

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.19>

УДК: 528.8, 528.83

ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ СВОЕВРЕМЕННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В.П. Саворский, А.П. Чернушич, О.Ю. Панова

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, г. Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2023 г.

Аннотация. Описаны результаты разработки информационной инфраструктуры, обеспечивающей своевременное обнаружение мезомасштабных конвективных комплексов (МКК), описаны автоматические процедуры, реализующие основной функционал этой инфраструктуры. Наряду с обнаружением МКК описанные процедуры позволяют выявлять зоны глубокой конвекции, т. е. такие МКК, которые развиваются по сценарию «дневных штормов», т. е. интенсивных гроз, шквалов и смерчей. Информационная инфраструктура, обеспечивает интеграцию данных спутникового СВЧ-радиометрического зондирования геостационарных наблюдений в видимом и ИК диапазоне. Эта интеграция призвана обеспечивать восстановление атмосферных температурно–влажностных профилей в условиях чрезвычайных атмосферных ситуаций, вызываемых МКК. Методическая особенность развиваемого подхода заключается в минимизации вероятности остановки системы анализа данных при прекращении доступа к отдельным источникам априорной информации. В основу этой методики положено использование автоматической системы адаптации к изменению условий доступа и применение результатов модельных прогнозов развития атмосферных процессов.

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

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

Автор для переписки: Саворский Виктор Петрович, savor@inbox.ru

Введение

Эффективное использование средств дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) для своевременного объявления о приближении опасной атмосферной ситуации требует обеспечения всепогодности измерений, т. е. максимально возможной независимости от условий проведения наблюдений. Такого рода требования по всепогодности в земных условиях могут быть предоставлены только средствами орбитальных СВЧ–радиометрических наблюдений [1]. В частности, это обуславливает корректность привлечения данных СВЧ–мониторинга для обнаружения и мониторинга мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) [2,3]. Площадь такого рода атмосферных комплексов превышает 10^5 км², а продолжительность их существования составляет более 9 ч [2,4]. Ливневые осадки от МКК являются одной из причин катастрофических наводнений на Черноморском побережье России [5], чем и обусловлена востребованность их своевременного обнаружения и мониторинга.

Повторяемость наблюдений, а, соответственно, и временное разрешение, для каждого из группировки космических аппаратов (КА) для СВЧ–радиометрического зондирования атмосферы составляет не менее 1 суток [6]. Поэтому мониторинг отдельного МКК по данным одного КА не возможен. Решением может быть использование комплекса данных всей существующей орбитальной группировки [6]. Однако для оперативного обнаружения МКК в настоящее время это не представляется возможным в связи со значительными задержками в получении экспериментальной спутниковой информации с зарубежных КА указанной спутниковой группировки.

Своевременность обнаружения МКК обеспечивается высоким временным разрешением (повторяемостью) наблюдений, что в настоящее время может быть обеспечено данными геостационарных наблюдений в видимом и ИК диапазонах. Из этого вытекает необходимость комбинированного использования СВЧ, видимых и ИК диапазонов спутниковых наблюдений.

Успешное функционирование информационной системы, обеспечивающей своевременное обнаружение и мониторинг опасных атмосферных явлений, обеспечивается возможностью получения автоматического доступа к актуальной спутниковой и сопутствующей информации из целого ряда независимых разнородных источников. Поэтому основная цель работы заключается в разработке системы программных инструментов (инфраструктуры), обеспечивающих автоматический сбор разнородных данных из распределенных источников, необходимых для обнаружения, и мониторинга МКК.

1. Функциональная схема программной инфраструктуры, обеспечивающей процедуры обнаружения и мониторинга МКК

В контексте представляемой работы оперативное обнаружение означает своевременное выявление опасных атмосферных явлений и процессов по данным спутниковых наблюдений. Речь идет о выявлении состояний атмосферы, прогноз развития которых указывает на высокую вероятность развития атмосферных процессов, приводящих к стихийным бедствиям (интенсивным грозам, крупному граду, сильным ливням, шквалам, сильным порывам ветра и смерчам). Это относится прежде всего к МКК, которые вызывают ливневые осадки, поскольку именно они приводят к наводнениям, как наиболее масштабным бедствиям, связанным с МКК. В частности, именно ливневые осадки на Кавказском участке Черноморского побережья России вызваны формированием МКК в восточной части Черного моря. Существенной особенностью таких опасных атмосферных явлений, как МКК, является то, что они имеют относительно малое время развития и относительно малые

пространственные размеры по сравнению с синоптическими процессами. Их характерные размеры составляют $300 \div 1000$ км [4], а продолжительность жизни $9 \div 14$ ч. Важной особенностью МКК является наличие области внутренних холодных облаков с температурой $\leq -52^\circ\text{C}$ и площадью $\geq 0,5 \times 10^5$ км² [2]. Таким образом можно заключить, что, по крайней мере, для части опасных атмосферных явлений и процессов при проведении спутниковых наблюдений необходимо обеспечить временное разрешение (повторяемость наблюдений), не превышающую 9 ч. Требуемую повторяемость в настоящее время могут обеспечивать только данные наблюдений в видимом и ИК диапазоне с геостационарных платформ. Их повторяемость составляет 15–30 мин.

