

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.594

*В.П. Горбатенко, С.Ю. Кречетова, М.Ю. Беликова, О.В. Разумова***ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕЗОМАСШТАБНОЙ КОНВЕКЦИИ И ГРОЗ ПО ДАННЫМ MODIS И АЭРОЛОГИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-05-90705) и ФЦП № 14.В37.21.0667*

Исследуется потенциал продукции MODIS для определения степени неустойчивости атмосферы. В качестве характеристик неустойчивости сравниваются три индекса, рассчитываемых по данным спутника и радиозондов: LIFT, TOTL и KIND. Получено, что хорошо коррелируют два индекса, определяемых по данным спутника и радиозондов: LIFT и TOTL. MODIS позволяет определять пространственное положение мощных конвективных ячеек и уточнять прогноз гроз.

Ключевые слова: гроза; неустойчивость атмосферы; спектрорадиометр MODIS.

Одной из самых уязвимых позиций в прогнозе гроз остается определение ее пространственной локализации. Причиной тому является сложность прогноза развития мезомасштабной конвекции, зависящей от совокупности факторов разного пространственного и временного масштаба. Исследования российских [1, 2] и зарубежных авторов [3–5] вскрыли большой потенциал использования спутниковой информации для наблюдения за развитием мезомасштабной конвекции и прогноза образования опасных конвективных явлений, включая грозу, град, смерч.

С выводом на полярную солнечно-синхронную орбиту в феврале 2000 г. пилотной космической платформы Terra стали доступны данные, необходимые для восстановления ключевых параметров структуры атмосферы, регистрируемые 36-канальным спектрорадиометром MODIS [5]. В перечень продуктов, создаваемых по данным MODIS, входит продукт MOD07_L2 (Atmosphere Profile Product), в котором содержится ряд характеристик атмосферы, включая профили температуры, точки росы и их производные [6–8], которые широко используются для прогноза опасных конвективных явлений за рубежом [3–5].

Одним из первых шагов в создании алгоритма идентификации мезомасштабных конвективных ячеек является сравнение результатов стандартного профильного зондирования атмосферы, осуществляемого радиозондами на аэрологических станциях, с данными спутниковых регистраций в дни с грозой, зарегистрированной наблюдателями метеорологических станций.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ характеристик неустойчивости атмосферы, определяемых по данным аэрологического зондирования и MOD07_L2 для территории Западной Сибири в дни с грозами.

В качестве реперной точки для проведения сравнительного анализа была выбрана территория аэрологической станции Колпашево (Томская область). Маркером наличия мощной конвекции послужили грозы, зарегистрированные наблюдателями на метеорологической станции, расположенной в непосредственной близости от аэрологической.

Материалы и методы. Практически все существующие методы прогноза гроз основаны на использовании

результатов аэрологического зондирования атмосферы. По результатам зондирования определяется степень неустойчивости атмосферы и мощность конвективно-неустойчивого слоя. Чем большей мощности в своем вертикальном развитии достигнут конвективные ячейки, тем интенсивнее будут опасные явления погоды, которые они продуцируют: ливни, грозы, град, смерчи [9–11].

В негидростатических мезомасштабных моделях для прогноза опасных конвективных явлений погоды используются количественные значения индексов, характеризующих конвекцию по ряду параметров [12, 13]. Наиболее часто используемыми являются индекс LIFT (различие температуры окружающей среды и частицы, поднимающейся с уровня 500 м и 850 гПа), индекс TOTL (комплексная характеристика статической стабильности и влажности в слое 850–500 гПа) и индекс KIND (комплексная характеристика статической стабильности и влажности в слое 850–700 гПа).

Интенсивность развития конвективных вертикальных движений определяется в большей степени 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:

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

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа (°C); T_{parcell} – температура частицы на уровне 500 гПа, поднимающейся с уровня 500 м над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы, °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, например Total Totals index (TOTL) и KIND:

$$TOTL = (T850 - T500) + (TD850 - T500); \quad (2)$$

$KIND = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700}),$ (3)
 где T_{850} – температура на уровне 850 гПа, °C; T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа, °C; TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа, °C; T_{700} – температура на уровне 700 гПа, °C; TD_{700} – температура точки росы на уровне 700 гПа, °C.

