

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-3-113-126>

УДК 551.575

## **Оперативное детектирование областей потенциального тумана по данным геостационарного спутника Himawari-8**

***М.О. Кучма, Ю.А. Шамилова***

*Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», г. Хабаровск, Россия  
m.kuchma@dvrcpod.ru*

С учетом зарубежного опыта (Японского Метеорологического Агентства, Корейской Метеорологической Администрации) разработан алгоритм детектирования областей тумана по данным геостационарного спутника Himawari-8 для Дальневосточного региона России. Реализован программный продукт для построения карт вероятности тумана, выраженной в процентах. Проведена валидация по данным наземных наблюдений с 284 метеостанций за 2017–2021 гг. Вероятность правильного определения областей тумана (POD) составила 0.79, вероятность ложного определения (POFD) – 0.03, что превосходит зарубежные аналоги.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование Земли, туман, Himawari-8, коэффициент спектральной яркости, яркостная температура, WRF-ARW, пороговый алгоритм.

## **Near-real-time detection of potential fog by Himawari-8 geostationary satellite data**

***M.O. Kuchma, J.A. Shamilova***

*Far-Eastern Center of State Research Center  
for Space Hydrometeorology «Planeta», Khabarovsk, Russia  
m.kuchma@dvrcpod.ru*

An algorithm for detecting potential fog using the Himawari-8 geostationary satellite data for the Far Eastern region of Russia is developed with account of foreign experience (Japan Meteorological Agency, Korea Meteorological Administration). A software product was implemented for constructing a map of fog probabilities expressed in percentage. The validation performed for 284 weather stations for 2017–2021 showed that the probability of fog detection (POD) was 0.79, and the probability of false detection (POFD) was 0.03, which is better than the foreign analogs.

*Keywords:* remote sensing, fog, Himawari-8, reflectance, brightness temperature, WRF-ARW, threshold algorithm.

### **Введение**

По сравнению с другими метеорологическими явлениями, такими как ураган, гроза, снегопад, туман нельзя назвать грозной силой природы. Однако он оказывает заметное воздействие на условия жизни человека,

влияет на производственные процессы, работу и безопасность передвижения всех видов транспорта. Крайне разреженная и неравномерно распределенная сеть наземных наблюдений на Дальнем Востоке России не обеспечивает достаточного пространственного покрытия для оперативной оценки наличия тумана на неосвещенных наблюдениями территориях, особенно в прибрежных морских водах. Детектирование тумана с использованием геостационарного космического аппарата (КА) Himawari-8 может позволить осуществлять мониторинг этого явления на больших площадях с высокой временной дискретностью и существенно дополнить наблюдения наземных метеостанций.

По результатам исследований в Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета» реализован программный продукт для построения вероятностной карты областей тумана, результаты валидации которого подтверждают возможность его использования в оперативной практике.

### Обзор исследований и работ

Туман на спутниковых изображениях имеет некоторые отличительные от других типов объектов особенности. В видимом диапазоне длин волн электромагнитного спектра (вблизи 0.6 мкм) область тумана выглядит ярче, чем подстилающая поверхность, а его текстура более гладкая, чем у конвективных и перистых облаков [3, 6]. Однако его трудно различить на изображениях в инфракрасном диапазоне, особенно на длинах волн, близких к 11 мкм, поскольку туман возникает очень близко к поверхности земли [5].

В практике детектирования туманов наиболее распространен метод, который использует разницу яркостной температуры инфракрасного (IR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) каналов [4, 5, 13] с центральными длинами волн 11 мкм и 3.7 мкм соответственно. Этот метод применим для обнаружения тумана преимущественно в ночное время, поскольку днем SWIR регистрирует не только излучение поверхностью земли в ИК-диапазоне, но и ее отражающую способность в видимом диапазоне. Для обнаружения областей тумана в дневное время используется IR и канал в видимом диапазоне электромагнитного спектра [6]. В зонах рассвета и сумерек определение тумана осложняется тем, что характеристики каналов обладают переменчивыми свойствами [10–12], поэтому большинство алгоритмов не применимы для этого времени суток.

В Дальневосточном центре ФГБУ «НИЦ «Планета» для решения различных задач используются данные геостационарных КА, однако собственные наработки по обнаружению тумана отсутствуют. Поэтому авторами было решено провести анализ внедренных в оперативную практику зарубежных метеорологических агентств алгоритмов детектирования тумана, разработанных применительно к таким данным.

