

УДК 551.501.8

## Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектрорадиометра MODIS/Terra данными аэрологического зондирования

В.П. Горбатенко<sup>1</sup>, О.Е. Нечепуренко<sup>1</sup>, С.Ю. Кречетова<sup>2</sup>, М.Ю. Беликова<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

<sup>2</sup> *Горно-Алтайский государственный университет  
649000, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1*

Поступила в редакцию 28.03.2016 г.

Для двух аэрологических станций на территории Камчатки за период 2005–2014 гг. проведено сравнение значений индексов неустойчивости LIFT, TOTL и KIND, полученных с помощью аэрологического зондирования и продукта MOD07\_L2 спектрорадиометра MODIS. Станции были выбраны с таким расчетом, чтобы разница во времени между сетевым стандартным аэрологическим зондированием и сканированием спутником Terra (NASA) не превышала 1 ч. Получено, что измерения, выполненные в одно время, согласуются гораздо лучше по сравнению с теми, где разница составляет несколько часов. Наиболее согласованными и однородными являются значения индексов TOTL и KIND, полученные в 12:00 UTC. Данные продукта MOD07\_L2 перспективны для разработки новых методов диагноза и прогноза пространственного расположения и динамики развития конвективных кластеров.

*Ключевые слова:* индексы неустойчивости, аэрологическое зондирование, спектрорадиометр MODIS, валидация; indices of instability, upper-air sounding, spectroradiometer MODIS, validation.

### Введение

Одним из активно развивающихся направлений использования спутниковых данных космической подсистемы наблюдений Росгидромета является мониторинг опасных метеорологических явлений, связанных с развитой конвекцией [1]. Применение данных дистанционного зондирования для этих целей особенно перспективно в связи с тем, что они позволяют осуществлять мониторинг пространственного положения очагов грозы и града [2, 3]. Для слабо освещенных наблюдениями территорий Западной Сибири и Дальнего Востока такая информация особенно актуальна, поскольку позволяет уточнять как временную, так и пространственную локализацию конвективных ячеек и оценивать вероятность развития опасных конвективных явлений [1, 4–6].

В настоящее время существуют различные спутниковые приборы, позволяющие получать информацию о многих характеристиках системы «атмосфера – подстилающая поверхность Земли». Таким прибором является сканирующий спектрорадиометр MODIS, установленный на космических платформах

Terra и Aqua. Тематическими продуктами обработки MODIS являются MOD07 (Terra) и MYD07 (Aqua), которые содержат данные о термодинамическом состоянии атмосферы, в том числе и о параметрах конвекции, с пространственным разрешением 5 × 5 км [7, 8].

Возможность своевременного и регулярного получения данных является немаловажным преимуществом применения MODIS. Но главной проблемой использования спутниковых измерений является то, что они имеют определенные ограничения и требуют дополнения и/или валидации данными натурных измерений.

Предварительные исследования [4, 9, 10] говорят о возможности использования индексов неустойчивости атмосферы, восстановленных при помощи спектрорадиометра MODIS, для отслеживания динамики мезомасштабной конвекции и прогноза образования опасных конвективных явлений, таких как гроза и град. Тем не менее информация о валидации индексов неустойчивости атмосферы Lifted Index (LIFT), K-Index (KIND) и Total Totals Index (TOTL), восстанавливаемых по данным MODIS, в исследованиях, выполненных для территории России, представлена недостаточно полно. Особенности валидации данных над территорией России обусловлены двумя обстоятельствами: 1) сетевое аэрологическое зондирование привязано к всемирному скоординированному времени, поэтому не везде производится

\* Валентина Петровна Горбатенко (vpgor@tpu.ru); Ольга Евгеньевна Нечепуренко (o.e.nechepurenko@gmail.com); Светлана Юрьевна Кречетова (krechetovas@yandex.ru); Марина Юрьевна Беликова (belikovamy@yandex.ru).