Величины индекса LIFT [8, 14, 15] меньше –9 являются признаком крайней неустойчивости атмосферы, при которой особенно высока вероятность не только грозы и града, но и шквала, смерча. В интервале значений LIFT от –9 до –6 атмосфера сильно неустойчива и высока вероятность перечисленных выше явлений. В интервале значений LIFT от –6 до –3 атмосфера неустойчива, отмечаются интенсивные грозы и возможен град. При значениях LIFT от –3 до 0 атмосфера считается слабо неустойчивой, но отдельные грозы возможны. Если значения LIFT больше 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.

Согласно [8, 14, 15], если значения индекса TOTL изменяются в пределах 40–45°C, то состояние атмосферы слабо неустойчивое, возможны отдельные грозы. При значениях TOTL в интервале 45–50°C атмосфера неустойчива, образуются грозы на больших территориях. Если значения TOTL составляют 50–55°C, то состояние атмосферы сильно неустойчивое и вероятность развития грозы и даже града высока. При значениях индекса TOTL более 55 атмосфера крайне неустойчива и над территорией вероятны сильные грозы, град и другие опасные явления, обусловленные конвекцией.

Если индекс KIND принимает значения в интервале 25–30°C, это указывает на слабо неустойчивое состояние атмосферы. При значениях от 30 до 35°C состояние атмосферы неустойчивое и высока вероятность ливня, но возможны с невысокой степенью вероятности и грозы. Значения индекса в интервале 35–40°C свидетельствуют о сильно неустойчивом состоянии атмосферы и наличии потенциала для развития грозы с ливнем, а при значениях индекса больше 40°C атмосфера крайне неустойчива и грозы с сильным ливнем и градом неизбежны [8, 14, 15].

Составляющие уравнений 1–3 определяются по результатам аэрологического зондирования атмосферы и по данным MODIS. Точность измерения температуры радиозондом не одинакова по высоте и составляет 1–2°C, а характеристик влажности – 15–20%. Точность измерений спектрорадиометром MODIS температурного профиля, согласно [8], не превышает 1,9°C, температуры точки росы – 4°C. Однако значения температуры точки росы на уровне 850 гПа не могут быть измерены спектрорадиометром, поэтому они восстанавливаются по эмпирическим формулам на основе данных об относительной влажности в нижних слоях атмосферы [8].

Таким образом, значения индексов TOTL и KIND определяются по косвенным характеристикам, и, следовательно, нельзя ожидать полного совпадения значений этих индексов с результатами, полученными по данным аэрологического зондирования. Тем не менее точность измерений и вычисления значений индексов неустойчивости продукта MOD07_L2 сопоставима с точностью аэрологических исследований атмосферы.

Пространственное разрешение данных MOD07_L2 составляет 5 × 5 км в надири. Абсолютная погрешность

привязки изображения MODIS/Terra к местности не превышает 150 м. Более точный анализ погрешности геопривязки, выполненный NASA, показал, что в направлении движения спутника средняя погрешность привязки составляет 18 м (при среднеквадратичном отклонении $\sigma = 38$ м), а в направлении скана – 4 м (при $\sigma = 40$ м) [6, 16, 17].

Объектом исследования являлось состояние атмосферы в дни с грозами, зарегистрированными в окрестностях аэрологической станции Колпашево за летний сезон 2009–2011 гг. Всего было рассмотрено 76 дней с грозой, наблюдавшихся в исследуемый период. Для каждого из этих дней были рассчитаны значения индексов неустойчивости TOTL, KIND и LIFT как по данным аэрологического зондирования, так и по данным спектрорадиометра MODIS. Данные аэрологического зондирования были взяты за 00 часов ВСВ. Над территорией Западной Сибири спутник Terra пролетает в период 5–6 ч ВСВ. Значения характеристик атмосферы по данным MODIS брали в пикселе размером 5 × 5 км, в который попадает исследуемая станция.