Так, был проанализирован алгоритм обнаружения тумана, предложенный Центром метеорологических спутников Японского Метеорологического Агентства (Meteorological Satellite Center / Japan Meteorological

Agency) на конференции The 8th Asia/Oceania Meteorological Satellite Users' Conference [7] по данным геостационарного КА Himawari-8 (далее – «Японский» алгоритм). В предложенном алгоритме для определения областей тумана используются только дневная и ночная зоны, разделенные зенитным углом Солнца  $90^\circ$ . Отличие работы алгоритма ночью и днем состоит в том, что ночью используется разница температур, а днем – пороговые значения для коэффициента спектральной яркости. Достоинством этого алгоритма является то, что в нем используются модельные данные на разных изобарических уровнях: относительная влажность на 700, 800, 925 гПа и на поверхности; температура на 700 гПа и на поверхности, то есть проведен глубокий анализ приземного слоя атмосферы.

В основе алгоритма обнаружения тумана [9], разработанного в Национальном центре метеорологических спутников Корейской Метеорологической Администрации (The National Meteorological Satellite Center (NMSC) in KMA) по данным геостационарного КА GEO-KOMPSAT (далее – «Корейский» алгоритм), лежит метод, который использует адаптивные пороги, минимизирующие разницу в точности обнаружения зон тумана между днем и ночью. Для этого зона обнаружения делится на три участка, зависящие от зенитного угла Солнца: ночная зона, зоны рассвета и заката, дневная зона. Для разделения зон использовались пороговые значения различных характеристик: разница яркостных температур – для всех зон, альбедо – для дневной зоны и зон рассвета и заката. Помимо деления на зоны, определяющими факторами, влияющими на детектирование области тумана, определены: отсутствие облаков на высоте 1800 метров; верхний порог разности между инфракрасным излучением и температурой у поверхности земли, равный 10 градусам; относительная влажность у поверхности, превышающая 90 %; скорость ветра у поверхности менее 2,5 метров в секунду. Температура, относительная влажность и скорость ветра у поверхности земли получены из модели AWS (Automatic Weather System, Seoul, Korea.).

Апробация этих алгоритмов применительно к территории Дальнего Востока России показала, что алгоритмы нуждаются в доработке, поскольку в большинстве случаев туман фиксировался там, где он по факту не наблюдался. Стоит также отметить, что оба рассмотренных алгоритма работают только в теплое время года, когда яркостная температура IR больше 263 К.

### **Решение задачи определения области потенциального тумана**

Для решения задачи определения областей тумана на Дальнем Востоке России было решено использовать часть методов из рассмотренных выше алгоритмов, которые позволяют наиболее детально рассмотреть процессы, происходящие в атмосфере: метод адаптивных порогов из «Корейского» алгоритма и глубокий анализ приземного слоя атмосферы

из «Японского» алгоритма. Также был добавлен анализ дополнительных физических параметров и величин: скорость ветра на различных изобарических уровнях, полученных из модели численного прогноза погоды (ЧПП) WRF-ARW [2]; эффективный радиус рассеивания частиц, полученный программным комплексом «PlanetaCloudsGS» [1]; рельеф местности, в качестве которого были использованы данные цифровой модели рельефа NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) [8].

В результате для данных прибора Advanced Himawari Imager (AHI), установленного на японском геостационарном КА Himawari-8, был получен алгоритм, на первом этапе которого отсекаются пиксели, где:

- яркостная температура IR меньше 263 К;
- относительная влажность на 700 гПа больше 90 %;
- яркостная температура IR канала меньше температуры ЧПП на 700 гПа;
- модуль разницы между яркостной температурой IR и температурой поверхности больше 18 К.

На втором этапе алгоритма происходит глубокий анализ приземного слоя атмосферы: относительная влажность у поверхности должна быть больше относительной влажности на уровнях 950, 850 и 700 гПа, а скорость ветра у поверхности и на уровнях 1000, 950 и 850 гПа должна быть не более 4, 5, 7.5 и 9 м/с соответственно [3].

На третьем этапе алгоритма область делится на 4 зоны, ограниченные зенитным углом Солнца: дневная зона (0–60°), зона рассвета (60–78°), зона сумерек (78–89°) и ночная зона (>89°).

На четвертом этапе алгоритма отсекаются значения, которые выходят за границы пороговых значений для следующих параметров:

- коэффициента спектральной яркости (КСЯ) для зон рассвета, сумерек и дневной зоны;
- эффективного радиуса частиц для дневной зоны;
- разницы яркостной температуры IR и SWIR для ночной зоны.

