

УДК 551.509+551.501.8:351.814.2

Диагноз и прогноз циклогенеза по данным спутникового зондирования атмосферы

Л.М. Акимов¹, И.П. Расторгуев², А.Н. Неижмак³

¹*Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия;*

²*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия», Воронеж, Россия;*

³*Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков, Краснодар, Россия
akl63@bk.ru*

Представлен подход к прогнозированию возникновения внетропических циклонических вихрей на основе интерпретации цифровых данных полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA. Обработка данных производилась с использованием специализированного программного обеспечения HPTReeder. На основе анализа распределения яркостных температур на верхней границе облачности и прилегающей подстилающей поверхности определены особенности спектров отраженного излучения основных форм облачности. Разработан алгоритм обработки первичных данных. Получены диагностические и прогностические правила для определения текущего циклогенеза и его краткосрочного прогноза по цифровым спутниковым данным. Представленная методика ориентирована на использование ведомственными метеорологическими подразделениями при обеспечении государственной авиации в условиях ограниченной исходной метеорологической информации

Ключевые слова: внетропические циклоны, циклогенез, цифровая спутниковая информация, диагноз и прогноз синоптических условий, метеорологическое обеспечение, государственная авиация, безопасность полетов

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-2-60-78>

Cyclogenesis diagnosis and forecasting from satellite data

L.M. Akimov¹, I.P. Rastorguev², A.N. Neizhmak³

¹*Voronezh State University, Voronezh, Russia;*

²*Air Force Military Training and Scientific Center «Air Force Academy», Voronezh, Russia;*

³*Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots, Krasnodar, Russia
akl63@bk.ru*

An approach to forecasting the occurrence of extratropical cyclones based on the interpretation of digital data from NOAA polar-orbiting meteorological satellites is presented. Data processing is performed using specialized HPTReeder software. Based on the analysis of the distribution of brightness temperature at the cloud top and on the underlying surface, the features of the reflected radiation spectra are determined for the basic cloud forms. An algorithm for processing raw data is developed. Diagnostic and prognostic rules are obtained for determining the current cyclogenesis and its short-term forecast based on digital satellite data. The presented methodology is focused on the use by departmental meteorological units in supporting state aviation under conditions of limited initial meteorological information.

Keywords: extratropical cyclones, cyclogenesis, digital satellite data, diagnosis and forecast of synoptic conditions, meteorological support, state aviation, flight safety

Введение

Снижение рисков влияния погодных условий является одной из актуальных проблем во многих отраслях экономики, обеспечения безопасности и обороноспособности государства. Наиболее сложные метеорологические условия связаны с циклонами и атмосферными фронтами. В области циклонической циркуляции наблюдается наибольшая повторяемость и максимальная интенсивность опасных явлений погоды и сочетания неблагоприятных метеорологических условий.

Наиболее сложными для прогнозирования метеорологических условий являются синоптические ситуации, связанные с возникновением новых барических образований.

Существующие гидродинамический, физико-статистический и синоптические подходы к прогнозу возникновения циклонов получили широкое распространение, адаптированы к особенностям местных физико-географических условий и показывают достаточно высокую успешность. Научные исследования, направленные на дальнейшее изучение физических механизмов циклогенеза и совершенствования его прогнозирования, продолжаются как в нашей стране, так и за рубежом [13–15, 19–21, 23, 25].

Несмотря на постоянное техническое и организационное совершенствование авиационной инфраструктуры, эффективность и безопасность деятельности авиационного транспорта по-прежнему существенно зависят от метеорологических условий. Совершенствованию метеорологического обеспечения авиационного потребителя посвящено значительное количество фундаментальных и прикладных исследований [3, 6, 8, 10, 22, 23]. Большинство указанных исследований ориентировано на обеспечение гражданской и коммерческой авиации и возможности авиационных метеорологических станций (АМСГ).

При метеорологическом обеспечении государственной, в частности военной, авиации не всегда представляется возможным использование современных научных достижений и оперативной продукции гидрометеорологических центров. Особенно актуальна данная проблема в условиях ограничения исходной информации над обширными водными пространствами, в горной и пустынной местности, а также в условиях локальных военных конфликтов.

Одно из направлений совершенствования подходов к прогнозу циклогенеза, с учетом специфики деятельности ведомственных метеорологических подразделений, является дальнейшее совершенствование технологий использования результатов дистанционного зондирования Земли специализированными метеорологическими аппаратами из космоса. Космические методы исследований в метеорологии последние десятилетия получили широкое распространение в оперативной и научной деятельности метеорологических подразделений как у нас в стране, так и за рубежом [2, 4, 7, 8, 18, 26, 27].

Наряду с получением первичной метеорологической информации об атмосферных процессах и явлениях, о характеристиках состоянии земной поверхности, одной из основных задач космических методов исследований в метеорологии является разработка способов дешифрирования информации с метеорологических искусственных спутников Земли и использование этой информации для анализа и прогноза погоды.

Исходя из изложенного, целью исследования было определено создание методики прогнозирования циклогенеза на основе спутниковой информации в интересах совершенствования метеорологического обеспечения государственной авиации.

Достижение поставленной цели осуществлялось на основе решения следующих задач:

1. Исследование возможности выделения основных форм облачности и облачных систем на основе интерпретации цифровой информации со специализированных космических аппаратов.

2. Разработка качественных правил определения процессов циклогенеза по характеристикам отраженного излучения облачной и земной поверхности на основе графоаналитического подхода.

3. Выработка объективных способов выделения на цифровых спутниковых снимках облачных систем, соответствующих зарождающимся циклоническим вихрям.

