

Тайфун «Хиннамнор» (2022): воздействие на дальневосточные моря, Приморский и Хабаровский края по данным активного и пассивного микроволнового зондирования из космоса

Л. М. Митник, А. В. Баранюк, М. Л. Митник

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru*

Количество экстремальных погодных явлений, сопровождающихся штормовым ветром, сильными осадками и наводнениями, увеличивается с ростом глобального потепления. Состояние морской поверхности, земных покровов и атмосферы при перемещении тайфуна «Хиннамнор» (*англ.* Hinnamnor) над Восточно-Китайским, Японским и Охотским морями и дальневосточным регионом 5–9 сентября 2022 г. оценивалось по изображениям РСА (радар с синтезированной апертурой, *англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR), яркостной температуре, измеренной радиометрами AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), GMI (*англ.* GPM Microwave Imager) и МТВЗА-ГЯ (Микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)), показаниям радиозондов и метеорологических станций. Для мониторинга наводнений и снижения ущерба космические агентства Кореи 2 сентября и России 4 сентября активировали Международную Хартию по космосу и крупным катастрофам. Комплексирование данных зондирования, полученных с различных сенсоров над районами бедствий, позволило восстановить скорость ветра над морем, интенсивность осадков, паросодержание атмосферы, водозапас облаков, площадь затоплений и другие параметры с пространственным и временным разрешением, недоступным для одного прибора.

Ключевые слова: тайфун «Хиннамнор» (Hinnamnor), осадки, наводнение, РСА, Sentinel-1A, AMSR2, GPM, приводный ветер, водозапас облаков, паросодержание атмосферы, бассейн Амура, Приморский край, Хабаровский край

Одобрена к печати: 06.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-336-345

Введение

Мощным инструментом для изучения и мониторинга тропических циклонов (ТЦ) являются данные дистанционного зондирования Земли из космоса (Katsaros et al., 2014). В работе рассмотрен супертайфун «Хиннамнор» (*англ.* Hinnamnor) (28 августа — 6 сентября 2022 г., минимальное давление в центре — 920–935 мб), большая часть жизненного цикла которого проходила над северо-западной частью Тихого океана. 5 сентября глаз тайфуна пересёк о. Чеджу, а затем — береговую черту Южной Кореи при давлении в центре 950 мб. 6 сентября над Японским морем тайфун трансформировался во внетропический циклон (ВТЦ) и в последующие сутки перемещался на север над Татарским проливом, Хабаровским краем и Охотским морем. Экстремальные дожди в центральной части и в дождевых полосах тайфуна вызвали катастрофические наводнения в Корее, Японии и на востоке России. Тайфун «Хиннамнор» принёс проливные дожди на южнокорейский о. Чеджу, где 4–6 сентября выпало 1058 мм осадков. На материковой части Южной Кореи выпало от 385 до 448 мм, в дальневосточном регионе России — до 180 мм осадков. Дождевые наводнения в бассейне Амура наблюдаются часто (Гарцман, 2008; Данилов-Данильян и др., 2014) и приводят к огромному экономическому ущербу, особенно при продолжительных и интенсивных осадках.

Изменчивость структуры и параметров атмосферы и океана в области тайфуна исследовалась по данным микроволнового (МВ) пассивного и активного зондирования со спутников GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission 1st-Water («Сидзуку» — *англ.*

Shizuku)), GPM (*англ.* Global Precipitation Mission), «Метеор-М» № 2-2 и Sentinel-1. По данным МВ-радиометров AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), GMI (*англ.* GPM Microwave Imager) и МТВЗА-ГЯ (Микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) (Чернявский и др., 2020) были найдены характеристики приводного ветра, содержание в атмосфере парообразной и капельной влаги. Увлажнённые участки поверхности, отдельные пятна и большие пространства открытой воды в водосборе Амура были обнаружены путём анализа пассивных МВ-данных и изображений РСА (радар с синтезированной апертурой, *англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR) со спутника Sentinel-1. Яркостная температура на частотах ν инструментов AMSR2 и GMI использовалась для восстановления полей паросодержания атмосферы V , водозапаса облаков Q и скорости ветра W над Восточно-Китайским, Японским и Охотским морями (Katsaros et al., 2014; Mitnik et al., 2009). Измерения в окнах прозрачности атмосферы на частотах ν , равных 6–37 и 89 ГГц, и в области резонанса водяного пара 176–190 ГГц, а также изображения спутниковых РСА использовались для индикации глаза тайфуна, выявления зон глубокой конвекции и сильных осадков, определения положения и структуры атмосферных фронтов в нижней и средней тропосфере (Чернявский и др., 2020; Chen, Bennartz, 2020; Katsaros et al., 2014; Kubota et al., 2020). Обоснованность и детальность интерпретации мультисенсорных наблюдений повышались при использовании видимых и инфракрасных спутниковых изображений, карт погоды, показаний метеорологических станций и данных радиозондирования атмосферы).

