

О РОЛИ ВАРИАЦИЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ТРОПИЧЕСКОМ ЦИКЛОГЕНЕЗЕ НА ПРИМЕРЕ УРАГАНА КАТРИНА

© 2008 г. Академик В. Г. Бондур, С. А. Пулинец, Г. А. Ким

Поступило 10.04.2008 г.

На основании анализа экспериментальных данных о вертикальных профилях температуры в районе прохождения урагана Катрина и вариаций потоков галактических космических данных лучей установлена взаимосвязь изменений температуры на уровне тропопаузы с изменением уровня ионизации атмосферы космическими лучами. Выявлено, что вариации температуры и ее пространственного градиента, обусловленные форбуш-понижением потока космических лучей, связанным с магнитной бурей, могли привести к изменению направления меридиональной компоненты скорости и увеличению интенсивности урагана Катрина.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОБЛАЧНЫЙ ПОКРОВ

В исследованиях последних лет по проблеме глобальных изменений климата помимо антропогенных факторов большое внимание уделяется роли естественных причин его формирования, одной из которых являются вариации галактических космических лучей [1]. Наличие метеорологических эффектов, обусловленных космическими лучами, было выявлено давно [2]. Однако более существенное внимание этому фактору стало уделяться только в последнее время. Так, например, в работе [1] установлено наличие корреляции в вариациях галактических космических лучей и глобального облачного покрова в течение 21–22 циклов солнечной активности. Ионы, образуемые в атмосфере за счет ударной ионизации высокоэнергичными частицами космических лучей, становятся центрами конденсации водяного пара в результате процесса гидратации, что в конечном итоге приводит к формированию облаков [3]. Исследования корреляции потоков космических лучей с облачным покровом были продолжены различными авторами. В частности, в рабо-

те [4] корреляция вариаций космических лучей и облачного покрова была исследована для более продолжительного периода, чем в работе [1]. При этом коэффициент корреляции для периода с 1983 по 2001 г. составил 99.5%. Модуляция потоков галактических космических лучей солнечной активностью позволяет выделить различные временные периоды в погодных изменениях, начиная от 11-летнего цикла солнечной активности и заканчивая кратковременными вариациями во время магнитных бурь – форбуш-эффектом космических лучей. Повышение плотности плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля во время активных событий на Солнце приводит к рассеянию галактических космических лучей и понижению их потока, достигающего поверхности Земли, особенно в низких широтах [5].

В работе [6] обнаружены кратковременные вариации облачного покрова во время форбуш-понижений. Причем над областями с толстым облачным покровом этот покров существенно уменьшался, в то время как над океаном с менее плотным облачным покровом плотность облаков повышалась.

Таким образом, установлен факт связи вариаций потока галактических космических лучей (в том числе и кратковременных) с вариациями облачного покрова. Этот эффект может быть использован для анализа изменчивости тропических циклонов.

ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ТРОПИЧЕСКИЕ ЦИКЛНЫ

Могут ли кратковременные вариации потока космических лучей влиять на такие атмосферные образования, как тропические циклоны? В работе [7] проведен детальный статистический анализ возможной связи вариаций солнечной, геомагнитной активности и вариаций галактических космических лучей с циклонической активностью в акваториях Тихого и Атлантического океанов вблизи побережья Мексики. Было проанализировано 119 тайфунов и ураганов, имевших

Научный центр аэрокосмического мониторинга
“Аэрокосмос” Российской Академии наук, Москва

место в течение временного интервала 55 лет. Обнаружено, что для 7 ураганов категории 5 за двое суток до достижения циклоном степени урагана первой категории наблюдалось форбуш-понижение галактических космических лучей. В работе [8] высказано предположение о генерации урагана Катрина в результате магнитной бури, наблюдавшейся 24 августа 2005 г. В качестве основного механизма предлагается увеличение барического контраста в освещенном полушарии и уменьшение давления в тропических широтах. Можно согласиться с тем, что магнитная буря могла повлиять на развитие урагана Катрина, однако механизм воздействия, предлагаемый автором работы [8], требует уточнения.