Но современные геостационарные платформы не оснащены в полном смысле всепогодными средствами мониторинга атмосферы при наличии плотного облачного слоя, поскольку на них не установлены СВЧ–радиометрические системы, а присутствуют только сенсоры видимого и ИК диапазонов. В этом случае параметры облачного слоя, прежде всего водозапаса облаков, могут быть оценены только по излучательным характеристикам верхней границы облаков в тепловом ИК диапазоне в результате применения косвенных оценок. Эти оценки, как показано ниже в статье (см. раздел 2) существенным образом зависят от климатических, синоптических, сезонных и зональных состояний атмосферы в зоне контроля. Решением этой проблемы является комбинирование данных наблюдений с геостационарных платформ синхронно с данными СВЧ–радиометрического зондирования с полярно–орбитальных платформ с тем, чтобы обеспечить валидацию и корректировку для заданных текущих состояний атмосферы. Это и является основной задачей системы интеграции данных ДЗЗ для раннего обнаружения и мониторинга МКК.

Для минимизации вероятности остановки системы интеграции и анализа данных при прекращении доступа к отдельным источникам информации необходимо также обеспечить доступ к нескольким источникам данных и постоянно контролировать их доступность. Речь идет, по меньшей мере, об организации и контроле доступности актуальных данных ИК наблюдений с

геостационарных платформ и данных СВЧ–радиометрических зондировщиков на полярно–орбитальных платформах, в частности, данных МТВЗА–ГЯ [7] на спутниках серии Метеор–3М и AMSR на спутнике GCOM–W1 [8].

Для решения задач своевременного обнаружения МКК была доработана функциональная схема обнаружения и мониторинга опасных атмосферных явлений [9], в автоматическом режиме обеспечивающая непрерывный контролируемый доступ к удаленным информационным ресурсам, что необходимо для оперативного мониторинга состояния атмосферы. Схема представлена на рис. 1. Основные функциональные особенности инфраструктуры такой информационной системы обеспечивает Планировщик этой системы, который в автоматическом режиме и адаптивно предоставляет доступ к затребованным для анализа и прогноза информационным ресурсам – наборам экспериментальных СВЧ–радиометрических и ИК измерений, вспомогательной и дополнительной информации [9].

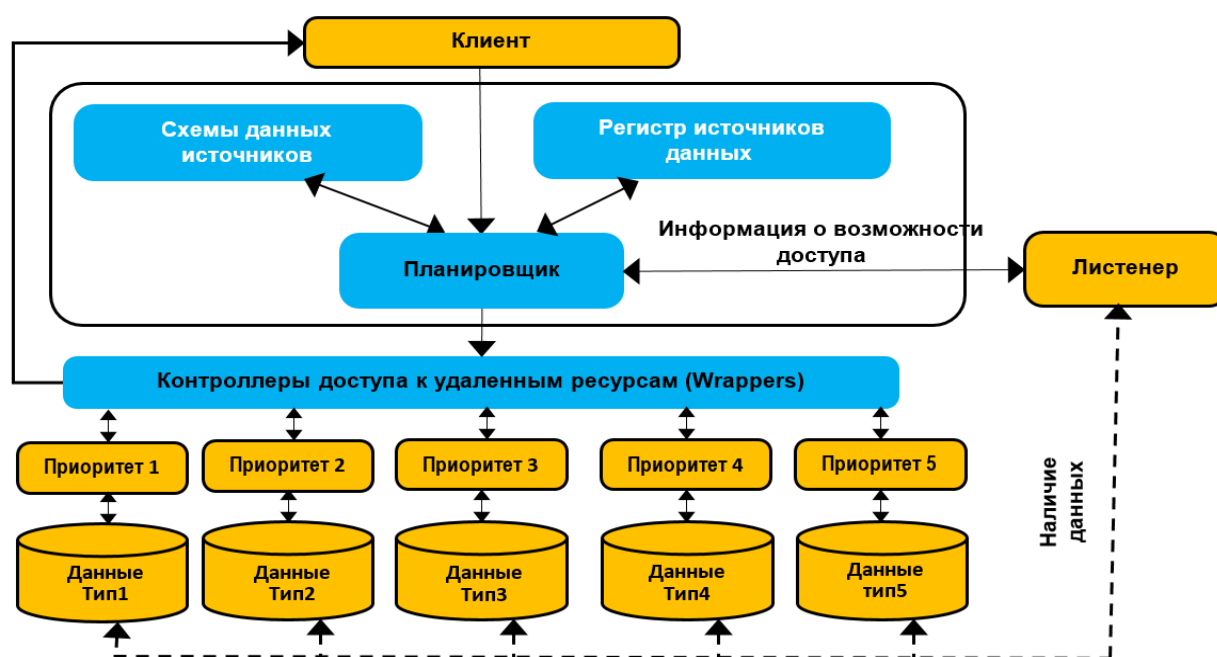


Рис. 1. Структурно-функциональная схема системы обнаружения и мониторинга МКК

Информация о доступности источников и наличии в них востребованной информации хранится в Реестре источников данных, содержание которого динамически обновляется Листенером. Для МКК, как следует из временных

особенной жизненного цикла МКК, достаточно обновлять информацию о контролируемой зоне не чаще чем с периодичностью $0,5 \div 1$ ч. Важно отметить, что функционал системы позволяет организовать и рекуррентные процедуры интеграции данных, когда результаты предшествующих сеансов наблюдений используются в качестве априорной информации для восстановления текущего состояния атмосферы (см. следующий раздел).