в часы максимального развития неустойчивости атмосферы; 2) разница во времени между аэрологическим и спутниковым зондированиями составляет несколько часов, в то время как продолжительность жизни конвективной ячейки составляет в среднем 40 мин.

Такая информация особенно актуальна для территорий, где разница во времени пролета спутника и радиозонда минимальна. Только в этом случае методически правильно сравнивать результаты зондирования.

Целью настоящего исследования является сравнение индексов неустойчивости атмосферы LIFT, KIND и TOTL, применяемых для прогноза опасных конвективных явлений и рассчитываемых на основе температурно-влажностных профилей, которые получены с помощью аэрологического зондирования и спутникового мониторинга над территорией Камчатки, где разница во времени зондирования не превышает 1 ч.

## Материалы и методы исследования

В качестве параметров неустойчивости атмосферы были использованы индексы LIFT, TOTL и KIND [11–13], которые рассчитываются по результатам как спутниковых, так и аэрологических измерений:

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

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

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

Здесь  $T_{500}$  — температура окружающей среды на уровне 500 гПа, °С;  $T_{\text{parcel}}$  — температура частицы на уровне 500 гПа, поднявшейся с уровня 500 м над земной поверхностью при среднем давлении, температуре и точке росы, °С;  $T_{850}$  — температура окружающей среды на уровне 850 гПа, °С;  $TD_{850}$  — температура точки росы на уровне 850 гПа, °С;  $T_{700}$  — температура окружающей среды на уровне

700 гПа, °С;  $TD_{700}$  — температура точки росы на уровне 700 гПа, °С.

В выбранном для исследований районе расположены две аэрологические станции: Ключи (56°31' с.ш., 160°83' в.д.) и Петропавловск-Камчатский (53°08' с.ш., 158°58' в.д.), результаты зондирования атмосферы которых и сравнивались со спутниковыми.

В процессе работы исследовалось состояние атмосферы в теплый период (март–сентябрь) за 2005–2014 гг. в окрестностях выбранных аэрологических станций. Территорию Камчатки спутник Terra сканирует во время, близкое к 00:00 и 12:00 UTC. Данные аэрологических наблюдений были получены за сроки 00:00 и 12:00 UTC [14]. Для сравнения были сформированы пары рядов значений индексов неустойчивости атмосферы, а именно индексов LIFT, TOTL и KIND. Для каждого из индексов была создана база, состоящая из 2140 пар значений, при помощи программы Atmospheric data [15]. Значения характеристик атмосферы по данным MODIS брали в пикселе размером 5×5 км, в который попадает исследуемая аэрологическая станция.

Для статистического сравнения результатов зондирования атмосферы использовались критерий Фишера и  $t$ -критерий Стьюдента для зависимых выборок.

## Результаты обработки данных и их обсуждение

На рис. 1–3 представлены сравнения значений индексов KIND, TOTL и LIFT, рассчитанных по данным обоих методов зондирования для срока 12:00 UTC на ст. Петропавловск-Камчатский.

Получено, что значения индексов, близких по времени измерений, хорошо согласуются между собой. В табл. 1 приведены результаты статистического анализа аэрологического и спутникового зондирования на основе расчетов критерия Фишера и  $t$ -критерия Стьюдента для зависимых выборок для обеих станций для срока 12:00 UTC. Выбор  $t$ -критерия