Результаты, полученные в указанных публикациях и в настоящей работе, дают основания связывать изменение динамики развития ураганов с вариациями космических лучей во время магнитных бурь.

Рассмотрим подробнее возможный механизм воздействия космических лучей на динамику тропических циклонов. Кроме процессов нуклеации, связанных с образованием новых ионов в результате ионизации и приводящих к образованию облаков, необходимо обратить внимание на термодинамику этого процесса. До настоящего времени роль космических лучей рассматривалась как фактор, модулирующий количество ядер нуклеации. При этом тепловые эффекты вследствие присоединения молекул воды к ионам не учитывались.

Следует обратить внимание на то, что основную роль в эволюции тропических циклонов играют вариации потока скрытой теплоты испарения, обусловленные процессами фазового перехода – конденсацией и испарением воды. В работе [9] показано, что увеличение/уменьшение количества ионов – продуктов ионизации атмосферы может вызывать значительные вариации потока скрытой теплоты испарения. Выделение тепла в процессе гидратации ионов приводит к одновременному повышению температуры окружающего воздуха, изменениям относительной влажности и давления. Таким образом, резкие изменения уровня ионизации нарушают термодинамический баланс внутри урагана во всем диапазоне высот.

Насколько эффективен такой процесс? Один протон с энергией $E_p \sim 10^{15}$ эВ (средняя энергия галактических космических лучей) при энергии ионизации основных атмосферных газов лежащей в пределах $E_i \sim 10\text{--}20$ эВ, может создать $10^{13}\text{--}10^{14}$ ион-электронных пар. Лабораторные эксперименты и измерения на аэростатах показали, что к одному иону может присоединиться более 100 молекул воды [10]. При исследованиях процессов образования крупных частиц в результате ионизации атмосферы космическими лучами, вы-

полненных с помощью масс-спектрометра, установленного на аэростате, были зарегистрированы положительные ионы в верхней тропосфере с молекулярной массой 2500 [10]. Нетрудно показать, что в этом случае энергия, выделившаяся в виде потока скрытой теплоты испарения, в $\sim 10^4$ раз превосходит энергию протона – источника ионизации.

Проведенные нами измерения содержания аэрозольных частиц – гигантских ионных кластеров, образуемых в результате ионизации и последующей гидратации ионов, показали, что максимум спектра образуемых частиц находится вблизи 1000 нм, что дает величину эффективности процесса ионизации (отношение выделившейся тепловой энергии к энергии, затраченной на ионизацию), превышающую 10^8 [9].

Таким образом, даже весьма незначительные изменения в плотности потоков космических лучей могут привести к заметным эффектам в атмосфере, что и отмечается в работах по исследованию плотности облачного покрова Земли [3, 4, 6]. Хотя в работе [9] оценивалось выделение тепла при увеличении уровня ионизации, можно предположить, что уменьшение выделения тепловой энергии с ослаблением источника ионизации будет идти с той же эффективностью.

Учитывая сказанное, можно ожидать понижения температуры на высотах максимального ионообразования с уменьшением потока галактических космических лучей во время форбуш-понижения.

На рис. 1 показаны экспериментальные профили ионообразования на различных широтах для периодов максимума (штриховая линия) и минимума (сплошная линия) солнечной активности [11]. Как видно из рис. 1, максимальный эффект можно ожидать на высоте $h \sim 12\text{--}16$ км.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СЛУЧАЯ УРАГАНА КАТРИНА

Рассмотрим конкретный случай тропического циклона Катрина (23–30 августа 2005 г.). Траектория урагана, построенная по данным спутника GOES-11, представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, в течение периода времени с 24 по 27 августа 2005 г. тропический циклон Катрина существенно изменил направление своего движения. Меридиональная компонента скорости урагана Катрина 25–26 августа 2005 г. сменилась с северной на южную. Вследствие этого при постоянной зональной компоненте скорости, направленной на запад, ураган переместился из западной части Атлантики в Мексиканский залив (см. рис. 2). Возникает вопрос: какой фактор мог повлиять на

