особенностей, сформировавшихся в условиях сложного рельефа, способствующего образованию инверсий температуры воздуха [11]. В некоторых случаях изменения температуры с высотой носят очень сложный характер, градиенты температуры меняются послойно. Вероятно, эта особенность вертикального распределения значений температуры и влажности на территории Восточной Сибири и обусловила столь высокую пространственную неоднородность индексов неустойчивости, которую будет полезно учитывать при идентификации опасных конвективных явлений.

Область применения полученных результатов

Обзор научной литературы по исследованиям рассматриваемой тематики позволил выделить три основных направления развития методов прогноза ОКА, в том числе гроз, где применяются пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы:

1. В качестве выходного параметра в мезомасштабных моделях, рассчитывающих прогноз с определенной заблаговременностью [20, 26].

2. Для идентификации грозовых кластеров при спутниковом мониторинге [42, 43].

3. При разработке альтернативных прогнозов наличия / отсутствия опасных конвективных явлений в районе, обслуживаемом аэрологической станцией.

В последние годы очень популярны статистические и эмпирические подходы для численного моделирования конвективных процессов. Например, в качестве входных данных в гидродинамических мезомасштабных моделях WRF (MM5) для прогноза развития конвекции используются значения индексов неустойчивости, характеризующие конвекцию по ряду параметров [8, 10, 15, 34]. Статистическая интерпретация численных характеристик прогностических полей по той или иной действующей модели, наложенная на географическую карту, дает возможность прогнозировать пространственную локализацию явления [38]. Основная проблема качественного прогноза развития конвективных явлений с помощью численных методов – это трудности в создании физической основы для мезомасштабных моделей с разной подстилающей поверхностью. Чем разнообразнее по физико-географическим условиям территория, тем труднее обеспечить мезомасштабные модели качественной параметризацией, необходимой для успешного прогноза явления.

Несмотря на то, что попытка определения пространственной локализации конвективных кластеров с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным глобальной модели прогноза ПЛАВ для Сибири дала обнадеживающие результаты [38], все-таки более перспективной для применения результатов исследования видится методика идентификации грозовых кластеров с использованием восстановленных значений индексов неустойчивости по данным спутникового мониторинга.

Предыдущие исследования позволяют утверждать, что температурно-влажностный профиль атмосферы, восстанавливаемый по данным спутникового зондирования, достаточно хорошо совпадает с результатами аэрологического зондирования в нужном для прогноза слое атмосферы [5, 7]. На слабо освещенных наблюдениями территориях Сибири использование данных дистанционного зондирования позволит уточнить как временную, так и пространственную локализацию конвективных ячеек, и оценить вероятность развития опасных конвективных явлений. Например, детализированное пространственное положение очагов высокой степени неустойчивости атмосферы и их динамику можно отслеживать с помощью спектрорадиометра MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на космических платформах EOS AM-1 (Terra) и EOS PM-1 (Aqua). В качестве примера перспективного использования данных спектрорадиометра, продукт которого содержит восстановленные значения индекса неустойчивости KIND, приведен случай от 22–23 июня 2017 года (рис. 2).

