

---

---

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ,  
СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК

---

---

## ГРУППИРОВКА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГЛОБАЛЬНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ НА БАЗЕ МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРА-СПЕКТРОМЕТРА

© 2020 г. А. В. Кузьмин<sup>а,\*</sup>, Д. М. Ермаков<sup>а,б</sup>, И. Н. Садовский<sup>а</sup>,  
В. В. Стерлядкин<sup>а</sup>, Е. А. Шарков<sup>а, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., Россия

\*E-mail: alexey.kuzmin@asp.iki.rssi.ru

\*\*E-mail: e.sharkov@mail.ru

Поступила в редакцию 27.08.2020 г.

В работе рассмотрено современное состояние микроволнового радиометрического зондирования Земли. Отмечается, что в мире на сегодняшний день работают и дают информацию около 30 спутниковых микроволновых радиометров, в то время как в России существует только один микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ с углом падения  $65^\circ$ . Предлагается на базе микроволнового радиометра МИРС, разрабатываемого для космического эксперимента “Конвергенция” на РС МКС, создать группировку малых космических аппаратов для глобального метеорологического наблюдения. Оптимальными параметрами для спутниковых данных микроволновой космической системы становятся пространственное разрешение 10–12 км и временное 3–6 ч для анализа текущих атмосферных процессов, улучшения качества прогноза погоды и предсказания чрезвычайных ситуаций. Для решения этой задачи на одной орбите Земли должны находиться от 4 до 8 спутников с радиометрами на борту одновременно.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, спутниковое микроволновое зондирование, микроволновая радиометрия, микроволновой радиометр, малые космические аппараты, группировка спутников, спутниковая метеорология, глобальное метеорологическое наблюдение, спутниковое радиотепловидение

**DOI:** 10.31857/S0205961420060044

### ВВЕДЕНИЕ

Мы все являемся потребителями метеорологической информации. Каждый день заглядываем на сайты метеопрогноза или внимательно слушаем слова диктора о прогнозе на ближайшие дни. Метеоинформация необходима для многих отраслей народного хозяйства, армии и флота. Первое место в мире по точности принадлежит Европейскому центру среднесрочного прогнозирования погоды (Woods, 2006). Интервал времени точного и надежного прогноза погоды улучшается примерно на один день за каждые десять лет, достигнув семидневного качественного прогноза на данный момент (Ebert et al., 2013). Но каждый из нас много раз убеждался, что прогноз погоды на трое суток часто не сбывается, особенно тогда, когда происходит динамичное изменение атмосферных процессов, например, при прохождении фронта окклюзии. Винить метеорологов в этом нельзя: они используют те инструменты, какие есть у них в руках.

Значительное улучшение прогноза погоды произошло с введением в массовую эксплуатацию метеорологических спутников, информация с которых с каждым годом все эффективней усваивается в прогнозах погоды. И по-видимому, потенциал ее использования далеко не исчерпан. Важным звеном в этих измерениях оказываются всепогодные глобальные данные спутниковых микроволновых радиометров, которые поставляют информацию даже в условиях облачности, занимающей от 50% территории над сушей до 70% над океаном.

Одним из направлений улучшения прогноза погоды и природных катастроф становится учет содержания водяного пара в атмосфере. Водяной пар — самый активный атмосферный газ, который играет важную роль в гидрологическом цикле планеты и перераспределении энергии в форме скрытой теплоты конденсации. Современные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают восстановление интегральных характеристик содержания водяного пара и

водозапаса облачности в атмосфере над морской поверхностью. Однако над сушей интегральные характеристики влажности определяются значительно хуже. Предложенные методики определения интегральных параметров атмосферы над сушей требуют экспериментальной проверки и доработки (Deeter, Vivekanandan, 2006; Du et al., 2017). Следующим шагом в повышении качества прогнозов становится определение профиля влажности в атмосфере над морской поверхностью, который, как ожидается, позволит изучить и прогнозировать развитие тропических циклонов (ТЦ).

Важным аспектом улучшения прогноза становится повышение пространственного разрешения и увеличение частоты обновления поступающей информации. Для регистрации ключевых моментов формирования или перестройки синоптических процессов желательным будет пространственное разрешение на уровне 10–12 км и обновление данных каждый час. Однако в современных условиях обеспечить такую периодичность становится затруднительной задачей. Учитывая этот факт, можно сказать, что оптимальным для анализа текущих атмосферных процессов, улучшения качества прогноза погоды и предсказания экстремальных погодных условий (природных катастроф) будет требование пространственного разрешения – 10–12 км – и временного – 3–6 ч. Такие пространственные и временные характеристики должна иметь информация, поступающая от микроволновых радиометрических средств ДЗЗ. Для решения этой задачи на одной орбите Земли друг за другом одновременно должны находиться от 4 до 8 спутников с радиометрами на борту. Создать такую группировку микроволновых спутников ДЗЗ можно только используя относительно недорогие малые космические аппараты (МКА).

### СОВРЕМЕННЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Использование данных микроволновых радиометрических систем дистанционного зондирования в моделях предсказания погоды широко используется во всем мире. Такие системы, обладающие очень важным свойством всепогодности и глобальности, определяют такие параметры системы океан–атмосфера, как интегральное содержание атмосферного водяного пара и содержание капельной влаги в атмосфере, интенсивность осадков и температуру поверхности океана, профили влажности и температуры тропосферы, скорость и направление ветра над морской поверхностью (Кутуза и др., 2016; Трохимовский, 1997; Deeter, 2007; Meissner, Wentz, 2012; Saunders et al., 1998; Weng, Grody, 2000). В настоящее время на околоземной орбите работают три десятка микроволновых радиометрических комплексов (14 – США, 6 – европейские, 6 – Китай, 1 – Япо-

ния), которые обеспечивают мониторинг метеорологической обстановки, прогноз погоды, предсказание опасных явлений. В России единственный радиометр МТВЗА-ГЯ прекратил поставлять информацию с августа 2017 г., а 5 июля 2019 г. был запущен очередной спутник “Метеор-М” № 2-2, на борту которого установлен новый МТВЗА-ГЯ. Однако после того, как 18 декабря 2019 г. была зафиксирована нештатная ситуация на космическом аппарате “Метеор-М” № 2-2, связанная с внешним воздействием на его конструкцию (предположительно микрометеорита) (<https://www.roscosmos.ru/27891/>), в работе МТВЗА-ГЯ возникли неполадки, которые через некоторое время удалось устранить, и он приступил к штатной работе. Вместе с тем очевидно, что одного космического радиометра для обеспечения информационной безопасности России явно недостаточно.