Сравнительный анализ значений аэрологического и спутникового мониторинга характеристик атмосферы проводился на основе расчетов рангового коэффициента корреляции Спирмена, критерия Фишера и t-критерия Стьюдента для зависимых выборок. Выбор t-критерия Стьюдента для определения значимости различий между средними значениями зависимых выборок продиктован тем, что измерения характеристик атмосферы, по которым рассчитывались индексы, проводились для одной и той же станции, но разными способами. С помощью критерия Фишера проводилась оценка значимости различий в дисперсиях значений соответствующих индексов. Кроме того, с помощью критерия χ^2 Пирсона была проведена оценка соответствия частот распределений значений индексов, полученных путем аэрологического и космического зондирования. Совокупность используемых статистических критериев позволяет оценить однородность рассматриваемых выборок.

При работе с данными MODIS было необходимо использовать специальное программное обеспечение, поскольку данные MODIS хранятся в формате HDF (Hierarchical Data Format). Формат HDF был выбран NASA в качестве основного формата для хранения данных EOS (Earth Observing System) и объединяет в себе массивы данных, растровые изображения, атрибуты (поименованные текстовые строки), а также результаты группирования исходных данных [18]. Файлы формата HDF поддерживают нерегулярную сетку и заданы в синусоидальной проекции, которая не поддерживается ГИС. Для перепроектирования данных MOD07_L2 и создания тематических продуктов, отвечающих конкретным параметрам атмосферы, была использована программа HEG [19]. Средствами HEG был создан промежуточный файл формата GeoTiff в проекции UTM, который позволяет визуализировать и подвергать численной обработке тематический продукт в любой ГИС, поддерживающей этот формат.

Изучение параметров атмосферы требует обработки достаточно больших временных серий продуктов MOD07_L2. На наш взгляд, наиболее приемлемой ГИС для решения этой проблемы является ГИС GRASS [20],

которая поддерживает пакетный режим обработки файлов данных, т.е. имеется возможность задания цикла обработки файлов, хранящихся в одном каталоге.

Результаты обработки данных и их обсуждение

На рис. 1 приведены значения сравниваемых индексов неустойчивости атмосферы, рассчитанных по разным базам данных: аэрологического зондирования и MODIS.

Очевидно, что значения индексов в моменты близких по времени измерений достаточно хорошо согласуются между собой, а следовательно, являются объективной характеристикой степени неустойчивости атмосферы. На основании этого сопоставления можно утверждать, что анализируемые индексы перспективны для использования над Западной Сибирью не только при анализе информации спутников, но и при адаптации мезомасштабных прогнозных моделей для исследуемой территории.

