

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 528.8, 528.83

КОМБИНИРОВАННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ И МОНИТОРИНГА МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ¹

© 2024 г. В. П. Саворский*, А. П. Чернушич, О. Ю. Панова, О. О. Кузнецов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: savor@inbox.ru

Поступила в редакцию 28.10.2023 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Рассмотрена возможность повышения точности восстановления интенсивности дождевых осадков по данным космических наблюдений атмосферных мезомасштабных конвективных комплексов (МКК). Показано, что гарантированное обнаружение МКК требует комплексного наблюдения земной атмосферы в ИК- и СВЧ-диапазонах. Проведенный анализ показал, что для повышения точности восстановления необходимы квазисинхронные измерения с геостационарных платформ в ИК-диапазоне и наблюдений с полярно-орбитальных платформ в СВЧ-диапазоне. Метод, разработанный на основе анализа характеристик МКК и возможностей современных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли, обеспечивает высокое временное разрешение системы обнаружения и мониторинга МКК. Получены оценки точности таких квазисинхронных измерений для реально существующих в настоящее время источников космической информации.

Ключевые слова: мезомасштабные конвективные комплексы, опасные атмосферные явления, чрезвычайные ситуации, комплексный мониторинг, спутниковые данные

DOI: 10.31857/S0033849424060108, EDN: IJEIEQ

ВВЕДЕНИЕ

Системы глубокой конвекции развиваются в слоях большой вертикальной мощности и могут занимать всю толщу тропосферы. Мезомасштабные конвективные комплексы (МКК), являясь одними из самых долгоживущих систем глубокой конвекции, представляют собой скопление кучево-дождевых облаков круглой формы с безоблачным пространством в центральной части. МКК характеризуется глубоким влажностным перемешиванием, примыкающим или встроенным в мезомасштабную вертикальную циркуляцию, которая, по крайней мере частично, вызвана конвективными процессами. Зачастую вызывая интенсивные ливни, грозы, шквалы, град, порывы ветра со скоростью более 30 м/с и даже смерчи, МКК формирует непрерывную область осадков размером не менее 100 км, по меньшей мере, в одном из горизонтальных направлений [1] и существует не менее 6 часов.

Повторяемость наблюдений, а соответственно, и временное разрешение существующих

в настоящее время спутников радиометрического СВЧ-зондирования атмосферы составляет не менее 1 сут [2]. Использование данных единичных космических платформ для мониторинга МКК не представляется возможным, поскольку постоянный, без пропусков, мониторинг отдельного МКК при этом невозможен. Решением может быть привлечение комплекса данных всей существующей орбитальной группировки [2]. Но и при применении данных единичной платформы (например, при включении в состав экспериментальной информации исключительно результатов, зарегистрированных отечественными спутниковыми средствами наблюдения), возможно дополнительное улучшение временного разрешения, позволяющее проводить мониторинг МКК. Это, в частности, может быть реализовано при комбинировании данных спутниковых радиометрических СВЧ-комплексов с данными ИК-диапазона, регистрируемыми аппаратурой геостационарных спутников.

Цель работы – развитие комбинированного подхода, базирующегося на совместном использовании спутниковых данных СВЧ- и ИК-диапазонов, для повышения временного разрешения МКК при проведении его мониторинга.

¹Работа была доложена на XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (23–26 мая 2023 г., Йошкар-Ола).