В табл. 1 приведены современные микроволновые радиометры космического базирования с характерным набором каналов. Самым надежным и долгоживущим прибором стал SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder), представляющий собой следующее поколение знаменитого радиометра SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager). Впервые он был запущен в 2003 г. и в настоящее время работает на спутниках DMSP F16, F17, F18, F19 (Defense Meteorological Satellite Program). К преимуществам данного прибора можно отнести надежность, очень хорошую чувствительность, большой набор радиометрических каналов, хороший пространственный и временной охват измерений. Наличие трех каналов в полосе 183 ГГц и канала 150 ГГц позволяет восстанавливать влажность лишь в трех-четырех атмосферных слоях, что не обеспечивает желаемого вертикального разрешения 1–1.5 км. В приборе реализовано коническое сканирование (Bornmarino, 1993). Аналогичным европейским прибором является MHS, который в табл. 1 не приведен. Впервые запущенный в 2005 г., в настоящее время он установлен на спутниках NOAA-18 (National Oceanic and Atmospheric Administration), NOAA-19, MetOp-A, MetOp-B. Данный прибор имеет схожие преимущества и недостатки, что и SSMIS, за исключением геометрии сканирования, которая осуществляется поперек трассы полета спутника (Gangwar et al., 2014).

В 2011 г. были запущены два идеологически новых зондирующих микроволновых прибора ATMS (Advanced Technology Microwave Sounders) на спутнике Suomi NPP (NPOESS Preparatory Project) и MADRAS/SAPHIR на индийско-французском спутнике Megha-Tropiques.

Американский прибор ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) имеет большой набор каналов для зондирования не только влажности, но и других параметров системы океан–атмосфе-

Таблица 1. Характеристики современных радиометров

| Радиометр                                       | WindSat                                                                                                   | SSMIS                                                                                               | ATMS                                                                        | AMSR-2                                                                                                                                                     | MTB3A-ГЯ                                                                                                                                  | MADRAS / SAPHIR                                                            | МИРС                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Частота, ГГц                                    | 6.8 (В, Г);<br>10.7 (В, Г, ±45°, л/п);<br>18.7 (В, Г, ±45°, л/п);<br>23.8 (В, Г);<br>37 (В, Г, ±45°, л/п) | 19.35 (В, Г); 22.235 (В); 50.3–55.5 (Г);<br>57.3–60.8 (П);<br>91.665 (В, Г);<br>150 (Г); 183.31 (Г) | 23.8 (В); 31.4 (В);<br>50.3–57.3 (Г);<br>88.2 (В); 165.5 (Г);<br>183.31 (Г) | 6.92/7.3 (В, Г); 10.6 (В, Г); 18.7 (В, Г);<br>23.8 (В, Г); 31 (В, Г);<br>37 (В, Г); 42 (В, Г);<br>48; 52.8–55.6 (В);<br>57.2 (Г); 91 (В, Г);<br>183.31 (В) | 10.6 (В, Г); 18.7 (В, Г);<br>23.8 (В, Г); 31 (В, Г);<br>37 (В, Г); 42 (В, Г);<br>48; 52.8–55.6 (В);<br>57.2 (Г); 91 (В, Г);<br>183.31 (В) | 18.7 (В, Г); 23.8 (В);<br>36.5 (В, Г); 89 (В, Г);<br>157 (В, Г)/183.31 (Г) | 10.65 (В, Г, ±45°);<br>18.7 (В, Г, ±45°);<br>23.8 (В, Г);<br>24–26.5 (В); 36.5 (В, Г, ±45°); 52.8–57.3 (Г); 88 (В, Г);<br>165 (Г); 183.31 (Г) |
| Количество каналов                              | 22                                                                                                        | 24                                                                                                  | 22                                                                          | 16                                                                                                                                                         | 29                                                                                                                                        | 9/6                                                                        | 33                                                                                                                                            |
| Диаметр зеркала антенны, м                      | 1.83                                                                                                      | 0.6                                                                                                 |                                                                             | 2.0                                                                                                                                                        | 0.6                                                                                                                                       | н/д/0.18                                                                   | 0.7                                                                                                                                           |
| Количество облучателей                          | 11                                                                                                        | 6                                                                                                   | 4                                                                           | 8                                                                                                                                                          | 4                                                                                                                                         | н/д/1                                                                      | 9                                                                                                                                             |
| Размер кадра самого высокочастотного канала, км | 8 × 13                                                                                                    | 13 × 16                                                                                             | 14 × 14*                                                                    | 3 × 5                                                                                                                                                      | 9 × 21                                                                                                                                    | 10 × 10                                                                    | 6 × 9                                                                                                                                         |
| Полоса обзора, км                               | 950 пер./350 зад.                                                                                         |                                                                                                     |                                                                             | 1450                                                                                                                                                       | 1500                                                                                                                                      | 1700/1661                                                                  | 830 пер., 830 зад.                                                                                                                            |
| Тип сканирования                                | Коническое                                                                                                | Коническое                                                                                          | Поперечное                                                                  | Коническое                                                                                                                                                 | Коническое                                                                                                                                | Коническое/поперечное                                                      | Коническое                                                                                                                                    |
| Период сканирования, с                          | 1.899                                                                                                     | 1.899                                                                                               | 2.66                                                                        | 1.5                                                                                                                                                        | 2.5                                                                                                                                       | 2.4/1.639                                                                  | 1,3                                                                                                                                           |
| Высота орбиты, км                               | 830                                                                                                       | 833                                                                                                 | 824                                                                         | 699                                                                                                                                                        | 830                                                                                                                                       | 866                                                                        | 410                                                                                                                                           |
| Вес, кг                                         | 330                                                                                                       | н/д                                                                                                 | н/д                                                                         | 250                                                                                                                                                        | 90                                                                                                                                        | н/д                                                                        | 50                                                                                                                                            |
| Энергопотребление, Вт                           | 350                                                                                                       | н/д                                                                                                 | н/д                                                                         | 3800                                                                                                                                                       | 80                                                                                                                                        | н/д                                                                        | 100                                                                                                                                           |
| Чувствительность в элемементе разрешения, К     | 0.37–0.55                                                                                                 | 0.2–1.9                                                                                             | 0.5–0.9                                                                     | 0.3–1.1                                                                                                                                                    | 0.25–0.5                                                                                                                                  | 0.4–1.5/0.5–1.4                                                            | 0.3–1.2                                                                                                                                       |
| Угол падения, град                              | 50–55                                                                                                     | 53.1                                                                                                | 0 ± 52.7                                                                    | 55                                                                                                                                                         | 65                                                                                                                                        | 53.5/0 ± 4.2                                                               | 53–56                                                                                                                                         |
| Спутник, год запуска                            | Coriolis с 2003 г.                                                                                        | F-16, F17, F-18, F-19 DMSP с 2003 г.                                                                | Suomi NPP с 2011 г.                                                         | GCOM-W1 с 2012 г.                                                                                                                                          | “Метеор-М” № 1 с 2009 г.                                                                                                                  | Megha-Tropiques с 2011 г.                                                  | МКС планируется                                                                                                                               |

Примечание: В, Г – вертикальная и горизонтальная поляризация; В, Г, ±45° – вертикальная, горизонтальная и повернутая на ±45° поляризация; л/п – поляризация с левым и правым вращением; н/д – нет данных.