Функционирование Планировщика схематически представлено на рис. 2. Прежде всего, Планировщик перебирает все актуальные сценарии работы системы обнаружения, мониторинга и прогнозирования развития МКК.

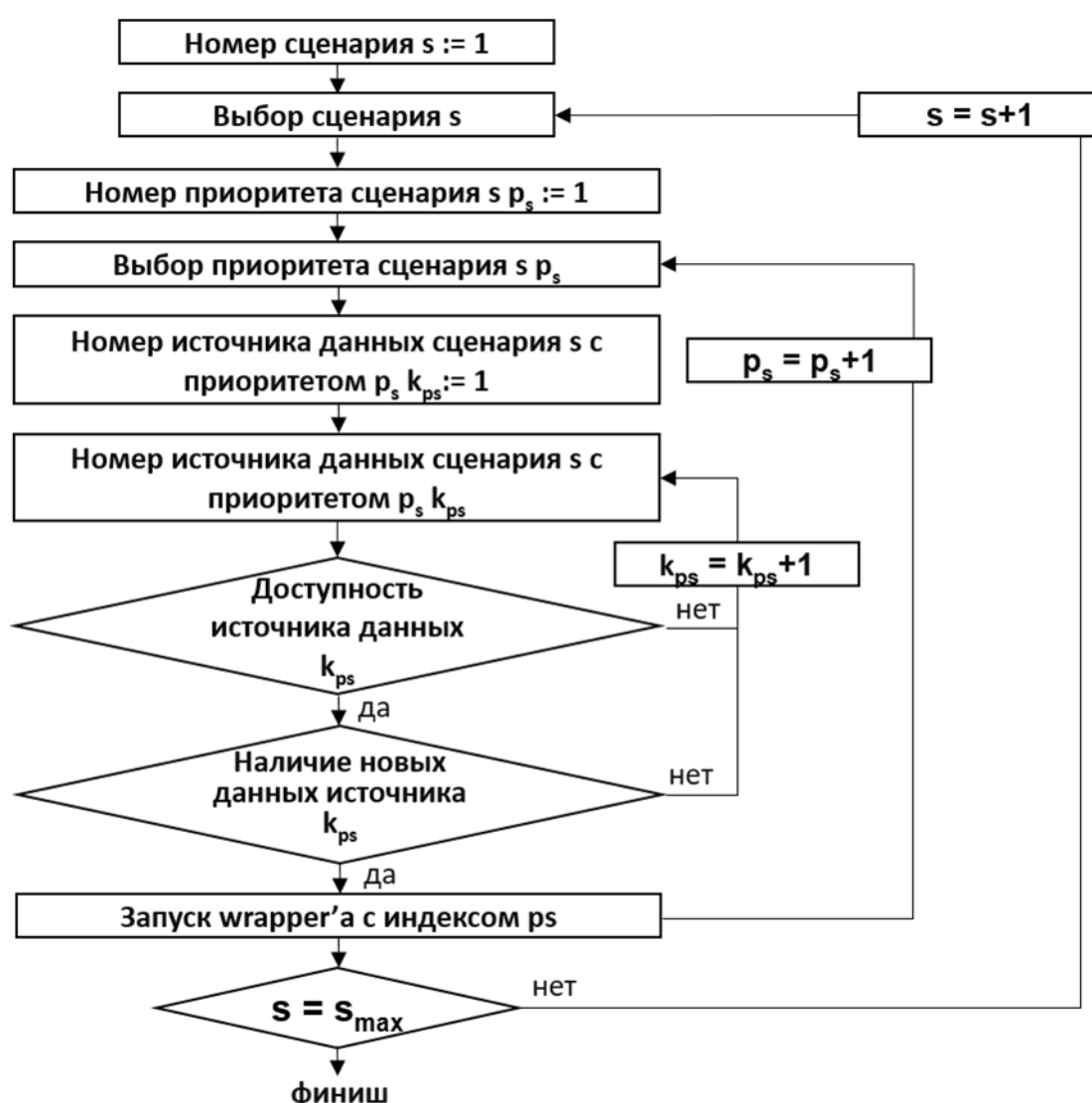


Рис. 2. Функциональная схема Планировщика

Для каждого из этих сценариев установлена индивидуальная система приоритета обращения к источникам данных в зависимости от их типа и

ожидаемого (расчетного) времени их обновления. При наличии доступа к данным и появления в источнике их обновления Планировщик запускает wrapper с индексом ps, т. е. включает средства их автоматической зачатки и конвертации во внутренний формат системы обнаружения и мониторинга МКК.