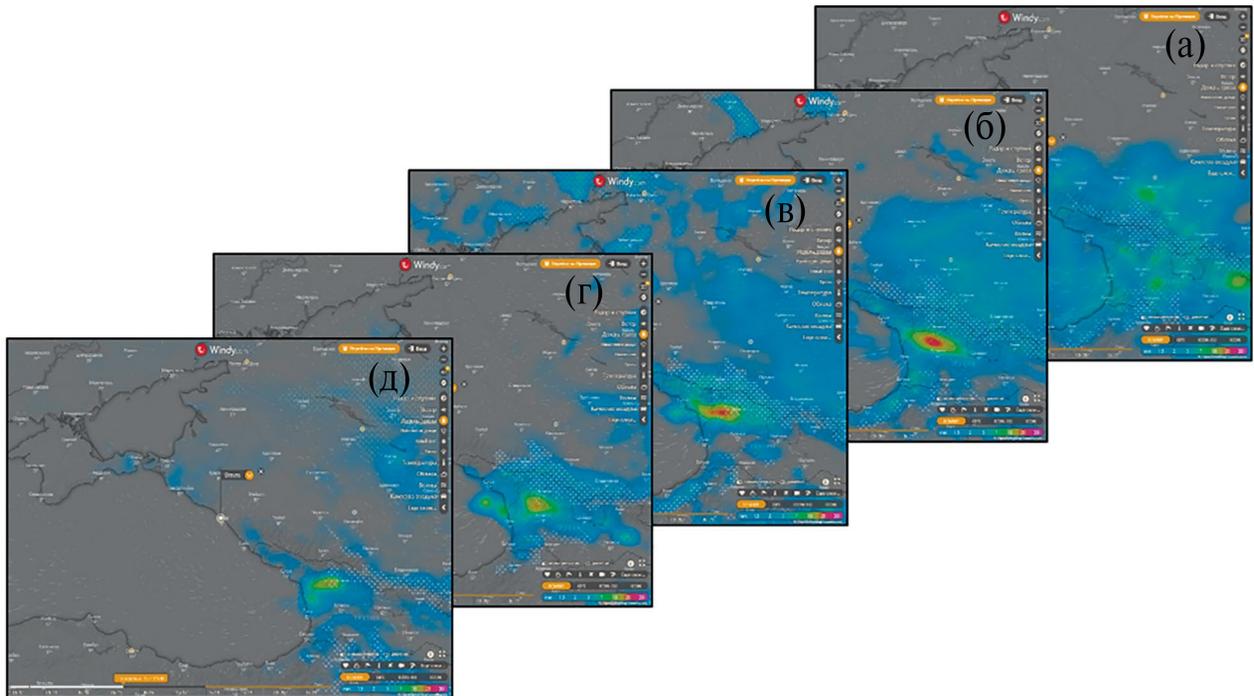


Рис. 1. Динамика развития зоны осадков на Черноморском побережье Кавказа с 13 по 15 мая 2023 г.: а) 13 мая 23:00 UTM, б) 14 мая 11:00 UTM, в) 14 мая 17:00 UTM, г) 14 мая 23:00 UTM, д) 15 мая 11:00 UTM.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАЧНОГО ЩИТА МКК

Мезомасштабные конвективные комплексы являются одними из самых долгоживущих систем глубокой конвекции, развивающихся в слоях атмосферы большой вертикальной протяженности, зачастую занимая всю толщу тропосферы. МКК проявляют себя в виде большого овального (по наблюдениям со спутника) долгоживущего холодного облачного щита [3, 4] и могут давать начало развитию новых кучево-дождевых облаков и их скоплений. В ряде случаев они инициируют развитие мезоциклонов, создавая в своем районе циклоническую циркуляцию.

Конвективные ячейки с максимальными размерами 10...15 км формируют ячеистую структуру МКК. Их совокупная площадь превышает 10^5 км², а продолжительность существования составляет более 6 ч [3, 4]. Формируемый в процессе глубокой конвекции холодный облачный щит МКК, наблюдаемый из космоса, обладает следующими физическими характеристиками:

размеры: А – облачный щит с постоянно низкой температурой инфракрасного (ИК) излучения ≤ -32 °С должен иметь площадь $\geq 10^5$ км²; В – область внутренних холодных облаков с термодинамической температурой ≤ -52 °С должна иметь площадь $\geq 0.5 \times 10^5$ км²;

зарождение: выполняются условия для размеров А и В;

максимальная протяженность: сплошной холодный облачный щит (ИК-температура ≤ -33 °С) достигает максимального размера;

форма: эксцентриситет (малая ось/большая ось) ≥ 0.7 во время максимальной протяженности;

прекращение: характеристики А и В больше не выполняются.

Динамика развития зоны осадков, порожденных мезомасштабным конвективным процессом, представлена на рис. 1 в виде результатов моделирования, проведенного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) (<http://www.windy.com>).

Следует отметить, что представленные на рис. 1 прогнозируемые результаты совпали с реально наблюдаемыми при последующем мониторинге с расхождением по времени не более чем на 3 ч, а по пространству не хуже чем на 30...100 км.

2. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОвого ЗОНДИРОВАНИЯ МКК В СВЧ- И ИК-ДИАПАЗОНАХ

На рис. 2 в качестве примера представлено поле радиояркихостных температур в СВЧ радиометрическом диапазоне в области частоты 89 ГГц (горизонтальная поляризация), измеренных с полярно-орбитальной платформы JAXA GCOM-W1 радиометрическим СВЧ-комплексом AMSR-2 03.04.2023 на 32-м восходящем витке. Измерения проведены

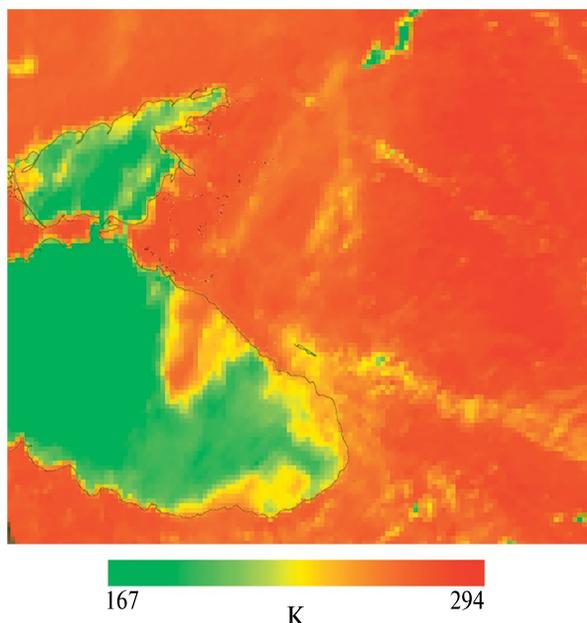


Рис. 2. Радиояркостные температуры (в К) в радиометрическом СВЧ-канале диапазона 89 ГГц (горизонтальная поляризация), 03.04.2023; радиометрический СВЧ-комплекс AMSR-2 (ИСЗ JAXA GCOM-W1); вилоток 32А.

в восточной части Черного моря, где наблюдается аномалия, описываемая контрастом спутниковых радиояркостных температур, достигающим 40 К относительно прилегающих участков морской поверхности. Эта аномалия вызвана присутствием кучево-дождевой облачности и, возможно, осадков. Положительный контраст аномалии по отношению

к окружающей водной поверхности указывает на то, что аномалия обусловлена таким возрастанием собственного радиотеплового СВЧ-излучения в нижней приводной части атмосферного слоя, при котором его интенсивность превышает интенсивность собственного излучения морской поверхности.

Следует отметить, что приведенное в данном примере возрастание собственного излучения системы «атмосфера–морская поверхность» не позволяет идентифицировать участок аномалии как зону глубокой конвекции. Это обусловлено тем, что в диапазоне 90 ГГц вклад собственного излучения верхних переохлажденных участков облачного слоя в радиотепловое СВЧ-излучение облачного слоя незначителен по сравнению с величиной суммарной интенсивности излучения всего слоя облаков. Следует также указать на то, что в СВЧ-диапазоне частот менее 90 ГГц проникающая способность электромагнитного излучения в облаках верхних ярусов увеличивается [5], а интенсивность их собственного излучения, соответственно, уменьшается с уменьшением частоты зондирования. При этом вклад верхних ярусов облаков в суммарное радиотепловое излучение уменьшается. Поэтому СВЧ-диапазон частот менее 90 ГГц можно эффективно использовать для исследования нижней тропосферы, в частности, для обнаружения и оценки параметров участков кучево-дождевой облачности. Но в общем случае использование этого СВЧ-диапазона не подходит для исследования верхних ярусов тропосферы, а именно для обнаружения и мониторинга зон глубокой конвекции (ЗГК).