ра. Существенным отличием ATMS, который на сегодняшний момент считается лучшим радиометром, стал тип сканирования. Прибор ATMS осуществляет сканирование поперек трека, которое представляется предпочтительным для определения вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы. Для зондирования профиля влажности ATMS имеет пять каналов в полосе 183 ГГц и канал на частоте 165.5 ГГц с хорошей чувствительностью. Такой набор позволяет восстанавливать влажность в 5–6 атмосферных слоях. (Weng et al., 2012) Однако поперечный тип сканирования плохо подходит для каких-либо измерений на частотных каналах со слабым атмосферным поглощением в связи с сильным влиянием подстилающей поверхности, которое зависит от угла визирования. Поэтому прибор ATMS и другие радиометры с поперечным типом сканирования слабо пригодны для определения таких параметров подстилающей поверхности, как скорость приповерхностного ветра и ТПО. Большинство радиометров, представленных в табл. 1, имеют конический тип сканирования и наряду с параметрами атмосферы могут восстанавливать параметры подстилающей поверхности.

На спутнике Megha-Tropiques используются два микроволновых радиометра: MADRAS с коническим сканированием на частотах от 18.7 до 157 ГГц и SAPHIR с поперечным типом сканирования, имеющий набор из шести каналов в полосе 183 ГГц, что позволяет восстанавливать влажность в шести атмосферных слоях. К недостаткам прибора можно отнести существенно худшую чувствительность по сравнению с ATMS и невысокую точность измерений влажности в нижних слоях атмосферы (0–2 км). Особенностью космической миссии Megha-Tropiques оказывается наклонение орбиты 20°, которое позволяет исследовать только тропическую зону земной атмосферы (Gohil et al., 2006).

Российский прибор МТВЗА-ГЯ был запущен в 2014 г. на спутнике “Метеор-М” № 2. Предыдущие попытки запуски прибора с 2009 г. оканчивались неудачами. Для зондирования профиля влажности атмосферы данный прибор имеет всего три канала в полосе 183 ГГц с хорошей чувствительностью. К особенностям прибора можно отнести коническое сканирование с большим углом падения — 65°. Такую геометрию сканирования можно считать недостатком для зондирования профиля влажности и параметров морской поверхности. Также у прибора есть незначительные проблемы с антенной системой (Болдырев и др., 2008).

В большинстве радиометров, предназначенных для исследования подстилающей поверхности и атмосферы, используются только две ортогональные линейные поляризации: вертикальная

и горизонтальная. Это связано с тем, что при зондировании на этих поляризациях радиояркостная температура водной поверхности достигает своих экстремальных значений вследствие различия коэффициентов Френеля для электромагнитных волн указанных поляризаций. Лишь относительно недавно было осознано, что измерения в полном поляризационном базисе способны повысить информативность данных дистанционного зондирования. С помощью поляризационных измерений удастся определять скорость и направление приповерхностного ветра над океаном, выделять поляризованное излучение морской поверхности на фоне слабо поляризованного излучения облаков и осадков. Этот принцип был использован в американском радиометре WindSat, запущенном в 2003 г. (Gaiser et al., 2004).

Японский радиометр AMSR-2 был запущен на спутнике GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission — Water 1) в мае 2012 г. AMSR-2 является радиометром конического типа сканирования с самой большой зеркальной антенной диаметром 2 м, что позволяет получать данные с очень высоким пространственным разрешением, которое раньше было недоступно для микроволновых радиометров (Митник и др., 2013; Masayoshi, Tatsuya, 2013).

В табл. 1 приведены также данные микроволнового радиометра-спектрометра МИРС, разрабатываемого для космического эксперимента (КЭ) “Конвергенция” на РС МКС (Шарков и др., 2018). Этот радиометр, по нашему мнению, выбрал в себя лучшие качества современных приборов. Прибор МИРС имеет традиционно используемые при коническом сканировании углы встречи с Землей 53°–56°, что позволяет одинаково хорошо восстанавливать как параметры атмосферы, так и параметры подстилающей поверхности. Кроме того, близость параметров зондирования МИРС на некоторых каналах с рассмотренными аналогами (SSMIS и ATMS) позволит проводить взаимную калибровку радиометров МИРС. МТВЗА-ГЯ имеет большой угол встречи с Землей 65°, что приводит к увеличению зависимости излучения подстилающей поверхности от скорости ветра и негативно сказывается на точности восстановления параметров атмосферы. Из-за отсутствия теоретической базы и моделей, описывающих излучение подстилающей поверхности на таких углах, возникают трудности при обработке данных.

Существенным преимуществом радиометра МИРС по сравнению с аналогами является наличие большего количества каналов для восстановления профилей влажности атмосферы. Приборы SSMIS и МТВЗА-ГЯ имеют всего три канала в полосе частот с центром 183.31 ГГц, что не позволяет им получить хорошего вертикального разрешения при восстановлении профилей влажности ат-

мосферы. Прибор ATMS имеет шесть каналов в полосе 183 ГГц и считается одним из передовых микроволновых зондировщиков атмосферы. Данный набор каналов позволяет восстанавливать профиль влажности в 5–6 атмосферных слоях. Однако существуют исследования, показывающие, что измерения в полосе 183 ГГц плохо подходят для восстановления профиля влажности в нижних слоях тропосферы (0–4 км) (Стерлядкин и др. 2017), а именно в этих слоях сосредоточено до 80% водяного пара атмосферы. Прибор МИРС имеет семь радиометрических каналов в полосе 183 ГГц и три дифференциальных канала в полосе 22 ГГц. Дифференциальный метод измерений в полосе 22 ГГц применяется впервые и предполагает улучшение качества восстановления профиля влажности в нижних слоях тропосферы, где сосредоточена основная масса водяного пара. Таким образом, прибор МИРС позволит восстанавливать профиль влажности атмосферы в 8–10 слоях. По сравнению с аналогами это существенно повысит разрешение и точность восстановления профиля водяного пара.

Еще одним преимуществом МИРС, по сравнению с аналогами, становится возможность восстановления направления приповерхностного ветра. Чтобы проводить подобные измерения, прибор должен обладать несколькими радиометрическими каналами и набором поляризаций (В, Г,  $\pm 45^\circ$ ). Кроме того, необходима геометрия сканирования, позволяющая наблюдать одну и ту же область подстилающей поверхности под разными азимутальными углами. МИРС имеет три таких канала: 10.65 (В, Г,  $\pm 45^\circ$ ); 18.7 (В, Г,  $\pm 45^\circ$ ); 36.5 ГГц (В, Г,  $\pm 45^\circ$ ). Сканирование МИРС проводится как в переднем, так и в заднем секторе обзора, что обеспечивает наблюдение подстилающей поверхности под различными азимутальными углами. Такая геометрия обзора дает возможность использовать анизотропию взволнованной морской поверхности для восстановления направления ветра. Отметим, что из всех существующих космических пассивных микроволновых радиометров только один — WindSat — способен проводить подобные измерения и может восстанавливать направление приповерхностного ветра.