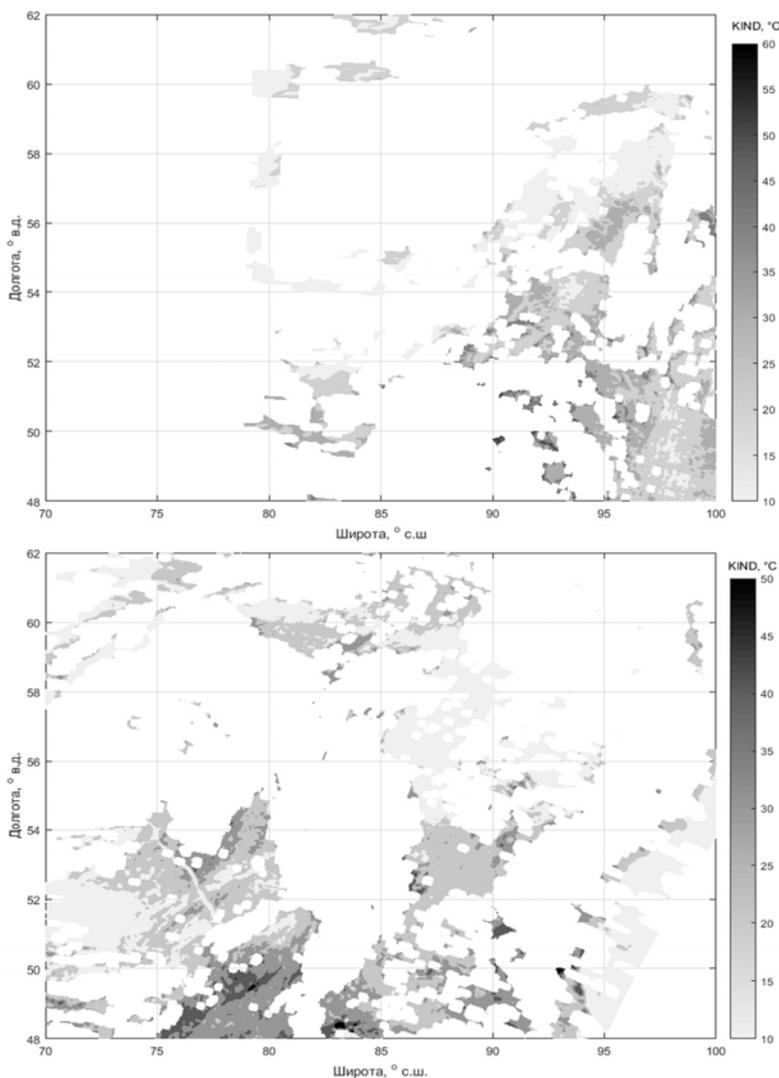


Рис. 2. Значения индекса KIND в атмосфере над Республикой Хакасия в пролеты спутника Terra в 04:50 и 05:45 ВСВ за 22–23 июня 2017 г.
Fig. 2. Spatial distribution of KIND over Republic of Khakassia on June 22-23, 2017 at 04:50 and 05:45 UTC Terra satellite spans. The values were retrieved from MODIS atmospheric product.

В этот день наблюдалась мощная, но небольшая по площади гроза с выпадением крупного града в районе озера Беле (54° с. ш., 90° в. д.). Практикуемыми в Сибири в настоящее время методами невозможно определить локализацию мезомасштабных конвективных комплексов, поэтому знание пороговых значений индексов неустойчивости атмосферы

и картированных значений индексов, полученных по данным измерений, например спектрорадиометра MODIS, позволит выделять зоны грозы с вероятностью 70 и 90 %.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что пороговые значения индексов неустойчивости (LIFT, SHOW, KIND и TOTL) над территориями с разными физико-географическими условиями различаются. Поэтому для успешного прогнозирования гроз в различных по физико-географическим условиям регионах Сибири определены пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы, при которых с определенной степенью вероятности развивается мощная конвекция с грозами.

Полученные пороговые значения термодинамических характеристик атмосферы перспективны для использования при разработке альтернативных прогнозов гроз над исследуемыми территориями, при интерпретации данных спутникового зондирования, а также могут использоваться при усовершенствовании параметризаций конвективных процессов в мезомасштабных моделях.

Результаты исследования получены при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Список литературы

1. *Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А.* Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.
2. *Бухаров М.В., Кухарский А.В., Мисник Л.А.* Автоматизированное рабочее место Планета-метеобзор для мониторинга опасных атмосферных явлений, связанных с конвективной облачностью // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 64-69.
3. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5-15.
4. *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.
5. *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.
6. *Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е.* Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10-19.
7. *Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю.* Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектрорадиометра MODIS/Terra данными аэрологического зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 7. С. 603-607.
8. *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. 27-37.

9. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 40-53.
10. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М., Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21-30.
11. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Особенности вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы над территорией Восточной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 7. С. 560-567.
12. Кочеева Н.А., Кречетова С.Ю. Особенности внутрисезонного распределения гроз на территории Республики Алтай и грозовые очаги // Казанская наука. 2011. № 1. С. 460-462.
13. Ленская О.Ю. Методические вопросы использования спутниковой и радиолокационной информации в мезомасштабном прогнозе (на примере опасных явлений погоды в Москве 24 июля 2001 г.) // Вестник Челябинского государственного университета. 2007. № 6. С. 66-79.
14. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 351 с.
15. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Терёб Л.А., Кулижникова Л.К., Калмыкова О.В. Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 13-20.
16. Показатели функционирования аэрологической сети РФ за январь 2018 г. / Отдел оперативного мониторинга НТЦР ЦАО. [Долгопрудный], 2004–2018. URL: http://caontr.mipt.ru/monitor/2018/01/res2018_01.htm (дата обращения: 03.03.2018).
17. Поморцева А.А., Калинин Н.А. Аналитический обзор современного состояния исследований шквалов: условия возникновения, методы диагноза и прогноза // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 90-104.
18. Specializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy. VNIIGMI-MCD, Obninsk, 2000-2011, available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>. [in Russ].
19. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Исследование параметров облачности и явлений по данным спутникового и радиолокационного зондирования // Географический вестник. 2011. № 3 (18). С. 59-69.
20. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 5-32.
21. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Особенности циклогенеза над территорией западной Сибири за период 1976-2015 гг. // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 81-92.
22. Центральной аэрологической обсерватории – 60 лет / Центральная аэрологическая обсерватория. [Долгопрудный]. URL: http://cao-rhms.ru/full_history.html (дата обращения: 19.03.2018).
23. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 232 с.
24. Щукин Г.Г., Степаненко В.Д. Состояние и перспектива радиометеорологических исследований атмосферы // Вопросы радиометеорологии: сб. статей. СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. С. 7-26.
25. Andersson, T., Andersson, M., Jacobsson, C., Nilsson, S. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in Southern Sweden // Meteorol. Mag. 1989. Vol. 118(1404). P. 141-146.
26. Brooks H.E., Lee J.W., Craven J.P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data // Atmos. Res. 2003. Vol. 67. P. 73-94. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0.
27. Cimini D., Nelson M., Güldner J., Ware R. Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology // Atmos. Meas. Tech. 2015. Vol. 8. P. 315-333. DOI:10.5194/amt-8-315-2015.