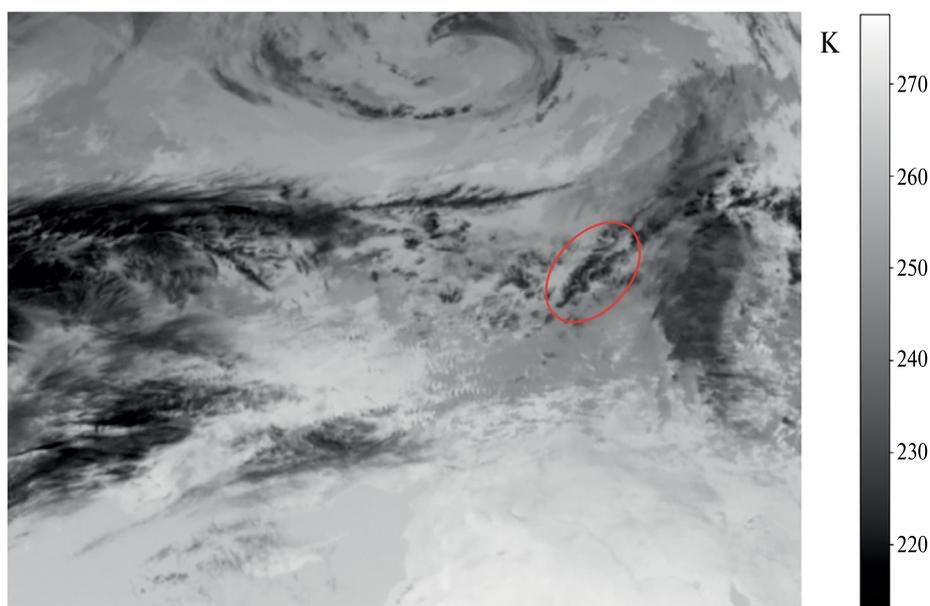


Рис. 3. ИК-яркостные температуры в канале 10.8 мкм аппаратуры SEVIRI (Eumetsat MSG-11), 03.04.2023 10:00 GMT; овалом выделена зона с экстремально низкими значениями яркостных температур в ИК-канале диапазона 10.8 мкм.

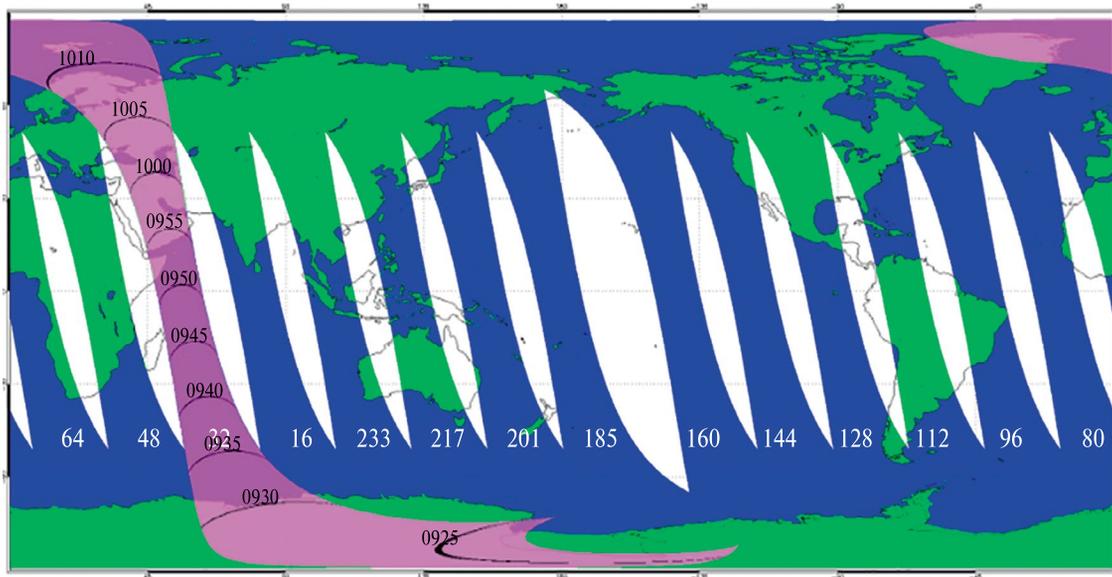


Рис. 4. Зоны суточного наблюдения радиометрического СВЧ-комплекса AMSR-2 (JAXA GCOM-W1), 03.04.2023. Светлые цифры - номера витков спутника.

Напротив, проникающая способность ИК-излучения в облачном слое (в том числе и в верхних ярусах тропосферы) на несколько порядков ниже проникающей способности СВЧ-излучения. Именно поэтому спутниковые наблюдения в тепловом ИК-диапазоне можно эффективно использовать для определения яркостной температуры верхней границы облаков и по температуре верхней границы облачного слоя устанавливать глубину конвекции.

В качестве критерия ЗГК можно использовать, в частности, параметрический пороговый критерий, указанный в разд. 1 в перечислении свойств МКК как частный случай ЗГК. А именно ЗГК, в первом приближении, можно выделять по спутниковым ИК тепловым данным области так называемых «внутренних холодных облаков» с яркостной температурой менее 220 К. Это соответствует термодинамическим температурам атмосферы примерно менее $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такая зона отмечена на рис. 3, где представлено ИК тепловое изображение того же участка Черного моря, что и на рис. 2. На рис. 3 видны отдельные конвективные ячейки с низкими значениями ИК яркостных температур, достигающими 220 К.