Таким образом, сравнительный анализ технических характеристик показал, что прибор МИРС имеет уникальные характеристики, необходимые для решения задач КЭ “Конвергенция” и задач глобального метеорологического наблюдения, предсказания погоды и чрезвычайных ситуаций. МИРС обладает малым весом (50 кг) и малым потреблением энергии (100 Вт), что позволяет установить его на малый космический аппарат с полезной нагрузкой до 300–500 кг.

## ЗАДАЧИ ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА

Системы глобального мониторинга создаются для широкого круга задач. Одна из них — это регулярное наблюдение за планетарными процессами и явлениями в биосфере с целью оценки и прогноза их изменений под влиянием антропогенных и естественных факторов. Наблюдение за метеорологической обстановкой входит в общую систему глобального наблюдения и становится ее важнейшей частью.

Определение метеорологических параметров, предсказание погоды, а в более длительном масштабе — исследование климата Земли, анализ и прогноз климатических изменений, несомненно, представляют собой не только фундаментальную научную проблему для мирового научного сообщества, но и имеют очень важные социальные, гуманитарные и экономические аспекты. Длительное время экспериментальные метеорологические измерения и исследования климата Земли проводились в основном при помощи зондирования контактными способами с поверхности Земли, а также дистанционными спутниковыми методами в инфракрасном (ИК) и оптическом диапазонах. Если первые обеспечивали только точечные измерения, то вторые при использовании восстановительных методов давали информацию о верхней тропосфере, стратосфере и, частично, о мезосфере и, в первую очередь, о содержании парниковых газов. Именно эта информация и ложилась в основу достаточно противоречивых концепций по вариациям глобального климата на планете. А наиболее насыщенная и деятельная часть атмосферы — нижняя и средняя тропосфера — в глобальном аспекте практически не затрагивалась. Но именно в этой части тропосферы происходили (и будут происходить) сложнейшие термогидродинамические процессы, которые приводили, в конце концов, к образованию мощных и опасных атмосферных катастроф — типа тропических циклонов и атлантических среднеширотных катастрофических циклонов, получивших название ураганов (например, ураган Ксавье над территорией Северной Европы, октябрь 2017 г.). В последние десятилетия по мере создания чувствительных радиотепловых комплексов, способных функционировать на КА в течение 20–30 лет (например, миссия DMSP), а также разработки сотрудниками Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) и Института радиотехники и электроники РАН (ИРЭ РАН) методологии спутникового радиотепловидения ситуация в корне изменилась. Появилась возможность по спутниковым данным радиотеплового зондирования Земли восстанавливать поля интегральных по высоте геофизических характеристик нижней и средней тропосферы не только на моменты наблюдений, но и на промежуточные моменты вре-

мени. А также рассчитывать динамику этих полей в терминах скоростей адвекции, что позволяет использовать поля скалярных геофизических величин и соответствующие векторные поля адвекции для расчета интегральных физических характеристик процессов, в частности горизонтальных потоков скрытого тепла через заданные границы произвольного профиля.

Единственным парниковым газом в атмосфере Земли, который имеет громадный термодинамический потенциал, оказывается водяной пар, при этом принципиальную роль играют не только его пространственно-временное распределение в атмосфере Земли, но и особенности его высотного распределения. Сотрудниками ИКИ РАН показано, что основной энергетический вклад в генезис ТЦ вносят экваториальные (материнские) поля водяного пара, и при этом сам ТЦ становится переносчиком связанных с ним полей водяного пара (модель “верблюда”) в средние и высокие широты (вплоть до 80° с.ш.). Таким образом, этот процесс представляется достаточно сильным и быстрым механизмом выноса скрытой энергии и влаги из экваториального пояса в средние широты, что влияет на выравнивание воздействия парникового эффекта на термический режим атмосферы планеты, а также в определенной мере формирует региональный климат и погоду арктического региона в Северном полушарии и приантарктической зоны в Южном полушарии (Ермаков и др., 2007, 2012а, б; Шарков, 2010; Шарков и др., 2008, 2011а–г; Sharkov, 1998; 2000; 2012).

Необходимость уменьшения времени экспозиции радиометрических данных связана с высокой динамичностью процессов, происходящих в атмосфере в области ТЦ и подобных структур. Так, исследование ТЦ (в частности ТЦ Alberto, Francisco и Katrina) показало, что за время жизни ТЦ может происходить несколько интенсификаций из полей водяного пара и кардинальных смен траектории движения (Ермаков и др., 2012а, б, 2013а, 2014). Для получения максимально достоверных данных о движении масс водяного пара недостаточно получать микроволновые снимки с различных сканеров. Необходимо иметь идентичные многочастотные радиометры на одной орбите, следующие друг за другом с интервалом в несколько часов.

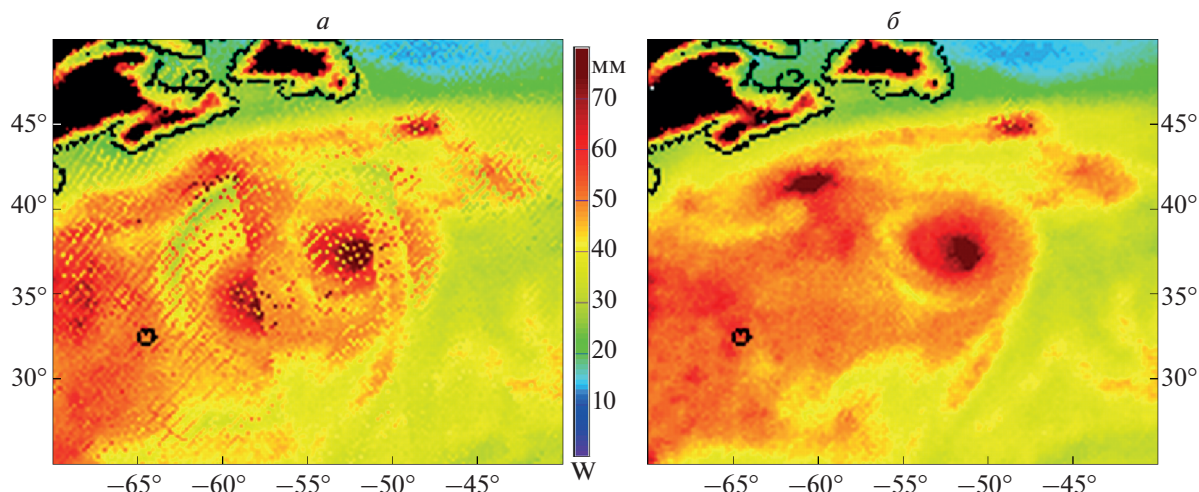
Сравнительно низкая периодичность (12 ч) и узкая полоса обзора (порядка 2000 км) спутниковых приборов на солнечно-синхронных орбитах приводят к тому, что объекты исследования зачастую наблюдаются лишь фрагментарно, а некоторые важные фазы их эволюции не фиксируются с некоторых спутников. В результате на практике часто прибегают к механическому объединению всей доступной спутниковой информации, полученной в течение некоторого, как правило, суточ-

ного интервала наблюдений, для их совместного анализа. В отношении быстроразвивающихся атмосферных процессов, таких как ТЦ, этот подход чреват существенными артефактами и ошибками обработки.