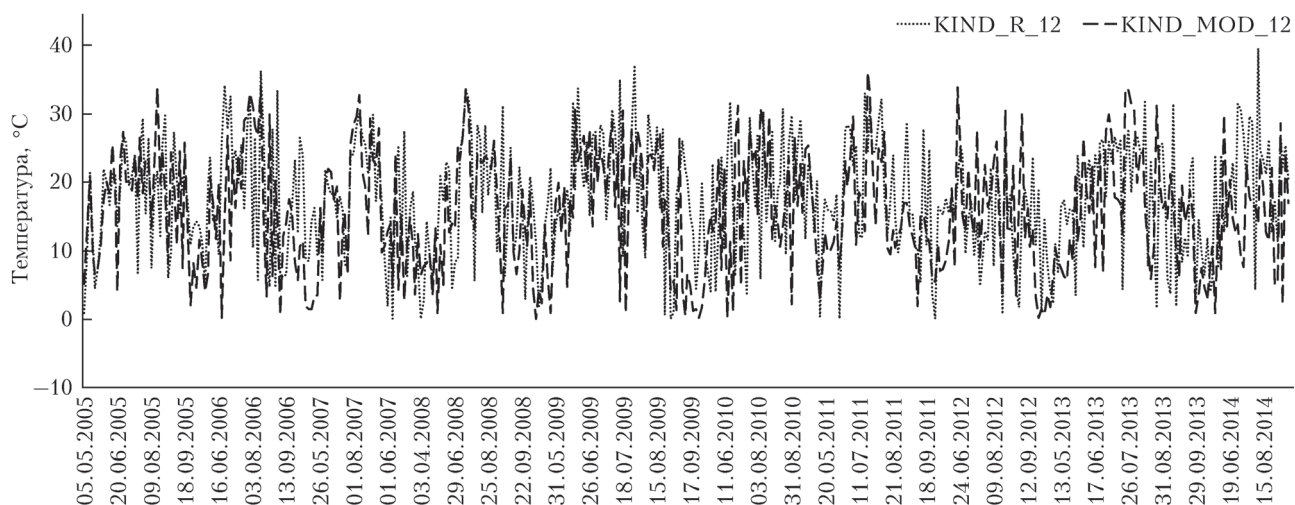


Рис. 1. Значения индекса KIND, рассчитанные по данным аэрологического (KIND\_R\_12) и спутникового (KIND\_MOD\_12) зондирования

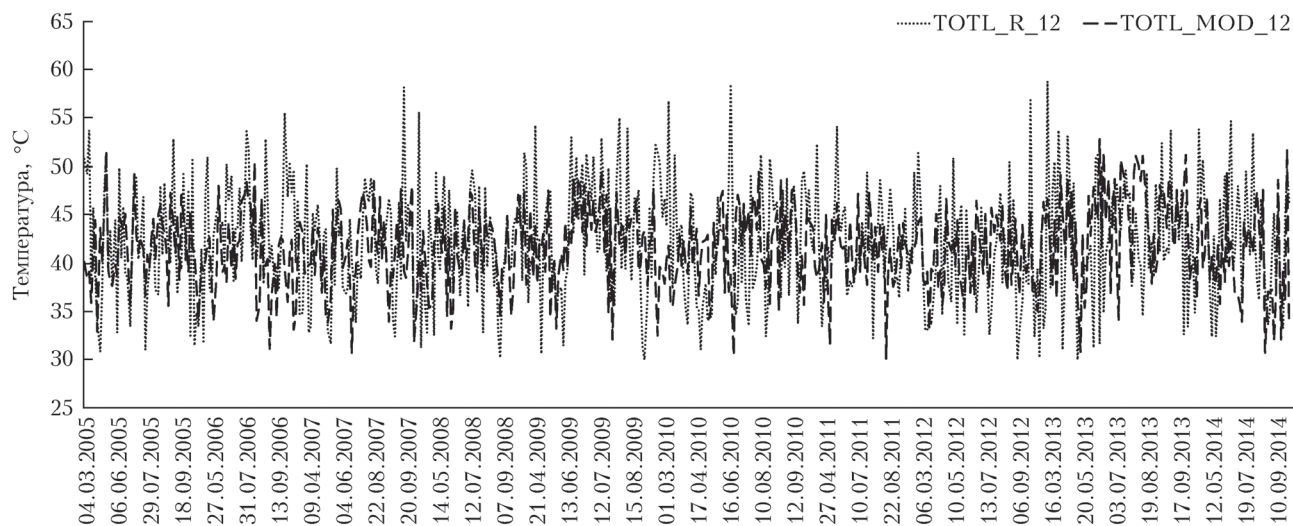


Рис. 2. Значения индекса TOTL, рассчитанные по данным аэрологического (TOTL\_R\_12) и спутникового (TOTL\_MOD\_12) зондирований