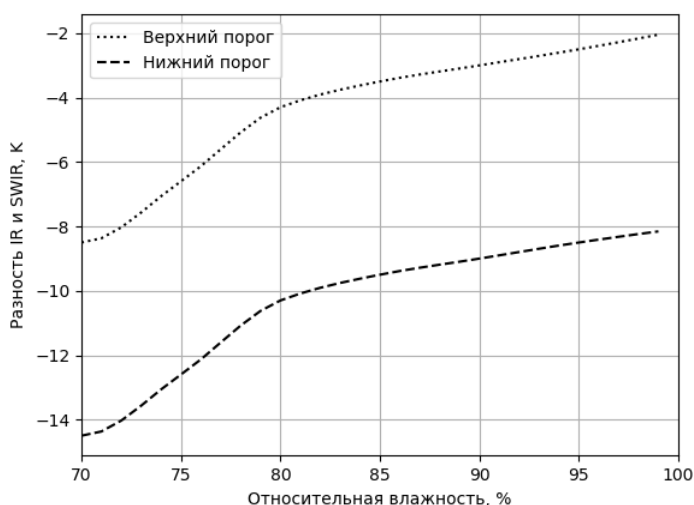
Пороговые значения КСЯ для различных зон были подобраны эмпирическим методом. Так, для дневной зоны верхний и нижний пороги составили 60 и 26 % соответственно. Для зоны рассвета к этим порогам прибавлялась величина, обратная трети от косинуса зенитного угла Солнца, а для зоны сумерек – величина, обратная косинусу зенитного угла Солнца. В результате удалось минимизировать ложные обнаружения тумана в утренние часы.

Пороговое значение для эффективного радиуса частиц было выбрано согласно [3] и составило 90 мкм. Таким образом пиксели, в которых значение этого параметра превышало порог, отсекались.

В ходе исследования было установлено, что в зоне рассвета и сумерек значения КСЯ начинают увеличиваться обратно пропорционально

зенитному углу Солнца, в особенности когда он больше  $80^\circ$ , и при постоянных пороговых значениях как туман детектируется облачность, что вызывает погрешность. Эмпирическим методом было установлено, что для минимизации такой погрешности необходимо к заданному пороговому значению прибавить величину, обратную косинусу зенитного угла Солнца.

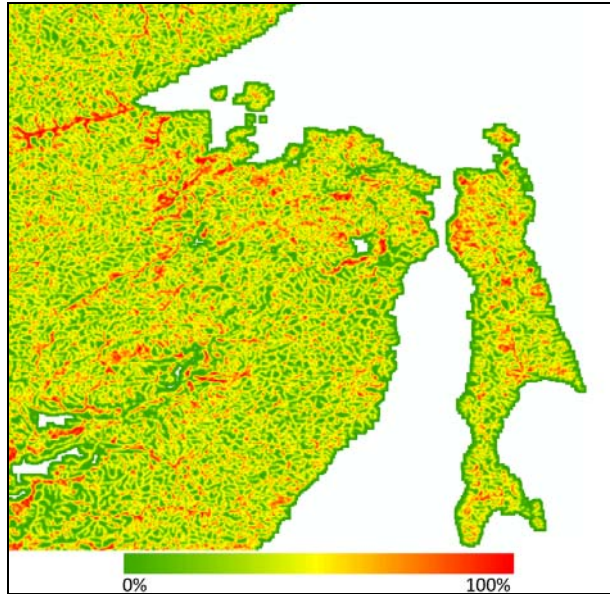
Пороговые значения разности яркостной температуры IR и SWIR меняются в зависимости от относительной влажности у поверхности – чем выше влажность, тем меньше пороги. Нижние и верхние пороговые значения были установлены эмпирическим методом для диапазона относительной влажности 70–100 % (рис. 1).



**Рис. 1.** Пороговые значения для разности яркостных температур IR и SWIR.  
**Fig. 1.** Threshold values for brightness temperature differenc IR and SWIR.

На пятом этапе работы алгоритма строится предварительная вероятностная карта, выраженная в процентах. Под вероятностью понимается положительная разность между температурой у поверхности из ЧПП и яркостной температурой IR – чем меньше разница, тем больше вероятность.

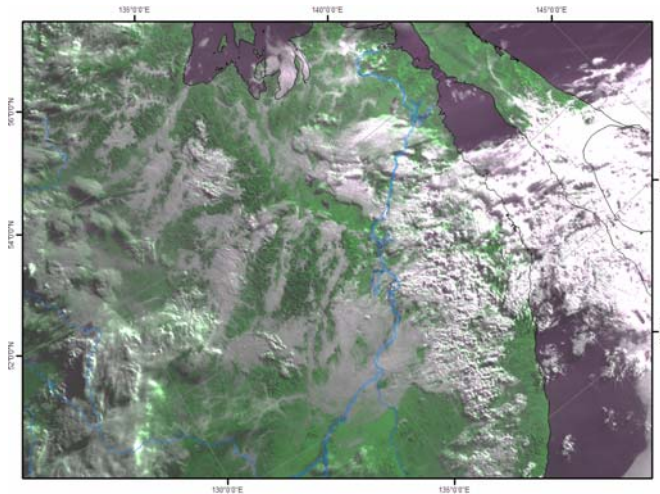
Известно, что в гористой местности туман чаще и интенсивнее образуется в горных долинах. Поэтому на шестом, заключительном этапе анализируется рельеф местности и для областей, которые являются горными долинами, дополнительно увеличивается вероятность тумана. По цифровой модели рельефа вычислялись перепады высот, которые далее в процентном соотношении преобразовывались в карту вероятности, где значение 100 % является горной долиной, 0 % – верхней точкой местности. Пример карты представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Пример карты перепадов высот для части территории Дальневосточного региона России, выраженных в процентах.