Эволюция тайфуна

«Хиннамнор» — 11-й тропический циклон над северо-западной частью Тихого океана в 2022 г., возник из тропической депрессии в районе $24,9^\circ$ с. ш., $150,3^\circ$ в. д. 28 августа в 00:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) при давлении в центре $P_{ц} = 1008$ мб. Имя ТЦ присвоено в честь национального заповедника в Лаосе. По данным Японского метеорологического агентства (*англ.* Japan Meteorological Agency — JMA), циклон за 6 ч развился до стадии тропического шторма с давлением $P_{ц} = 1004$ мб. В стадию сильного тропического шторма он перешёл 29 августа в 00:00 UTC. Центр в это время находился в районе $27,3^\circ$ с. ш., $145,9^\circ$ в. д., а $P_{ц} = 985$ мб. Стадии тайфуна циклон достиг 29 августа в 06:00 UTC, когда давление в центре снизилось до 975 мб. Установившаяся скорость ветра W равнялась 33 м/с, а при порывах достигала 49 м/с. При минимальном давлении в центре 920 мб скорость ветра составила 54 м/с, а при порывах — 77 м/с. Стадия тайфуна наблюдалась до 6 сентября 06:00 UTC.

Из-за ослабления тихоокеанского антициклона тайфун 2 сентября повернул на северо-запад, а затем некоторое время перемещался в северном направлении. Положение центра ТЦ надёжно определялось по РСА-изображениям со спутников Radarsat-2 и Sentinel-1. При приближении к Корейскому п-ову тайфун влился в циркуляцию с атмосферным фронтом с высоким паросодержанием и интенсивными осадками и продолжал движение на север-северо-восток, трансформировавшись в ВТЦ. ВТЦ вышел на северную часть Приморского края, пересёк её и продолжал движение параллельно северо-западному побережью Охотского моря. Траектория циклона с 5 по 9 сентября приведена на *рис. 1а* (см. с. 338).

Глаз ТЦ пересёк побережье Кореи в 20:00 UTC 5 сентября, что видно на изображении РСА со спутника Radarsat-2 (<https://coastwatch.noaa.gov/cwn/products/synthetic-aperture-radar-surface-roughness-winds.html>). Поле ветра, найденное по данным РСА, показано на *рис. 1б*, а по данным радиометра AMSR2 — на *рис. 1в*. Сильное поглощение и рассеяние излучения в осадках и мощной облачности затрудняют восстановление ветра и параметров атмосферы в центральной области и в спиральных рукавах тайфуна по радиометрическим данным. Эти зоны показаны на *рис. 1в* белым цветом. Рассеяние излучения на гидрометеорах приводит к снижению яркостной температуры $T_{я}$ на частоте $\nu = 89$ ГГц на вертикальной (В) поляризации (*рис. 1г*) как над морской поверхностью, так и над сушей. Из-за сильного поглощения

в водяном паре, облаках и осадках граница море/суша и вариации излучения земных покровов не видны в полях яркостной температуры не только на $\nu = 89$ ГГц, но и на 36,5 ГГц, что следует из анализа данных AMSR2.

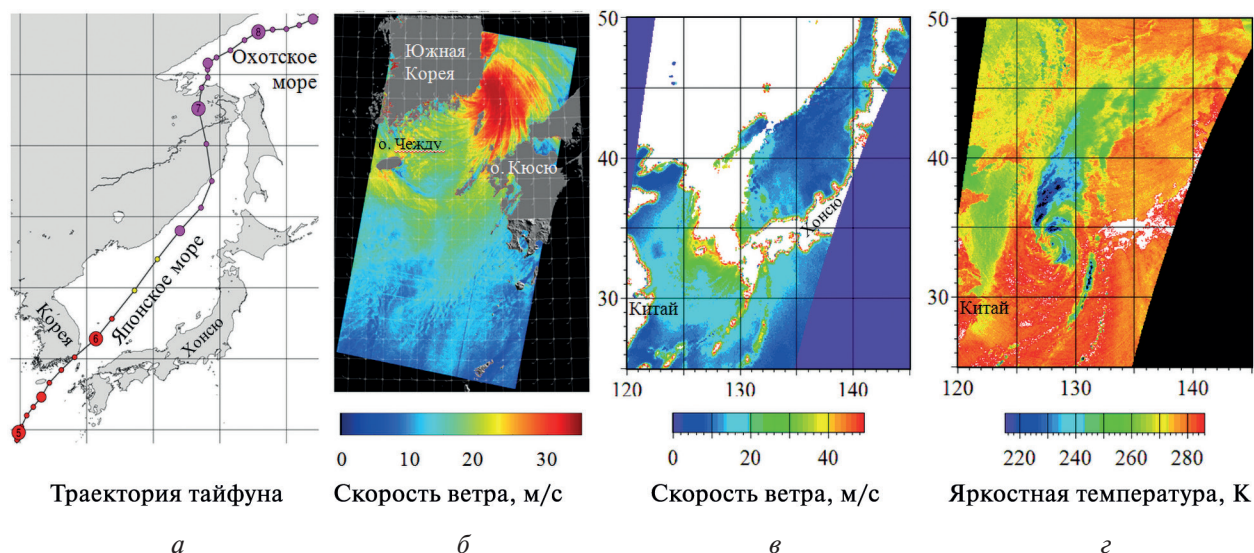


Рис. 1. Траектория тайфуна «Хиннамнор» 5–9 сентября 2022 г. (а); поле ветра, найденное по РСА-изображению со спутника Radarsat-2 в 21:24 UTC 5 сентября (б) (изменённое из <https://coastwatch.noaa.gov/cwn/products/synthetic-aperture-radar-surface-roughness-winds.html>); скорость ветра (в) и яркостная температура на частоте 89 ГГц на В-поляризации (г) по измерениям AMSR2 в 17:03 UTC 5 сентября 2022 г.