На вооружении метеорологических подразделений Министерства обороны и других силовых ведомств находятся пункты приема и обработки спутниковой информации серии «Сюжет» различных поколений. Программные и аппаратные возможности их постоянно совершенствуются. В качестве методического обеспечения данных комплексов разработаны алгоритмы диагноза и прогноза метеорологических величин и явлений погоды на основе спутниковой информации [1, 5, 9, 11, 12, 16, 17], получившие применение при оперативном метеорологическом обеспечении военной авиации. Результаты указанных разработок легли в основу настоящего исследования.

Из-за существенного отличия физических процессов облакообразования в различные сезоны года для отработки методики был определен только теплый период года.

Методы и результаты исследования.

Распознавание облачности по цифровым спутниковым снимкам

По спутниковым снимкам, в том числе и в цифровом формате, не представляется возможным непосредственно обнаружить очаг падения атмосферного давления, приводящий к возникновению нового циклонического вихря. Поэтому прогноз циклогенеза осуществляется по характерным признакам эволюции облачных систем [5, 18].

Распознавание форм облачности – одна из наиболее распространенных задач обработки данных спутникового зондирования.

На основе анализа экстремальных значений радиационной температуры и альbedo на верхней границе облачности был разработан способ

идентификации конвективной облачности в массиве фронтальных слоистообразных облаков, связанных с возникновением конвективных явлений аномальной интенсивности [9]. Исследование проводилось на архивных данных полярно-орбитальных спутников серии NOAA с перспективой последующей адаптации разработанной методики к данным отечественных космических аппаратов «Метеор».

Возможности использования цифровой спутниковой информации существенно расширяются при рассмотрении не только экстремумов, но и распределения измеряемых сканируемых поверхностей в целом. Для реализации этих возможностей была проведена обработка цифровых снимков облачности и подстилающей поверхности за период с мая по сентябрь над европейской территорией России. Использовались данные выборочно за период 2006–2015 гг. Всего было обработано более тысячи фрагментов с пространственными размерами 200–250 км с наличием различной текстуры и мезоструктуры облачности.

Были использованы данные сканирующего радиометра AVHRR метеорологических спутников серии NOAA. Имея пространственное разрешение 1,1 км, они обладают высоким радиометрическим разрешением. Чувствительность AVHRR позволяет различить 1024 значения спектральной яркости (градации фототона) [25].

Прибор AVHRR производит измерение собственного теплового излучения Земли и отраженного солнечного излучения в пяти спектральных каналах: *ch1* – 0,58–0,68 мкм (видимый диапазон), *ch2* – 0,72–1,0 мкм (граница видимого и ближнего ИК-диапазона), *ch3* – 3,55–3,93 (на некоторых радиометрах – 1,5–1,6) мкм (средний ИК-диапазон), *ch4* – 10,3–11,3 и *ch5* – 11,5–12,5 мкм (дальний ИК-диапазон).

Многоканальность позволяет получать высокоточные сведения об альбедо (точность 0,5 %) и радиационной температуре сканируемой поверхности (точность 0,12 °С при $T = 27$ °С). С целью регистрации сигнала от исследуемых поверхностей (суша, вода, облачность), минимально ослабленного при прохождении через атмосферу, спектральные диапазоны каналов приходятся на окна прозрачности атмосферы [25].

Примеры типичных изображений облачности на спутниковых снимках и соответствующие им спектры характеристик яркости изображения – альбедо и яркостной температуры (в дальнейшем – спектров яркости) – показаны на рис. 1–5.

Графические изображения, представленные на рисунках, приведены в исходном виде, получаемом с помощью штатного программного обеспечения. Для каждого из пяти каналов (*ch1* – *ch5*) на горизонтальной оси графиков отложены номера градаций яркости (минимального диапазона фототона, различимого аппаратурой): в начале шкалы отображаются самые темные участки поверхности, в конце – имеющие наибольшую яркость. На вертикальной шкале отложены относительные повторяемости градаций яркости отражающей поверхности: градация яркости, имеющая наибольшую повторяемость в единичных участках выделенного

фрагмента, имеет значение 99 % (100 % с учетом градации «0» – отсутствующих на фрагменте значений). Все остальные повторяемости приведены в долях (процентах) относительно модального значения.



Рис. 1. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника многослойной фронтальной облачности.

Fig. 1. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view layered front clouds.



Рис. 2. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника слоисто-кучевой (закрытые ячейки), кучевой и мощно-кучевой облачности (открытые ячейки).

Fig. 2. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view layered cumulus (closed cells) cumulus and thick cumulus clouds (open cells).

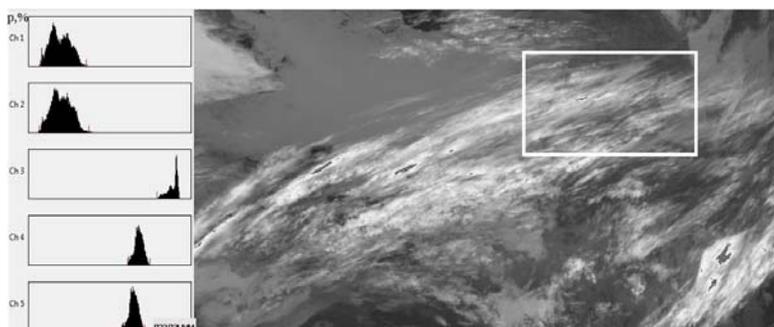


Рис. 3. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника перистых (волокнисто-образных) облаков.

Fig. 3. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view cirrus (fibrous) clouds.



Рис. 4. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника слоистых облаков.

Fig. 4. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view layered clouds.