Таким образом, выделение (обнаружение) ЗГК и прогнозирование объема вызываемых ЗГК осадков требует привлечения комплекса данных как ИК теплового, так и радиометрического СВЧ-зондирования. Это позволяет своевременно обнаруживать и прогнозировать развитие ЗГК.

3. ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СВЧ- И ИК-ЗОНДИРОВАНИЯ МКК

На рис. 4 представлены зоны суточного наблюдения Земли со спутника JAXA GCOM-W1 радиометрической СВЧ-аппаратурой AMSR-2 (https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/w_amsr2/w_amsr2_orbit.html).

Существенной особенностью зондирования Земли этой аппаратурой является то, что наблюдения на широтах 50° ю.ш. – 50° с.ш. можно проводить не чаще одного раза в сутки на восходящих витках и одного раза в сутки на нисходящих. При этом на восходящих витках в восточной части Черного моря съемка производится в дневное время (12–14 ч местного времени, или 9–11 ч GMT), а на нисходящих – в ночное (0–2 ч местного времени, или 21–23 GMT). Для исследования ЗГК предпочтительны наблюдения в дневное время, когда интенсивность конвекции максимальна. Поэтому в восточной части Черного моря возможность обнаруживать МКС средствами спутникового мониторинга в СВЧ-диапазоне доступна не чаще, чем один раз в сутки. Кроме того, в течение четырех дней из 16-дневного цикла такая возможность отсутствует.

Совместное использование данных экспериментальных наблюдений в СВЧ- и ИК-диапазонах не только обеспечивает надежность обнаружения МКК (см. разд. 2), появляется также возможность обеспечения необходимой периодичности наблюдений. Это можно реализовать, в частности, при использовании наряду с данными радиометрического СВЧ-зондирования также и данных тепло-

вых наблюдений в ИК-диапазоне со стационарных платформ (см. далее).

4. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ИК-ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И МОНИТОРИНГА МКК

Современные системы наблюдения Земли с геостационарных платформ (см., например, [6]) обеспечивают снимок земного полушария с периодичностью порядка 15 мин, что более чем достаточно для синхронизации наблюдений с этих платформ с проведением измерений одного и того же участка земной поверхности с полярноорбитальных платформ с применением радиометрической СВЧ-аппаратуры. Современные геостационарные данные регистрируются с интервалами 15–30 мин. Поэтому с рассогласованием по времени не более 15 мин результаты геостационарных наблюдений в тепловом ИК-диапазоне могут быть круглосуточно синхронизованы со съемками в СВЧ-диапазоне, проводимыми с полярноорбитальных платформ. Кроме того, следует учесть, что наблюдения в ИК-диапазоне имеют лучшее по сравнению со спутниковыми радиометрическими СВЧ-средствами пространственное разрешение. Так, пространственное разрешение аппаратуры SEVIRY, установленной на геостационарных платформах MSG, в ИК-диапазоне составляет 2 км в приэкваториальной области и около 3 км на широте 45° [6], в то время как радиометрические наблюдения в СВЧ-диапазоне проводятся с разрешением порядка 20 км [2].

Геостационарные системы спутникового мониторинга, обладая достаточно высокими показателями пространственного и временного разрешения, позволяют экспериментально отслеживать динамику пространственной структуры и радиационные характеристики верхней границы облачного слоя. Однако вследствие малой проникающей способности излучения ИК-диапазона в слое облаков восстановление значений мощности облачного образования и интенсивности конвективных осадков по данным спутниковых наблюдений в ИК-диапазоне требует дополнительной проверки достоверности результатов такого восстановления и соответствующей коррекции применяемых эмпирических зависимостей с учетом локации, сезона и/или синоптических условий наблюдения. Рассмотрим обоснование необходимости такой коррекции на примере процедуры восстановления интенсивности конвективных осадков по данным спутниковых наблюдений в ИК-диапазоне.