Базовые сценарии работы Планировщика системы обнаружения и мониторинга МКК представлены на рис. 3. Они предназначены для решения задач обнаружения (Сценарий 1), оценки мощности (Сценарий 2), и прогнозируемых следствий развития МКК (Сценарий 3). Сценарий 1, прежде всего, призван обеспечивать систему актуальными данными с наибольшей повторяемостью наблюдений. Поэтому в этом сценарии наивысший приоритет имеют данные геостационарных наблюдений. В Сценарии 2 такой, наивысший приоритет имеют данные контактных измерений с радиозондов, а в Сценарии 3 – результаты модельных расчетов на ближайшие часы и сутки.

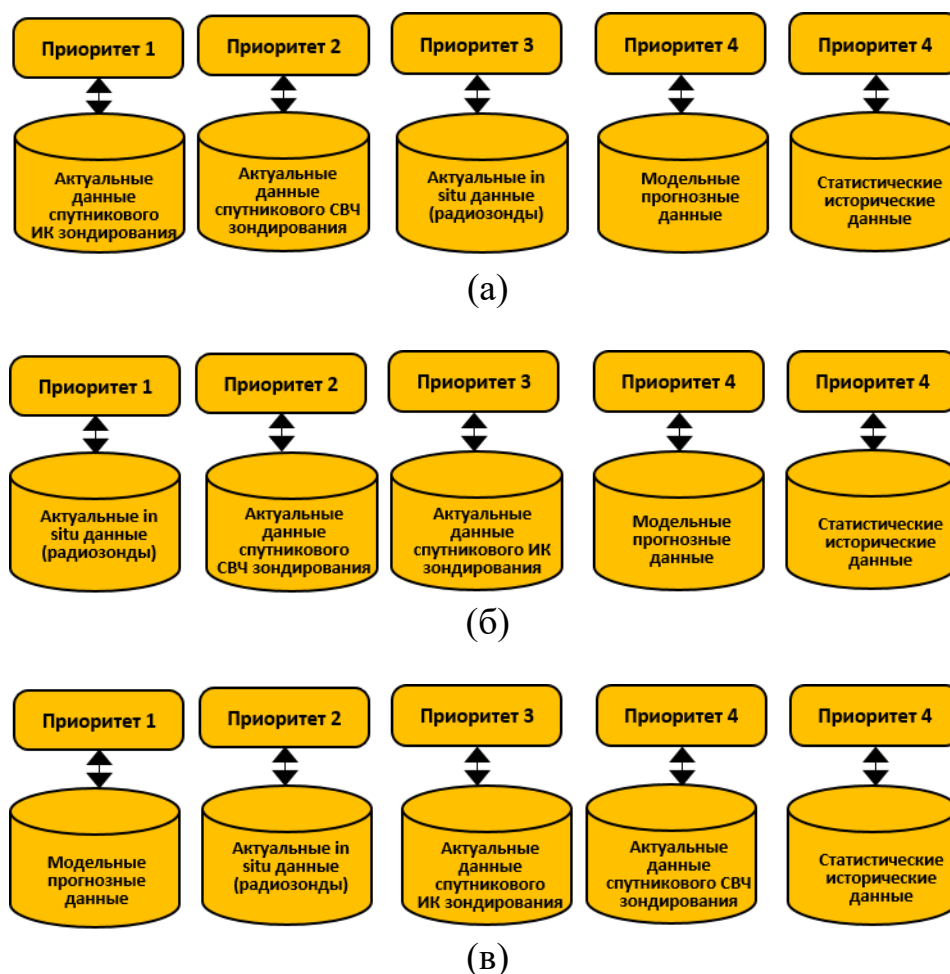


Рис. 3. Базовые сценарии работы Планировщика: а) обнаружение МКК, б) оценка мощности МКК, в) прогнозирование развития МКК

2. Реализация процедур обнаружения зон глубокой конвекции (ЗГК), связанной с МКК

Для своевременного и надежного, без пропусков, обнаружения МКК, как следует из схемы на рис. 3(а), необходимо использовать данные геостационарных наблюдений в ИК и видимом диапазонах. Для достижения этой цели в рамках сценария, обеспечивающего своевременное обнаружение МКК, реализованы процедуры автоматической загрузки данных геостационарных наблюдений (`gstat_dwn`), выделения из массива загруженных данных информации о значениях коэффициентов спектральной яркости видимого и ближнего ИК диапазонов и яркостных температур теплового ИК диапазона (`hrit_extr`), локализации ЗГК (`deep_conv`). Процедура `gstat_dwn` реализована в среде ОС Centos, а `hrit_extr` и `deep_conv` в среде MS Windows 10 на языке Python с использованием модуля SatPy (`reader hrit`). Для автоматического определения ЗГК, связанных с МКК, был использован пороговый критерий. А именно, к ЗГК были отнесены участки земной поверхности, на которых температура не превышала 220 К. Именно таким способом выделен участок глубокой конвекции, представленный в качестве примера на рис. 4. Шкала температур, представленная на снимке, показывает, что облачное образование в виде черного овала обозначает участок с ИК-яркостными температурами ниже 220 К, что указывает на наличие на этом участке переохлажденных ледяных облаков.

