

**ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ  
СИЛ «ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ  
ИМЕНИ ПРОФЕССОРА Н.Е.ЖУКОВСКОГО И Ю.А.ГАГАРИНА»  
(г. Воронеж)**

**И.П. Расторгуев**

**ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ КОНВЕКТИВНОЙ ОБЛАЧНОСТИ И ЯВЛЕНИЙ  
ПОГОДЫ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ ПО ДАННЫМ  
СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

На протяжении последних десятилетий выработаны и реализованы в практической деятельности надежные способы анализа и прогноза конвективной облачности и явлений погоды, в том числе базирующихся на современных высокоэффективных технологиях радиолокационного и спутникового зондирования атмосферы.

Однако современные методы мониторинга метеорологических условий, не всегда реализуемые вследствие отсутствия соответствующей материальной и технологической базы. Сказанное в полной мере относится к юго-восточной Африке. В частности, проблема дефицита исходных данных актуальна при метеорологическом обеспечении авиации Военно-воздушных сил республики Мозамбик.



**Цель работы:**

**совершенствование методики мониторинга конвективных явлений погоды на основе использования аналоговой спутниковой информации доступной национальной ведомственной метеорологической службе**

В ходе проведенного исследования в качестве исходных данных использовались данные получасовых наземных метеорологических наблюдений в аэропортах и синхронные им аналоговые снимки с геостационарных метеорологических космических аппаратов (рисунок 1) за 2018-2020 годы.

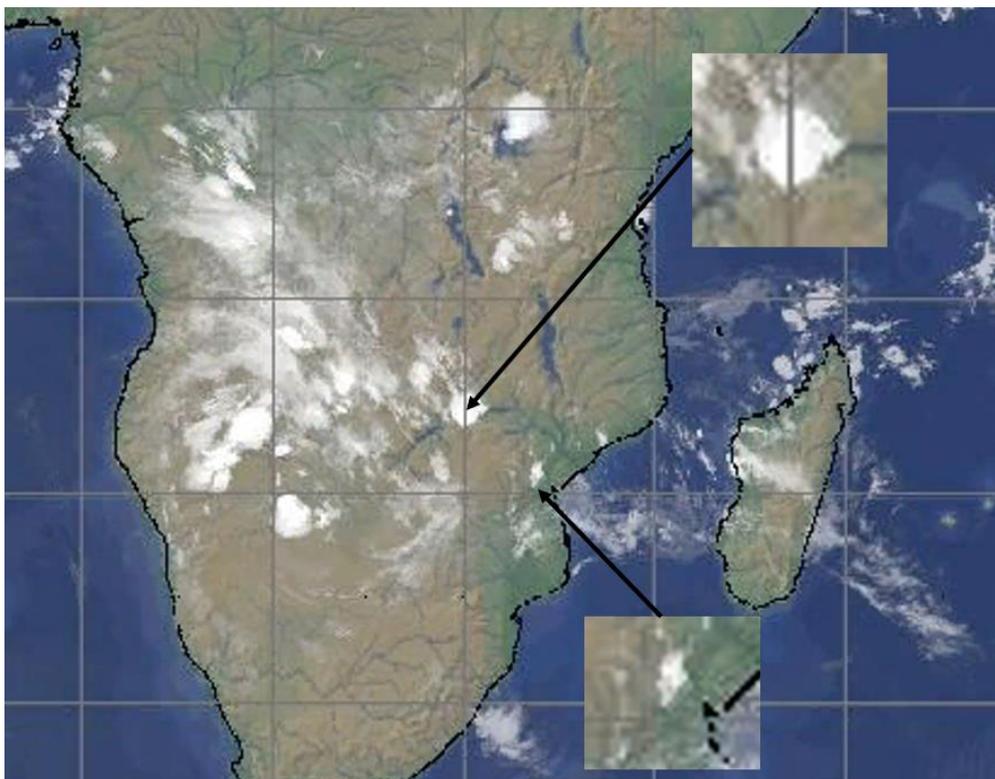


Рис. 1. Район исследования на спутниковом снимке и объекты метеорологического мониторинга

Обработка спутниковых снимков производилась с использованием стандартной программы - просмотрщика электронных изображений.

Предварительно проводилось контрастирование изображения - значение контрастности выводилось на максимальное значение (рисунок 2).