Об изменчивости вертикального распределения метеорологических переменных и интегрального содержания водяного пара в атмосфере (паросодержания) можно судить по показаниям радиозондов вблизи от траектории ТЦ. Так, по данным радиозондирования со ст. 31977 Садгород ($43,26^\circ$ с. ш., $132,05^\circ$ в. д., Владивосток), паросодержание V составляло $31,17 \text{ кг/м}^2$ в 00:00 UTC и $40,27 \text{ кг/м}^2$ в 12:00 UTC 5 сентября. В 00:00 UTC 6 сентября оно возросло до $43,57 \text{ кг/м}^2$, а ещё через 12 ч упало до $18,05 \text{ кг/м}^2$. На ст. 47401 Вакканай (англ. Wakkanai) ($45,41^\circ$ с. ш., $141,68^\circ$ в. д., о. Хоккайдо) V было равно $25,88 \text{ кг/м}^2$ в 00:00 UTC и $54,35 \text{ кг/м}^2$ в 12:00 UTC 5 сентября, $50,34 \text{ кг/м}^2$ — в 00:00 UTC 6 сентября и $13,47 \text{ кг/м}^2$ — в 00:00 UTC 7 сентября.

6 сентября в 06:00 UTC центр циклона, по данным JMA, находился на $39,8^\circ$ с. ш., $133,6^\circ$ в. д. и перемещался на север-северо-восток (см. рис. 1а) со скоростью 22 м/с. Яркостная температура, измеренная радиометром AMSR2 в 03:46 UTC, и результаты её обработки по алгоритмам (Mitnik et al., 2009) приведены на рис. 2 (см. с. 339) и 3.

Зоны осадков и затоплений выделяются на окружающем фоне по пониженным значениям яркостной температуры $T_{\text{я}}(\nu)$. В сантиметровом диапазоне длин волн понижение обусловлено ростом влажности верхнего слоя почвы и суммарной площади малых и больших пятен открытой воды, что приводит к уменьшению коэффициента излучения поверхности. В полях $T_{\text{я}}$ на $\nu = 6,9$ ГГц (см. рис. 2а) и $\nu = 10,65$ ГГц (см. рис. 2б) выделяются русло и затопленная пойма р. Амур (1), оз. Ханка (2) и увлажнённые участки поверхности земли с пятнами открытой воды (3). В миллиметровом диапазоне понижение вызвано увеличением интегрального поглощения атмосферы, которое ослабляет излучение поверхности, и рассеянием излучения на гидрометеорах (см. рис. 2в–е). С ростом частоты влияние излучения поверхности на $T_{\text{я}}(\nu)$ снижается. Преобладающим становится вклад в $T_{\text{я}}(\nu)$ восходящего излучения атмосферы.

Сильные осадки выпадали к северу и северо-востоку от центра и в области стены глаза ТЦ (см. рис. 2д, е и 3а, б). Осадки различной интенсивности R отмечались в широкой полосе над сушей. Значения R спадали с удалением от центра циклона (см. рис. 3а, д).

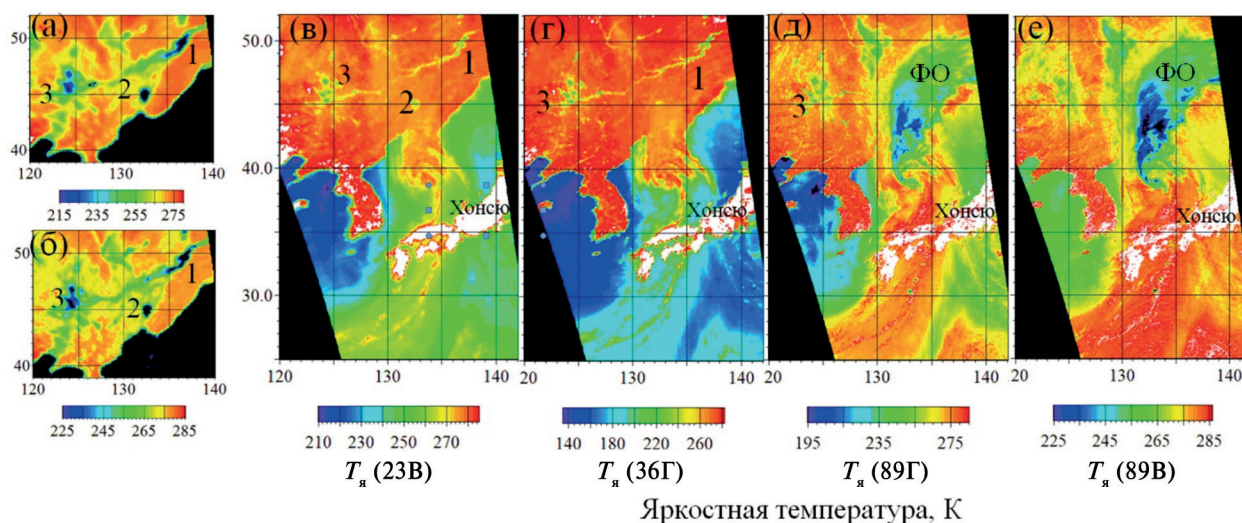


Рис. 2. Яркостная температура на частотах AMSR2 6,9 ГГц (а); 10,6 ГГц (б); 23,8 ГГц (в); 36,5 ГГц (г) и 89 ГГц (д, е) по измерениям со спутника GCOM-W1 в 03:46 UTC 6 сентября 2022 г.; 1 — р. Амур, 2 — оз. Ханка, 3 — влажная почва и пятна воды; ФО — фронт окклюзии