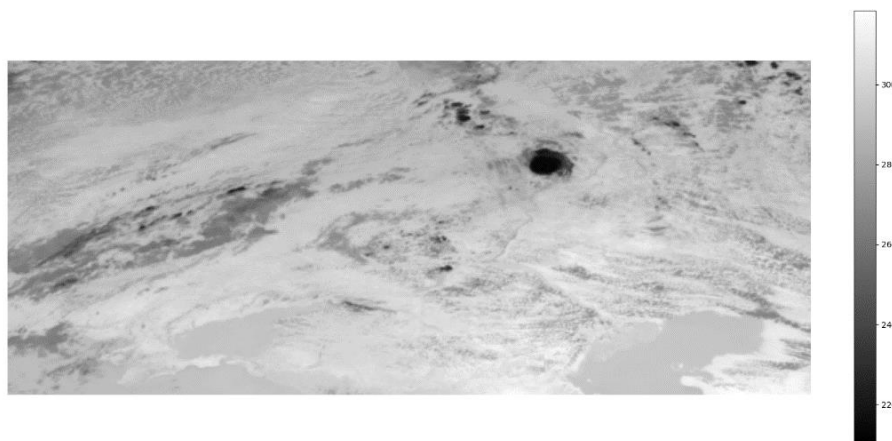


Рис. 4. ИК температуры (К) юга Европейской территории России в канале 10,8 мкм аппаратуры SEVIRI (MSG-11). 03.07.2023 10:00 GMT

Представленное на рис. 4 распределение температур в ИК-тепловом канале 10,8 мкм, полученное с геостационарного КА MSG-11, указывает на наличие глубокой конвекции на указанном участке. Однако, этой информации недостаточно для того, чтобы судить о том, насколько развита эта конвекция, т. е. от того насколько давно она началась.

3. Реализация процедур своевременного обнаружения дневных штормов

Дневные штормы – это быстро развивающиеся молодые конвективные системы, проявляющиеся в виде мезомасштабных грозовых комплексов типа МКК на ранних стадиях развития. Как показали радиолокационные исследования [10-12] глубокой конвекции, индикатором продолжительности развития конвекции являются размеры кристаллов льда в верхнем слое облаков, поскольку на первых стадиях развития глубокого конвективного процесса верхний слой облаков состоит из мелких кристалликов льда, которые по мере развития процесса существенно укрупняются. Появление признаков наличия на вершине облачного слоя переохлажденных мелких кристаллов льда свидетельствует о появлении мощного восходящего потока, предвестника элемента дневного конвективного шторма. Именно поэтому так важно не только обнаружить ЗГК, но и установить степень ее зрелости.

Для определения степени развития конвекции целесообразно использовать подход, основывающийся на повышении излучательной способности собственного теплового излучения ИК диапазона 3,9 мкм при уменьшении кристалликов льда на вершине облачного слоя [13,14]. Эту особенность в работе [15] было предложено использовать для RGB композита «Convection», отражающего особенности мощных конвективных (восходящих) потоков воды в атмосфере. К настоящему времени композит «Convection» [14,16] введен в состав стандартных продуктов обработки данных научной аппаратуры MSG SEVIRI [17]. Кроме того, этот же подход использован для анализа глубокой атмосферной конвекции и при обработке данных, зарегистрированных аппаратурой HIMAVARI ANI [18]. Поскольку аппаратура HIMAVARI ANI

аналогична [19] по спектральным характеристикам и пространственному разрешению аппаратуре GOES ABI [20], этот же подход для визуализации ЗГК может быть применен и к данным этого геостационарного датчика. Спектральные каналы российской научной аппаратуры для геостационарных наблюдений МСУ-ГС [21] заметно отличаются от спектральных каналов SEVIRI, АНІ и АВІ. Это препятствует непосредственному использованию подхода [14,16] для начальных этапов глубокой конвекции по данным МСУ-ГС.

Процедура `rgb_convcompos` обеспечивает генерацию RGB изображений, генерируемых встроенной функцией модуля SatPy `'convection'`. На рис. 5 в качестве иллюстрации представлено такое композитное изображение. ЗГК визуально характеризуется желтым цветом, что соответствует начальным фазам дневного шторма [14,16]. Красным цветом в этом композите отмечены зоны глубокой развитой конвекции с крупными кристаллами льда.