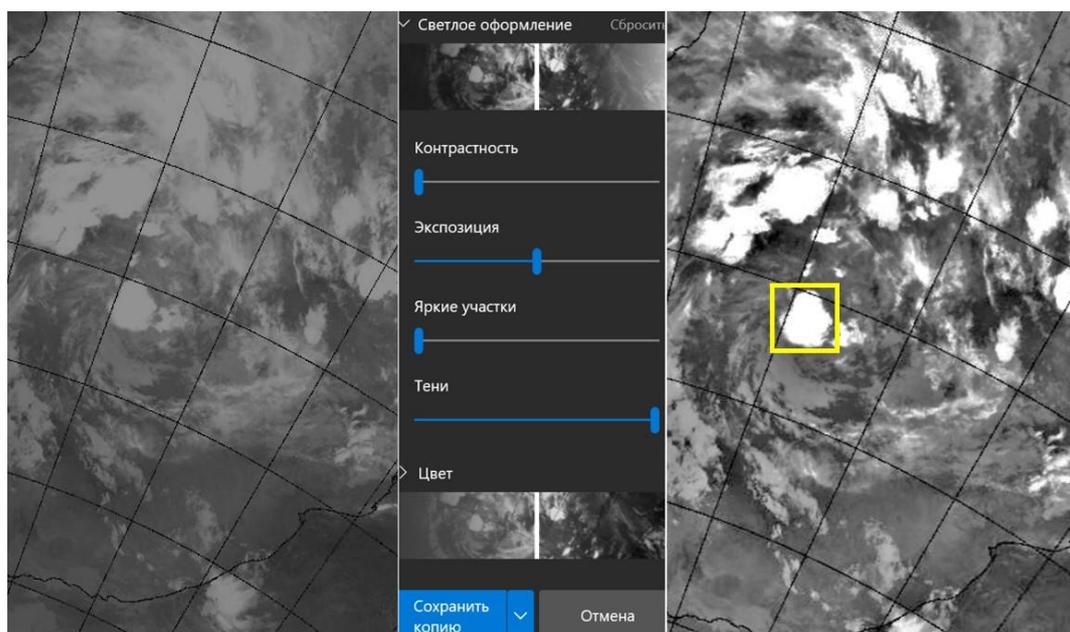


Рис. 2. Исходный снимок и снимок после контрастирования изображения с выделенным фрагментом

Далее отбирались снимки с текстурой и мезоструктурой, характерной для конвективной облачности. Выделялись отдельные фрагменты с отметками от конвективной облачности и обрабатывались штатными средствами обработки изображений (рисунок 3).

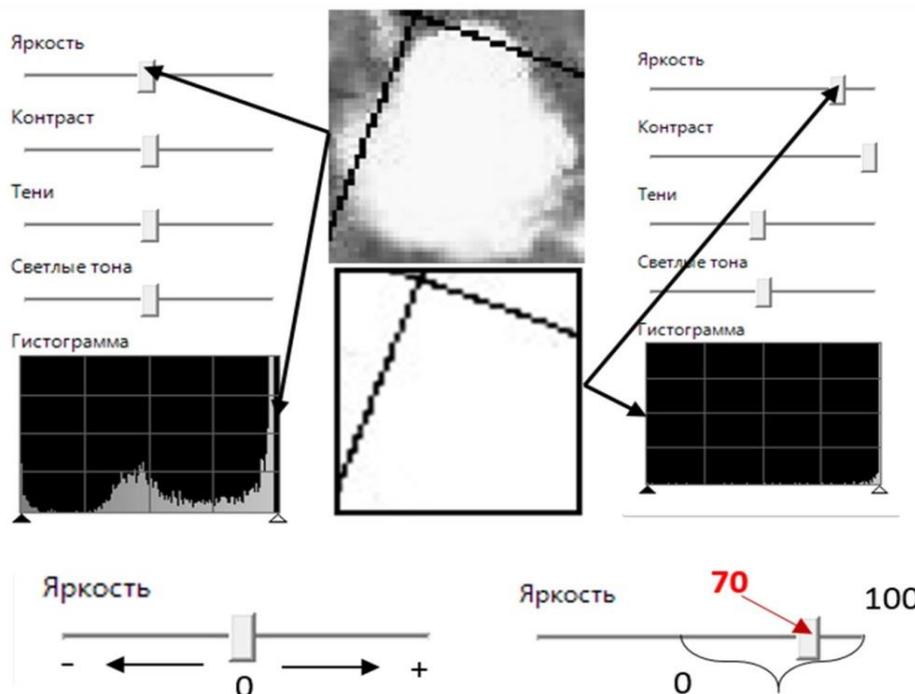


Рис. 3. Схема методики обработки спутникового снимка

На следующем этапе по данным наземных наблюдений в подоблачном географическом пространстве определялась степень развития конвекции по следующим градациям:

- 1) скопления кучевых плоских или средних облаков,
- 2) мощно-кучевая облачность,
- 3) кучево-дождевая облачность без явлений,
- 4) кучево-дождевая с ливневым дождём,
- 5) кучево-дождевая с ливневым дождём и грозой,
- 6) кучево-дождевая с градом (и или шквалом).