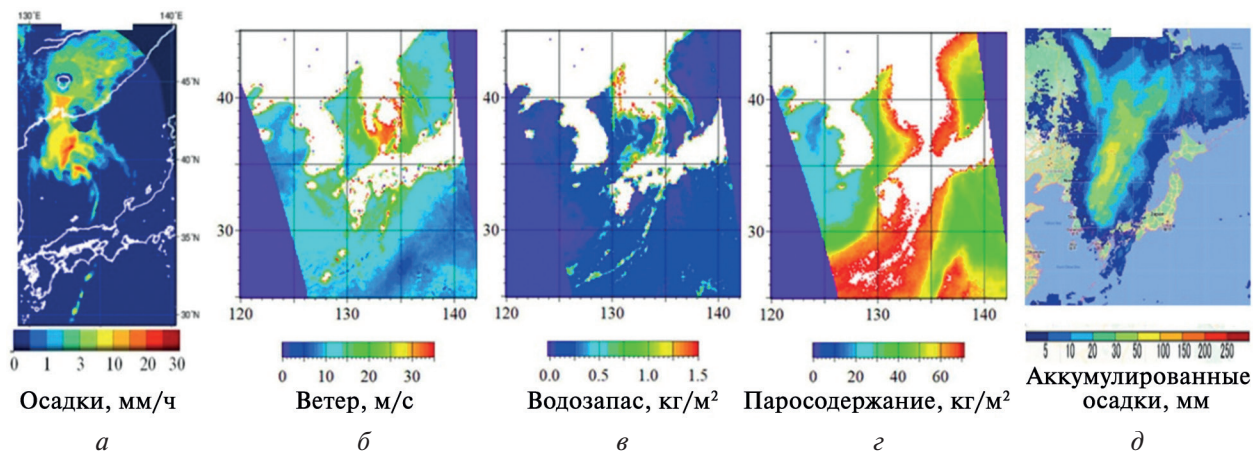


Рис. 3. Интенсивность осадков (а), скорость ветра (б), водозапас облаков (в) и паросодержание атмосферы (г), восстановленные по измерениям радиометра AMSR2 в 03:46 UTC 6 сентября 2022 г.; аккумулятивные осадки (д) по данным GSMaP* (Kubota et al., 2020) с 21:00 UTC 5 сентября 2022 г. до 06:00 UTC 6 сентября 2022 г.

В центральной части тайфуна и в спиральных рукавах, пересекавших Японию и Японское море, скорость ветра W была больше 30 м/с (см. рис. 3б), а водозапас облаков Q превышал $1,5 \text{ кг/м}^2$ (см. рис. 3в). С юга циклон подпитывал поток влажного воздуха из тропической зоны Тихого океана с паросодержанием $V > 70 \text{ кг/м}^2$, а с северо-востока к его центральной зоне подходил фронт окклюзии (ФО) с интенсивными осадками (см. рис. 2д, е). Согласно картам приземного синоптического анализа JMA, максимальная скорость ветра вблизи от центра составляла 33 м/с с порывами до 48 м/с. Скорость ветра превышала 25 м/с на расстоянии от центра до 150 км (см. рис. 3б).

6 сентября в 18:00 UTC центр пересёк западную границу Татарского пролива, и циклон продолжил движение на север над Хабаровским краем (см. рис. 1а). 7 сентября в 03:00 UTC

* GSMaP является продуктом спутника GPM и представляет собой результаты глобального наблюдения осадков с трёхчасовым интервалом. Значения интенсивности осадков оцениваются с использованием данных микроволнового и инфракрасного многочастотных радиометров с основного спутника GPM и семейства других спутников (<https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/guide.html>).

ВТЦ вышел в северо-западную часть Охотского моря. Как следует из обработки яркостной температуры AMSR2 за 6–7 сентября над Японским и Охотским морями (рис. 4) и показаний радиозондовых станций, циклон принёс тёплую и влажную ($V > 50 \text{ кг/м}^2$) воздушную массу, облачность с водозапасом $Q \geq 1,5 \text{ кг/м}^2$ и интенсивные осадки.

