

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.20>

УДК: 528.8, 528.83

## ОПЕРАТИВНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И МОНИТОРИНГ МКК

В.П. Саворский, О.Ю. Панова

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

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2022 г.

**Аннотация.** Описаны результаты разработки информационной системы, обеспечивающей 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 мезомасштабными конвективными комплексами (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 № 075-01133-22-00 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00680 А.

**Автор для переписки:** Саворский Виктор Петрович, [savor@inbox.ru](mailto:savor@inbox.ru)

## Введение

Важным условием эффективности средств ДЗЗ применительно к задачам оперативного обнаружения опасных атмосферных ситуаций является обеспечение всепогодности измерений не зависимо от условий проведения наблюдений. Поэтому для своевременного обнаружения опасных природных явлений необходимо использовать средства и методы наблюдений, не зависящие от условий освещенности, в том числе, в ночных условиях и при наличии плотного облачного слоя. Такие требования к всепогодности среди пассивных средств наблюдения предоставляют только средства спутникового СВЧ-радиометрического зондирования [1]. Однако, при этом необходимо применять средства СВЧ-мониторинга к объектам, пространственно-временные размеры которых соответствуют пространственному и временному разрешению спутниковых СВЧ-радиометрических систем. Это необходимо учитывать, в частности, при проведении спутниковых СВЧ-наблюдений опасных атмосферных процессов, так как эти требования имеют объективную основу.

Их учет позволяет обосновать, в частности, корректность применения СВЧ-мониторинга для обнаружения и мониторинга мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) [2]. Такого рода атмосферные комплексы сопровождаются значительными ливневыми осадками и потому представляют собой достаточно распространенное опасное метеорологическое явление. МКК имеют ячеистую структуру с максимальными размерами ячеек  $10\div 15$  км. Их площадь превышает  $105$  км<sup>2</sup>, а продолжительность их существования – не менее 9 ч [2,4]. Ливневые осадки от МКК являются одной из причин катастрофических наводнений на Черноморском побережье России [5], чем и обусловлена востребованность своевременного обнаружения и мониторинга МКК.

Повторяемость наблюдений, а соответственно, и временное разрешение для существующей в настоящее время орбитальной группировки спутников СВЧ-радиометрического зондирования атмосферы составляет не менее 1 суток [6]. Поэтому использование данных единичных космических платформ для

мониторинга МКК не представляется возможным, поскольку постоянный, без пропусков, мониторинг отдельного МКК при этом не возможен. Решением может быть использование комплекса данных всей существующей орбитальной группировки [6]. Дополнительно временное и пространственное разрешение может быть улучшено при комбинировании данных спутниковых СВЧ-радиометрических комплексов с данными видимого и ИК диапазонов, регистрируемых аппаратурой геостационарных спутников.

Улучшение временного разрешения обеспечивает также и возможность повысить эффективность самих методик решения задач восстановления параметров атмосферы. Такую возможность обеспечивает, в частности, рекуррентное использование результатов восстановления параметров атмосферы, полученных в предыдущих сеансах наблюдений одного и того же МКК, в качестве дополнительной априорной информации при решении обратной задачи восстановления параметров атмосферы методом статистической регуляризации [7, 8]. Такая возможность определяется статистической связностью атмосферных параметров, определяемой характерными временами развития контролируемых объектов, таких, как, например, МКК. Именно поэтому повышение временного разрешения является актуальным также и для решения обратных задач радиофизики.

Из вышесказанного следует, что для успешного и, что не менее важно, бесперебойного функционирования информационной системы, обеспечивающей своевременное обнаружение и мониторинг опасных атмосферных явлений, необходимо иметь возможность получения доступа к актуальной спутниковой и сопутствующей информации из целого ряда независимых разнородных источников. Поэтому основной целью работы является разработка системы программных инструментов, обеспечивающих сбор и интеграцию разнородных, в том числе удаленных данных, необходимых для восстановления атмосферных температурно-влажностных профилей в условиях чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, т.е. в условиях существенных временных ограничений на процедуры обмена и

обработки данных. Методической особенностью развиваемого подхода является также обеспечение минимизации вероятности останковки системы анализа данных при прекращении доступа к отдельным источникам априорной информации.