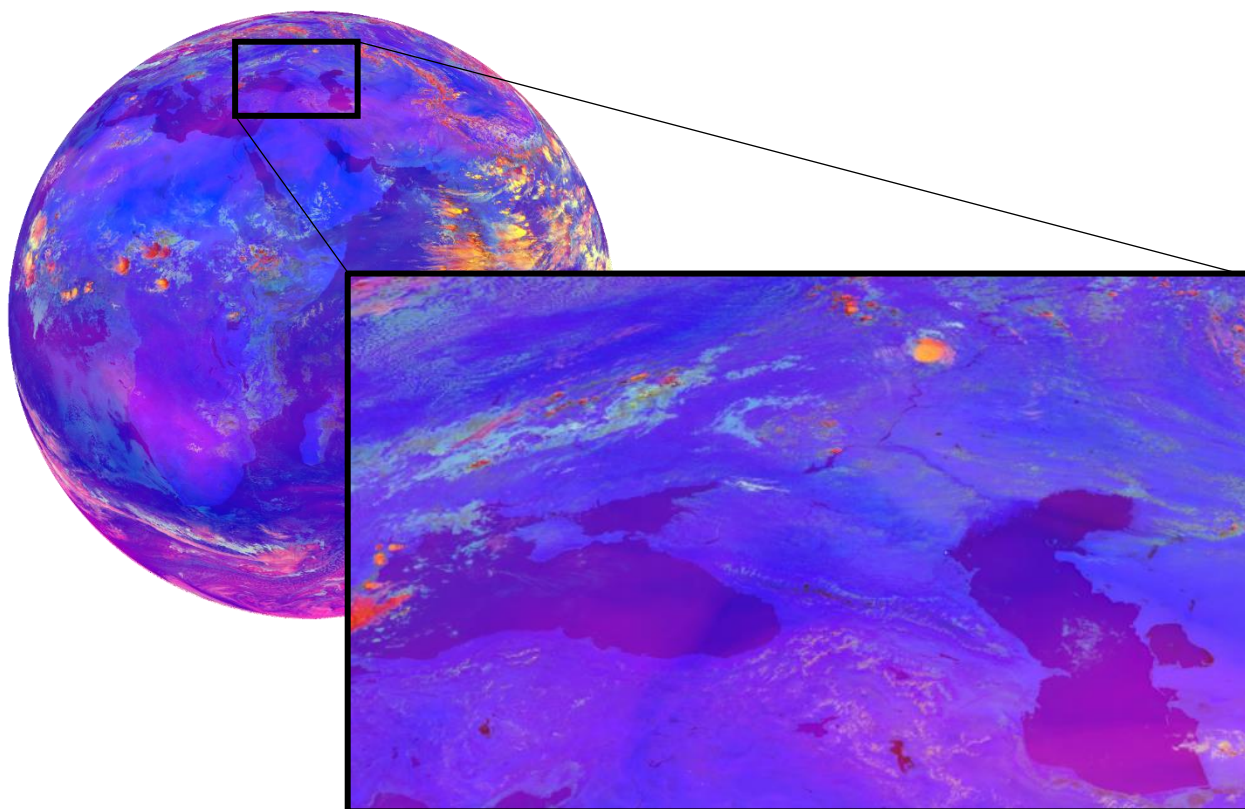


Рис. 5. Композитное изображение «Convection» по данным SEVIRI (MSG-11).
03.07.2023 10:00 GMT

4. Реализация процедур прогнозирования интенсивности и объема вызываемых ЗГК осадков

Наряду с процедурами обнаружения ЗГК, для прогнозирования последствий ее развития необходимо обеспечить прогнозирование интенсивности и объема вызываемых ЗГК осадков. Это требует привлечения комплекса данных как ИК-теплого, так и СВЧ-радиометрического зондирования. Именно их совместное использование позволяет не только обнаруживать ЗГК, но и обоснованно прогнозировать ее развитие, в том числе оценивать предпосылки для развития опасных атмосферных явлений в виде мощных ливневых осадков.

Геостационарные системы наблюдений, обладая достаточно высокими показателями пространственного временного разрешения, позволяют экспериментально наблюдать динамику пространственной структуры и радиационные характеристики верхней границы облачного слоя. Однако, оценки интенсивности конвективных осадков по данным спутниковых ИК наблюдений требуют дополнительной валидации получаемых результатов путем коррекции коэффициентов применяемых эмпирических зависимостей в зависимости от локации, а также сезона и/или синоптических условий развития ЗГК.

Эмпирическая зависимость высоты верхней границы облачности $H_{\text{ВГО}}$ от значения яркостной температуры в ИК диапазоне можно представить в виде [22]:

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

где $T_{\text{ИК}}$ – радиационная температура верхнего слоя облаков в тепловом ИК диапазоне; K – эмпирический коэффициент зависимости, меняющийся при использовании данной модели в зависимости от географического расположения и сезона наблюдений. Для ЗГК, приведенной в виде примера на рис. 4, $K \approx 0,045$. Его среднеклиматические значения в заданном сезоне определяются по данным аэрологического зондирования. Ожидаемое значение максимального количества осадков можно оценить по формуле [22]:

$$Q_{\text{макс}}[\text{мм}] = \gamma \lambda H^2, \quad (2)$$

где λ – коэффициент, зависящий от типа облачной системы [22], $\lambda = 1 \div 5$; 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) и (2) является возможность предварительного выявления МКК, которое может развиться в опасное атмосферное явление с интенсивными осадками.

Для точного оценивания последствий развития МКК, для валидированной оценки количества осадков из конвективных облаков, как следует из выражения (1), необходимо корректировать эмпирический коэффициент K в зависимости от географической зоны и сезона, для которых проводятся оценки. В данной работе для такой коррекции предлагается использовать данные СВЧ-радиометрического зондирования, а именно данные СВЧ-радиометрического комплекса AMSR-2, установленного на японском полярно-орбитальном КА GCOM-W1 (агентство JAXA).