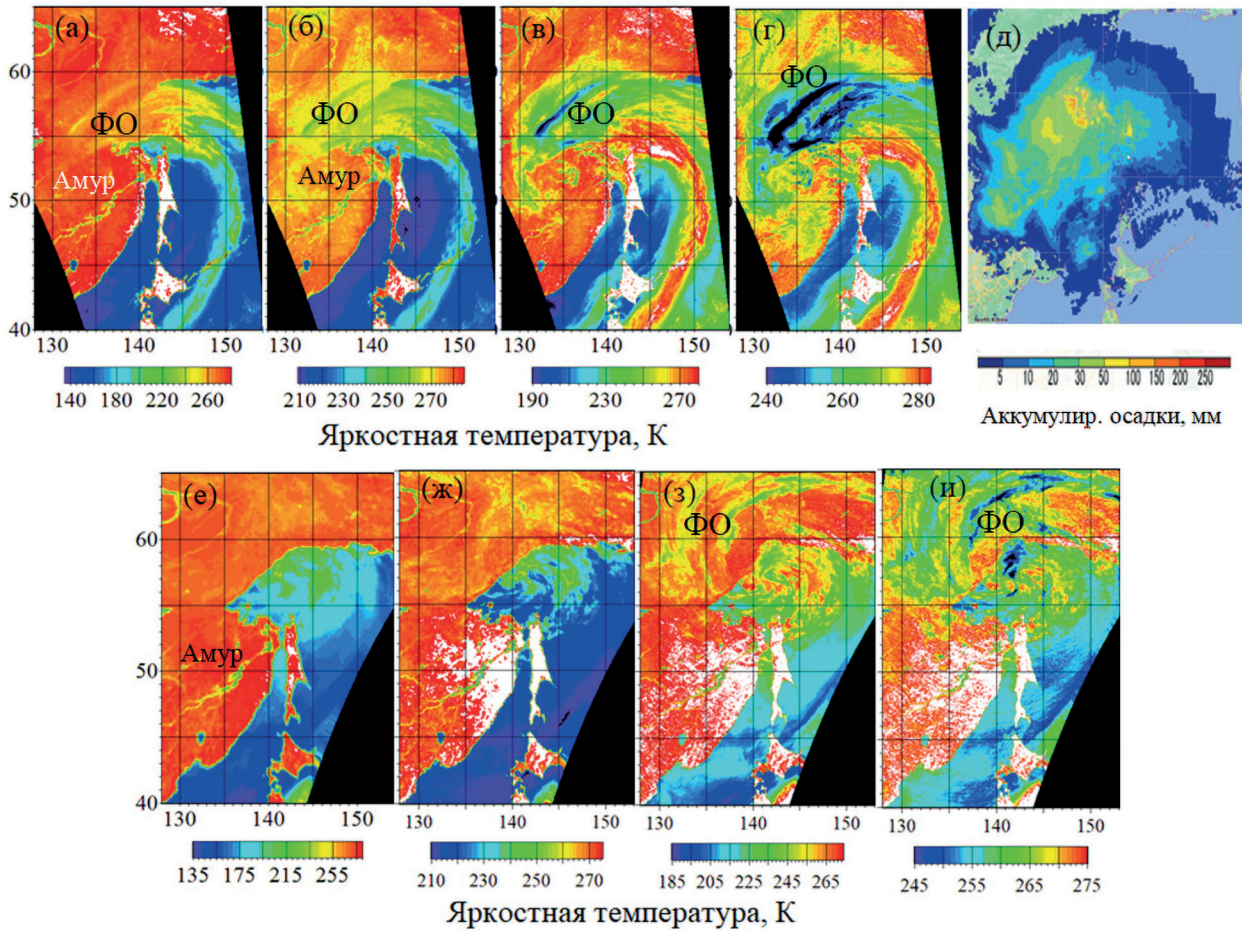


Рис. 4. Яркостная температура по измерениям AMSR2 в 03:50 UTC 6 сентября (а–г) и в 16:50 UTC 7 сентября (е–и) на частотах: 23,8 ГГц, горизонтальная (Г) поляризация (а, е); 36,5 ГГц, В-поляризация (б, ж); 89 ГГц, Г-поляризация (в, з) и В-поляризация (г, и); аккумулярованные осадки с 09:00 по 21:00 UTC 6 сентября 2022 г. (д); ФО — фронт окклюзии

Яркостная температура AMSR2 и результаты её обработки (см. рис. 2–4) находятся в хорошем согласии с картами приземного анализа JMA за 5–7 сентября, полями аккумулярованных осадков (см. рис. 3д и 4д) и данными радиозондирования, согласно которым значения паросодержания атмосферы составили 42,18; 49,34; 53,51 и 21,39 кг/м^2 на ст. 32098 Поронайск ($49,22^\circ \text{ с. ш.}, 131,1^\circ \text{ в. д.}$) и 30,10; 49,34; 53,51 и 28,88 кг/м^2 на ст. Николаевск-на-Амуре ($53,15^\circ \text{ с. ш.}, 140,7^\circ \text{ в. д.}$) в 12:00 UTC 5 сентября, в 00:00 и 12:00 UTC 6 сентября и в 12:00 UTC 7 сентября соответственно.

В облачных системах внетропических и тропических циклонов в полях $T_y(\nu)$ на высоких частотах выделяются области глубокой конвекции, обусловленные рассеянием восходящего излучения атмосферы на граде и обводнённом граде. Рассеяние приводит к уменьшению яркостной температуры на $\nu = 89 \text{ ГГц}$, особенно на вертикальной поляризации (см. рис. 2д, е, 4в, г, з, и), а также на 166 ГГц и на частотах в области сильной резонансной линии водяного пара 183,31 ГГц. Измерения на этих частотах выполняются радиометрами GMI со спутника GPM (Chen, Bennartz, 2020) и МТВ3А-ГЯ со спутников серии «Метеор-М» (Чернявский и др., 2020; Mitnik et al., 2022) (не показаны).

Наводнение на Дальнем Востоке

Из-за наводнения в сентябре 2022 г., связанного с тайфуном «Хиннамнор», в Приморье был введён федеральный режим чрезвычайной ситуации. «Хиннамнор» стал самым мощным тайфуном за последние 60 лет. Его жертвами оказались восемь человек. С приближением тайфуна площадь затопления в Дальневосточном регионе стремительно увеличивалась. 4 сентября Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» активировала Международную Хартию по космосу и крупным катастрофам (*англ.* International Charter on Space and Major Disasters) (Activation ID 774). Было смыто много дорог, мостов и других объектов инфраструктуры. Жители на время остались без электричества, были затоплены поля, с которых ещё не успели собрать урожай. Ущерб от стихии составил ~6 млрд руб.