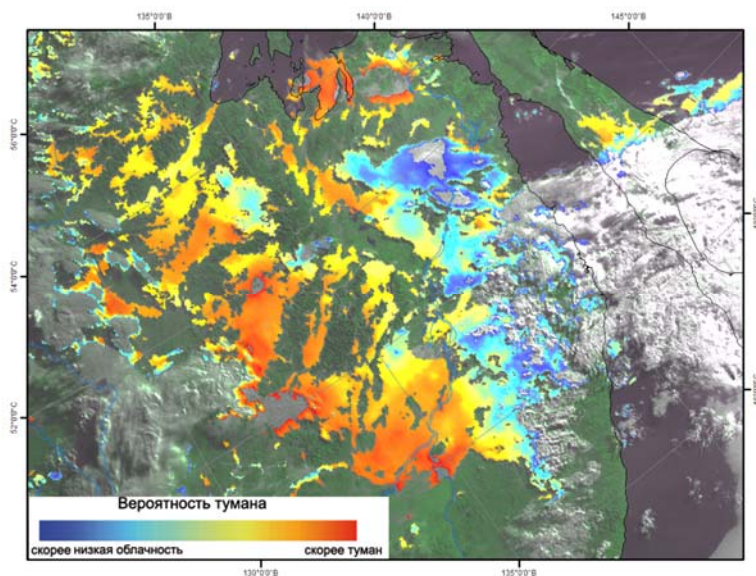
**Fig. 2.** An example of a map of elevation changes for a part of the territory of the Far Eastern region of Russia, expressed as a percentage.

Пример исходного мультиспектрального изображения по данным КА Himawari-8 за 19.08.2018 21.00 ч ВСВ показан на рис. 3; на рис. 4 – этого же изображения, совмещенного с картой вероятностного тумана.



**Рис. 3.** Мультиспектральное изображение по данным КА Himawari-8 за 19.08.2018, 21.00 ч ВСВ.

**Fig. 3.** Multispectral image according to Himawari-8 data for 19.08.2018 21:00 UTC.



**Рис. 4.** Мультиспектральное изображение по данным КА Himawari-8 за 19.08.2018, 21.00 ч ВСВ, совмещенное с картой вероятности тумана.

**Fig. 4.** Multispectral image according to Himawari-8 data for 19.08.2018 21:00 UTC, combined with a fog probability map.

### Валидация

На первом этапе для визуальной оценки точности работы алгоритма использовались кольцевые карты погоды, распространяемые в ведомственной сети Росгидромета. Пример такой карты представлен на рис. 5, где наблюдаемое на метеостанциях явление «туман» выделено желтым цветом. Здесь и далее под явлением «туман» имеются ввиду значения 11, 12, 40–49 из поля «ww – текущая погода» телеграммы в коде КН-01 SYNOP. На рис. 6 показана карта вероятности тумана, на которую нанесены фактически наблюдаемые на метеостанциях туманы, отображенные на кольцевой карте погоды.

Анализируя информацию на рис. 5 и рис. 6, можно сделать вывод, что практически во всех случаях ненулевое значение вероятности тумана рассчитанным алгоритмом совпадает с наблюдаемым туманом на метеостанции. Тем не менее на карте наблюдаются места, где алгоритм не обнаружил туман. Это связано с наличием плотной облачности, экранирующей области тумана, что исключает возможность осуществить его детектирование в видимом и ИК-диапазонах длин волн, поэтому такие случаи в дальнейшем не попадали в расчет для валидации.

Далее было проведено визуальное сравнение рассчитываемых алгоритмом карт тумана с аналогичными, рассчитанными «Корейским» алгоритмом, за этот же срок (рис. 7) (данные взяты из [nmssc.kma.go.kr](http://nmssc.kma.go.kr)).