Выбор данных AMSR-2 для выбранного СВЧ-радиометрического канала, определяемого частотой зондирования и поляризацией, обеспечивается процедурой `gcom_extr`. Это позволяет произвести выбор множества значений радиоярких температур в заданном радиометрическом канале и параметров восстановленных по данным СВЧ-наблюдений значений параметров атмосферы и подстилающей поверхности Земли, в частности, значений интенсивности осадков и водозапаса облаков (над водной поверхностью) на выбранную дату и время в заданном диапазоне широт. Тем самым обеспечивается возможность сопоставления данных ИК и СВЧ измерений. На рис. 6(а) показана аномалия радиояркой температуры, наблюдаемая в поле радиоярких температур, зарегистрированных аппаратурой AMSR-2 (JAXA GCOM-W1) в канале 89 ГГц на горизонтальной поляризации. Эта аномалия вызвана присутствием кучево-дождевой облачности и осадков развивающейся в Поволжье 03.07.2023 МКК. Аномалия радиоярких температур имеет существенно меньший (примерно на 20 К) контраст по отношению к окружающей поверхности суши, чем та же аномалия

в поле ИК температур. Это указывает на то, что аномалия обусловлена собственным СВЧ-радиотепловым излучением нижних, т.е. более теплых, слоев тропосферы, по сравнению с представленной на рис. 4 аномалией, наблюдаемой в ИК диапазоне 3,9 мкм. Оценка максимальной величины осадков Q_{max} по формуле (2) дает значение 43,5 мм/ч в 10:00 GMT. По данным, приведенным на рис. 6(б), интенсивность осадков приблизительно в это же время составляет около 15 мм/ч. Большой разброс свидетельствует о необходимости коррекции эмпирический коэффициент K – уменьшении примерно в 3 раза до значения $K \approx 0,015$, что указывает на необходимость уточнения методики оценивания высоты верхней границы облачного слоя.

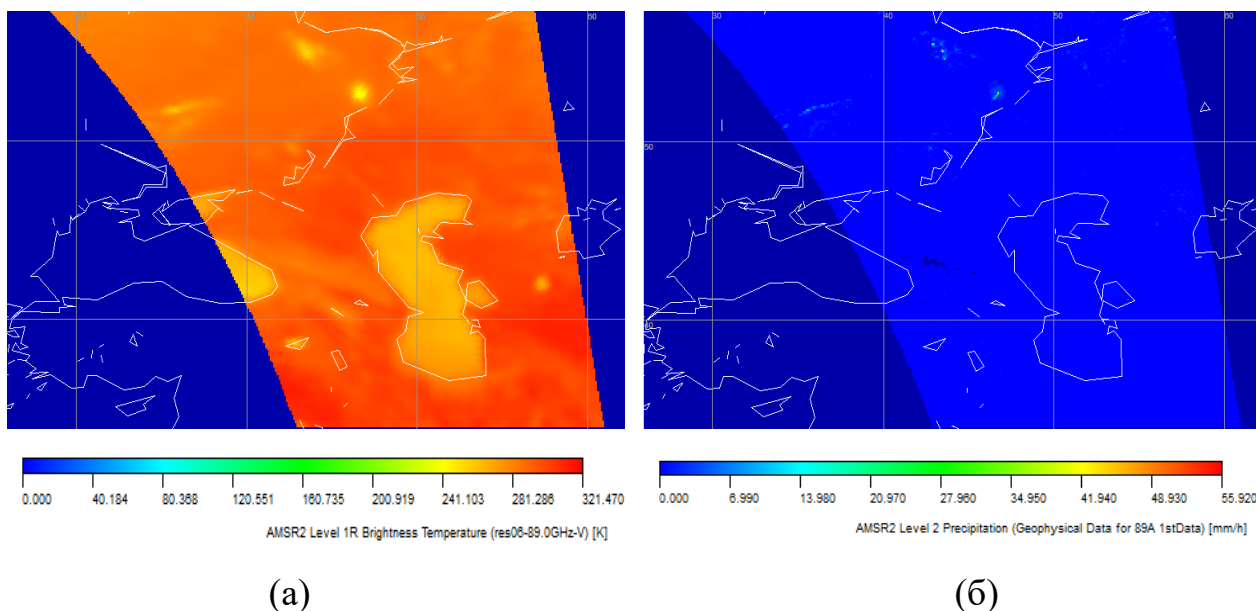


Рис. 6. Радиояркостные температуры в канале 89А-Н СВЧ-радиометрического комплекса AMSR-2 (JAXA GCOM-W1). Виток 32А

Приведенное в примере на рис. 6 возрастание собственного радиотеплового излучения по сравнению с ИК-тепловыми данными 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 СВЧ радиотепловое излучение облачного слоя, по-видимому, не значителен 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 [1], 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 ЗГК.