28. *DeRubertis D.* Recent trends in four common stability indices derived from U.S. radiosonde observations // *American Society Journal*. 2006. Vol. 19. P. 309-323. DOI:org/10.1175/JCLI3626.1.
29. *Fuelberg H., Biggar D.* The preconvective environment of summer thunderstorms over the Florida Panhandle // *Weather and Forecasting*. 1994. Vol. 9. P. 316–326. DOI:org/10.1175/1520-0434(1994)009<0316:TPEOST>2.0.CO
30. *Galway J.G.* The Lifted index as a predictor of latent instability // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1956. Vol. 3. P. 528-529.
31. *George J.J.* *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York; London: Academic Press, 1960. 684 p.
32. *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.
33. *Haklander A.J., Van Delden A.* Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands // *Atmospheric Research*. 2003. 67-68. P. 273–299. doi:10.1016/S0169-8095(03)00056-5
34. *Kunz M.* The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 7. P. 327-342. DOI.org/10.5194/nhess-7-327-2007
35. *Manzato A.* A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods // *Atmospheric Research*. 2003. Vol. 67-68. P. 417-454. doi:10.1016/S0169-8095(03)00058-9.
36. *Marinaki A., Spiliotopoulos M., Michalopoulou H.* Evaluation of atmospheric instability indices in Greece // *Advances in Geosciences*. 2006. Vol. 7. P. 131–135. doi.org/10.5194/adgeo-7-131-2006
37. *Miller R.C.* Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, 1972. 190 p.
38. *Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Bart A.A., Belikova M.Yu.* The forecast of the spatial position of convective cells using a data by global SL-AV NWP model // *Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2016. Vol. 10035. P. 1–5. URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> (date of access: 07.02.2018). doi:10.1117/12.2249138.
39. *Showalter A.K.* A stability index for forecasting thunderstorms // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1947. Vol. 34. P. 250-252.
40. *Smiljanić I., Bahorić Z., Strelec Mahović N.* The value of satellite-derived instability indices in the assessment of pre-convective conditions. *Croatian Meteorological Journal.*, 2013/14. Vol. 48/49. P. 19-36.
41. *Tajbakhsh S., Ghafarian P., Sahraian F.* Instability indices and forecasting thunderstorms: the case of 30 April 2009 // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2012. Vol. 12, no. 12. P. 403-413. DOI: 10.5194/nhess-12-403-2012.
42. *Weisz E., Smith N., Smith Sr. W. L.* The use of hyperspectral sounding information to monitor atmospheric tendencies leading to severe local storms. *Earth Space Science*, 2015, vol. 2, pp. 369-377. DOI: 10.1002/2015EA000122.
43. *Yang J., Zhiqing Z., Caiying W., Feng L., Qiang G.* Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites–FengYun 4 (FY-4) // *Bull. Am. Meteorol. Society*. 2017. Vol. 98, no. 8. P. 1637-1658. DOI:10.1175/BAMS-D-16-0065.1.

References

1. *Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A.* Prognoz opasnyh konvektivnyh yavlenij v Permskom krae s ispol'zovaniem global'nyh prognosticheskikh modelej [The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 101-119 [in Russ.].

2. Bukharov M. V., Kukharskii A. V., Misnik L. A. Automated work place "Planeta-Meteobzor" for monitoring hazardous weather associated with convective clouds. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, no. 2, pp. 102-105, DOI: 10.3103/S1068373908020064.

3. Vasil'ev E.V., Alekseeva A.A., Peskov B.E. Conditions for formation and short-range forecasting of severe squalls. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 1, pp. 1-7, DOI: 10.3103/S1068373909010014.

4. Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A. Konvektsiya v atmosfere nad yugo-vostokom Zapadnoy Sibiri [Convection in the atmosphere above south-east of the Western Siberia]. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2009, vol. 22, no. 1, pp. 17-21 [in Russ].

5. Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Zolotukhina O. I., Tunaev E.L. Termodinamicheskie usloviya formirovaniya mezomasshtabnoy konvektsii v atmosfere Zapadnoy Sibiri. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Fizika [Russian Physics Journal]*, 2011, vol. 54, no. 11/3, pp. 148-155 [in Russ.].

6. Gorbatenko V.P., Krechetova S.Y., Belikova M.Y., Nechepurenko O. E. The comparison of atmospheric instability indices retrieved from the data of radio sounding and MODIS spectroradiometer on thunderstorm days over West Siberia. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015, vol. 40, no. 5, pp. 289-295. DOI: 10.3103/S1068373915050015.

7. Gorbatenko V.P., Nechepurenko O.E., Krechetova S.Yu., Belikova M.Yu. Verifikatsiya parametrov neustojchivosti atmosfery, vosstanovlennyh po dannym spektrometra MODIS/Terra dannymi aerologicheskogo zondirovaniya [The verification of atmospheric instability parameters recovered by spectroradiometer MODIS/Terra with data from upper-air soundings]. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*. 2016, vol. 29, no. 7, pp. 603-607 [in Russ].

8. Gubenko I.M., Rubinshtein K.G. Analysis of the Results of Thunderstorm Forecasting Based on Atmospheric Instability Indices Using the WRF-ARW Numerical Model Data. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015, vol. 40, no. 1, pp. 16-24. DOI: 10.3103/S1068373915010033 [in Russ].