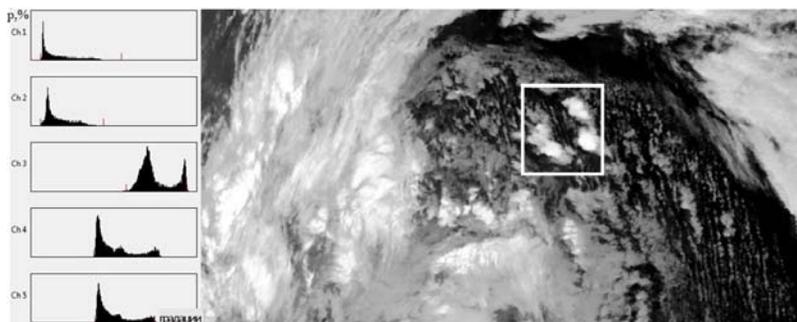


Рис. 5. Спектральные яркости в градациях фототона и вид со спутника внутримассовых кучево-дождевых облаков.

Fig. 5. Spectral brightness in phototone gradations and satellite view Cumulonimbus air mass clouds.

В процессе анализа распределения яркостей учитывались:

- положение гистограмм на шкале градаций яркости (характеризующих диапазон высот отражающих поверхности);
- форма (скупенность – растянутость) гистограмм (однородность поверхности);
- положение экстремумов (вертикальная разнесенность слоев облачности);
- соотношение повторяемостей градаций яркости в разных участках спектра (распределение отражательных поверхностей в вертикальной плоскости).

Классификация облачности осуществлялась методом экспертного анализа по типовым изображениям спектров яркости и приведенным выше характеристикам.

Для определения соответствия классификации фактическим данным использовались приземные кольцевые карты погоды за квазисинхронные сроки наблюдений. Результаты проведенной классификации представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты классификации компонентов облачных систем по спектральным яркостям сканируемых поверхностей (в % к общему количеству)

Table 1. Classification results of cloud system components according to spectral brightness's of scanned surfaces (in % of the total number)

Облачность	Правильно классифицирована, %	Определено при отсутствии, %	Пропущено при наличии, %	Общее количество случаев в классе, %	Успешность определения, %
Многослойная фронтальная облачность	15,1	1,3	2,4	18,8	80,3
Кучевая и мощно-кучевая облачность	15,5	3,6	2,2	21,4	72,4
Перистые облака	13,5	0,9	2,0	16,4	82,3
Слоистые облака	10,3	2,2	1,7	14,2	72,5
Внутримассовые кучево-дождевые облака	11,6	1,6	0,3	13,5	85,9
Не классифицировано	15,7				–
Среднее					78,7 %

В табл. 1 за 100 % принято количество всех рассматриваемых случаев. В качестве критерия качества классификации использовалось отношение количества случаев правильной классификации к общему количеству случаев с данным классом облачности.

Из приведенных результатов видно, что для отдельных классов облачности успешность классификации составила от 72,4 % (кучевая и мощно-кучевая облачность) до 85,9 % (внутримассовые кучево-дождевые облака). В первом случае ошибки были вызваны сложностью отделения слабо развитых по вертикали конвективных облаков от слоисто-кучевой и высоко-кучевой облачности. Внутримассовые кучево-дождевые облака не маскируются другими формами облаков и хорошо выделяются на фоне подстилающей поверхности. Общая успешность классификации (без случаев отказа от классификации) составила 78,7 %.

Таким образом, показана возможность классификации облачности по качественному анализу цифровых данных, полученных со специализированных космических аппаратов.

Диагноз циклогенеза по цифровой спутниковой информации

На следующем этапе исследования решалась задача диагноза возникновения циклонов (циклогенеза).

До недавнего времени для синоптического анализа использовалась аналоговая спутниковая информация: на снимках видимого и инфракрасного диапазона определяются типичные изображения облачности (текстура, яркость изображения), характерные для начального периода возникновения новых барических образований циклонического типа: у точки окклюзии и на фронтальной волне (рис. 6).

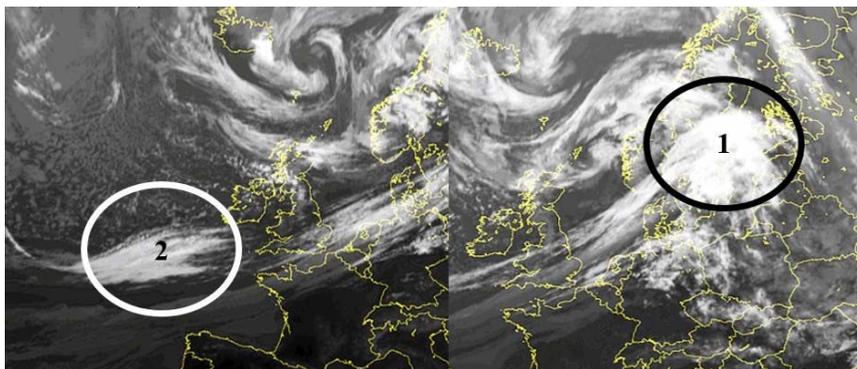


Рис. 6. Циклогенез на аналоговом спутниковом ИК-изображении:

1 – у точки окклюзии, 2 – на фронтальной волне.

Fig. 6. Cyclogenesis in the analogue satellite infrared image:

1 - at the point of occlusion, 2 - on the frontal wave.

Успешность реализации данного подхода зависит от субъективных факторов и не всегда удовлетворяет требованиям по точности и оправданности.

На смену субъективному визуальному анализу пришли цифровые технологии на базе специализированных комплексов обработки спутниковой информации. В ведомственной метеорологической службе Министерства обороны Российской Федерации используются системы серии «Сюжет» со специализированным программным обеспечением «Актомика» и HPTReeder. Первая из указанных программных оболочек в основном ориентирована на представление конечного продукта и эффективно зарекомендовала себя в оперативной работе. HPTReeder поставлялась с аппаратным комплексом предшествующего поколения «Сюжет-МЦ» и имеет большой потенциал для исследовательских целей.

Было проведено исследование более тридцати случаев с обстановкой, благоприятной для образования циклона у точки окклюзии, и более 50 случаев – на фронтальной волне. Всего было проанализировано

87 случаев теплого периода года (май – сентябрь) над территорией Европы и умеренных широт Атлантики. При этом образование циклонов (по данным наземных наблюдений) происходило в 39 случаях.