Заключение

В работе представлена информационная инфраструктура, обеспечивающая своевременное обнаружение МКК, описаны автоматические процедуры, реализующие основной функционал этой инфраструктуры. Разработанный подход гарантированно обеспечивает обнаружение МКК. Наряду с обнаружением МКК описанные процедуры позволяют выявлять зоны глубокой конвекции, такие МКК, которые развиваются по сценарию «дневных штормов» – интенсивных гроз, шквалов и смерчей. В состав информационной инфраструктуры своевременного обнаружения МКК также включена процедура коррекции параметров оценки интенсивности осадков по данным ИК наблюдений. Для такой коррекции предложено и обосновано использование оценок интенсивности осадков по результатам СВЧ-радиометрических измерений.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

Благодарность: Авторы выражают особую благодарность Отделу технологий спутникового мониторинга Института космических исследований Российской академии наук за предоставленные геостационарные данные, Японскому

агентству аэрокосмических исследований JAXA за предоставленные данные СВЧ-радиометрического зондирования.

Литература

1. Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. – 2016.
2. Maddox R. A. Mesoscale convective complexes // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1980. – С. 1374-1387.
3. Назаренко А. В. Опасные природные явления. Часть III. Опасные явления погоды конвективного происхождения // Учебно-методическое пособие для вузов. Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета. – 2008. – С. 62.
4. Шихов А. Н. и др. Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – №. 1. – С. 223-236. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-223-236>
5. Алексеевский Н. И. и др. Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – №. 1. – С. 3-3. <https://doi.org/10.7868/s032105961601003x>
6. Саворский В. П. и др. Орбитальные СВЧ-радиометрические системы влажностного зондирования атмосферы диапазона 183, 31 ГГц // Радиолокация и радиосвязь. – 2020. – С. 198-202.
7. Гайфулин Д. Р. и др. Использование информации спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 2017. – №. 9. – С. 36-47.
8. Митник Л. М., Митник М. Л., Заболотских Е. В. Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №. 3. – С. 135-141.

9. Васильев В. С., Панова О. Ю., Саворский В. П. Информационная инфраструктура, обеспечивающая виртуальную интеграцию данных спутникового СВЧ-радиометрического зондирования // Распространение радиоволн. – 2021. – С. 710-715. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_08_698
10. Rosenfeld D., Ulbrich C. W. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities // Meteorological Monographs. – 2003. – Т. 30. – №. 52. – С. 237-258. [https://doi.org/10.1175/0065-9401\(2003\)030<0237:CMPPAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/0065-9401(2003)030<0237:CMPPAR>2.0.CO;2)
11. Rosenfeld D., Lensky I., Kerkmann J. Applications of Meteosat Second Generation (MSG)–Cloud processes // Darmstadt: EUMETSAT. – 2004. – URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fresources.eumetrain.org%2FIntGuide%2FPowerPoints%2FApplication%2F00_convection_day.ppt&wdOrigin=BROWSELINK (дата обращения: 12.09.2023).
12. Heymsfield A. J. et al. Homogeneous ice nucleation in subtropical and tropical convection and its influence on cirrus anvil microphysics // Journal of the atmospheric sciences. – 2005. – Т. 62. – №. 1. – С. 41-64.
13. Kerkmann J. Understanding Convective Clouds through the Eyes of (MSG). Cloud Particle Size. – 2016. – URL: <https://www.slideserve.com/israel/understanding-convective-clouds-through-the-eyes-of-msg-cloud-particle-size> (дата обращения: 12.09.2023).
14. Zeschke B. The Day Convection RGB product // Australian Bureau of Meteorology - 2015. – URL: http://www.virtuallab.bom.gov.au/files/2814/4100/7318/DayConvectionRGBTOTALoneslide_Compatibility_Mode.pdf (дата обращения: 12.09.2023).
15. Kerkmann J. Applications of Meteosat Second Generation (MSG). RGB Images: Part 4. RGB Composites with Channels 01-11 and Their Interpretation // Eumetsat. Version 0.6. - 2004. – URL:<https://www.slideserve.com/calix/applications-of-meteosat-second-generation-msg> (дата обращения: 12.09.2023).

16. Kerkmann J. RGB 05-06, 04-09, 03-01 ("Day Convective Storms") // Eumetsat. - 2010. – URL: https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-09/pdf_il_10_08_04.pdf (дата обращения: 12.09.2023).
17. Instrument: SEVIRI: сайт/ Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. – World Meteorological Organization, 2011–2023. – URL: <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/seviri> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
18. Instrument: АНІ: сайт / Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. – World Meteorological Organization, 2011-2023. – URL: <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/ahi> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
19. Himawari 8: сайт / Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Himawari_8 (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
20. Instrument: ABI: сайт / Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. – World Meteorological Organization, 2011-2023. – URL: <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/abi> (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
21. Instrument: MSU-GS: сайт / Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. – World Meteorological Organization, 2011-2023. – URL: https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/msu_gs (дата обращения: 12.09.2023). – Текст: электронный.
22. Иванов В. В. и др. Восстановление полей метеорологических элементов по спутниковым изображениям облачности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2006. – Т. 3. – №. 1. – С. 280-286.

Для цитирования:

Саворский В.П., Чернушич А.П., Панова О.Ю. Информационная инфраструктура, обеспечивающая своевременное обнаружение мезомасштабных конвективных комплексов // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.19>