Рассматривалась облачность в радиусе до 50 км от пунктов наземных наблюдений и временной разнесённостью не более 10 минут.

Далее для каждого фрагмента были определены значения яркости в безразмерных единицах (максимум - 100). Определялись эти значения следующим образом: исходное значение принималось за «ноль», производилось уменьшение яркости до сливания отметки от облачности с фоном и появления характерной «гистограммы яркости» (пустой). На рисунке 3 такие условия достигаются при уменьшении яркости до значения 70 единиц.

На завершающем этапе для каждой градации развития конвекции определялись критические значения яркости, при достижении которой диагностируется именно эта градация. Определение критических значений производилось из условия 30% обеспеченности достижения данной градации, исходя из большей «цены» ошибки пропуска.

Использование представленной методики и решающего правила было проверено на независимом материале (таблица 1).

Таблица 1

## Характеристики дешифрирования конвективной облачности и явлений (%)

| Характеристика<br>Выборка | Число<br>случаев | Попало в<br>градацию | В<br>соседней<br>градации | Ошибка<br>более<br>градации | С<br>занижением<br>градации |
|---------------------------|------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Обучающая                 | 360              | 73,6                 | 22,2                      | 4,2                         | 5,6                         |
| Контрольная               | 180              | 66,7                 | 27,8                      | 5,5                         | 12,7                        |

Можно сделать вывод, что существенные ошибки в определении степени развития конвекции составляют 18,2% (ошибка более градации и занижение градации).

На следующем этапе исследования, исходя из анализа климатических особенностей отдельных территорий разрабатывались диагностические правила отдельно для субэкваториальной зоны (север страны – 1-й район) и тропического климата (юг рассматриваемого района – 2-й район). Были установлены следующие значения критических яркостей (таблица 2).

Таблица 2

## Критериальные значения конвективной облачности

| Район     | Градации развития конвекции |                 |    |                |                           |  |
|-----------|-----------------------------|-----------------|----|----------------|---------------------------|--|
|           | Cu,<br>Cu med               | Cu <sup>2</sup> | Cb | Cb +<br>ливень | Cb +<br>ливень +<br>гроза | Cb + ливень<br>+ гроза +<br>град/шквал |
| 1-й район | 55                          | 62              | 75 | 83             | 92                        | 97*                                    |
| 2-й район | 57                          | 65              | 78 | 86             | 91                        | 95*                                    |

Результаты проверки успешности представленного подхода на независимой выборке представлены в таблице 3.

Таблица 3

## Характеристики дешифрирования конвективной облачности и явлений погоды дифференцированно по отдельным районам (%)

| Харак-тика<br>Район | Число<br>случаев | Попало в<br>градацию | В соседней<br>градации | Ошибка<br>более<br>градации | С<br>занижением<br>градации |
|---------------------|------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1-й район           | 99<br>(195)      | 74,7<br>(76,4)       | 21,2<br>(24,2)         | 4,1<br>(5,1)                | 8,1<br>(4,6)                |
| 2-й район           | 95<br>(181)      | 75,8<br>(78,5)       | 18,9<br>(15,5)         | 5,3<br>(6,1)                | 9,5<br>(3,9)                |

Из приведенных данных видно, что «попадание» дешифрирования точно в наблюдаемую градацию (по контрольной выборке) наблюдалось для 1-го района в 74,7%, для 2-го района – 75,8%, что соответственно на 8,0% и 9,1% выше, чем при реализации правил общих для всей территории, без дифференциации по районам.

К ошибочной классификации следует отнести ошибки дешифрирования более, чем в одну градацию и с занижением градации. Таких случаев оказалось 12,2% и 14,8% соответственно для первого и второго района.

По всем показателям дешифрование по правилам для отдельных климатических районов оказалось более успешным.

Помимо данных о фактическом развитии конвекции в практической деятельности необходимы сведения о дальнейшей эволюции конвективной облачности и связанных с ней явлений погоды.