Для каждого случая были построены распределения относительных значений повторяемости градаций яркости (яркостных температур) подспутниковых поверхностей по пяти спектральным каналам (рис. 7) и рассчитаны статистические характеристики распределений: средние и экстремальные значения, квантили 95 и 75, дисперсии, размах, асимметрии и эксцессы.

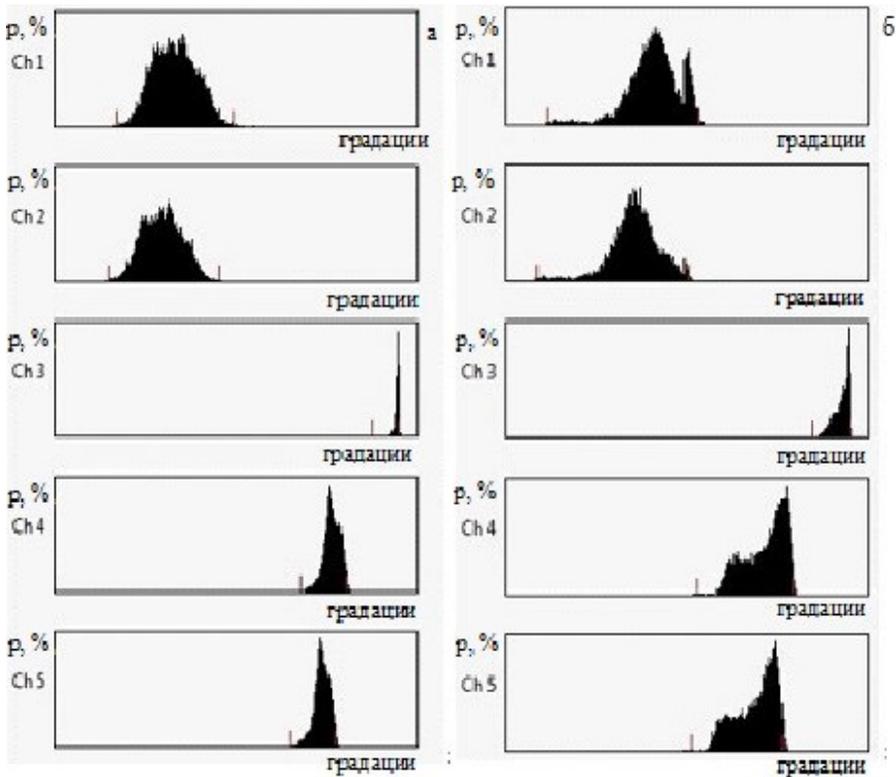


Рис. 7. Примеры типичных спектров яркостных температур подспутниковой поверхности при циклогенезе: на фронтальной волне (а) и у точки окклюзии (б) в графическом виде.

Fig. 7. Examples of typical spectra of brightness temperatures of the sub-satellite surface: during frontal wave cyclogenesis (a) and at the occlusion point (b) in graphical form.

Таким образом, на основе компьютерной обработки с использованием специализированного программного обеспечения получены статистические модели яркостной отражаемости на верхней границе облачных фронтальных систем на участках циклогенеза.

Для более детального анализа однородности (неоднородности) характеристик распределения яркостей по классам «наличия-отсутствия» условий циклогенеза были рассчитаны критерии Фишера и Стьюдента проверки гипотез о равенстве дисперсий и средних значений распределений. Значения указанных критериев подтвердили гипотезу о «разделимости» случаев с наличием и отсутствием циклогенеза.

Проверка практической реализации данных моделей, проводилась на независимой выборке из случаев с благоприятными условиями для циклогенеза у точки окклюзии и на фронтальной волне (21 и 27 случаев соответственно). При этом в 9 случаях на фронтальной волне и в 12 случаях у точки окклюзии, развивался процесс циклогенеза.

По критерию максимального соответствия распределения яркостных температур на верхней границе облачности одному из двух классов (с развитием циклогенеза и с его отсутствием или затуханием) формировалось прогностическое заключение для каждой реализации контрольной выборки.

Успешность классификации составила для первой синоптической ситуации (у точки окклюзии) – 90,5 %, для второй (на фронтальной волне) – 88,9 %. Данные показатели существенно превышают показатели оправдываемости прогноза циклогенеза, проведенного методом экспертных оценок с помощью аналоговых спутниковых снимков (71,4 %, и 74,1%).

Приведенный сравнительный анализ критериев успешности подходов к диагнозу циклогенеза свидетельствует о перспективности компьютерного моделирования процессов циклогенеза по цифровым данным специализированных метеорологических космических аппаратов.

В качестве факторов, снижающих качество результатов классификации ситуаций, следует отметить отсутствие возможности выделять для анализа на спутниковых снимках площади со сложной конфигурацией (отличной от прямоугольной). По этой причине в анализ включаются области с нефронтальной облачностью и открытые участки подстилающей поверхности, что вносит искажения в распределения градаций яркости и приводит к отдельным ошибкам классификации.

Разработка прогностических правил прогноза циклогенеза по спутниковым данным

Как и при проведении диагностики циклогенеза, для получения исходных данных использовалась программа HRPTreader. По приземным картам определялись случаи образования фронтальных циклонов на волне холодного фронта или у точки окклюзии. За квазисинхронные сроки подбирались цифровые спутниковые снимки. В архивную выборку также включались случаи с благоприятными условиями, когда циклогенез не происходил.

По каждому каналу, аналогично предшествующему этапу, выполнялось выделение фрагментов и построение гистограмм повторяемости альbedo и яркостной температуры с последующим преобразованием из графического в цифровой формат.