## **1. Функциональная схема системы обнаружения и мониторинга МКК**

В контексте представляемой работы оперативное обнаружение означает своевременное выявление опасных атмосферных явлений и процессов по данным спутниковых наблюдений. Т.е. 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. 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 не превышает 15 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 путем их постоянного сопоставления с результатами восстановления параметров облаков по данным спутникового СВЧ-радиометрического зондирования. Решением этой проблемы является периодическое использование данных наблюдений с геостационарных платформ синхронно с данными СВЧ-радиометрического зондирования с полярно-орбитальных платформ с тем, чтобы обеспечить валидацию и корректировку процедур оценки параметров облаков по данным ИК-наблюдений. Это и является основной задачей системы интеграции данных ДЗЗ.

Для минимизации вероятности останова 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 [9] на спутниках серии Метеор-3М и AMSR на спутнике GCOM-W1 [10]. Кроме того, для этих целей необходим и доступ к данным о прогнозе развития атмосферных процессов минимум на 3 дня вперед.

Функциональная схема информационной системы, в автоматическом режиме обеспечивающей непрерывный контролируемый доступ к удаленным информационным ресурсам, что необходимо для оперативного мониторинга состояния атмосферы, 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. 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 особенностей 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).



Рис. 1. Функциональная схема системы обнаружения и мониторинга МКК

## 2. Моделирование функционирования системы обнаружения и мониторинга МКК

При использовании предлагаемой системы интеграции данных для восстановления параметров атмосферы появляется возможность использовать существующую взаимную корреляцию  $R(t - t_0)$  между восстанавливаемыми в момент времени  $t$  атмосферными профилями и атмосферными профилями,

восстановленными по данным предыдущих измерений в момент  $t_0$ . Важно отметить, что в общем случае при этом могут быть использованы разные СВЧ зондировщики. Оценки указанных корреляционных зависимостей определяются пространственно-временными масштабами атмосферных процессов. В частности, для МКК их характерные размеры составляют  $300 \div 1000$  км, а продолжительность жизни  $9 \div 14$  ч [4]. Учет временной связности профилей в первом приближении связан с модификацией ковариационной матрицы  $C_{aa}$  вариаций атмосферных профилей путем ее замены на матрицу  $C_{aa}^t$ :

$$C_{aa}^t = TC_{aa}. \quad (1)$$

При использовании источников априорных данных с точностями, существенно превышающими уровень среднеклиматических вариаций параметров атмосферы, выражение для диагональной матрицы  $T$  можно представить в следующем виде [8]:

$$T_{kk} = 1 - e^{-\frac{t-t_0}{\Delta t}}. \quad (2)$$

На рис. 2 приведены результаты анализа эффективности учета временной коррелированности. Здесь  $G_k^t, k = \overline{1, 2 \times K}$  – это массив отношений точностей восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы с использованием временных корреляционных связей в качестве дополнительной информации в процедурах восстановления и без их использования. Расчет сделан для использования в качестве априорной информации значений температурно-влажностных профилей, восстановленным по данным СВЧ-радиометрических наблюдений, проведенным на 8 часов раньше для атмосферного образования типа МКК с 6-часовой продолжительностью жизненного цикла (см. детальное описание в [8]). Но даже на таких временных интервалах точность восстановления атмосферных профилей достигает 15%.

Представленные на рис. 2 результаты подтверждают эффективность средств автоматизированной адаптации информационной системы обнаружения и мониторинга МКК к восстановлению атмосферных профилей даже при чувствительности СВЧ радиометров  $\sigma_T = 1,0$  К.