Эмпирическую зависимость высоты верхней границы облачности (ВГО) $H_{\text{ВГО}}$ от значения яркостной температуры в ИК-диапазоне можно представить в виде [7]

$$H_{\text{ВГО}} = -KT_{\text{ИК}}, \quad (1)$$

где T – яркостная температура верхнего слоя облаков в тепловом ИК-диапазоне, K – эмпирический коэффициент зависимости, меняющийся при использовании данной модельной зависимости в разной местности и в разное время года. Среднее суммарное количество конвективных осадков, которые выпадают за 90 мин из выбранной облачной системы (R_{90}), можно оценить по эмпирической зависимости [7]:

$$R_{90} = 0.00025(5 - T_{\text{ИК}})^{2.61}, \quad (2)$$

а ожидаемое значение максимального количества осадков по эмпирической формуле [7] –

$$Q_{\text{max}} = \gamma \lambda H^2, \quad (3)$$

где λ – коэффициент, зависящий от типа облачной системы [7], $\lambda = 1 \dots 5$; γ – эмпирический коэффициент, зависящий от формы облаков ($\gamma = 0.087$ для конвективных облаков, $\gamma = 0.043$ для слоисто-дождевых облаков), H – максимальная высота верхней границы облачности (в км).

Важным следствием применения соотношений (1)–(3) является возможность предварительного выявления МКК. Однако для точного оценивания последствий развития МКК, как следует из выражения (1), для корректной оценки количества осадков из конвективных облаков необходимо корректировать эмпирический коэффициент K в зависимости от географической зоны и сезона, для которых проводятся оценки. Такая коррекция может быть осуществлена с использованием данных спутниковых СВЧ радиометрических наблюдений. Но при этом важно обеспечить расхождение времен регистрации, не превышающее времени жизни атмосферно объекта, в данном случае МКК.

Расхождение времен регистрации наблюдений состояния атмосферы из космоса определяется, прежде всего, интервалом регистрации кадров геостационарных наблюдений, поскольку они имеют на порядок большую повторяемость, чем повторяемость наблюдений, проводимых с отдельных уединенных полярноорбитальных спутников, оснащенных радиометрической СВЧ-аппаратурой. Так, например, радиометрический СВЧ-комплекс AMSR-2 на спутнике JAXA GCOM-W1 в дневное время обеспечивает наблюдения с повторяемостью примерно 24 ч, а геостационарные наблюдения аппаратурой ИК-диапазона SEVIRI на спутнике MSG-11 имеют повторяемость от 15 мин до 1 ч. Поэтому для данной пары наборов экспериментальной информации максимальное расхождение времен наблюдения не превышает 10 мин. Таким образом, использование экспериментальных данных, полученных в СВЧ-диапазоне, для коррекции результа-

тов геостационарных наблюдений в ИК-диапазоне для предложенной выше пары источников информации правомерно, так как времена жизни МКК превышают 6 ч, а расхождение времен измерений не превышает 10 мин. В частном случае это фактически продемонстрировано на рис. 2 и 3, где показаны изображения одного и того же участка Причерноморья, полученные в СВЧ- и ИК-диапазонах.

5. МЕТОД КОРРЕКЦИИ ЭМПИРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА K ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО СВЧ-ЗОНДИРОВАНИЯ МКК

Для оценки точности коррекции эмпирического коэффициента K целесообразно использовать результаты восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы по СВЧ радиометрическим данным, в частности, в рамках метода, описанного в [8]. При этом необходимо, чтобы результаты восстановления характеристик атмосферы по спутниковым СВЧ данным и данным геостационарного зондирования в ИК-диапазоне относились к одной и той же реализации МКК. Именно в этом случае появляется возможность сопоставлять спутниковые наблюдения одного и того же ансамбля статистических состояний МКК в СВЧ- и ИК-диапазонах с различных космических аппаратов. Но поскольку эти измерения проводятся в общем случае в разные моменты времени, необходимо учитывать уровень невязок оценок K , которые вносит использование параметров атмосферы в момент времени t_0 для коррекции параметров атмосферы в момент времени t .

Модельные соотношения, позволяющие оценить влияние указанной выше разности времен наблюдения, в первом приближении могут быть описаны матрицами взаимной корреляции вариаций значений температуры, влажности, водности и ледности в слоях вертикальных профилей тропосферы $\mathbf{L}(r - r_0, t - t_0)$, восстановленных по данным спутникового радиометрического СВЧ-зондирования. Здесь и далее t_0 и t – времена спутниковых наблюдений в СВЧ- и ИК-диапазонах, r_0 и r – места их локализации, относящиеся к одной и той же реализации МКК. В этом случае $\mathbf{L}(r - r_0, t - t_0)$ дает общее описание статистической связности между восстанавливаемыми в момент времени t в точке с координатой r атмосферными температурно-влажностными профилями, синхронными с данными геостационарного ИК-зондирования, и атмосферными профилями, восстановленными по данным радиометрических СВЧ наблюдений в момент времени t_0 в точке r_0 .