В фазе быстрой интенсификации ТЦ увеличивает интенсивность (максимальную устойчивую скорость горизонтального ветра) на 15 м/с и более за одни сутки и способен эволюционировать от начальных фаз развития до урагана или тайфуна максимальной категории. В процессе этой эволюции он может смещаться на расстояния порядка собственного размера и более, меняя (не только за счет дрейфа, но, что особенно важно, в итоге собственного активного воздействия) характеристики внешней среды, описываемые крупномасштабными полями геофизических параметров атмосферы (в первую очередь — интегрального влагосодержания).

Сказанное иллюстрирует рис. 1 на примере ТЦ Alberto (2000). Слева показано поле интегрального влагосодержания ( $W$ , мм) за 12.08.2000 г., полученное механическим объединением всех данных наблюдений приборами SSM/I со спутников F13, F14, F15 серии DMSP. Как видно, информационная избыточность данных, использованная таким “механическим” способом, свидетельствует лишь о том, что редких (дважды в сутки) наблюдений ТЦ каждым из приборов в отдельности недостаточно, чтобы сформировать удовлетворительно полную и непротиворечивую картину его эволюции. Тело ТЦ “раздваивается”, образ его спиральной структуры нарушается, и невозможно даже надежно определить положение его центра. Проблема заключается в том, что самые ранние и самые поздние из использованных наблюдений разделяет интервал в 21 ч. За это время ТЦ смещается примерно на 800 км в восточном направлении и успевает изменить интенсивность (Покровская, Шарков, 2006). Из примера видно, что для четкой фиксации отдельных фаз развития ТЦ требуется более высокая дискретизация по времени — до 3–6 ч, а в отдельных случаях и чаще. Алгоритмы спутникового радиотепловидения обеспечивают более тонкий подход к использованию информационной избыточности имеющихся данных, что позволяет восстанавливать отчетливые образы ТЦ в полях геофизических параметров атмосферы на разных фазах его эволюции (см. рис. 1, б) (Ермаков и др., 2013б).

Задачи восстановления атмосферной динамики в настоящее время решаются в двумерной постановке, что отчасти связано с недостаточностью данных спутниковых наблюдений относительно трехмерной структуры геофизических полей. Тем не менее, и в этих условиях формируются подходы, фактически создающие предпосылки для перехода к квазитрехмерному описанию. В частности,



**Рис. 1.** ТЦ Alberto 12.08.2000 г. в поле интегрального влагосодержания атмосферы  $W$ : *a* — при механическом объединении данных суточных наблюдений SSM/I со спутников DMSP F13, F14, F15; *б* — при восстановлении отдельных фаз эволюции ТЦ алгоритмами спутникового радиотепловидения. Цветовая шкала значений  $W$  в мм.

широко используется комплексный подход, привлекающий к анализу спутниковых данных результаты стороннего моделирования и позволяющий связать найденные векторы атмосферных движений с некоторой высотой над поверхностью геоида. В итоге формируется мозаичная картина, состоящая из фрагментов полей атмосферных движений на разных горизонтах. Комбинирование таких мозаик, относящихся к разным моментам времени, позволяет получить более детальное представление о трехмерном поле движений в атмосфере. Не вызывает сомнений, что дальнейшее совершенствование этих методик и их адаптация к данным новейших спутниковых сканеров атмосферы — вопрос ближайшей перспективы.

Создание российской группировки микроволновых МКА с темпом обновления информации 3–6 ч создаст условия построения трехмерных динамических полей атмосферы. Получение таких данных позволит повысить достоверность и качество прогноза погоды, предсказание чрезвычайных ситуаций.

### МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ДЗЗ

Последние 10–15 лет быстрыми темпами идут разработки и запуски МКА с массой существенно менее 1000 кг. Это объясняется тем, что стоимость и время создания КА уменьшаются со снижением массы, сокращается стоимость запуска. Преимущества использования малых аппаратов заключаются в большей оперативности получения данных наблюдений за счет создания необходимой по численности группировки малых аппа-

ратов, более быстром внедрении новых технических разработок, увеличении стабильности получения данных за счет оперативного восполнения группировки в случае необходимости (Севастьянов и др., 2009). Создание и функционирование группировки малых спутников крайне необходимо для ежесуточного мониторинга тропического (и не только) региона системы океан–атмосфера в течение длительного срока наблюдательного цикла (30–40 лет) с идентичной аппаратурой. Ближайшая цель такого мониторинга заключается в обнаружении физических причин наступления в монотонном ходе глобального потепления странной “паузы” с 2000 г. до настоящего времени с нулевым градиентом во временном ходе глобальной температуры, которую не удалось воспроизвести ни с помощью какой-либо существующей численной модели глобального потепления (а их имеется около 90 вариантов), ни с помощью чрезвычайных попыток климатологов модернизировать прежние модели, что вновь ставит на повестку дня острый вопрос существования совсем других факторов (неантропогенного типа) (Tremberth, Fasullo, 2013; Zhou et al., 2019).

В качестве показательного примера можно указать на недавний (25 июня 2019 г.) запуск группировки идентичных миниспутников (причем одновременно шести спутников ракетой SpaceX Falcon Heavy) по программе FormoSat-7/COSMIC-2 (NASA США — NSPO Тайвань). Каждый спутник имеет массу 300 кг. Группировка доставлена на низкую орбиту с углом наклона к экватору 24° и высотой орбиты в 720 км. Аппаратура спутников будет работать в радиозатменном режиме от сигналов глобальных навигационных систем USA GPS и российской системы ГЛОНАСС. Спутники обес-

печат суточное производство 5000 высотных зондирований земной атмосферы в низких и средних широтах Северного и Южного полушарий. Отметим, что наземные станции радиозондирования обеспечивают около 1300 высотных зондирований ежесуточно практически на всех широтных поясах земной атмосферы (Anthes, Schreiner, 2019).

Создание орбитальной группировки из 4–8 спутников с микроволновыми радиометрическими системами на борту, информация с которых будет обновляться через 3–6 ч с каждого участка поверхности Земли, может быть возложена только на МКА, основным требованием к которым должна быть надежность, оптимальный набор частот и дешевизна. Группировки МКА имеют неоспоримое преимущество в оперативности перед большими КА. Конечно, к микроволновой радиометрической системе необходимо добавить спектральные системы ИК- и оптического диапазонов, которые позволяли бы получать дополнительную метеорологическую информацию в областях свободных от облачности, но это задача других публикаций.

Как показала работа над проектированием МИРС, радиометр может иметь вес в пределах 50 кг и потреблять энергию порядка 100 Вт. Главное требование к спутниковой платформе — это точность поддержания угла визирования порядка  $0.1^\circ$ . Такое требование представляется достаточно легким по сравнению с оптическими системами высокого разрешения, где требуемая точность наведения составляет 2–5 угл. мин, а погрешность стабилизации осей должна быть не хуже  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  град/с (Севастьянов и др., 2009).