При редкой сети метеорологических станций и гидрологических постов единственным способом получения количественных сведений о зонах затопления стали спутниковые наблюдения. Особенно востребованы МВ-радиометрические наблюдения в диапазоне 6–190 ГГц, обеспечивающие получение данных о состоянии поверхности и осадках независимо от времени суток и облачности (см. *рис.* 1–4) с разрешением от 5 до 30–50 км в полосе обзора шириной 1000–2500 км. Высоким (10–100 м) разрешением обладают изображения РСА, по которым составляются подробные карты наводнения и отслеживается его динамика (Manavalan, 2017; Tay et al., 2020). После активации Хартии (<https://disasterscharter.org/web/guest/activations/>) со спутника Sentinel-1 Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA) были получены изображения РСА Приморского и Хабаровского краёв за различные даты в сентябре, а также до наводнения. При наложении изображений были выявлены затопленные участки и оценена их площадь.

На *рис.* 5 приведено РСА-изображение части водосбора р. Амур за 8 сентября 2022 г., полученное со спутника Sentinel-1 в ходе зондирования на В-поляризации при передаче и приёме сигналов и при ширине полосы обзора 250 км. Размер пикселя изображения (после усреднения) составляет 100×100 м.

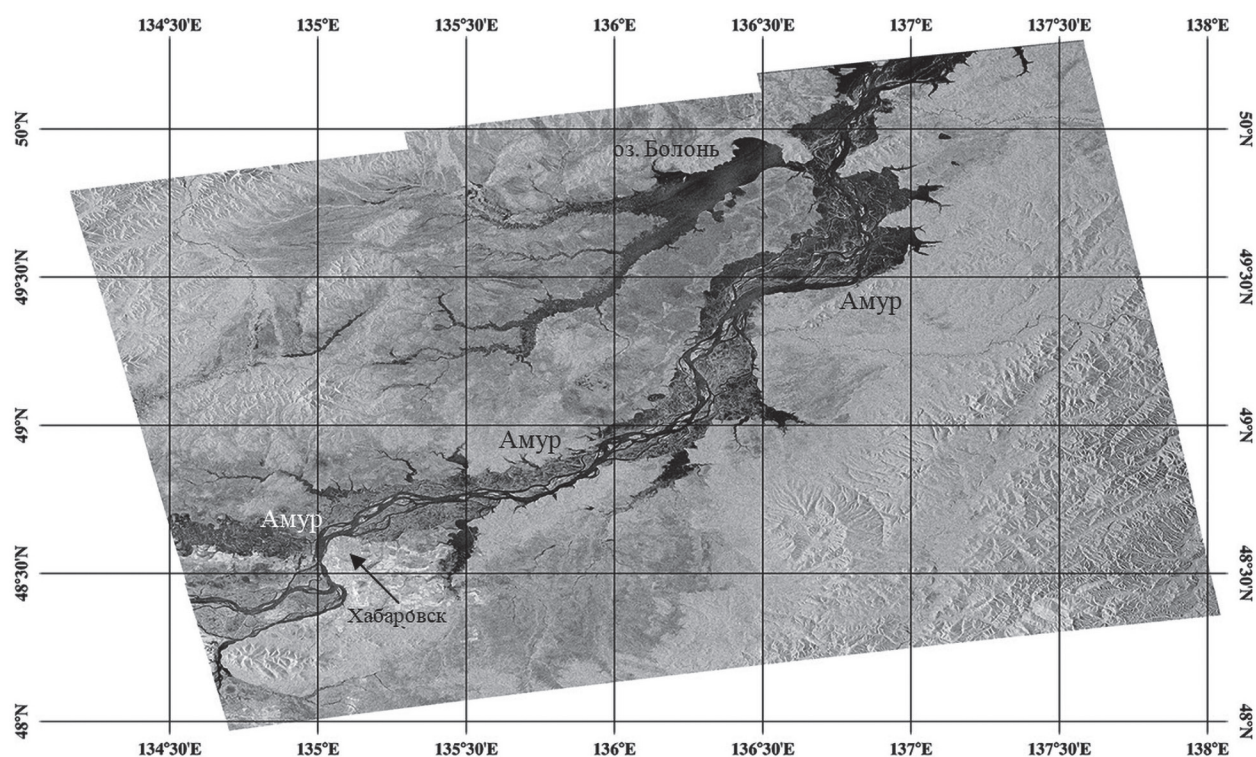


Рис. 5. Изображение части водосбора р. Амур, полученное РСА со спутника Sentinel-1 во время наводнения 8 сентября 2022 г.

Тёмным тоном отображаются основное русло Амура, его крупные притоки, оз. Болонь и (почти) полностью затопленные участки поверхности, а светлым тоном — лесные массивы и обращённые к радару склоны горных хребтов. Среднее значение удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) σ^0 , найденное для участка гладкой поверхности оз. Болонь, составило $-20,34$ дБ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_{\text{СКВ}} = -1,84$ дБ. Среднее значение УЭПР для леса — $\sigma_{\text{ср}} = -9,42$ дБ при $\sigma_{\text{СКВ}} = -2,02$ дБ. Вариации серого тона на изображении соответствуют уровням рассеяния от различных природных образований на холмистой местности: разреженного леса, кустарника, лугов и др.

При наводнении в низменных участках территории (поймы рек, зоны вокруг озёр и болот) появляется открытая вода. Рассеяние от таких участков и их яркость снижаются пропорционально относительной доли открытой воды в пикселях изображения. С увеличением относительной доли открытой воды пиксели на изображении РСА выглядят темнее. Площадь и степень затопления оцениваются сравнением РСА-изображений, полученных до и во время наводнения. При этом используются различные методики (Manavalan., 2017; Tupas et al., 2023).