9. Gubenko I. M., Rubinshtein K. G. An example of the comparison of middle troposphere instability indices in the prognostic model with the thunderstorm activity data. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2014, vol. 39, no. 5, pp. 308-318. DOI: 10.3103/S1068373914050045 [in Russ].

10. Kalinin N.A., Vetrov A.L., Sviyazov E.M., Popova E.V. Studying intensive convection in Perm krai using the WRF model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2013, vol. 38, no. 9, pp. 598-604. DOI: 10.3103/S1068373913090021. [in Russ].

11. Komarov V.S., Lomakina N.Ya. Osobennosti vertikal'noy statisticheskoy struktury poley temperatury, vlazhnosti i vetra v pogranichnom sloe atmosfery nad territoriy Vostochnoy Sibiri [Features of vertical statistical structure of temperature, humidity, and wind fields within the atmospheric boundary layer of Eastern Siberia]. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2011, vol. 24, no. 7, pp. 560-567 [in Russ].

12. Kocheeva N.A., Krechetova S.J. Osobennosti vnutrisezonnogo raspredeleniya groz na territorii Respubliki Altay i grozovye ochagi [Features of distribution of thunderstorms in territory of republic of Altai and storm centres]. *Kazan nayka [Kazan Science]*, 2011, no. 1, pp. 460-462. [in Russ].

13. Lenskaya O.Yu. Metodicheskie voprosy ispol'zovaniya sputnikovoy i radiolokatsionnoy informatsii v mezomasshtabnom prognoze (na primere opasnyh yavleniy pogody v Moskve 24 iyulya 2001 g.) *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Chelyabinsk State University]*, 2007, no. 6, pp. 66-79. [in Russ]

14. Muchnik V.M. Fizika grozy. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 351 p. [in Russ].

15. Novitskii M.A., Shmerlin B.Ya., Petrichenko S.A., Tereb L.A., Kulizhnikova L.K., Kalmykova O.V. Using the indices of convective instability and meteorological parameters for analyzing the tornado-risk conditions in Obninsk on May 23, 2013. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 2, pp. 79-84. DOI: 10.3103/S1068373915020028. [in Russ].

16. Pokazateli funktsionirovaniya aerologicheskoy seti RF za yanvar' 2018 g. / Otdel operativnogo monitoringa NTTSR TSAO. Dolgoprudnyy, 2004-2018, available at: http://caontr.mipt.ru/monitor/2018/01/res2018_01.htm. [in Russ].