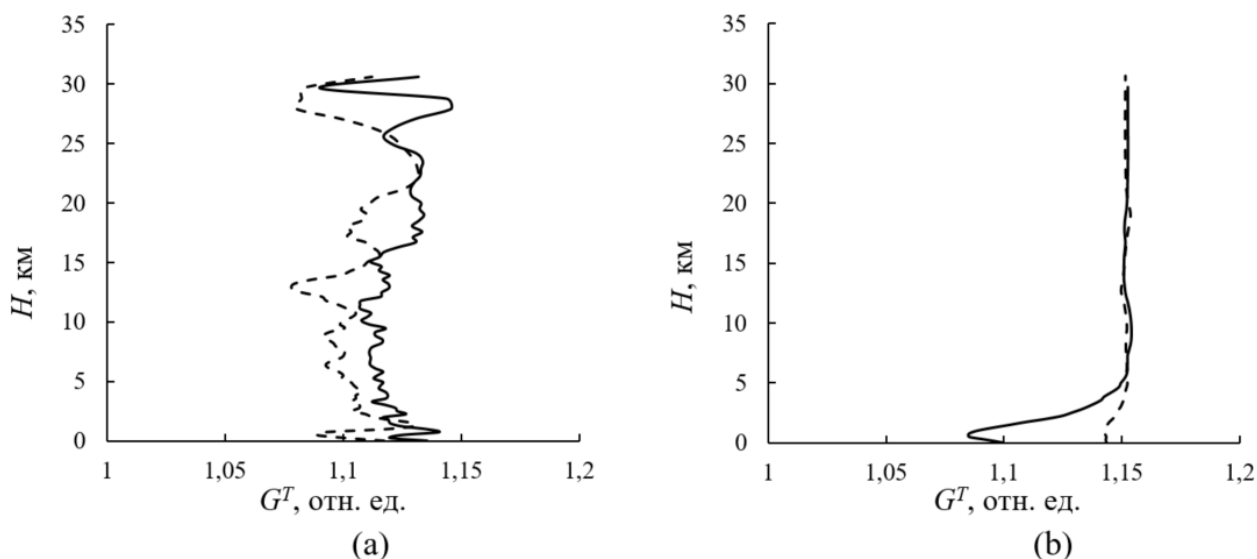


Рис. 2. Профили относительной эффективности учета временной корреляции для оценок температуры (а) и влажности (б) воздуха.

$\sigma_T = 0,1$  К (—),  $\sigma_T = 1,0$  К (- -)

## Заключение

В работе представлена информационная система, обеспечивающая интеграцию информационных ресурсов ДЗЗ в задачах оперативного обнаружения и мониторинга опасных атмосферных явлений и процессов. Наряду с повышением точности восстановления атмосферных профилей предложенный подход обеспечивает и бесперебойность функционирования системы благодаря использованию модельных прогнозов развития атмосферных процессов. Эффективность подхода подтверждена результатами модельных расчетов.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01133-22-00 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00680 А.



## Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. *Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности*. Москва, Ленанд. 2016. 336 с.
2. Maddox R.A. Mesoscale convective complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1980. №61. P.1374-1387.
3. Назаренко А.В. *Опасные природные явления. Часть III. Опасные явления погоды конвективного происхождения*. Воронеж, Издательство ВГУ. 2008. 62 с.
4. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О. 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., Магрицкий Д.В., Колтерманн П.К., Торопов П.А., Школьный Д.И., Белякова П.А. Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края. *Водные ресурсы*. 2016. Т.43. №1. С.3-17. <https://doi.org/10.7868/s032105961601003x>
6. Саворский В.П., Аквилонова А.Б., Кибардина И.Н., Панова О.Ю., Данилычев М.В. Орбитальные СВЧ-радиометрические системы влажностного зондирования атмосферы диапазона 183,31 ГГц. *Сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь»*. Москва. 2020. С.187-192.
7. Саворский В.П., Кутуза Б.Г., Аквилонова А.Б., Кибардина И.Н., Панова О.Ю., Данилычев М.В., Широков С.В. Повышение эффективности восстановления температурно-влажностных профилей облачной атмосферы по данным спутниковых сверхвысокочастотных спектрометров. *Радиотехника и электроника*. 2020. Т.65. №7. С.658-666. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070104>

8. Васильев В.С., Панова О.Ю., Саворский В.П. Информационная инфраструктура, обеспечивающая виртуальную интеграцию спутникового СВЧ-радиометрического зондирования. *Известия Вузов. Радиофизика*. 2021. №8-9. С.698-711. [https://doi.org/10.52452/00213462\\_2021\\_64\\_08\\_698](https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_08_698)
9. Гайфулин Д.Р., Цырульников М.Д., Успенский А.Б., Крамчанинова Е.К., Успенский С.А., Свиренко П.И., Горбунов М.Е. Использование информации спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ в системе усвоения данных Гидрометцентра России. *Метеорология и гидрология*. 2017. №9. С.36-47.
10. Митник Л.М., Митник М.Л., Заболотских Е.В. Спутник Японии GSOM-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.

**Для цитирования:**

Саворский В.П., Панова О.Ю. Оперативное обнаружение и мониторинг МКК. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.20>