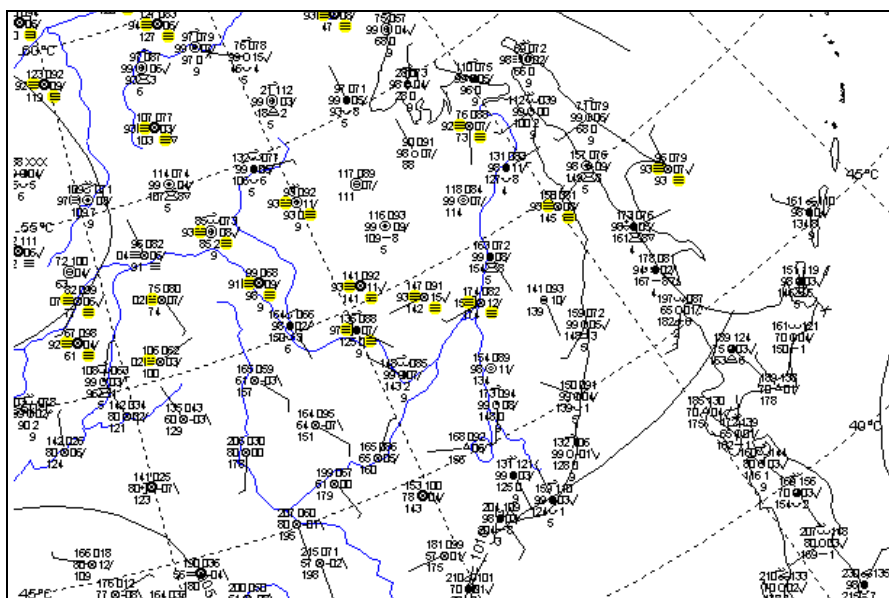


Рис. 5. Кольцевая карта погоды за 19.08.2018, 21.00 ч ВСВ.

Fig. 5. Weather map for 19.08.2018 at 21:00 UTC.

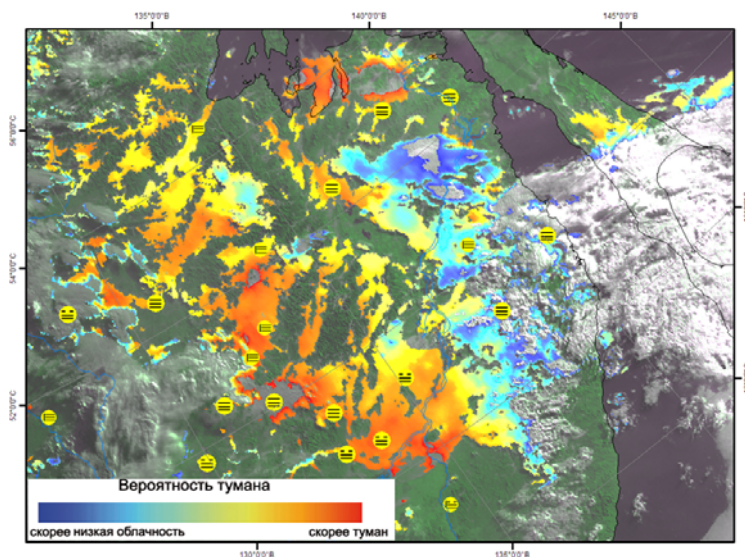
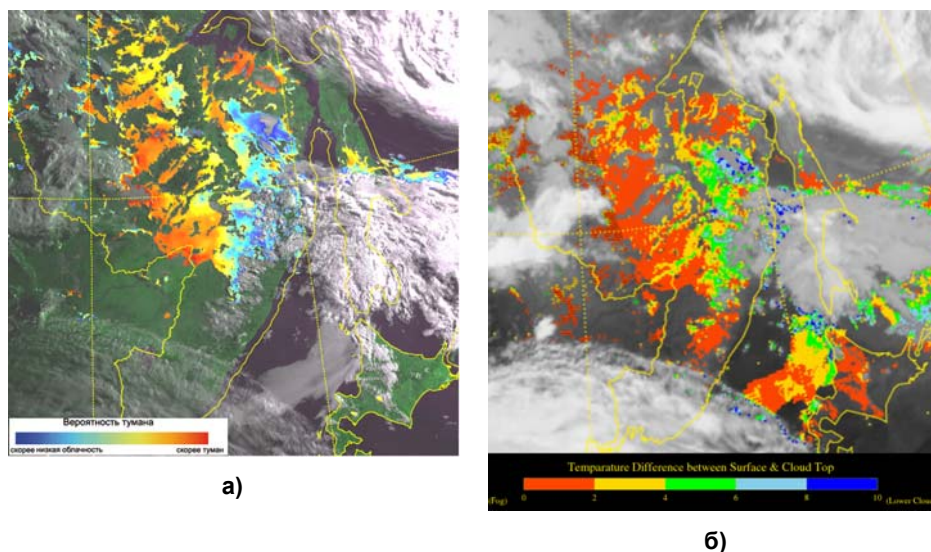


Рис. 6. Карта вероятности тумана с нанесенными фактически наблюдаемыми туманами на метеостанциях из кольцевой карты погоды за 19.08.2018, 21.00 ч ВСВ.