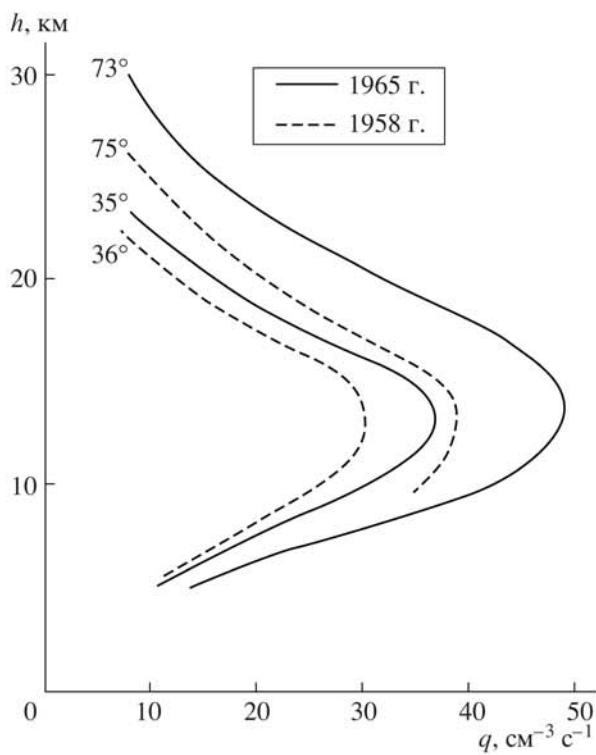


Рис. 1. Высотные профили ионообразования на различных широтах в периоды максимума 1958 г. (штриховые кривые) и минимума 1965 г. (сплошные кривые) солнечной активности по данным [10].

внезапное изменение траектории движение тропического циклона Катрина?

Анализ геофизической обстановки показал, что в течение 24–25 августа имела место сильная

магнитная буря. Значение экваториального индекса D_{st} на главной фазе магнитной бури составляло величину -216 нТл. При этом буря была с внезапным началом: в течение всего 3 ч индекс D_{st} магнитной бури изменился от невозмущенного значения 3 до -216 нТл. Развитие бури привело к резкому уменьшению потока космических лучей. Именно в течение 24–26 августа 2005 г. наблюдался минимум форбуш-эффекта (кривая на рис. 3).

Таким образом, уменьшение интенсивности источника ионизации за счет эффектов вариаций космических лучей должно привести к уменьшению тепловыделения, а следовательно, к падению температуры в области максимума ионообразования (рис. 1).

Для подтверждения этого эффекта нами были проанализированы высотные профили температуры, полученные с помощью метеозондов [13], запускаемых со станций, находящихся вблизи траектории урагана Катрина (рис. 2). Анализ экспериментальных данных, полученных с метеозондов (рис. 4) показал, что максимальное понижение температуры наблюдалось 26 августа 2005 г. на уровне тропопаузы на высоте ~ 16 км.

На рисунке 3 показаны вариации температуры воздуха на высоте 16 км, которые тоже имеют ярко выраженный минимум, следующий с задержкой ~ 20 ч относительно минимума в интенсивности космических лучей. Из кривой 2 (рис. 3) и сравнения профилей, приведенных на рис. 4, отчетливо видно, что 26 августа 2005 г. по сравнению с 25 августа 2005 г. температура на высоте 16 км понизилась на $\sim 9^{\circ}\text{C}$. Такое понижение температуры привело к увеличению высотного темпера-