На следующем шаге исследования были построены распределения нормированных повторяемостей градаций яркости на верхней границе сканируемой поверхности (рис. 8).

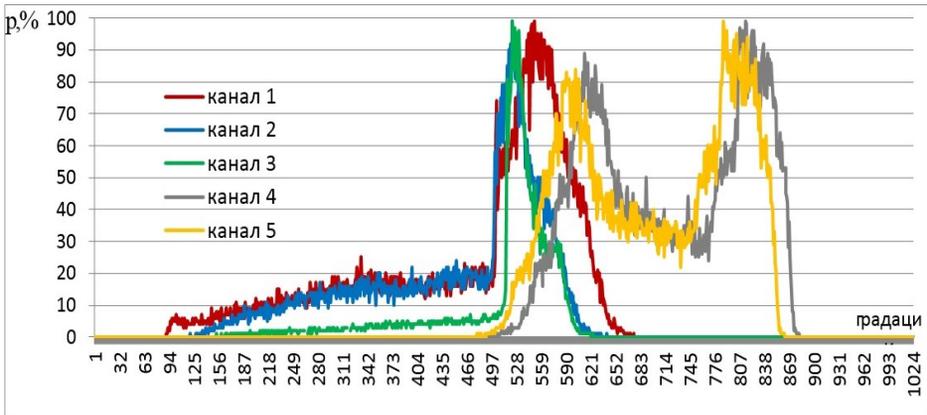


Рис. 8. Пример комплексного графического представления распределения нормированных повторяемостей градаций яркости сканируемой поверхности на разных каналах.

Fig. 8. An example of a complex graphical representation of the distribution of normalized frequency of gradations of brightness of a scanned surface on different channels.

На каждом фрагменте определялась синоптическая ситуация: волна либо точка окклюзии, а также степень проявления циклогенеза в выделенной зоне в ближайшие 6 часов: 0 – отсутствует, 1 – слабо выражен, 2 – выражен.

Далее для всех снимков определялись различные параметры для каждого пика и всего спектра в целом в каждом из 5 каналов (n-номер канала):

k_{1N} – количество пиков (всплесков) – показывает количество выраженных слоев облачности;

$k_{n \min}$ – минимум канала – номер наименьшей градации яркости, характеризующий наибольшее значение температуры (в 3–5 каналах) и наименьшее значение альbedo (на 1–2 каналах) отражающей поверхности;

$k_{n \max}$ – максимум канала – номер наибольшей градации яркости, характеризующий наименьшее значение температуры (в 3–5 каналах) и наибольшее значение альbedo (на 1–2 каналах) отражающей поверхности;

$k_{n \text{ mod}}$ – среднее значение (разность между минимальным и максимальным значением спектра) – характеризует положение распределения на оси градаций яркости;

Δk_n – размах спектра (расстояние от минимума до максимума) – характеризует однородность отражающей поверхности (большему значению соответствует расслоенность облачности и наличие просветов в облаках – просматривается поверхность земли);

$k_{n_1 \text{ min}}$ – начало пика – номер наименьшей градации яркости конкретного всплеска, характеризующий наибольшее значение температуры или наименьшее значение альbedo отражающей поверхности на канале;

$k_{n_1 \text{ max}}$ – конец пика пика – номер наибольшей градации яркости конкретного всплеска, характеризующий наименьшее значение температуры или наибольшее значение альbedo отражающей поверхности на канале;

$k_{n_1 \text{ pik}}$ – наибольшее значение пика – значение преобладающей градации яркости, характеризующей уровень верхней границы основного слоя облачности (ВВГО);

Δk_{n_1} – расстояние от начала до конца пика – показатель однородности (сплоченности) облачного слоя;

$k_{n_1 \text{ pic+}}$ – разность между наибольшим значением пика и началом пика;

$k_{n_1 \text{ pic-}}$ – наибольшее значение пика – характеризует наибольшее значение ВВГО слоя;

$k_{n_1 \text{ скос}} = (k_{1_1 \text{ max}} - k_{1_1 \text{ pik}}) - (k_{1_1 \text{ pik}} - k_{1_1 \text{ min}})$ – характеристика скошенности слоя, косвенно характеризующая разность между «провисаниями» и выступами («шапками») слоя;

$k_{n_1 \text{ скос}^*} = (k_{1_1 \text{ max}} - k_{1_1 \text{ pik}})/(k_{1_1 \text{ pik}} - k_{1_1 \text{ min}})$ – аналогичная характеристика распределения, выраженная через отношение пониженных и повышенных участков слоя облачности или подстилающей поверхности.

По анализу спектров можно сделать следующие пояснения.

1. Рассчитываемые величины не являются исчерпывающими характеристиками облачных слоев. Излучение в рассматриваемых диапазонах не проникает внутрь облака и несет информацию только о верхней границе самого верхнего слоя и не перекрывааемых участков нижерасположенных слоев облачности и подстилающей поверхности Земли.

2. Искажение значений ВВГО возможно за счет наличия инверсий температуры и наблюдается, как правило, в приземном слое и выше тропопauses (поэтому значительно не влияет на анализ облачных систем атмосферных фронтов и циклонов).

3. Чем выше яркостная температура (спектр сдвинут вправо), тем выше ВВГО слоя облачности.

4. Следует учитывать также расстояние между пиками спектра: чем больше расстояние между пиками, тем больше разность высот между слоями облачности.

5. При отсутствии всплеска в начале спектра поверхность Земли не просматривается, что свидетельствует о наличии сплошной облачности.

6. Большое значение имеет форма всплеска спектра. Острый пик, свидетельствующий о большой повторяемости градаций яркости в узком диапазоне, означает однородную верхнюю границу отражающей поверхности, а широкий всплеск означает неоднородность верхней границы слоя.