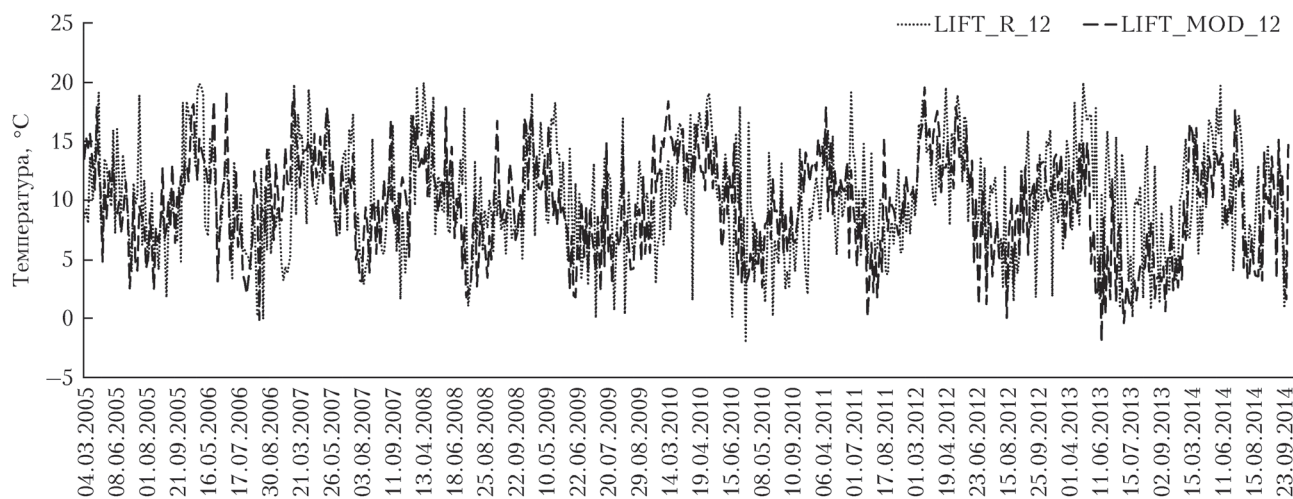


Рис. 3. Значения индекса LIFT, рассчитанные по данным аэрологического (LIFT\_R\_12) и спутникового (LIFT\_MOD\_12) зондирований

Таблица 1

**Статистические характеристики и эмпирические значения статистических критериев индексов неустойчивости, рассчитанные по данным радиозондов (R) и MOD07\_L2 (MOD) для срока 12:00 UTC**

Статистические характеристики		Среднее	Критерий Стьюдента	Среднеквадратическое отклонение	Критерий Фишера	
Ключи	LIFT	MOD_12	11,8	4,3	4,6	2,0
		R_12	10,5	( $p < 0,05$ )	6,6	( $p < 0,05$ )
	KIND	MOD_12	10,7	-1,8	13,6	1,0
		R_12	10,0	( $p > 0,05$ )	13,9	( $p > 0,05$ )
Петропавловск-Камчатский	TOTL	MOD_12	44,4	0,06	4,5	2,0
		R_12	48,8	( $p > 0,05$ )	5,5	( $p > 0,05$ )
	LIFT	MOD_12	9,8	-1,9	4,4	1,2
		R_12	10,3	( $p > 0,05$ )	4,7	( $p > 0,05$ )
	KIND	MOD_12	10,5	-2,9	1,7	1,0
		R_12	12,5	( $p > 0,05$ )	2,1	( $p > 0,05$ )
	TOTL	MOD_12	41,5	0,08	4,2	2,4
		R_12	41,5	( $p > 0,05$ )	6,5	( $p < 0,05$ )

Таблица 2

**Статистические характеристики и эмпирические значения статистических критериев индексов неустойчивости, рассчитанные по данным радиозондов (R) и MOD07\_L2 (MOD) для срока 00:00 UTC**