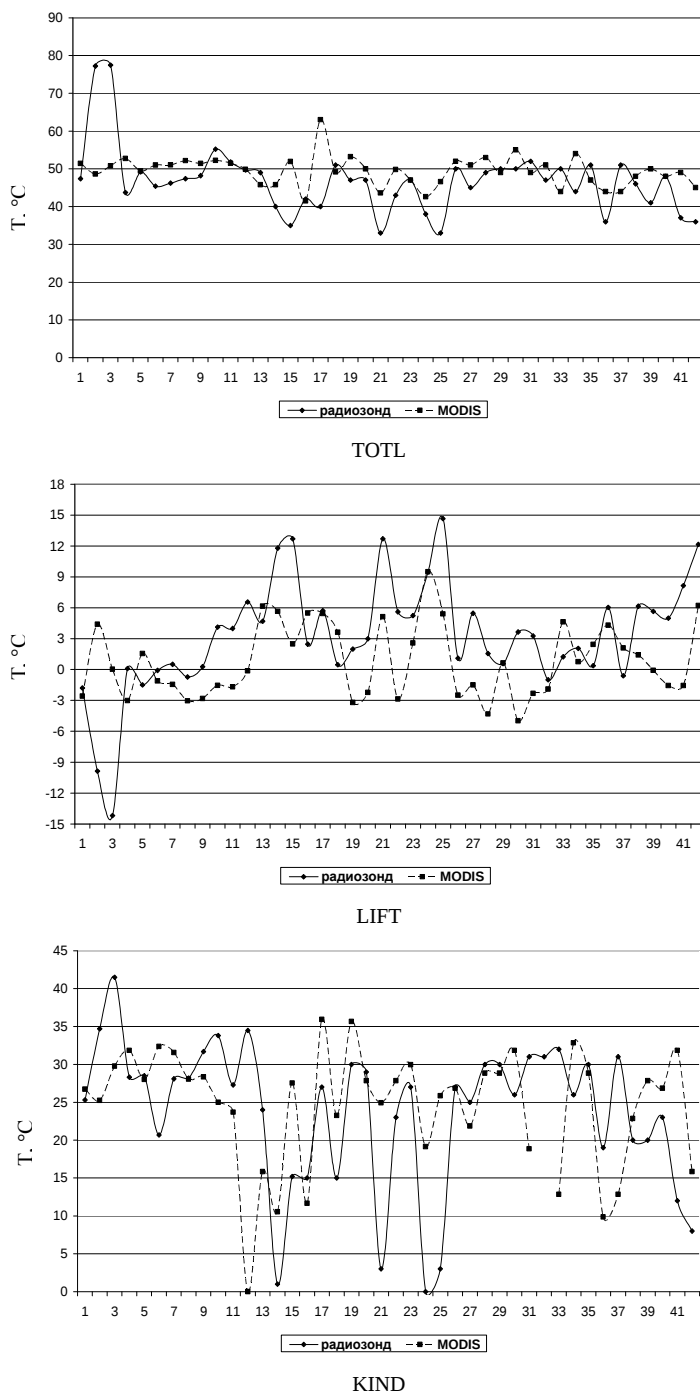


Рис. 1. Значения индексов неустойчивости, рассчитанных по базам аэрологического зондирования (радиозонд) и MODIS в дни с грозами

В табл. 1 приведено сравнение статистических характеристик индексов неустойчивости атмосферы, полученных в результате измерения профиля температуры и влажности путем аэрологического (радиозондом) и спутникового зондирования (MODIS).

По результатам t-критерия Стьюдента можно утверждать, что средние значения индексов TOTL и KIND, рассчитанных по рассматриваемым методикам, статистически существенно не различаются. Результаты критерия Фишера показали, что дисперсии значений

всех индексов, измеренных двумя способами, обнаруживают статистически значимое различие. Согласно критерию Пирсона статистически значимо различаются и распределения значений рассматриваемых индексов. Следовательно, рассматриваемые выборки неоднородны. Это может быть следствием того, что конвекция усиливается к 11–12 ч (MODIS) местного времени по сравнению с 6 ч утра (радиозонд). Поэтому MOD07_L2 иллюстрирует характеристики более мощной конвекции, чем радиозонд. Это предположение подтверждает и тот факт, что уменьшается дис-

персия значений индексов (табл. 1). Это значит, что наблюдаемые расхождения являются закономерностью, которую можно учитывать в оценке степени неустойчивости атмосферы.

Коэффициент корреляции является положительным и статистически значимым для индекса LIFT (табл. 2). Значения индексов TOTL и KIND согласуются несколько хуже. Обусловлено это тем, что эти индексы содержат параметры влажности атмосферы, которые MODIS, возможно, определяет с большей погрешностью, чем радиозонд.