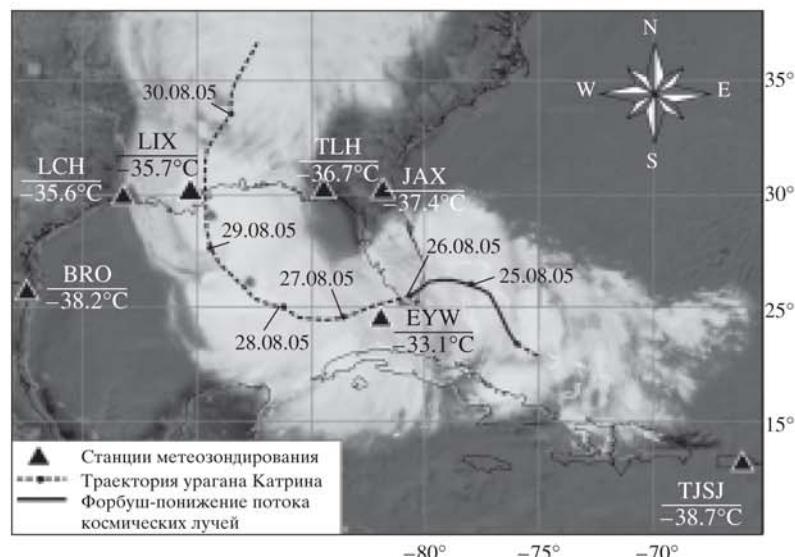


Рис. 2. Траектория урагана Катрина, построенная по космическим данным GOES-11, и положение станций метеорологического зондирования. У каждой станции указаны значения температур на высоте 10500 м, измеренные в 12:00 LT 26 августа 2005 г.

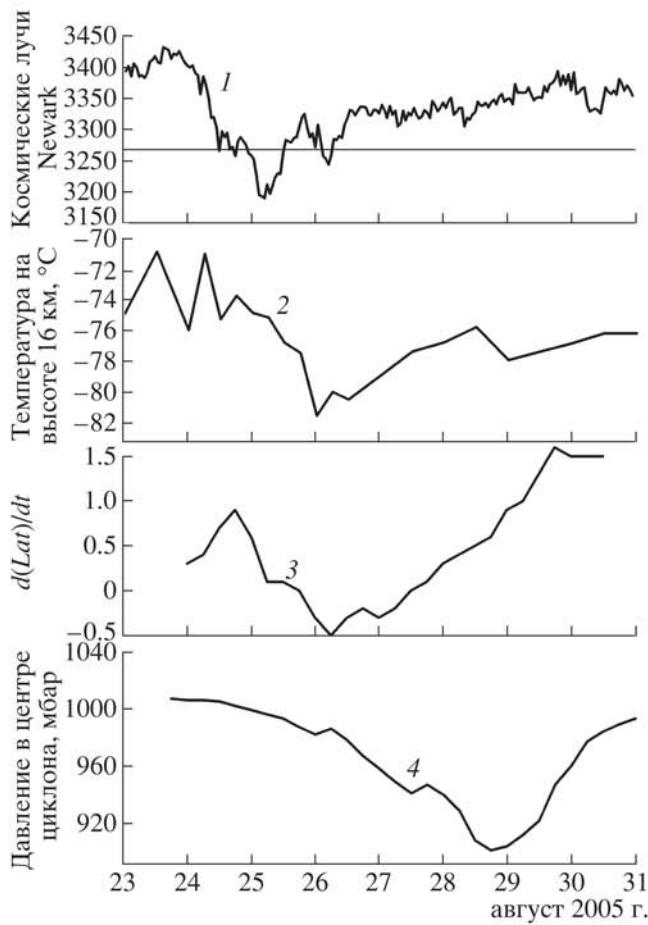


Рис. 3. Вариации потока галактических космических лучей по данным станции Newark, США (1), температура воздуха на высоте 16 км (2), производная северной широты положения урагана Катрина (3) и давление в центре урагана Катрина (4).

турного градиента и усилиению конвекции. В результате усиления конвекции более теплые слои воздуха стали подниматься вверх, в результате чего на высотах от 5 до 14 км температура повысилась на $\sim 2^\circ$.

Чтобы отобразить изменения траектории тропического циклона Катрина, нами было рассчитано суточное приращение широты положения центра урагана, представленное на рис. 3 (кривая 3). Смена меридиональной компоненты скорости с северного направления на южное, произошедшая 25 августа 2005 г., привела также к образованию минимума на кривой положения урагана 26 августа 2005 г. (см. кривую 3 на рис. 3). Задержка наибольшей наблюдаемой южной компоненты скорости урагана по отношению к минимуму потока космических лучей составляет около одних суток (см. кривые 1 и 3 рис. 3). Следует отметить, что несмотря на малое разрешение по времени локальные минимумы на кривой космических лучей

находят свое отражение на локальных минимумах производной широты урагана.