Статистические характеристики		Среднее	Критерий Стьюдента	Среднеквадратическое отклонение	Критерий Фишера	
Ключи	LIFT	MOD_0	7,5	-10,2	4,8	1,6
		R_0	10,1	( $p < 0,05$ )	6,1	( $p < 0,05$ )
	KIND	MOD_0	12,8	8,7	12,1	1,2
		R_0	7,6	( $p < 0,05$ )	13,3	( $p < 0,01$ )
	TOTL	MOD_0	38,2	-7,5	4,8	1,5
		R_0	40,6	( $p < 0,05$ )	5,9	( $p < 0,05$ )
Петропавловск-Камчатский	LIFT	MOD_0	7,2	-13,9	5,0	0,5
		R_0	10,6	( $p < 0,01$ )	4,5	( $p < 0,01$ )
	KIND	MOD_0	13,0	7,8	1,3	1,1
		R_0	7,7	( $p < 0,01$ )	2,1	( $p > 0,05$ )
	TOTL	MOD_0	44,7	21,1	4,5	2,2
		R_0	38,5	( $p < 0,01$ )	6,7	( $p < 0,01$ )

Стьюдента для определения значимости различий между средними значениями зависимых выборок обусловлен тем, что измерения характеристик атмосферы, по которым рассчитывались индексы, проводились для одной и той же станции, но разными способами. С помощью критерия Фишера осуществлялась оценка значимости различий в дисперсиях значений соответствующих индексов. Совокупность используемых статистических критериев позволяет оценить однородность рассматриваемых выборок.

Для ст. Петропавловск-Камчатский для всех индексов, измеренных в 12:00 UTC, средние значения не имеют статистически значимых различий. Что касается анализа дисперсии значений индексов, замечены некоторые расхождения для индекса TOTL.

Средние значения и дисперсии индексов TOTL и KIND для ст. Ключи согласно проверке по  $t$ -критерию Стьюдента не имеют значимых различий.

Результаты сравнения данных ночного зондирования оказались несколько хуже (табл. 2). Полученные значения средних и дисперсии (за исключением KIND для ст. Петропавловск-Камчатский) имеют статистически значимые различия (с вероятностью 95%). При этом средние значения индексов TOTL и KIND, полученные из продукта MOD07\_L2, завышены на 2–6 °С, а LIFT – занижены на 1–3 °С относительно значений индексов по данным аэрологического зондирования. Таким образом, индексы, восстановленные при помощи спектрометра MODIS индексируют атмосферу ночью как более неустойчивую по сравнению с оценкой по данным аэрологического зондирования.

По результатам статистического анализа можно заключить, что точность измерений и вычисления значений индексов неустойчивости атмосферы TOTL и KIND продукта MOD07\_L2 в целом сопоставима с точностью аэрологических измерений, особенно для неустойчивой атмосферы. Статистическое сравнение значений индекса LIFT не обнаружило столь хорошего совпадения, возможно, потому, что индекс очень чувствителен к разнице между реальной температурой окружающей среды на уровне 500 гПа

и температурой виртуальной поднимающейся частицы ( $T_{parcel}$ ), которую можно определить либо по аэрологической диаграмме [11–13], либо с помощью математического алгоритма [16]. Поскольку в эмпирических расчетах этой характеристики по результатам спутниковых измерений используются аппроксимационные приближения, а не определение ее по аэрологической диаграмме, ожидать полного совпадения значений индекса не представляется возможным.

## Заключение

Результаты валидации индексов неустойчивости показали, что для территории Камчатки наиболее согласованными и однородными являются значения индексов TOTL и KIND, полученные в 12:00 UTC. Индексы, восстановленные при помощи спектрометра MODIS за 00:00 UTC, индексируют атмосферу более неустойчивой, по сравнению с рассчитанными по аэрологическим данным. Тем не менее полученные результаты демонстрируют, что измерения, выполненные в одно время, согласуются гораздо лучше по сравнению с теми, где разница составляет несколько часов [4].