Таблица 1

Статистические характеристики индексов устойчивости атмосферы, рассчитанные по данным радиозондов (P) и MOD07_L2 (M)

Параметры	TOTL		LIFT		KIND	
	P	M	P	M	P	M
Среднее	46,7	49,4	3,3	0,8	23,7	24,5
Среднеквадратическое отклонение	8,9	3,9	5,5	3,6	9,7	7,9
Минимум	33	41,5	-14,2	-5	0	0
Максимум	77,5	63	14,7	9,5	41,5	36
Эмп. значение t-критерия (уровень значимости)	-1,8 (при p = 0,07)		3,0 (при p = 0,01)		-0,57 (при p = 0,6)	
Эмп. значение критерия Фишера (уровень значимости)	4,0 (при p < 0,01)		1,8 (при p = 0,02)		1,8 (при p = 0,02)	
Эмп. значение критерия χ^2 (уровень значимости)	35,7 (p < 0,05)		44,7 (p < 0,01)		57,1 (p < 0,05)	

Таблица 2

Значения коэффициента корреляции Спирмена между индексами устойчивости аэрологического зондирования и продукта MOD07_L2 на станции Колпашево

Индексы	Коэф. корреляции	Уровень значимости p-level
TOTAL (аэрологическое зондирование) & TOTAL (MOD07_L2)	0,2	0,23
LIFT (аэрологическое зондирование) & LIFT (MOD07_L2)	0,4	0,01
KIND (аэрологическое зондирование) & KIND (MOD07_L2)	0,19	0,22

Таким образом, можно утверждать, что данные спутникового зондирования достаточно хорошо описывают термодинамическое состояние атмосферы в дни с грозой. Следовательно, очаги пространственной локализации гроз можно достаточно надежно выявлять по спутниковым данным над территориями, где значения индексов превышают определенное значение. Значения индексов LIFT и TOTL и KIND, при которых опасные конвективные явления могут обнаруживаться, приведены в [21].

На рис. 2 приведено пространственное распределение значений индексов неустойчивости атмосферы LIFT и TOTL для окрестностей станции Колпашево, построенное по данным MODIS. Судя по значениям индексов, обширная область неустойчивости охватывает все пространство вокруг станции. Однако средние значения индексов, рассчитанные по обеим методикам (табл. 1), не позволяют считать атмосферу Западной Сибири в дни с грозой как сильно неустойчивую, если сравнивать со значениями индексов, приведенными в [12–15]. Тем не менее грозы в анализируемый период были весьма интенсивными и занимали большие площади. Возможно, значения индексов, характеризующих мощность конвекции, несколько отличаются от опубликованных в литературе [12–15]. Этот факт требует дополнительных исследований. Однако, даже ориентируясь на данные зарубежных исследований, можно говорить о том, что над рассматриваемой территорией 15.07.2009 была высока вероятность гроз (рис. 2) и они были отмечены наблюдателями на метеостанциях.

Таким образом, пространственное распределение значений индексов LIFT и TOTL, получаемых на основе продукта MOD07_L2, позволяет определять места локализации конвективных ячеек, способных продуцировать грозы в местах, не покрытых сетью метеостанций. Следовательно, если прогноз гроз, полученный по данным аэрологического зондирования, дополнять картиной пространственного распределения значений индексов, полученных по базам спутникового зондирования, то можно давать детализированный по местности прогноз гроз.

Однако при использовании данных MODIS следует учитывать следующие ограничения. Наиболее точными измерениями спектро радиометра MODIS являются измерения, полученные при отсутствии облачности [8] или при наличии разрывов в плотном слое облаков. Спектро радиометром облачность фиксируется в окне обзора 5×5 пикселей относительного анализируемого пикселя («центральный» пиксель), для которого определяется искомое значение. Если из 25 пикселей хотя бы 5 не покрыты плотной облачностью, то анализируемому пикселю присваивается среднее значение искомой характеристики, рассчитанное по свободным от облачности пикселям. В случае если облаками были закрыты более 20 пикселей окна обзора или по какой-либо причине измерения не удовлетворяют требованиям или отсутствуют, то значение анализируемого пикселя обозначается как неопределенное (missing data). Очевидно, что в дни с плотной беспросветной облачностью, закрывающей территорию более 25 км², значения индексов неустойчивости не будут рассчитаны.