Произведенный анализ показал, что коэффициент корреляции вариаций космических лучей с температурой на высоте 16 км составляет ~ 0.75 при задержке 20 ч, а коэффициент корреляции с положением урагана ~ 0.8 при задержке 24 ч.

Возникает вопрос о связи наблюдаемых изменений температуры с уровнем конвекции, определяющим интенсивность урагана. На рис. 4 представлены вертикальные профили температуры, полученные с помощью радиозонда над станцией EYW с координатами 24N, 81.75W (рис. 2) до начала изменения потока космических лучей 24 августа 2005 г. и после форбуш-эффекта 26 августа 2005 г.

Каким образом изменение температуры может сказываться на динамике тропического циклона? Для ответа на этот вопрос можно использовать результаты математического моделирования. В работе [14] на основе системы вариационной асимиляции данных измерений атмосферных и гидрофизических параметров во время прохождения двух разрушительных тропических циклонов (Iniki и Andrew), имевших место в акватории Атлантического океана в 1992 г., исследовалась возможность воздействия на ураган и определение ключевых параметров такого воздействия. Оказалось, что изменение температуры воздуха, приводящее к возникновению горизонтального градиента температур (пространственной анизотропии) в верхней части урагана, может изменить его траекторию, а повышение температуры верхней части урагана – к ослаблению его интенсивности.

В случае с ураганом Катрина проявились оба эффекта: изменение температуры на разных высотах и возникновение горизонтального градиента температур. Это обусловлено тем, что потоки космических лучей обладают пространственной анизотропией, что приводит к пространственной анизотропии теплового эффекта, возникающего в результате ионизации. Это и наблюдалось в нашем случае. На рис. 2 показаны значения температур на момент времени 12:00 LT для 26 августа 2005 г. по данным 7 станций метеоразведки, использованным в настоящем исследовании. Как видно, разброс значений температур на высоте 10.5 км превышает 5°C (при максимальном значении -33.1°C на станции EYW). В то же время 24 августа 2005 г. в 12:00 LT разброс не превышал 1°C при значениях температур $-(36-37)^\circ\text{C}$ [13]. Как обсуждалось выше, понижение температуры на уровне турбопаузы привело к увеличению конвекции и усилиению урагана Катрина.

При анализе эволюции тропического циклона Катрина не следует забывать также о роли температуры поверхности океана. В работе [15] показано, что более высокий уровень температуры

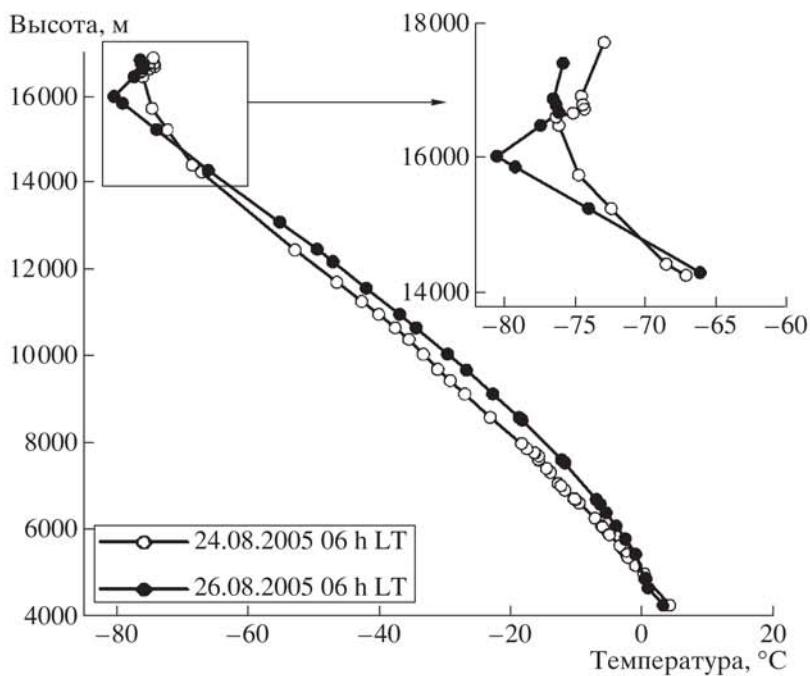


Рис. 4. Высотные профили температуры по данным зондирования со спутника GOES, полученные над станцией EYW (24N, 81.75W), полученные в 06 ч местного времени 24 и 26 августа 2005 г.