Полученные результаты следует учитывать при восстановлении параметров неустойчивости атмосферы на других территориях, принимая во внимание разницу между временем зондирования атмосферы спутником и радиозондом.

Данные продукта MOD07\_L2 перспективны для разработки новых методов диагноза и прогноза пространственного расположения и динамики развития конвективных кластеров.

Комплексное использование данных искусственных спутников Земли и других практикуемых методов прогноза опасных конвективных явлений позволит успешнее прогнозировать динамику и пространственную локализацию развитых конвективных кластеров для территории Западной Сибири, что особенно актуально на фоне меняющегося климата и высокой вероятности увеличения числа гроз [17].



Авторы работы выражают благодарность профессору А.А. Лагутину за обсуждение результатов работы и ценные замечания.

Работа выполнена по Государственному заданию Министерства образования и науки РФ (№ 5.628.2014/К) и при поддержке гранта РФФИ № 13-05-98024.

1. Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б. Использование спутниковых данных в Росгидромете для мониторинга опасных явлений и чрезвычайных ситуаций // Сб. тезисов Восьмой всерос. открытой ежегодной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 15–19 ноября 2010. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 5–6.
2. Sauli Joro. 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](http://www.eumetsat.int/groups/cps/documents/document/pdf_conf_p46_s2_12_joro_v.pdf)
3. Бухаров М.В. Диагноз вероятности гроз по спутниковой информации // Метеорол. и гидрол. 2013. № 8. С. 5–16.
4. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 17–21.
5. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами над территорией Западной Сибири // Метеорол. и гидрол. 2015. № 5. С. 10–19.
6. Лагутин А.А., Лагутин Ал.А., Шмаков И.А., Никулин Ю.А. Специализированная ГИС оперативного мониторинга окружающей среды территории и прогнозирования источников природных ЧС // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 53. С. 54–64.
7. MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document. URL: [http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07\\_L2/atbd.html](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07_L2/atbd.html)
8. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 2. С. 67–89.
9. Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Изв. вузов. Физ. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 148–156.
10. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Разумова О.В. Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования // Вестн. Томского гос. ун-та. 2012. № 365. С. 169–174.
11. Galway J.G. The lifted index as a predictor of latent instability // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1956. V. 37, N 10. P. 528–529.
12. Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Nat. Hazard Earth Sys. 2007. V. 7, N 2. P. 327–342.
13. Peppier A.A. Review of static stability indices and related thermodynamic parameters. URL: <http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/mp/iswsmp-104.pdf>
14. Department of Atmospheric Science. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
15. Программа для сбора информации о параметрах атмосферы, получаемых с помощью радиозондирования: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616442 от 24.06.2014 г. (Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам) / Беликова М.Ю., Перельгин А.А.; ФГБОУ ВПО ГАГУ.
16. GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Legacy Atmospheric Moisture Profile, Legacy Atmospheric Temperature Profile, Total Precipitable Water, and Derived Atmospheric Stability Indices. URL: <http://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/LAP.pdf>
17. Горбатенко В.П., Итолитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Решетько М.В., Таранюк М.И. Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 8. С. 693–697.

**V.P. Gorbatenko, O.E. Nepochurenko, S.Yu. Krechetova, M.Yu. Belikova. The verification of atmospheric instability parameters recovered by spectroradiometer MODIS/Terra with data from upper-air soundings.**

For two upper-air stations in Kamchatka for the period 2005–2014 the values of instability indices LIFT, TOTL and KIND, obtained by upper-air sounding and product MOD07\_L2 of spectroradiometer MODIS were compared. These stations were chosen because the difference in observation time does not exceed one hour. It was found that the measurements performed at one time have a much better agreement than those different by a few hours. The most consistent and uniform were the TOTL and KIND values obtained at 12 UTC. Data from the MOD07\_L2 are promising for developing new methods of diagnosis and prediction of the spatial arrangement and dynamics of convective clusters.