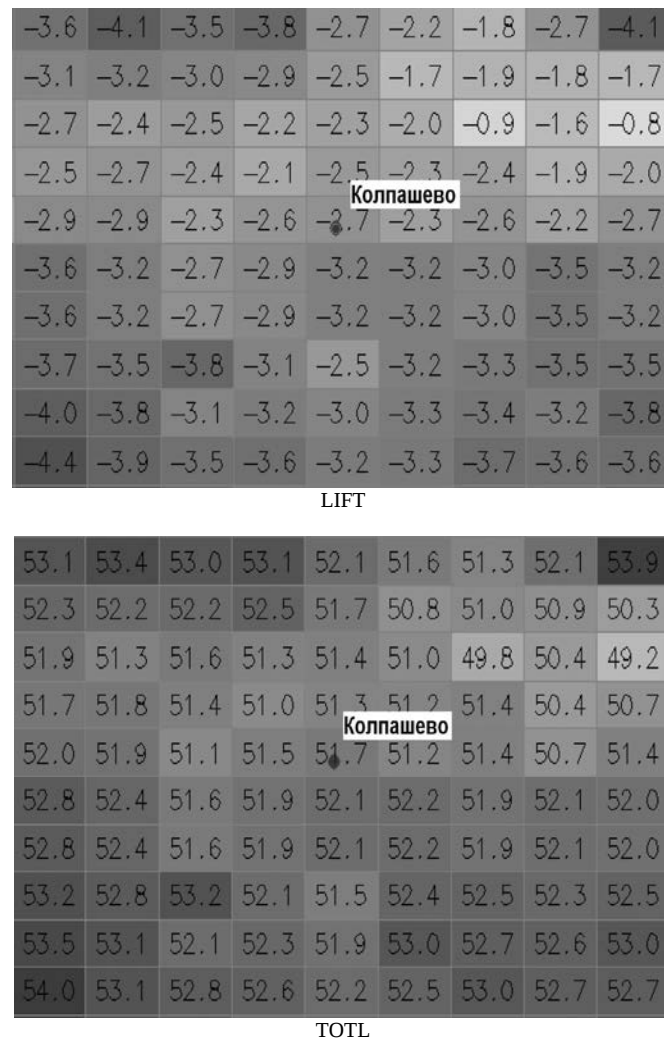


Рис. 2. Распределение значений индексов LIFT (°K) и TOTL (°K) в окрестностях станции Колпашево 15 июля 2009 г. Темным выделены пиксели с наибольшей неустойчивостью атмосферы

При наличии плотной облачности определение параметров атмосферы спектрометрическим MODIS в нижних слоях невозможно, а в дни с грозой наличие такой облачности является необходимым условием ее развития.

Поскольку средний размер конвективной ячейки составляет 10×10 км, то возможны ситуации, когда конвективная ячейка с плотной облачностью будет не полностью закрывать площадь окна обзора MODIS и для «центрального» пикселя может быть восстановлено значение параметров атмосферы, в том числе и значения индексов TOTL и LIFT.

Следовательно, данные спектрометра MODIS позволяют обнаружить не только кластеры конвективных ячеек, связанные с линией фронта, но и отдельные конвективные ячейки, которые продуцируют отдельные внутримассовые грозы [21].

Однако не исключены ситуации, когда плотная облачность полностью закрывает площадь окна обзора MODIS и параметры атмосферы не идентифицируются. Тем не менее если в окрестностях пикселей с неопределенными значениями индексов неустойчивости наблюдаются пиксели с характерными для гроз значениями индексов, то эти значения индексов можно экстраполировать на неосвещенные области.

Выводы:

1. Параметры атмосферы, регистрируемые спектрометрическим MODIS, имеют высокое пространственное разрешение и приемлемую для идентификации конвективных ячеек погрешность измерений.

2. Значения индексов, характеризующих степень неустойчивости атмосферы в дни с грозой, рассчитываемые по данным спутникового и аэрологического зондирования, хорошо согласуются между собой.

3. Данные продукта MOD07_L2 позволяют обнаружить как кластеры конвективных грозовых ячеек, связанных с линией фронта, так и отдельные внутримассовые ячейки.