С целью получения прогностической информации были разработаны прогностические уравнения для разработки сверхкраткосрочного прогноза конвективной деятельности на примере северной части (области субэкваториального климата) рассматриваемой территории.

Была составлена архивная выборка из 150 случаев (100 – для разработки уравнения, 50 – для его проверки на независимом материале).

На основе значений предшествующих значений максимальной яркости и их динамики прогнозировалось значение ожидаемой яркости через один час. В качестве предикторов использовались следующие величины:

- $B_1$  – значение яркости за один час до производства расчетов;
- $B_2$  – значение яркости за 30 минут до производства расчетов;
- $B_3$  – фактическое значение яркости (на момент производства расчетов);
- $\Delta B_2 B_1$  – изменение значения яркости между первым и вторым рассматриваемыми сроками наблюдения;
- $\Delta B_3 B_2$  – изменение значения яркости между вторым и третьим рассматриваемыми сроками наблюдения;
- $\Delta B_3 B_1$  – изменение значения яркости между первым и третьим рассматриваемыми сроками наблюдения.

Поскольку развитие конвекции в условиях субтропического климата на территории Мозамбика имеет выраженный суточный ход, то уравнения разрабатывались отдельно для первой половины дня – на период развития конвекции, и для второй половины дня – для периода размывания конвективных облаков. Эмпирическим способом был определен пик развития конвекции в суточном ходе – 13-14 часом, который и был принят за границу между первой и второй половиной дня.

С использованием стандартной процедуры пошаговой линейной регрессии были получены уравнения 1, 2, соответственно для первой и второй половины дня:

$$B = 0,950B_3 + 1,285\Delta B_3 B_2 + 2,931 \quad (1)$$

$$B = 0,952B_3 + 1,276\Delta B_3 B_2 + 2,514 \quad (2)$$

Коэффициент детерминации для первого уравнения равен 0,94, для второго 0,92, среднеквадратическая ошибка составила 2,3% и 3,3%. При проверке на независимом материале наблюдалось незначительное увеличение ошибки – до 2,7% и 4,5%.

Далее прогноз градации развития конвекции проводился аналогично методике мониторинга (диагностики) развития конвекции, только по расчетным значениям яркости.

Результаты расчетов успешности представленного подхода представлены в таблице 4.

Характеристики сверхкраткосрочного прогнозирования градаций конвективной облачности и явлений (по контрольной выборке) (%)

| Харак-тика<br>Период | Число случаев | Попало в градацию | В соседней градации | Ошибка более градации | С занижением градации |
|----------------------|---------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1-й период           | 50            | 74,0              | 20,0                | 6,0                   | 6,0                   |
| 2-й период           | 50            | 68,0              | 22,0                | 10,0                  | 6,0                   |

Как видно из таблицы, критерии успешности прогностических уравнений, практически не уступают процедуре восстановления значений. Это связано с небольшой заблаговременностью прогноза (один час).

Таким образом, показана возможность не только восстановления, но и сверхкраткосрочного прогнозирования характеристик атмосферной конвекции по спутниковым данным.

Исходя из изложенного можно сформулировать следующие результаты исследования.

1. Изучены и обобщены данные о местных физико-географических условиях Мозамбика, особенности атмосферной циркуляции и климата исследуемого региона.

2. Исследованы особенности развития атмосферной конвекции, формирования конвективной облачности и явлений погоды по тропической и субэкваториальной юго-восточной Африке.

3. Проведён анализ современного состояния международной космической метеорологической системы и исследование возможности ведомственной метеорологической службы по получению и обработке данных с метеорологических космических аппаратов.

4. Осуществлен подбор исходных метеорологических и спутниковых данных – составлена архивная выборка.

5. Проведена статистическая обработка архивной выборки – устранены ошибочные и сомнительные наблюдения, рассчитаны одномерные статистические характеристики и парные коэффициенты корреляции элементов архивной выборки.

6. Разработана методика мониторинга конвективной облачности и явлений погоды по спутниковым снимкам. Построены диагностические и прогностические правила для мониторинга конвективной облачности и явлений погоды.

7. Проведена проверка практической работоспособности разработанной методики на независимом материале и разработаны рекомендации по её практическому использованию. В результате проверки, получены критерии успешности, позволяющие рекомендовать результаты исследования для практического использования.

Разработанная методика мониторинга конвективной облачности и явлений может использоваться в оперативной работе метеорологических подразделений на территории юго-восточной Африки, а также может быть реализована и для других пунктов (территорий), имеющих специфические физико-географические условия и обеспеченность исходными данными.