В России разработано несколько МКА. Один из них создан в Государственном космическом научно-производственном центре им. М.В. Хруничева — это унифицированная космическая платформа (УКП) “Яхта” с полезной массой 350–500 кг и временем активного существования 5–12 лет. Другой — платформа “Гонец”, созданная АО “Информационные спутниковые системы им. акад. М.Ф. Решетнева” для спутниковой связи с полезной нагрузкой 280 кг и сроком службы 5–7 лет. Третий МКА — платформа “Канопус-В”, созданная Научно-производственной корпорацией “Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы” им. А.Г. Иосифьяна для спутников ДЗЗ с полезной нагрузкой 450 кг и сроком активного существования 5 лет. Разработкой новых МКА серьезно и активно занимаются в студенческих научных коллективах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено современное состояние микроволнового радиометрического зондирования Земли. Отмечено, что в мире на сегодняшний день работают и дают информацию около 30 микроволновых радиометрических систем дистанционного зондирования, в то время как в России существует только один микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ с углом падения  $65^\circ$ . Такое состояние дел в области ДЗЗ подрывает информационную безопасность России. На базе микроволнового радиометра МИРС, разрабатываемого для космического эксперимента “Конвергенция” на РС МКС, предлагается создать группировку МКА для глобального метеорологического мониторинга. Оптимальными параметрами для спутниковых данных микроволновой космической системы являются пространственное разрешение 10–12 км и временное 3–6 ч для анализа текущих атмосферных процессов, улучшения качества прогноза погоды и предсказания чрезвычайных ситуаций. Для решения этой задачи на орбите Земли должны быть одновременно задействованы от 4 до 8 спутников с радиометрами на борту.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке тем “Мониторинг” (Государственное задание № 01.20.0.2.00164) и “Космос” (0030-2019-0008), а также проекта РФФИ № 18-02-01009.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдырев В.В., Ильгасов П.А., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 1 // Вопросы электро-механики. 2008. Т. 107. С. 22–25.
- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан–атмосфера // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
- Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Покровская И.В. Поиск источника энергии при интенсификации ТЦ Katrina по данным микроволнового спутникового зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012а. № 4. С. 47–56.
- Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А. Детализация фаз развития ТЦ Katrina по интерполированным глобальным полям водяного пара // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012б. Т. 9. № 2. С. 207–213.
- Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Покровская И.В., Чернушич А.П. Обнаружение энергетических источников в переменяемых режимах интенсивности ТЦ Alberto при его эволюции по данным спутникового микроволнового зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2013а. № 4. С. 39–49.

- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Чернушич А.П., Шарков Е.А. Алгоритм построения глобальных радиотепловых полей системы океан–атмосфера высокой пространственно-временной дискретизации по спутниковым микроволновым измерениям // Исслед. Земли из космоса. 2013б. № 4. С. 72–82.
- Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Роль тропосферных адвективных потоков скрытого тепла в интенсификации тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 4. С. 3–15.
- Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
- Митник Л.М., Митник М.Л., Заболотских Е.В. Спутник Японии GCOM-W1: моделирование, калибровка и первые результаты восстановления параметров океана и атмосферы // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 135–141.
- Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1. (1983–2005). М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
- Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., Казинский Н.В., Кондранин Т.В., Негодяев С.С. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 3. С. 14–22.
- Стерлядкин В.В., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В., Шарков Е.А. Дифференциальные радиотепловые методы восстановления профиля влажности атмосферы с борта космических аппаратов // Исслед. Земли из космоса. РАН. 2017. № 2. С. 64–76.
- Трохимовский Ю.Г. Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.
- Шарков Е.А. Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Шарков Е.А., Кузьмин А.В., Веденькин Н.Н., Jeong S., Ермаков Д.М., Квитка В.Е., Козлова Т.О., Комарова Н.Ю., Минаев П.Ю., Oh S., Park I.H., Пашинов Е.В., Позаненко А.С., Прасолов В.О., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Селунский А.Б., Стерлядкин В.В., Хапин Ю.Б., Hong G., Черненко А.М. Космический эксперимент “Конвергенция”: научные задачи, бортовая аппаратура, методики обратных задач // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 71–96.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Эволюция тропического циклона Goni и его связь с полем интегрального водяного пара в экваториальной области // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 25–30.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. (2011а) Эволюция тропического циклона Hondo в поле экваториального водяного пара с использованием мультиспектрального подхода // Исслед. Земли из космоса. 2011а. № 1. С. 22–29.
- Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. Энергетические особенности множественного тропического циклогенеза по мультиспектральным спутниковым наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011б. № 2. С. 18–25.
- Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В. Особенности экваториального поля водяного пара при эволюции тропического циклона (ТЦ) на примере ТЦ Francisco (2001) // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2011в. Т. 8. № 3. С. 310–316.
- Шарков Е.А., Шрамков Я.Н., Покровская И.В. Критический параметр генезиса тропических циклонов в глобальном поле интегрального водяного пара // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2011г. Т. 8. № 1. С. 280–286.
- Anthes R., Schreiner W. Six new satellites watch the atmosphere over Earth's equator // EOS. 2019. V. 100. <https://doi.org/10.1029/2019EO131779>
- Bommarito J.J. DMSP Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) // Proc. SPIE. 1993. V. 1935. P. 230–238. <https://doi.org/10.1117/12.152601>
- Deeter M.N., Vivekanandan J. New dual-frequency microwave technique for retrieving liquid water path over land // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. D15209.
- Deeter M.N. A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. Art. L02815.
- Du J., Kimball J.S., Jones L.A., Kim Y., Glassy J., Watts J.D. A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations // Earth System Science Data. 2017. V. 9. № 2. P. 791–808.
- Ebert E., Wilson L., Weigel A., Mittermaier M., Nurmi P., Gill P., Göber M., Joslyn S., Brown B., Fowler T., Watkins A. Progress and challenges in forecast verification // Meteorological Applications. 2013. V. 20. P. 130–139.
- Gaiser P.W., Germain K.St., Twarog E.M., Poe G.A., Purdy W., Richardson D., Grossman W., Jones W.L., Spencer D., Golba G., Mook M., Cleveland J., Choy L., Bevilacqua R.M., Chang P. The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: Sensor description and early orbit performance // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. № 11. P. 2347–2361.
- Gangwar R.K., Gohil B.S., Mathur A.K. Retrieval of Layer Averaged Relative Humidity Profiles from MHS Observations over Tropical Region // Intern. J. Atmos. Sci. 2014. Art. ID 645970. 10 p. <https://doi.org/10.1155/2014/645970>
- Gohil B.S., Mathur A.K., Sarkar A., Agarwal V.K. Atmospheric humidity profile retrieval algorithms for Megha-Tropiques SAPHIR: a simulation study and analysis of AMSU-B data // Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6408. <https://doi.org/10.1117/12.693566>
- Masayoshi K., Tatsuya Y. Regular Observation by Global Change Observation Mission 1st-Water GCOM-W1 (SHIZUKU) // NEC Tech. J. 2013. V. 8. № 1. P. 32–35.
- Meissner Th., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incident angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. № 8. P. 3004–3026.
- Saunders R., Matricardi M., Brunel P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1998. V. 125. P. 1407–1425.
- Sharkov E.A. Remote sensing of tropical regions. Chichester, N.Y., etc.: John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.

*Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. B., Heidelberg, L., N.Y.; etc.: Springer/PRAXIS, 2000. 361 p.

*Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. 2nd ed. B., Heidelberg, L., N.Y.; etc.: Springer/PRAXIS, 2012. 650 p.

*Tremberth K.F., Fasullo J.* An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future*. 2013. V. 1. P. 19–32.

*Weng F., Grody N.C.* Retrieval of ice cloud parameters using a Microwave Imaging Radiometer // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. P. 1069–1081.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057)

*Weng F., Zou X., Wang X., Yang S., Goldberg M.D.* Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for numerical weather prediction and tropical cyclone applications // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Art. D19112.

<https://doi.org/10.1029/2012JD018144>

*Woods A.* Medium-Range Weather Prediction: The European Approach. Springer, 2006. 270 p.

*Zhou W., Shang Ping Xie, Da Yang.* Enhanced equatorial warming causes deep-tropical contraction and subtropical monsoon shift // *Nature Climate Change*. 2019. V. 9. № 11. P. 834–839.

## Grouping Small Spacecraft for Global Meteorological Observation by Means of a Microwave Radiometer-Spectrometer

A. V. Kuzmin<sup>1</sup>, D. M. Ermakov<sup>1,2</sup>, I. N. Sadovskii<sup>1</sup>, V. V. Sterlyadkin<sup>1</sup>, and E. A. Sharkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Space Research Institute RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino branch, Fryazino, Moscow region, Russia*

The paper considers the current state of microwave radiometer for remote sensing of the Earth. It is noted that about 30 satellite microwave radiometers operate and provide information in the world today, while in Russia there is only one microwave radiometer MTVZA-GY, with a 65° sounding angle. It is proposed to create a constellation of small spacecraft for global meteorological observation on the basis of the MIRS microwave radiometer, which is being developed for the “Convergence” space experiment on the ISS RS. The optimal parameters for satellite data of the microwave space system are a spatial resolution of 10–12 km and a temporal resolution of 3–6 hours for analyzing current atmospheric processes, improving the quality of weather forecasting and predicting emergency situations. To solve this problem, there must be from 4 to 8 satellites with radiometers on board simultaneously in one Earth orbit.

**Keywords:** remote sensing, satellite microwave remote sensing, microwave radiometry, microwave radiometer, small spacecraft, satellite constellation, satellite meteorology, global meteorological observation, satellite radio thermal television

## REFERENCES

*Boldirev V.V., Grobets N.N., Ilgasov P.A., Nikitin O.V., Pantsov V.U., Prohorov U.N., Strelnikov N.I., Streltsov A.M., Cherniy I.V., Cherniavskiy G.M., Yakovlev V.V.* Sputnikoviy mikrovolnoviy skaner/zondirovshchik MTVZA-GY [Satellite microwave imager/sounder MTVZA-GY] // *Sov. probl. dist. zond. Zemli iz kosmosa*. 2008. V. 5. № 1. P. 243–248.

*Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A.* Elektronnaya baza mnogoletnikh dannykh global'nogo radioteplovogo polya Zemli v kontekste mnogomasshtabnogo issledovaniya sistemy okean—atmosfera [Electronic base of long-term data of the global radio-thermal field of the Earth in the context of a multiscale study of the ocean—atmosphere system] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1. P. 7–13.

*Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V.* Poisk istochnika ehnergii pri intensivatsii TTS Katrina po dannym mikrovolnovogo sputnikovogo zondirovaniya [Searching for an energy source in the intensification of the Katrina TC based on microwave satellite sounding data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2012a. № 4. P. 47–56.

*Ermakov D.M., Chernushich A.P., Sharkov E.A.* Detalizatsiya faz razvitiya TC Katrina po interpolirovannym global'nym polyam vodyanogo para [Detailing the phases of develop-

ment of TC Katrina using interpolated global fields of water vapor] // *Sov. probl. dist. zond. Zemli iz kosmosa*. 2012b. V. 9. № 2. P. 207–213.

*Ermakov D.M., Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V., Chernushich A.P.* Obnaruzheniye energeticheskikh istochnikov v peremeshchayemykh rezhimakh intensivnosti TTS ALBERTO pri yegoevolutsii po dannym sputnikovogo mikrovolnovogo zondirovaniya [Detection of energy sources in alternating modes of intensity of the ALBERTO TC during its evolution according to satellite microwave sounding data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2013a. № 4. P. 39–49.

*Ermakov D.M., Raev M.D., Chernushich A.P., Sharkov E.A.* Algoritm postroyeniya global'nykh radioteplovykh poley sistemy okean—atmosfera vysokoy prostranstvenno-vremennoy diskretizatsii po sputnikovym mikrovolnovym izmereniyam [Algorithm for constructing global radio-thermal fields of the ocean—atmosphere system of high spatio-temporal sampling from satellite microwave measurements] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2013b. № 4. P. 72–82.

*Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P.* Rol' troposfernykh advektivnykh potokov skrytogo tepla v intensivatsii tropicheskikh tsiklonov [The role of tropospheric advective latent heat fluxes in the intensification of tropical cyclones] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2014. № 4. P. 3–15.