4. По значениям рассчитанных индексов неустойчивости можно получать картины пространственного расположения конвективных ячеек, продуцирующих грозы. Поэтому преимуществом информации, полученной с MODIS, является подробная пространственная локализация конвективных ячеек в районах с редкой сетью метеорологических наблюдений.

Учитывая практическую важность разрабатываемой методики спутникового диагноза мощной мезомасштабной конвекции вообще и гроз в частности, в дальнейшем предусматривается проведение детальных

сравнений профилей температурно-влажностных характеристик атмосферы, измеренных радиозондами и MODIS в дни с грозой и градом над рядом пунктов Западной Сибири.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева А.А. Распознавание конвективных стихийных явлений погоды на основе цифровой информации с ИСЗ с целью их сверхкраткосрочного прогноза // Труды Гидрометцентра России. 2000. Вып. 335. С. 59–73.
2. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Детектирование облачности и выделение зон осадков регионального масштаба по данным полярно-орбитальных метеорологических ИСЗ // Метеорология и Гидрология. 2002. Т. 4. С. 28–38.
3. Chrysoulakis H.M., Domenikiotis C., Dalezios H. Towards monitoring of regional atmospheric instability through MODIS/AQUA images. URL: http://www.iacm.forth.gr/_docs/pubs/4/MODIS_GIS2003.pdf (дата обращения 14.05.2012).
4. Liu G.R., Chaung Y.C., Kuo T.H., Chen Y.J. Prediction of the Summer Convection with MODIS and NOAA Satellite Data. URL: http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2006/Papers/P-4_Q13.pdf
5. Sauli J. MODIS atmospheric profiles product in Finland – A feasibility study. URL: http://www.eumetsat.int/groups/cps/documents/document/pdf_conf_p46_s2_12_joro_v.pdf
6. Лагутин А.А. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 2. С. 67–89.
7. MODIS Atmosphere: официальный сайт NASA. URL: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07_L2/index.html (дата обращения 05.08.2012).
8. Suzanne W. Seemann, Eva e. Borbas, Jun Li, W. Paul Menzel, Liam E. Gumley, MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document. URL: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07_L2/atbd.html (дата обращения 05.07.2012).
9. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.П. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 148–156.
10. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2010. Т. 337. С. 184–189.
11. Решетов Г.Д. Прогноз дневных и ночных гроз // Труды Гидрометцентра СССР. 1977. Вып. 176. С. 86–99.
12. Johns R.H., Doswell C.A. Severe local storms forecasting. Wea. Forecasting. 1992. P. 558–612.
13. Schulz P. Relationships of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado // Wea. Forecasting. 1989. № 4. P. 73–80.
14. Andersson T.A. M.J.C.N.S.: Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // Meteorol. Mag. 1989. № 116. P. 141–146.
15. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 7. P. 327–342.
16. Meteorology: Understanding the Atmosphere: официальный сайт NASA. URL: http://itg1.meteor.wisc.edu/wxwise/AckermanKnox/chap11/TW_index.html (дата обращения 20.08.2012).
17. MODIS: официальный сайт EOSDIS. URL: earthdata.nasa.gov/data/nrt-data/data-products/modis (дата обращения 05.08.2012).
18. HDF-EOS Tools and Information Center. URL: <http://hdfEOS.net/software/index.php> (дата обращения 25.08.2012).
19. HDF-EOS to Geo TIFF Conversion TOOL: официальный сайт NASA. URL: <http://newsroom.gsfc.nasa.gov/sdptoolkit/HEG/HEGDownload.html> (дата обращения 20.08.2012).
20. Grass Gis: официальный сайт Grass Gis. URL: http://grass.osgeo.org/gdp/html_grass64 (дата обращения 05.08.2012).
21. Ground Receiving and Processing System for NOAA/METOP/MODIS. Product Catalog]. URL: <http://www.imd.gov.in/section/satmet/dynamic/FINAL-METOP.pdf> (дата обращения 05.08.2012).

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 12 октября 2012 г.