Fig. 6. Fog probability map plotted with actually observed fogs at stations from the weather map for 19.08.2018 at 21:00 UTC.





**Рис. 7.** Визуальное сравнение карт вероятности тумана: разработанный авторами алгоритм (а); «Корейский» алгоритм (б).

**Fig. 7.** Visual comparison of fog probability maps: algorithm developed by the authors (а); "Korean" algorithm (б).

Анализируя информацию на рис. 7, можно отметить, что над сушей разработанный алгоритм детектирует меньшие области тумана и больше соответствует данным наземных наблюдений (рис. 5). Над морской акваторией «Корейский» алгоритм обнаружил большую область тумана у берегов о. Хоккайдо, в то время как разработанный алгоритм эту область не идентифицировал как туман, что также подтверждается данными прибрежных метеостанций наблюдательной сети.

Помимо визуального сравнения, валидация проводилась по данным телеграмм в коде КН-01 SYNOP, получаемым каждые три часа с сети наземных измерений. Всего было задействовано 284 наземных метеостанции на территории Приморского, Камчатского и Хабаровского краев, а также Амурской и Магаданской областей. Валидация проводилась отдельно по каждому из представленных субъектов, отдельно по каждому сезону (кроме зимы), а также в совокупности вышеописанных факторов. Временной период был выбран с марта по ноябрь 2017–2021 гг. Всего было проанализировано около 40 тысяч случаев зафиксированного тумана и около 825 тысяч случаев отсутствия тумана.

Для оценки результатов с использованием матрицы ошибок (табл. 1) рассчитывались такие параметры, как вероятность правильного определения события (POD), вероятность ложного определения события (POFD) и коэффициент ложного определения события (FAR) (табл. 2).

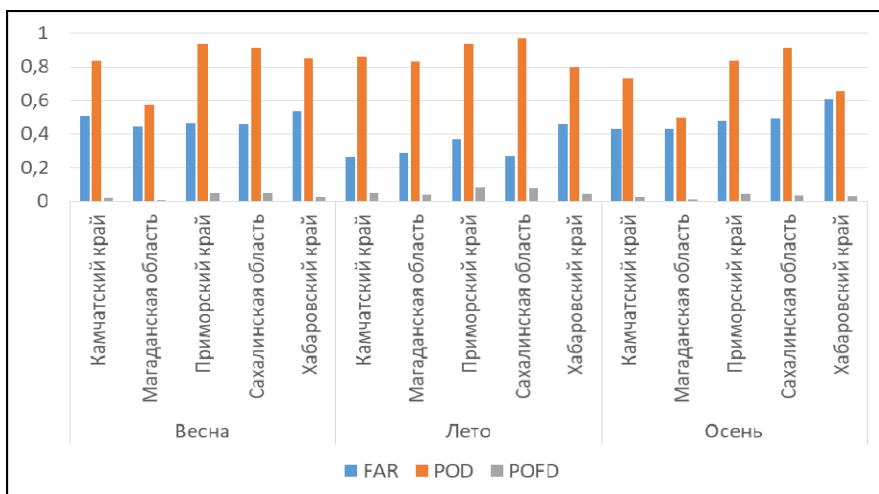
**Таблица 1.** Матрица ошибок  
**Table 1.** Confusion matrix

		Наблюдаемое событие	
		Да	Нет
Рассчитанное событие	Да	a (правильно определенное событие)	b (ошибка)
	Нет	c (не определенное событие)	d (правильно определенное отсутствие события)

**Таблица 2.** Рассчитываемые коэффициенты  
**Table 2.** Calculated coefficients

Probability Of Detection (POD) (Вероятность определения)	$a/(a+c)$
Probability Of False Detection (POFD) (Вероятность ложного определения)	$b/(b+d)$
False Alarm Ratio (FAR) (коэффициент ложного определения события)	$b/(a+b)$

Валидация по субъектам для различных сезонов представлена на рис. 8. Валидация по всем сезонам, как в отдельности, так и в совокупности для различных субъектов, представлена в табл. 3.