17. Pomortseva A.A., Kalinin N.A. Analiticheskij obzor sovremennoogo sostoyaniya issledovaniy shkvalov: usloviya vozniknoveniya, metody diagnoza i prognoza [Analytical review of the current status of studying squalls: formation conditions, methods of diagnosis and prognosis]. *Geographical Bulletin*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. 90-104. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104. [in Russ].
18. Специализированные массивы для климатических исследований / ВНИИГМИ-МЦД. [Обнинск], 2000–2011. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 26.02.2018).
19. Tolmachyova N.I., Ermakova L.N. Issledovanie parametrov oblachnosti i yavlenij po dannym sputnikovogo i radiolokacionnogo zondirovaniya [Research of parameters of overcast and the phenomena according to satellite and radar-tracking sounding]. *Geographical Bulletin*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 90-104. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104. [in Russ].
20. Tolstykh M.A. *Global'nye modeli atmosfery: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Global atmosphere models: current state and development plans]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 359, pp. 5-32 [in Russ].
21. Tunaev E.L., Gorbatenko V.P., Podnebesnykh N.V. Osobennosti ciklogeneza nad territoriej zapadnoj Sibiri za period 1976-2015 gg. [Distinctive features of cyclogenesis over the territory of western Siberia during 1976-2015]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 364, pp. 81-92 [in Russ].
22. Central'noy aehrologicheskoy observatorii – 60 let / Central'naya aehrologicheskaya observatoriya, Dolgoprudnyy, available at: http://cao-rhms.ru/full_history.html. [in Russ].
23. *Shmeter S.M. Fizika konvektivnyh oblakov*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 232 p. [in Russ].
24. Shukin G.G., Stepanenko V.D. Sostoyanie i perspektiva radiometeorologicheskikh issledovaniy atmosfery. Voprosy radiometeorologii: sb. statey. Saint-Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhayskogo Publ., 2013, pp. 7-26 [in Russ].
25. Andersson, T., Andersson, M., Jacobsson, C., Nilsson, S. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in Southern Sweden. *Meteorol. Mag.*, 1989, vol. 118, no. 1404, pp. 141-146.
26. Brooks H.E., Lee J.W., Craven J.P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmos. Res.*, 2003, vol. 67, pp. 73-94. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0.
27. Cimini D., Nelson M., Guldner J., Ware R. Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology. *Atmos. Meas. Tech.*, 2015, vol. 8, pp. 315-333. DOI:10.5194/amt-8-315-2015.
28. DeRubertis D. Recent trends in four common stability indices derived from U.S. radiosonde observations. *American Society Journal*, 2006, vol. 19, pp. 309-323. DOI:org/10.1175/JCLI3626.1.
29. Fuelberg H., Biggar D. The preconvective environment of summer thunderstorms over the Florida Panhandle. *Weather and Forecasting*, 1994, vol. 9, pp. 316–326. DOI:org/10.1175/1520-0434(1994)009<0316:TPEOST>2.0.CO
30. Galway J.G. The Lifted index as a predictor of latent instability. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1956, vol. 3, pp. 528-529.
31. George J.J. *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York; London: Academic Press Publ., 1960, 684 p.
32. 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, pp. 160-164.
33. Haklander A.J., Van Delden A. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmospheric Research.*, 2003, vol. 67-68, pp. 273–299. DOI:10.1016/S0169-8095(03)00056-5.
34. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2007, vol. 7, pp. 327-342, DOI: 10.5194/nhess-7-327-2007.

35. *Manzato A.* A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods. *Atmospheric Research*, 2003, vol. 67-68, pp. 417-454. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00058-9.

36. *Marinaki A., Spiliotopoulos M., Michalopoulou H.* Evaluation of atmospheric instability indices in Greece. *Advances in Geosciences*, 2006, vol. 7, pp. 131–135. DOI: 10.5194/adgeo-7-131-2006.

37. *Miller R.C.* Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R). Headquarters, Air Weather Service, USAF, 1972. 190 p.

38. *Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Bart A.A., Belikova M.Yu.* The forecast of the spatial position of convective cells using a data by global SL-AV NWP model. *Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2016, vol. 10035, pp. 1–5. Available at: www.proceedings.spiedigitallibrary.org. DOI: 10.1117/12.2249138.

39. *Showalter A.K.* A stability index for forecasting thunderstorms. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1947, vol. 34, pp. 250-252.

40. *Smiljanić I., Bahorić Z., Strelec Mahović N.* The value of satellite-derived instability indices in the assessment of pre-convective conditions. *Croatian Meteorological Journal.*, 2013/14, vol. 48/49, pp. 19-36.

41. *Showalter A.K.* A stability index for forecasting thunderstorms. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1947, vol. 34, pp. 250-252.

42. *Tajbakhsh S., Ghafarian P., Sahraian F.* Instability indices and forecasting thunderstorms: the case of 30 April 2009. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, vol. 12, no. 12, pp. 403-413. DOI: 10.5194/nhess-12-403-2012.

43. *Yang J., Zhiqing Z., Caiying W., Feng L., Qiang G.* Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites—FengYun 4 (FY-4). *Bull. Am. Meteorol. Society*, 2017, vol. 98, no. 8, pp. 1637-1658. DOI:10.1175/BAMS-D-16-0065.1.

Поступила в редакцию 27.04.2018 г.

Received by the editor 27.04.2018.