Обобщенная зависимость ковариационной матрицы $\mathbf{L}(r - r_0, t - t_0)$ может быть существенно упрощена в случае малости максимальных интервалов $t - t_0$ относительно продолжительности жиз-

ни МКК Δt . В частности, максимальные разности наблюдений современных геостационарных наблюдений ИК-зондирования и радиометрических СВЧ-данных не превышают 10–15 мин [2]. За это время облачный щит МКК смещается менее чем на 10 км, т.е. менее чем на 50% от размера типового пространственного разрешения современных спутниковых радиометрических СВЧ-систем [2]. В этом случае можно, пренебрегая пространственным смещением положения зоны МКК при проведении спутниковых наблюдений в ИК- и СВЧ-диапазонах, представить ковариационную матрицу $\mathbf{L}(r - r_0, t - t_0)$ в виде произведения среднеклиматической ковариационной матрицы температурно-влажностных профилей атмосферы $\mathbf{C}(r_0)$, описывающей пространственную взаимосвязность вертикальных профилей МКК в окрестности точки с координатами r_0 [8], и сомножителя, описывающего временные изменения этих профилей:

$$\mathbf{L}(r - r_0, t - t_0) \approx \mathbf{L}(r_0, t - t_0) = \mathbf{T}(t - t_0)\mathbf{C}(r_0), \quad (4)$$

где \mathbf{T} – диагональная матрица, описывающая временную связность атмосферных профилей в моменты времени t_0 и t .

Аналогично подходу к описанию пространственной связности профилей, представленному в [8], учет временной связности профилей позволяет использовать в качестве априорной информации модифицированную ковариационную матрицу $\mathbf{L}(r_0, t - t_0)$ вариаций атмосферных температурно-влажностных профилей. Учет такой временной связности необходим при использовании источников априорных данных, имеющих в выделенный момент времени t_0 ковариационные матрицы атмосферных вариаций, существенно отличающиеся от ковариационной матрицы, полученной по данным полного ансамбля среднеклиматических вариаций атмосферных профилей. В нашем случае таким источником априорных данных могут служить восстановленные по данным спутникового СВЧ-зондирования температурно-влажностные профили для ансамбля МКК, наблюдаемого в заданной природно-климатической зоне в определенном сезоне. Таким же источником могут служить и измеренные с помощью радиозондов температурно-влажностные профили атмосферы. Модифицированная матрица $\mathbf{L}(r_0, t - t_0)$ в данном случае с учетом значений апостериорной матрицы восстановления атмосферных профилей по радиометрическим СВЧ-данным для профиля атмосферы в точке r_0 $\mathbf{C}^r(r_0)$ [8] может быть представлена в виде

$$\mathbf{L}(r_0, t - t_0) = \mathbf{T}\mathbf{C}(r_0) + (1 - \mathbf{T})\mathbf{C}^r(r_0). \quad (5)$$

В этом выражении для модифицированной ковариационной матрицы учтено то, что в точке r_0 вариации атмосферных профилей определяются не

среднеклиматическими значениями этих вариаций, а апостериорной точностью восстановления этих профилей по результатам спутникового зондирования в СВЧ-диапазоне.

Диагональные элементы матрицы \mathbf{T} удовлетворяют условиям (6) и (7) при выборе временного профиля в виде

$$t_{ii} = 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\Delta t}\right) \quad t_{ii} = 1 - \exp(-W). \quad (6)$$

При $t - t_0 \ll \Delta t$ матрицу \mathbf{T} можно представить в упрощенном виде

$$t_{ii} = W \approx \frac{t-t_0}{\Delta t}. \quad (7)$$

Это дает возможность оценить значения элементов t_{ii} .

Важным свойством такого представления $\mathbf{L}(r_0, t - t_0)$ являются следующие характеристики матрицы временной связности \mathbf{T} :

$$\lim_{t \rightarrow t_0} \mathbf{T} \rightarrow 0, \quad (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{T} \rightarrow 1. \quad (9)$$

Условие (8) отражает то, что матрица $\mathbf{L}(r_0, t - t_0) \rightarrow \mathbf{C}^r(r_0)$ при $t \rightarrow t_0$, а условие (9) то, что $\mathbf{L}(r_0, t - t_0) \rightarrow \mathbf{C}(r_0)$ при $t \rightarrow \infty$.