**Рис. 8.** Валидация по сезонам и субъектам Дальневосточного региона России.

**Fig. 8.** Validation by seasons and subjects of the Far East region of Russia.

**Таблица 3.** Валидация алгоритма  
**Table 3.** Algorithm validation

Сезон	Субъекты	FAR	POD	POFD
Весна	Камчатский край	0.51	0.83	0.02
	Магаданская область	0.44	0.57	0.01
	Приморский край	0.46	0.94	0.05
	Сахалинская область	0.46	0.91	0.05
	Хабаровский край	0.54	0.85	0.02
	Все субъекты	0.49	0.85	0.02
Лето	Камчатский край	0.26	0.86	0.05
	Магаданская область	0.29	0.83	0.04
	Приморский край	0.37	0.94	0.08
	Сахалинская область	0.27	0.97	0.08
	Хабаровский край	0.46	0.80	0.05
	Все субъекты	0.35	0.89	0.05
Осень	Камчатский край	0.43	0.73	0.02
	Магаданская область	0.43	0.50	0.01
	Приморский край	0.48	0.83	0.04
	Сахалинская область	0.49	0.92	0.04
	Хабаровский край	0.61	0.66	0.03
	Все субъекты	0.50	0.73	0.02
Все сезоны	Камчатский край	0.34	0.82	0.02
	Магаданская область	0.32	0.63	0.02
	Приморский край	0.41	0.92	0.06
	Сахалинская область	0.35	0.95	0.04
	Хабаровский край	0.51	0.77	0.03
	Все субъекты	0.40	0.79	0.03

Значение POFD измеряется от 0 до 1, и чем меньше это значение, тем меньше вероятность того, что событие определится как ложное. Таким образом, рассчитанное значение POFD, которое составило 0.03, говорит о том, что с вероятностью 3 % рассматриваемое событие определится ошибочно. Учитывая, что POD и FAR для «Корейского» алгоритма составили 0.49 и 0.9 соответственно [9], а по данным рис. 5 и табл. 3 – в среднем 0.79 и 0.4, можно сделать вывод, что разработанный алгоритм не уступает по точности зарубежному аналогу, а в основном превосходит

его, особенно в части ложного обнаружения. Это подтверждает, что автограм удалось существенно снизить ложные детектирования и повысить вероятность правильно определения тумана.

### Заключение

Полученный алгоритм детектирования тумана по данным прибора АНГ геостационарного КА Himawari-8, описание которого приводится в работе, основывается на анализе спутниковых данных и данных ЧПП WRF-ARW у поверхности земли и на различных изобарических уровнях, что в совокупности позволяет достигнуть высокой точности обнаружения тумана.

Основным достоинством разработанного алгоритма является снижение ложного определения тумана, которое достигнуто за счет объединения наиболее эффективных элементов зарубежных алгоритмов и модификации пороговых значений под особенности Дальневосточного региона России. Валидация, проведенная по данным наземных наблюдений с 284 метеостанций за 2017–2021 гг., показала, что значения POD, FAR и POFD составили 0.79, 0.4 и 0.03 соответственно, что превосходит зарубежные аналоги и позволяет использовать полученный алгоритм в оперативной практике региональных подразделений Росгидромета.

В планах по развитию алгоритма стоит его перенос на данные отечественных геостационарных КА серии «Электро-Л» и высокоэллиптических КА серии «Арктика-М».

### Список литературы

1. *Адамов А.Я., Шамилова Ю.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "PlanetaCloudsGS" № 2017610084 Программа "PlanetaCloudsGS". Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2017 г.
2. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW "Хаб-15" в пунктах Дальневосточного региона России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. Информационный сборник № 43. С. 32-62.
3. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии: Изд. 2-е. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
4. *Ahn M.H., Sohn E.H., Whang B.J.* A new algorithm for fog/stratus detection using GMS-5 IR data // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2003. Vol. 20. P. 899-913.
5. *Ellrod G.P.* Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multi-spectral infrared imagery // *Weather Forecasting*. 1995. Vol. 10. P. 606-619.
6. *Gultepe I., Pagowski M., Reid J.* A satellite-Based Fog Detection Scheme Using Screen Air Temperature // *Weather Forecasting*. 2007. Vol. 22. P. 444-456.
7. *Ioka Y., Maruyama T., Ishida H., Chubachi K.* Improvement of Fog Detection by Adjustment of Night Microphysics RGB Image and Developing fog Detection Product // *Proceedings of the the "8th Asia/Oceania Meteorological Satellite Users Conference, AOMSUC-8: Thesis"*. Vladivostok, 2017, available at: [http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/08/S5-5\\_Ioka.pdf](http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/08/S5-5_Ioka.pdf)

8. *Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E.* Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database, 2008, available at: <https://srtm.csi.cgiar.org>

9. *Lee J.R.* Fog Detection (FOG) Algorithm Theoretical Basis Document // National Meteorological Satellite Center. 2012. Issue 1. Rev. 0. P. 18

10. *Lee T.F., Turk J., Richardson K.* Stratus and Fog Products Using GOES-8-9 3.9-um Data // *Weather Forecasting*. 1997. Vol. 12. P. 664-677.