Для построения решающего правила была проведена процедура дискриминантного анализа. В результате проведения данной статистической процедуры был отобран всего один предиктор Δk_2 – ширина основного всплеска (в количестве градаций) на 2-м спектральном канале. Дальнейшее увеличение размерности функции (привлечение дополнительной информации) не привело к статистически значимому увеличению критериев успешности прогностического правила.

Методом дискриминантного анализа были определены параметры прогностической дискриминантной функции:

$$L = 0,02733\Delta k_2 - 10,39217. \quad (1)$$

Таким образом, решающее правило прогноза циклогенеза по спутниковым данным можно сформулировать следующим образом: образование циклона следует ожидать (указывать при прогнозе синоптического положения) в случае отрицательного значения функции L ($L \leq 0$).

Из равенства (1) определено критериальное значение $\Delta k_{2_кр} = 380,2$, т. е. при ширине основного всплеска, во втором спектральном диапазоне (канале) до 380 градаций яркости, следует прогнозировать циклогенез, при больших значениях – его отсутствие.

Ключевым параметром в определении благоприятных условий для циклогенеза оказалась характеристика однородности верхней границы – сплоченности облачной системы.

Критерии успешности (оправдываемости на наличие, на отсутствие, общая оправдываемость) дискриминации по полученному решающему правилу представлены в табл. 2.

Из анализа результатов, представленных в табл. 2 видно, что оправдываемость прогноза циклогенеза по контрольной выборке существенно не снизилась по сравнению с обучающей выборкой и имеет приемлемые значения для практического использования.

В качестве примера, иллюстрирующего зависимость исследуемого процесса от выбранного предиктора, приведены яркостные спектры типичных случаев с наличием и отсутствием циклогенеза, представленные на рис. 9.

Таблица 2. Матрица классификации облачных систем на наличие условий циклогенеза с использованием дискриминантного анализа
Table 2. Classification matrix of cloud systems for cyclogenesis conditions using discriminant analysis

Оправды- ваемость	Прогноз					
	Обучающая выборка		Доля правильной классифика- ции	Контрольная выборка		Доля правильной классифика- ции
	Правиль- но	Ошибоч- но		Правиль- но	Ошибоч- но	
Наличия	25	4	86,2	13	2	86,7
Отсутствия	12	2	85,7	5	1	83,3
Общая	37	6	86,0	18	3	85,7

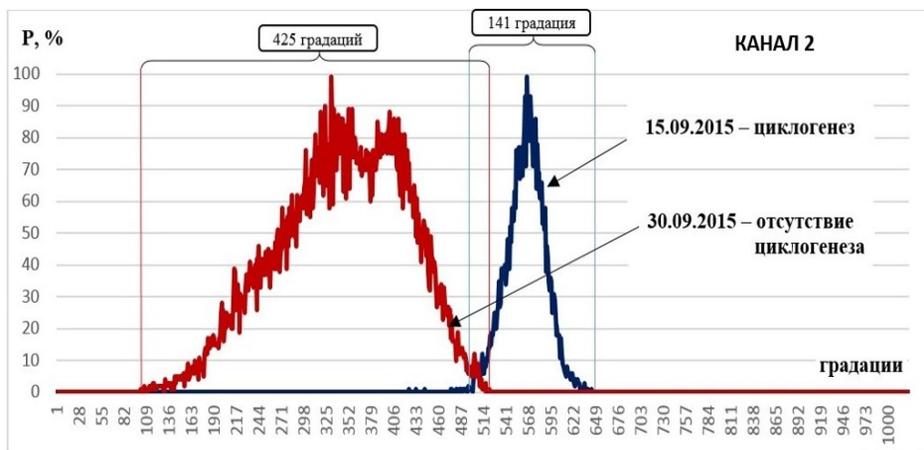


Рис. 9. Пример сравнительного анализа спектров яркости на 2-м канале, применительно к разработанному способу прогноза циклогенеза по цифровым спутниковым данным.

Fig. 9. An example of a comparative analysis of the luminance spectra on channel 2, as applied to the developed method for predicting cyclogenesis using digital satellite data.

Схематично методика прогноза циклогенеза с использованием спутниковых данных изображена на рис. 10.

Представленная методика диагноза и прогноза циклогенеза на основе спутниковых технологий без адаптации может применяться только в указанный период года. Прогностические правила и алгоритм их использования также могут быть реализованы для других регионов со сходными физико-географическими условиями. Необходимыми предварительными

процедурами при этом является их проверка на местном аэросиноптическом материале и соответствующих данных спутникового зондирования с последующей адаптацией по приведенному алгоритму. Критерием правильности классификации факта «наличия-отсутствия» циклогенеза, с использованием предлагаемой методики, выступает синоптическая обстановка, определяемая с помощью аэросиноптического материала.



Рис. 10. Схема методики прогноза циклогенеза по спутниковыми данным.

Fig. 10. Scheme of the methodology for predicting cyclogenesis prediction from satellite data.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана методика и произведена оценка успешности распознавания облаков на спутниковых снимках путем сравнения полученных изображений с эталонными типами. Общая успешность классификации различных типов облаков с применением данного подхода составила 78,7%. Наилучшее распознавание облачности с вероятностью 85,9% характерно для внутримассовых кучво-дождевых облаков. Предложенную методику рекомендуется использовать в оперативной работе в качестве предварительного анализа текущего и ожидаемого циклогенеза.

Получены методические материалы по анализу и прогнозу циклогенеза в умеренных широтах Северного полушария на основе специализированной спутниковой информации, реализованные в практической деятельности ведомственных метеорологических подразделений.

Разработанная методика диагноза и прогноза циклогенеза на основе спутниковых технологий актуальна прежде всего для районов, недостаточно освещенных в метеорологическом отношении. Применительно к военной авиации данная методика может быть использована в Заполярье и в Ближневосточном регионе при метеорологическом обеспечении группировок Воздушно-космических сил.