поверхности океана в Мексиканском заливе способствовал усилению урагана Катрина в течение 27 августа 2005 г., когда он попал в этот залив после изменения траектории. На рис. 3 (кривая 4) представлен суточный ход изменения атмосферного давления в центре урагана Катрина. Из анализа кривой следует, что процесс усиления урагана, выражавшийся в понижении давления в центре циклона, можно разделить на два этапа: первоначальное усиление, по-видимому, обусловленное воздействием космических лучей в течение 24–27 августа 2005 г., с двумя локальными минимумами, отвечающими минимумам в интенсивности потока космических лучей, и резкое усиление урагана 28 августа 2005 г. при его попадании в Мексиканский залив.

Таким образом, анализ данных о вертикальных профилях температуры в области прохождения урагана Катрина совместно с данными потока космических лучей позволяет сделать заключение о воздействии вариаций космических лучей во время магнитной бури 24–25 августа 2005 г. на изменение интенсивности и траектории движения этого урагана.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Вариации галактических космических лучей, в том числе и кратковременные, являются важным фактором в формировании облачного покрова и теплового баланса верхних слоев тропосферы.

2. Уменьшение потока космических лучей во время магнитных бурь в результате форбуш-эффекта приводит к уменьшению температуры воздуха на уровне тропопаузы и увеличению вертикального градиента температуры, что может вызывать изменение характеристик тропических циклонов.

3. На основании проведенного анализа изменение характеристик урагана Катрина может быть представлено следующим образом:

в результате уменьшения потока космических лучей в течение 24–26 августа 2005 г. в ходе развития магнитной бури температура на высоте тропопаузы 16 км уменьшилась на 9°C, что привело к усилению конвекции и соответствующему усилению урагана; локальные минимум на кривой давления в центре урагана отражают минимум на кривой потока космических лучей с запаздыванием ~1 сут (рис. 3);

пространственный градиент температур, обнаруженный нами по экспериментальным данным, вызвал изменение траектории урагана и его перемещение из Атлантического океана через полуостров Флорида в воды Мексиканского залива;

перемещение урагана на юг и на запад в более теплые воды Мексиканского залива 27 августа 2005 г. привело к увеличению контраста температур и дальнейшему усилению урагана (давление в центре урагана упало).

Таким образом, установлено влияние вариаций галактических космических лучей на изменение

ние характеристик тропических циклонов (интенсивности и траекторий движения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Svensmark H.* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 5027–5030.
2. *Дорман Л.И.* Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 211 с.
3. *Svensmark H., Pedersen J.O.P., Marsch N.D. et al.* // Proc. Roy. Soc. London. A. 2007. V. 463. P. 385–396, doi:10.1098/rspa.2006.1773
4. *Palle E., Butlerb C.J., O'Brien K.* // J. Atmos. Solar and Terr. Phys. 2004. V. 66. P. 1779–1790.
5. *Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И.* Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971.
6. *Knivetton D.R.* // J. Atmos. Solar and Terr. Phys. 2004. V. 33. P. 1135–1142.
7. *Pérez-Peraza J., Kavlakov S., Velasco V., et al.* // Adv. Space Res. 2008. doi: 10.1016/j.asr.2007.12.004.
8. *Иванов К.Г.* // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. С. 643–650.
9. *Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelina A.V. et al.* // Phys. Chem. Earth. 2006. V. 31. P. 143–153.
10. *Eichkorn S., Wilhelm S., Aufmhooff H. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29.
11. *Gringel W., Rosen J.M., Hofmann D.J.* In: The Earth's Electrical Environment. Wash. (D.C.): Nat. Acad. Press, 1986. P. 166–182.
12. www.goes.noaa.gov NOAA Satellite and Information Service.
13. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
14. *Hoffman R.N., Henderson J.M., Grassotti C. et al.* // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. P. 1924–1937.
15. *Kafatos M., Sun D., Gautam R. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L17802. doi:10.1029/2006GL026623