- Kutuza B.G., Danilychev M.V., Yakovlev O.I.* Sputnikovy monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti [Satellite Earth Monitoring: Microwave Radiometry of the Atmosphere and Surface]. Moscow: LENAND, 2016. 336 p. (In Russian).
- Mitnik L.M., Mitnik M.L., Zabolotskikh E.V.* Sputnik Yaponii GCOM-W1: modelirovaniye, kalibrovka i pervyye rezul'taty vosstanovleniya parametrov okeana i atmosfery [Japanese satellite GCOM-W1: modeling, calibration and first results of reconstructing the parameters of the ocean and atmosphere] // Sovr. probl. dist. zond. Zemli iz kosmosa. 2013. V. 10. № 3. P. 135–141.
- Pokrovskaya I.V., Sharkov E.A.* Tropicheskie tsiklony i tropicheskie vozmushheniya Mirovogo okeana: khronologiya i evolyutsiya. Versiya 3.1. (1983–2005) [Tropical cyclones and tropical disturbances of the World Ocean: chronology and evolution. Version 3.1. (1983–2005)], Moscow: Poligraf servis, 2006. 728 p.
- Sevastianov N.N., Branets V.N., Panchenko V.A., Kazinsky N.V., Kondranin T.V., Negodyaev S.S.* Analiz sovremennykh vozmozhnostey sozdaniya mal'kh kosmicheskikh apparatov dlya dstantsionnogo zondirovaniya Zemli [Analysis of modern possibilities of creating small spacecraft for remote sensing of the Earth] // Trudy MIPT. 2009. V. 1. № 3. P. 14–22.
- Sterlyadkin V.V., Pashinov E.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A.* Differentsial'nyye radioteplovyye metody vosstanovleniya profilya vlazhnosti atmosfery s borta kosmicheskikh apparatov [Differential radio-thermal methods for reconstructing the atmospheric humidity profile from spacecraft] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2017. № 2. P. 64–76.
- Trokhimovsky Yu.G.* Model' radioteplovogo izlucheniya vzvolnovannoy morskoy poverkhnosti [Model of radio-thermal radiation of an agitated sea surface] // Issled. Zemli iz kosmosa. 1997. № 1. P. 39–49.
- Sharkov E.A.* Dstantsionnye issledovaniya atmosferykh katastrof [Remote studies of atmospheric disasters] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2010. № 1. P. 52–68.
- Sharkov Y.A., Kuzmin A.V., Veden'kin N.N., Jeong S., Ermakov D.M., Kvitka V.E., Kozlova T.O., Komarova N.Yu., Minayev P.Yu., Oh S., Park I.H., Pashinov E.V., Pozanenko A.S., Prasolov V.O., Sadvovskiy I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Khapin Yu.B., Hong G., Chernenko A.M.* Kosmicheskii eksperiment "Konvergentsiya": nauchnyye zadachi, bortovaya apparatura, metodiki resheniya zadach [Space experiment "Convergence0: scientific problems, onboard equipment, methods of inverse problems] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2018. № 4. P. 71–96 (In Russian).
- Sharkov E.A., Kim G.A., Pokrovskaya I.V.* Evolyutsiya tropicheskogo tsiklona Gonu i ego svyaz' s polem integral'nogo vodyanogo para v ehkvatorial'noj oblasti [The evolution of the tropical cyclone Gonu and its relation to the field of integral water vapor in the equatorial region] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2008. № 6. P. 25–30.
- Sharkov E.A., Kim G.A., Pokrovskaya I.V.* Evolyutsiya tropicheskogo tsiklona Hondo v pole ehkvatorial'nogo vodyanogo para s ispol'zovaniem mul'tispektral'nogo podkhoda [Evolution of the tropical cyclone Hondo in the field of equatorial water vapor using the multispectral approach] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2011. № 1. P. 22–29.
- Sharkov E.A., Kim G.A., Pokrovskaya I.V.* Energeticheskie osobennosti mnozhestvennogo tropicheskogo tsiklogeneza po mul'tispektral'nym sputnikovym nablyudeniya [Energy features of multiple tropical cyclogenesis from multispectral satellite observations] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2011b. № 2. P. 18–25.
- Sharkov E.A., Shramkov Ya.N., Pokrovskaya I.V.* Osobennosti ehkvatorial'nogo polya vodyanogo para pri ehvolyutsii tropicheskogo tsiklona (TC) na primere TC Francisco (2001) [Features of the equatorial field of water vapor in the evolution of the tropical cyclone (TC) in the example of the TC Francisco (2001)] // Sovr. probl. dist. zond. Zemli iz kosmosa. 2011c. V. 8. № 3. P. 310–316.
- Sharkov E.A., Shramkov Ya.N., Pokrovskaya I.V.* Kriticheskii parametr genezisa tropicheskikh tsiklonov v global'nom pole integral'nogo vodyanogo para [Critical parameter of the genesis of tropical cyclones in the global field of integral water vapor] // Sovr. probl. dist. zond. Zemli iz kosmosa. 2011d. V. 8. № 1. P. 280–286.
- Anthes R., Schreiner W.* Six new satellites watch the atmosphere over Earth's equator // EOS. 2019. V. 100. DOI: 10.1029/2019EO131779
- Bommarito J.J.* DMSP Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) // Proceedings of SPIE. 1993. V. 1935. P. 230–238. DOI: 10.1117/12.152601
- Deeter M.N., Vivekanandan J.* New dual-frequency microwave technique for retrieving liquid water path over land // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. D15209.
- Deeter M.N.* A new satellite retrieval method for precipitable water vapor over land and ocean // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. Art. L02815.
- Du J., Kimball J.S., Jones L.A., Kim Y., Glassy J., Watts J.D.* A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations // Earth System Science Data. 2017. V. 9. № 2. P. 791–808.
- Ebert E., Wilson L., Weigel A., Mittermaier M., Nurmi P., Gill P., Göber M., Joslyn S., Brown B., Fowler T., Watkins A.* Progress and challenges in forecast verification // Meteorological Applications. 2013. V. 20. P. 130–139.
- Gaiser P.W., Germain K.St., Twarog E.M., Poe G.A., Purdy W., Richardson D., Grossman W., Jones W.L., Spencer D., Golba G., Mook M., Cleveland J., Choy L., Bevilacqua R.M., Chang P.* The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: Sensor description and early orbit performance // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. № 11. P. 2347–2361.
- Gangwar R.K., Gohil B.S., Mathur A.K.* Retrieval of Layer Averaged Relative Humidity Profiles from MHS Observations over Tropical Region // Intern. J. Atmos. Sci. 2014. Art. ID 645970. 10 p. DOI: 10.1155/2014/645970.
- Gohil B.S., Mathur A.K., Sarkar A., Agarwal V.K.* Atmospheric humidity profile retrieval algorithms for Megha-Tropiques SAPHIR: a simulation study and analysis of AMSU-B data // Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6408. DOI: 10.1117/12.693566
- Masayoshi K., Tatsuya Y.* Regular Observation by Global Change Observation Mission 1st-Water GCOM-W1 (SHIZUKU) // NEC Tech. J., 2013. V. 8. № 1. P. 32–35.
- Meissner Th., Wentz F.J.* The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incident angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. № 8. P. 3004–3026.

- Saunders R., Matricardi M., Brunel P.* An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1998. V. 125. P. 1407–1425.
- Sharkov E.A.* Remote sensing of tropical regions. Chichester, New York etc.: John Wiley and Sons/PRAXIS, 1998. 310 p.
- Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis. Berlin, Heidelberg, London, New York, etc. Springer/PRAXIS, 2000. 361 p.
- Sharkov E.A.* Global Tropical Cyclogenesis, 2nd ed. Berlin, Heidelberg; London, New York, etc.: Springer/PRAXIS, 2012. 650 p.
- Tremberth K.F., Fasullo J.* An apparent hiatus in global warming? // *Earth's Future*. 2013. V. 1. P. 19–32.
- Weng F., Grody N.C.* Retrieval of ice cloud parameters using a Microwave Imaging Radiometer // *J. Atmos. Sci.* 2000. V. 57. P. 1069–1081. DOI: 10.1175/1520-0469(2000)057
- Weng F., Zou X., Wang X., Yang S., Goldberg M.D.* Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for numerical weather prediction and tropical cyclone applications // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Art. D19112. DOI: 10.1029/2012JD018144
- Woods A.* Medium-Range Weather Prediction: The European Approach. Springer, 2006. 270 p.
- Zhou W., Shang Ping Xie, Da Yang.* Enhanced equatorial warming causes deep-tropical contraction and subtropical monsoon shift // *Nature Climate Change*. 2019. V. 9. № 11. P. 834–839.