Список литературы

1. Акимов Л.М., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н., Муехина Т.А. Особенности прогнозирования опасных для авиации конвективных явлений погоды над юго-востоком Африки // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 2. С. 103-110.
2. Анискина О.Г., Заболотских Е.В., Шапрон Б. Моделирование эволюции полярных циклонов с использованием данных спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 13-26.
3. Афанасьева Ю.С., Богаткин О.Г. Оценка метеорологических рисков в гражданской авиации // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 1 (14). С. 5-13.
4. Баянкина Т.М., Воскресенская Е.Н. Климатическое районирование средиземноморского региона и его особенности в поле облачности и параметрах циклонов по данным спутникового мониторинга // Системы контроля окружающей среды. 2012. № 17. С. 90-93.
5. Беспалов С.В., Неижмак А.Н., Расторгуев И.П., Савченко П.Д. Синоптическая метеорология. Синоптические объекты и процессы. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. С. 5-10, 61-69.
6. Болелов Э.А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 5. С. 117-129.
7. Верятин В.Ю., Иоффе Г.М., Воронин А.А. Космический мониторинг тропических циклонов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 23-32.
8. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 3. С. 66-74.
9. Звягинцева А.В., Расторгуев И.П., Неижмак А.Н. Мониторинг стихийных бедствий конвективного происхождения по данным дистанционного зондирования с метеорологических космических аппаратов. Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2013. 166 с.
10. Моисеева Н.О., Белоусова Л.Ю., Коваленко Г.В. Теоретические аспекты повышения эффективности метеорологического обеспечения авиаперевозок в арктическом регионе // Сб. материалов XXVII Международной береговой конференции «Арктические берега: путь к устойчивости», 2018. С. 349-352.
11. Неижмак А.Н., Звягинцева А.В., Расторгуев И.П. Распознавание опасных метеорологических явлений конвективного происхождения в интересах управления авиацией // Вестник ВГТУ. 2008. Т. 4, № 10. С. 135-139.
12. Неижмак А.Н., Расторгуев И.П. Способ определения конвективных опасных метеорологических явлений в теплый период года для европейской части территории России: Патент на изобретение RU 2385474 28.07.2008.
13. Нестеров Е.С., Похил А.Э., Федоренко А.В. Об особенностях формирования глубоких циклонов в Северной Атлантике в осенний период // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 92-101.

14. *Нестеров Е.С.* Экстремальные циклоны над морями европейской части России // Гидрометеорологические прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2018. № 1 (367). С. 97-115.
15. *Калинин Н.А., Связов Е.М.* Трансформация кинетической энергии в циклонах умеренных широт. Пермь: ГОУ ВПО Пермский гос. ун-т, 2008. 115 с.
16. *Расторгуев И.П., Качмар М.Б., Сурков Д.А., Божко А.С.* Распознавание облачных систем на основе цифровой спутниковой информации // Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Комплексные проблемы техносферной безопасности. Ч. 3. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2017. С. 111-116.
17. *Расторгуев И.П., Шулякевич Л.В., Божко А.С.* Исследование метеорологических и синоптических объектов по данным специализированных космических аппаратов // Сборник статей V Международной научно-практической конференции. Комплексные проблемы техносферной безопасности. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2018. С. 66-70.
18. *Толмачева Н.И., Калинин Н.А.* Космические методы исследования метеорологических процессов в атмосфере // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. 2010. № 4. С. 12-23.
19. *Тунеголовец В.П.* Интенсивность циклогенеза во второй половине XX столетия // Труды ГУ Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт. 2009. № 151. С. 140-153.
20. *Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В.* Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976-2015 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. Вып. 364. С. 81-92.
21. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Комасько Н.И.* Современные представления об атмосферном фронтогенезе. Теоретические положения // Метеорология и гидрология. 2014. № 10. С. 5-18.
22. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада лтд, 2016. 310 с.
23. *Шакина Н.П.* Прогноз погоды для авиации на основе продукции численных моделей атмосферы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 241-256.
24. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Беркович Л.В., Ткачева Ю.В.* Диагностические исследования и моделирование процессов циклогенеза, фронтогенеза и погодных условий на различных стадиях развития циклонов // Труды Гидрометцентра России. 2000. Вып. 335. С. 3-25.
25. Comprehensive large array data stewardship system. AVHRR // NOAA. URL: https://www.avl.class.noaa.gov/release/data_available/avhrr/index.htm. (дата обращения: 21.03.2020).
26. *Georgiev, C.* Use of Meteosat WV channel data for detection of model analysis and forecast errors of potential vorticity fields, in 9th Conference on Satellite meteorology (Paris, 25-29 May 1998), EUM P 22, ISSN 1011-3932, EUMETSAT. P. 777-780.
27. *Volkova E.V., Uspensky A.B.* Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data of scanning radiometers of polar-orbiting and geostationary meteorological satellites // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52, no. 9. P. 1097-1109.

References

1. *Akimov L.M., Rastorguyev I.P., Neizhmak A.N., Muyeckhina T.A.* Peculiarities of forecasting the dangerous convective weather phenomena over the south-east of Africa. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]*, 2018, vol. 2, pp. 103-110 [in Russ.].
2. *Aniskina O.G., Zabolotskih E.V., Shapron B.* Modelirovanie evolyucii polyarnykh ciklonov s ispol'zovaniem dannyh sputnikovoy mikrovolnovoy radiometrii. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2016, no. 3, pp. 13-26 [in Russ.].
3. *Afanasiyeva Y.S., Bogatkin O.G.* Assessment of meteorological risks in civil aviation. *Vestnik SPbGU GA*, 2017, vol. 14, no. 1, pp. 5-13 [in Russ.].