11. *Schreiner A.J., Ackerman S.A., Baum B.A., Heidinger A.K.* A Multispectral Technique for Detecting Low-Level Cloudiness near Sunrise // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2007. Vol. 24. P. 1800-1810.

12. *Turk J., Vivekanandan J., Lee T., Durkee P., Nielsen K.* Derivation and Applications of Near-Infrared Cloud Reflectances from GOES-8 and GOES-9 // *Amer. Meteor. Soc.* 1998. Vol. 37. P. 819-831.

13. *Turner J., Allam R.J., Maine D.R.* A case study of the detection of fog at night using channel 3 and 4 on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) // *Meteorol. Mag.* 1986. Vol. 115. P. 285-290.

## References

1. *Adamov A.Ja., Shamilova Ju.A.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM "PlanetaCloudsGS" № 2017610084 Programma "PlanetaCloudsGS". Zaregistrirvano v Reestre programm dlja JeVM 9 janvarja 2017 g. [Certificate of state registration of the computer program "PlanetaCloudsGS" No. 2017610084 Program "PlanetaCloudsGS". Registered in the Register of Computer Programs on January 9, 2017] [in Russ.].

2. *Verbitskaya E.M., Romanskii S.O.* Rezul'taty ispytaniy kratkosrochnykh operativnykh prognozov mezomasshtabnoi modeli WRF-ARW "KhAB-15" v punktakh Dal'nevostochnogo regiona Rossii [The results of short-term operational forecasts of the mesoscale model WRF-ARW "HUB-15" in the points of the Far Eastern region of Russia], *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [The results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts], 2016, vol. 43, pp. 32-62 [in Russ.].

3. *Matveev L.T.* Kurs obshhej meteorologii [General meteorology course]: 2nd Edition. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1984, 751 p. [in Russ.].

4. *Ahn M.H., Sohn E.H., Whang B.J.* A new algorithm for fog/stratus detection using GMS-5 IR data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, vol. 20, pp. 899-913. DOI: 10.1007/BF02915513.

5. *Ellrod G.P.* Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multi-spectral infrared imagery. *Weather Forecasting*, 1995, vol. 10, pp. 606-619. DOI: 10.1175/1520-0434(1995)010<0606:AITDAA>2.0.CO;2.

6. *Gultepe I., Pagowski M., Reid J.* A satellite-Based Fog DetectionScheme Using Screen Air Temperature. *Weather Forecasting*, 2007, vol. 22, pp. 444-456. DOI:10.1175/WAF1011.1.

7. *Ioka Y., Maruyama T., Ishida H., Chubachi K.* Improvement of Fog Detection by Adjustment of Night Microphysics RGB Image and Developing fog Detection Product. Proceedings of the The "8th Asia/Oceania Meteorological Satellite Users Conference, AOMSUC-8: Thesis". Vladivostok, 2017, available at: [http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/08/SS-5\\_Ioka.pdf](http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/08/SS-5_Ioka.pdf).

8. *Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E.* Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database, 2008, available at: <https://srtm.csi.cgiar.org>.

9. *Lee J.R.* Fog Detection (FOG) Algorithm Theoretical Basis Document. *National Meteorological Satellite Center*, 2012, issue 1, rev. 0, 18 p.

10. *Lee T.F., Turk J., Richardson K.* Stratus and Fog Products Using GOES-8-9 3.9-um Data. *Weather Forecast*, 1997, vol. 12, pp. 664-677.

11. Schreiner A.J., Ackerman S.A., Baum B.A., Heidinger A.K. A Multispectral Technique for Detecting Low-Level Cloudiness near Sunrise. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2007, vol. 24, pp. 1800-1810. DOI:10.1175/JTECH2092.1.

12. Turk J., Vivekanandan J., Lee T., Durkee P., Nielsen K. Derivation and Applications of Near-Infrared Cloud Reflectances from GOES-8 and GOES-9. *Amer. Meteor. Soc.*, 1998, vol. 37, pp. 819-831. DOI: 10.1175/1520-0450(1998)037<0819:DAAONI>2.0.CO;2.

13. Turner J., Allam R.J., Maine D.R. A case study of the detection of fog at night using channel 3 and 4 on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *Meteorol. Mag.*, 1986, vol. 115, pp. 285-290.

*Поступила 01.06.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022;  
принята в печать 23.10.2022.*

*Submitted 01.06.2022; approved after reviewing 07.09.2022;  
accepted for publication 23.10.2022.*