Для выбранной реализации МКК значения W не превышают 0.04. Это следует из (6) и (7), поскольку расхождение моментов проведения измерений современных зондирующих устройств в ИК-диапазоне (с геостационарной платформы) и в СВЧ-диапазоне (с полярноорбитальной платформы) не превышает 10 мин, а продолжительность существования МКК составляет не менее 6 ч. Поэтому при обеспечении высокой точности восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы по данным радиометрического СВЧ-зондирования, т.е. при $|A_{ij}^r / c_{ij}| \ll 1$, обеспечена возможность использовать эти данные в качестве заданной с точностью порядка 4% априорной информации, синхронизированной с данными ИК-наблюдений.

Использование значений, при которых минимизируется среднеквадратическая разность оценок интенсивности осадков $\left(R_{\max}^{\text{ИК}} - R_{\max}^{\text{СВЧ}}\right)^2$ на множестве измерений, проведенных в ИК- и СВЧ-диапазонах и отнесенных к одному и тому же МКК, позволяет оценить H (3) при квазисинхронном зондировании атмосферы над одним и тем же участком Земли для однородного в климатическом отношении региона. Таким образом, описанный подход позволяет эмпирически определять региональное сезонное значение K .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выражения (1)–(9) полностью описывают процедуру коррекции оценок количества осадков по данным ИК-наблюдений с геостационарных платформ с использованием синхронных СВЧ наблюдений. Тем самым обеспечивается высокое временное разрешение системы обнаружения и мониторинга мезомасштабных конвективных комплексов. Это позволяет обеспечить своевременное обнаружение и упреждающую оценку последствий развития МКК, приводящих к опасным атмосферным процессам.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов благодарит JAXA и Eumetsat за возможность использования данных AMSR-2, MSG-9 и MSG-11 для подтверждения реализуемости предлагаемого методического подхода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаренко А. В. Опасные природные явления. Ч. III. Опасные явления погоды конвективного происхождения. Воронеж: Изд-во ВГУ. 2008.
2. Саворский В. П., Аквилонова А. Б., Кибардина И. Н. и др. // Сб. трудов XIV Всерос. науч.-технич. конф. «Радиолокация и радиосвязь». М., 2020. С. 187.
3. Glossary of Meteorology “Mesoscale convective system”. Washington: Amer. Meteorol. Soc., 2000. URL: <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/browse?s=m&p=27>.
4. Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Спрыгин А. А., Ажигов И. О. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 223. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-223-236>.
5. Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Лена-над, 2016.
6. Werner F., Deneke H. // Atmos. Meas. Tech. 2020. V.13. P. 1089. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1089-2020>.
7. Иванов В. В., Черепанов А. В., Сухинин А. И. и др. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 1. С. 280.
8. Саворский В. П., Кутуза Б. Г., Аквилонова А. Б. // РЭ. 2020. Т. 65. № 7. С. 658. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070104>

SATELLITE MEANS OF DETECTING AND MONITORING THE MESOSCALE CONVECTIVE COMPLEX

V. P. Savorskiy, A. P. Chernushich, O. Yu. Panova, O. O. Kuznetsov

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Vvedenslogo square, 1, Fryazino, Moscow region, 141190, Russian Federation

**E-mail: savor@inbox.ru*

Received October 28.10.2023, revised April 15, 2024, accepted April 25,2024

The possibility of increasing the accuracy of rainfall intensity retrieval based on space observations of atmospheric mesoscale convective complexes (MCC) is considered. It is shown that guaranteed detection of MCC requires complex observation of the Earth's atmosphere in the IR and microwave ranges. The analysis showed that quasi-synchronous measurements from geostationary platforms in the IR range and observations from polar-orbital platforms in the microwave range are necessary to improve the retrieval accuracy. The method developed based on the analysis of MCC characteristics and capabilities of modern remote sensing satellite systems provides high time resolution of the MCC detection and monitoring system. The accuracy estimates of such quasi-synchronous measurements for currently existing sources of space information are obtained.

Keywords: mesoscale convective complexes, hazardous atmospheric phenomena, emergency situations, integrated monitoring, satellite data