Заключение

Глобальное потепление климата привело к увеличению количества и интенсивности опасных явлений погоды. К опасным явлениям относятся тропические циклоны, перемещение которых сопровождается штормовым ветром, экстремальными осадками, а при выходе на сушу — штормовым нагоном и масштабными наводнениями. Именно таким был супертайфун «Хиннамнор», вызвавший сильные наводнения в Восточном Китае, Южной Корее и России, сопровождавшиеся человеческими жертвами и большим экономическим ущербом.

В работе на основе спутниковых данных рассмотрена заключительная стадия жизненного цикла тайфуна (5–8 сентября), когда он, пройдя о. Чеджу и Корейский п-ов, стремительно пересёк Японское море, Приморский и Хабаровский края и вышел на Охотское море. 6 сентября тайфун трансформировался во внетропический циклон. При движении на север (см. *рис. 1а*) облачность ВТЦ объединилась с облачностью мощного фронта окклюзии. Этот процесс ярко выражен в полях яркостной температуры на частотах в диапазоне от 6 до 183 ГГц по данным радиометров AMSR2, GMI и МТВ3А-ГЯ, в последовательности спутниковых оптических изображений (в статье не показаны), синоптических карт погоды и радиозондирования атмосферы.

В совокупности мультисенсорные спутниковые и наземные измерения дают более детальное и полное представление об изменчивости состоянии подстилающей поверхности, нижней и средней тропосферы. Так, циклонически изогнутые протяжённые полосы с пониженной яркостной температурой (как на частоте $\nu \geq 89$ ГГц, так и на частотах 36,5 и 23,8 ГГц (см. *рис. 4а–г, е–и*)) свидетельствуют о наличии в облачности больших и малых рассеивающих частиц различного фазового состава (град, обводнённый град, крупные и мелкие капли дождя). На восходящем витке AMSR2 за 6 сентября понижения на частотах 23,8 и 36,5 ГГц хорошо заметны и над морем, и над сушей (см. *рис. 4а, б*). Через 35 ч на нисходящем витке AMSR2 контраст на окружающем фоне таких облачных полос падает на всех частотах, особенно на 23,8 и 36,5 ГГц (см. *рис. 4е–и*), что, скорее всего, обусловлено уменьшением водозапаса облаков и паросодержания атмосферы, а следовательно, и интегрального поглощения в атмосфере.

Влияние рассеяния на $T_{\text{я}}$ следует и из анализа измерений, выполненных радиометрами GMI на частотах 89; 166; 183 ± 7 ; 183 ± 3 ГГц и МТВ3А-ГЯ в диапазоне 36–48 ГГц и на частотах 91,6; 183 ± 7 ; 183 ± 3 ; $183 \pm 1,4$ ГГц как над тайфуном «Хиннамнор» в сентябре 2023 г., так и ранее (Чернявский и др., 2020; Mitnik et al., 2022). Отмеченные особенности подтверждаются результатами моделирования яркостной температуры при вариациях параметров рассеивающих частиц, содержания водяного пара в атмосфере и воды в облаках (Chen, Bennartz, 2020).

Следует подчеркнуть важную роль измерений $T_{\text{я}}$ в области резонансной линии водяного пара на 183,31 ГГц, обработка которых позволяет получать количественную информацию

о тропических и внетропических циклонах, муссонах и других погодных системах, регистрировать зоны глубокой конвекции, оценивать относительную влажность тропосферы и которые к тому же обладают высоким пространственным разрешением. Обработка пассивных и активных микроволновых данных обеспечивает получение сведений о пространственном распределении осадков при задаваемом временном интервале усреднения (см., например, <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/guide.html>) (см. рис. 3д, 4д).

Для получения оперативных сведений о затоплении и прогноза развития стремительно развивающихся дождевых паводков, экономический ущерб от которых грандиозен, необходимо выполнять картирование поверхности с высоким разрешением. При решении этой задачи вне конкуренции оказываются изображения спутниковых РСА, обработка и анализ которых продолжают совершенствоваться (Manavalan, 2017; Benoudjit, Guida, 2019; Tay et al., 2020; Turas et al., 2023).

Возможности мониторинга тайфунов, других опасных атмосферных явлений и наводнений будут улучшены. Из заявления Роскосмоса следует, что 14 ноября 2023 г. завершены лётные испытания спутника «Кондор-ФКА», предназначенного для радиолокационного всепогодного зондирования Земли. На спутнике установлена РСА с рабочей длиной волны 9,4 см. С 6 января 2024 г. начнётся выполнение заявок на получение изображений РСА. Второй спутник «Кондор-ФКА» планируется вывести на орбиту в 2024 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетных тем Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН № FWMM-2022-0037 и 0211-2021-0007.

Авторы благодарят Японское аэрокосмическое исследовательское агентство (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA) за предоставленные данные радиометров AMSR2 и GMI, а также Европейское космическое агентство за изображения РСА со спутника Sentinel-1.