4. Bayankina T.M., Voskresenskaya E.N. Climatic zoning of the Mediterranean Sea region and its features manifesting the cloudiness field and cyclones' parameters based on satellite monitoring. *Sistemy kontrolya okruzhayushey sredy* [Monitoring systems of environment], 2012, no. 17, pp. 90-93 [in Russ.].

5. Bepalov S.V., Neizhmk A.N., Rastorguev I.P., Savchenko P.D. Sinopticheskaya meteorologiya. Sinopticheskie ob"ekty i process. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2013, pp. 5-10, 61-69 [in Russ.].

6. Bolelov E.A. Meteorological service for civil aviation: problems and ways of their solution. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2018, vol. 21, no. 5, pp. 117-129. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129 [in Russ.].

7. Vertyatin V.Y., Ioffe G.M., Voronin A.A. Satellite monitoring of tropical cyclones. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 369, no. 3, pp. 23-32 [in Russ.].

8. Volkova E.V. Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2013, vol. 10, no. 3, pp. 66-74 [in Russ.].

9. Zvyaginceva A.V., Rastorguev I.P., Neizhmk A.N. Monitoring stihnykh bedstviy konvektivnogo proiskhozhdeniya po dannym distantsionnogo zondirovaniya s meteorologicheskikh kosmicheskikh apparatov. Voronezh: GOU VPO VGTU, 2013, 166 p. [in Russ.].

10. Moiseeva N.O., Belousova L.Yu., Kovalenko G.V. Theoretical Aspects of Improving the Efficiency of Meteorological Support of Air Transportation in the Arctic Region. Sb. materialov XXVII Mezhdunarodnoy beregovoy konferencii «Arkticheskie berega: put' k ustoychivosti» [Materials of the XXVII International Coastal Conference "Arctic shores: shore-up to sustainability"], 2018, pp. 349-352 [in Russ.].

11. Zvyagintseva A.V., Neizhmk A.N., Rastorguev I.P. Recognition of dangerous convective weather phenomena for aviation regulations. *Vestnik VGTU*, 2008, vol. 4, no. 10, pp. 135-139 [in Russ.].

12. Neizhmk A.N., Rastorguev I.P. Sposob opredeleniya konvektivnykh opasnykh meteorologicheskikh yavleniy v tepley period goda dlya evropeyskoy chasti territorii Rossii: Patent na izobrenenie RUS 2385474 28.07.2008 [in Russ.].

13. Nesterov E.S., Pokhil A.E., Fedorenko A.V. Peculiarities of deep cyclone formation in the North Atlantic autumn. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2019, vol. 372, no. 2, pp. 92-101 [in Russ.].

14. Nesterov E.S. Extreme cyclones over the seas of the European part of Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 367, no. 1, pp. 97-115 [in Russ.].

15. Kalinin N.A., Sviyazov E.M. Transformatsiya kineticheskoy energii v ciklonah umerennykh shirot. Perm': GOU VPO Permskiy gos. un-t., 2008, 115 p. [in Russ.].

16. Rastorguev I.P., Kachmar M.B., Surkov D.A., Bozhko A.S. Raspoznavanie oblachnykh sistem na osnove cifrovoy sputnikovoy informatsii. Sbornik statey IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Kompleksnyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti. Ch. 3. Voronezh, FGBOU VO VGTU, 2017, pp. 111-116 [in Russ.].

17. Rastorguev I.P., Shulyakevich L.V., Bozhko A.S. Issledovanie meteorologicheskikh i sinopticheskikh ob"ektov po dannym specializirovannykh kosmicheskikh apparatov. Sbornik statey V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Kompleksnyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti. Voronezh, FGBOU VO VGTU, 2018, pp. 66-70. [in Russ.].

18. Tolmacheva N.I., Kalinin N.A. Kosmicheskie metody issledovaniya meteorologicheskikh processov v atmosfere. *Vestnik Permskogo nauchnogo centra UrO RAN* [Perm Federal Research Centre Journal], 2010, no. 4, pp. 12-23 [in Russ.].

19. Tunegolovec V.P. Intensivnost' ciklogeneza vo vtoroy polovine XX stoletiya. *Trudy DVNIGMI*, 2009, no. 151, pp. 140-153 [in Russ.].

20. Tunaev E.L., Gorbatenko V.P., Podnebesnykh N.V. Distinctive features of cyclogenesis over the Territory of Western Siberia during 1976–2015. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2017, vol. 364, pp. 81-92 [in Russ.].

21. *Shakina N. P., Ivanova A.R., Komar'ko N. I.* Present-day concepts of atmospheric frontogenesis. Part 1. Theoretical ideas. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 10, pp. 639–649. DOI: 10.3103/S106837391410001X.
22. *Shakina N.P., Ivanova A.R.* Prognozirovanie meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 312 p. [in Russ.].
23. *Shakina N.P.* Aviation weather forecasting based on numerical weather prediction products. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 374, no. 4, pp. 241-256 [in Russ.].
24. *Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Berkovich L.V., Tkacheva Yu.V.* Diagnosticheskie issledovaniya i modelirovanie processov ciklogeneza, frontogeneza i pogodnykh usloviy na razlichnykh stadiyah razvitiya ciklonov. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2000, vol. 335, pp. 3-25 [in Russ.].
25. Comprehensive large array data stewardship system. AVHRR. NOAA. Available at: https://www.avl.class.noaa.gov/release/data_available/avhrr/index.htm.
26. *Georgiev, C.* Use of Meteosat WV channel data for detection of model analysis and forecast errors of potential vorticity fields, in 9th Conference on Satellite meteorology (Paris, 25-29 May 1998), EUM P 22, ISSN 1011-3932, EUMETSAT, pp. 777-780.
27. *Volkova E.V., Uspensky A.B.* Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data of scanning radiometers of polar-orbiting and geostationary meteorological satellites. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 2016, vol. 52, no. 9, pp. 1097-1109.

Поступила в редакцию 30.04.2020 г.

Received by the editor 30.04.2020.