Литература

1. Гарцман Б. И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 241 с.
2. Данилов-Данильян В. И., Гельфан А. Н., Мотовилов Ю. Г., Калугин А. С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. № 2. С. 111–122.
3. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. Моделирование яркостной температуры и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 51–65. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
4. Benoudjit A., Guida R. A novel fully automated mapping of the flood extent on SAR images using a supervised classifier // Remote Sensing. 2019. V. 11. Article 779. 22 p. DOI: 10.3390/rs11070779.
5. Chen R., Bennartz R. J. Sensitivity of 89–190-GHz microwave observations to ice particle scattering // J. Applied Meteorology and Climatology. 2020. V. 59. No. 7. P. 1195–1215. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0293.1>.
6. Katsaros K. B., Mitnik L. M., Black P. G. Microwave instruments for observing tropical cyclones // Typhoon Impacts and Crisis Management. Springer, 2014. P. 5–61.
7. Kubota T., Aonashi K., Ushio T. et al. Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era // Satellite Precipitation Measurement. Springer, 2020. P. 355–373. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20.
8. Manavalan R. SAR image analysis techniques for flood area mapping — literature survey // Earth Science Information. 2017. V. 10. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0274-2>.
9. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Zabolotskikh E. V. Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E // J. Remote Sensing Society of Japan. 2009. V. 29. No. 1. P. 156–165.
10. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. et al. Microwave radiometer MTVZA-GY on new Russian satellite Meteor-M No. 2-2 and sudden stratospheric warming over Antarctica // IEEE J. Selected Topics of Applied Remote Sensing. 2022. V. 15. P. 820–830. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3133425.
11. Tay C. W. J., Yun S. H., Chin S. T. et al. Rapid flood and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan // Scientific Data. 2020. V. 7. Article 100. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0443-5>.

12. Tupas M. E., Roth F., Bauer-Marschallinger B., Wagner W. An intercomparison of Sentinel-1 based change detection algorithms for flood mapping // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Article 1200. <https://doi.org/10.3390/rs1505120>.

Typhoon Hinnamnor (2022): Impact on the Far Eastern seas, Primorsky and Khabarovsk Krai based on active and passive microwave sensing data from space

L. M. Mitnik, A. V. Baraniuk, M. L. Mitnik

V. I. Ilyichev *Pacific Oceanological Institute FEB RAS*
Vladivostok 690041, Russia
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

The number of extreme weather events accompanied by gale force winds, heavy precipitation and flooding is increasing with global warming. The state of the sea surface, land cover and atmosphere as Typhoon Hinnamnor moved over the East China Sea, Sea of Japan, Sea of Okhotsk and the Far East region on September 5–9, 2022, was assessed using SAR images, brightness temperatures measured by AMSR2, GMI and MTVZA-GYa radiometers, radiosonde readings and meteorological station readings. To monitor floods and reduce damage, the space agencies of Korea on September 2 and Russia on September 4 activated the International Charter on Space and Major Disasters. Combining sensing data from various sensors over the disaster areas allowed reconstructing wind speed over the sea, precipitation intensity, atmospheric water vapor content, cloud liquid water content, flooding area and other parameters with spatial and temporal resolution unavailable from any single instrument.

Keywords: typhoon Hinnamnor, precipitation, flooding, SAR, Sentinel-1A, AMSR2, GPM, sea surface wind, cloud liquid water content, total atmospheric water vapor content, Amur basin, Primorsky Krai, Khabarovsk Krai

Accepted: 06.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-336-345

References

1. Gartzman B. I., *Dozhdevye navodneniya na rekakh yuga Dal'nego Vostoka: metody raschetov, prognozov, otsenok riska* (Rain floods on the rivers of the south of the Far East: methods of calculations, forecasts, risk assessments), Vladivostok: Dalnauka, 2008, 241 p. (in Russian).
2. Danilov-Danilyan V. I., Gelfan A. N., Motovilov Yu. G., Kalugin A. S., Catastrophic flood of 2013 in the Amur River basin: formation conditions, repeatability assessment, modeling result, *Water Resources*, 2014, No. 2, pp. 111–122 (in Russian), DOI: 10.1134/S0097807814020055.
3. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P. et al., Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 51–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
4. Benoudjit A., Guida R., A novel fully automated mapping of the flood extent on SAR images using a supervised classifier, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Article 779, 22 p., DOI: 10.3390/rs11070779.
5. Chen R., Bennartz R. J., Sensitivity of 89–190-GHz microwave observations to ice particle scattering, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2020, Vol. 59, No. 7, pp. 1195–1215, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0293.1>.
6. Katsaros K. B., Mitnik L. M., Black P. G., Microwave instruments for observing tropical cyclones, In: *Typhoon Impacts and Crisis Management*, Springer, 2014, pp. 5–61, DOI: 10.1007/978-3-642-40695-9_2.
7. Kubota T., Aonashi K., Ushio T. et al., Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era, In: *Satellite Precipitation Measurement*, Springer, 2020, pp. 355–373, https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20.

8. Manavalan R., SAR image analysis techniques for flood area mapping — literature survey, *Earth Science Information*, 2017, Vol. 10, pp. 1–14, <https://doi.org/10.1007/s12145-016-0274-2>.
9. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Zabolotskikh E. V., Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E, *J. Remote Sensing Society of Japan*, 2009, Vol. 29, No. 1, pp. 156–165.
10. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. et al., Microwave radiometer MTVZA-GY on new Russian satellite Meteor-M No. 2-2 and sudden stratospheric warming over Antarctica, *IEEE J. Selected Topics of Applied Remote Sensing*, 2022, Vol. 15, pp. 820–830, DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3133425.
11. Tay C. W. J., Yun S. H., Chin S. T. et al., Rapid flood and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan, *Scientific Data*, 2020, Vol. 7, Article 100, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0443-5>.
12. Tupas M. E., Roth F., Bauer-Marschallinger B., Wagner W., An intercomparison of Sentinel-1 based change detection algorithms for flood mapping, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Article 1200, <https://doi.org/10.3390/rs1505120>.