

Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга тропических циклонов

А.С. Ерёменко

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Радио, 5
E-mail: academy21@iacp.dvo.ru*

Была разработана и реализована пробная версия системы автоматического мониторинга тропических циклонов (ТЦ). Система основана на работе нескольких алгоритмов поиска центра ТЦ с автоматической отбраковкой ложных объектов и построением траекторий ТЦ. Траектория ТЦ является базой для расчета трехмерной структуры ТЦ на основе атмосферных профилей температуры и влажности. Опытная эксплуатация проводилась на нескольких ТЦ за летние месяцы 2011 г в режиме реального времени. Система обработки построена на основе разветвленной grid-сети. В результате опытной эксплуатации была выявлена необходимость распараллеливания счетных алгоритмов, для чего был задействован супер-компьютер SMH-11 с пиковой производительностью до 16 Тфлопс.

Ключевые слова: тропический циклон, автоматическая система, обнаружение, траектория, grid-система.

Введение

Детектирование тропических циклонов (ТЦ) и определение их макропараметров (положение центра, геометрические размеры, перепад давления, максимальная скорость ветра) в Дальневосточном регионе является одной из важных задач дистанционного зондирования. Чаще всего ТЦ проходят над поверхностью океана, где в большинстве случаев недоступны прямые метеорологические и аэрологические измерения. Спутниковые методы обладают преимуществом по сравнению с традиционными методами измерения: частота получаемой информации (интервал между снимками геостационарного спутника MTSAT-1R составляет 15 минут и более); покрытие больших районов интересов; высокая детальность изображений.

Для определения макропараметров ТЦ по изображениям геостационарных спутников ныне широко применяется методика Дворака и ее модификации (Dvorak, 1984). Она основана на анализе структуры облачности экспертами. Для ее работы применяются спутниковые данные в видимом и ИК-диапазоне. Но данная методика не позволяет проводить все расчеты полностью автоматически. По этой причине разные эксперты, применяя данный подход, могут давать различные оценки. Сравнения оценок параметров ТЦ США и Японии (best-tracks), показывают различия в оценках местоположении центра ТЦ (до 50–100 км), особенно в начальной и конечной стадии жизни ТЦ. Попытки создать автоматические алгоритмы на основе спутниковых данных предпринимаются постоянно (Wimmers, Velden, 2004; Tsang Long Pao et al., 2006; Wimmers, Velden, 2010), но представленные результаты демонстрируются только лишь на нескольких примерах.

В данной работе представлена схема реализации и результаты опытной эксплуатации системы автоматического мониторинга ТЦ на основе алгоритмов обнаружения «глаза» и центра циркуляции (Алексанин, Ерёменко, 2009), с использованием методов вычисления перепада давления в ТЦ по измерениям радиометра ATOVS (Alexanin et al., 2010).

Используемые данные и алгоритмы

Для работы системы автоматического построения треков ТЦ используются ИК-изображения с геостационарного спутника MTSAT-1R с пространственным разрешением в 4 км. Все снимки поступают в оперативном режиме. Для каждого изображения производится расчет карты доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК) на многопроцессорном кластере. ДОТК – угол генерального направления изотерм в данной окрестности, которые можно рассматривать как оценки направления ветра.

Для автоматического обнаружения центра ТЦ используются ранее разработанные алгоритмы обнаружения «глаза» и центра ТЦ по циркуляции на основе карт ДОТК. В общей схеме работы системы также имеется модуль построения треков ТЦ с последующей автоматической отбраковкой ложных объектов на основе накопленных данных.

Профили температуры и влажности атмосферы рассчитываются по данным радиометров ATOVS полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA европейскими пакетами программ AAPR, RTTOV и MetOffice-1Dvar. Исходные спутниковые данные для построения профилей в тропической зоне берутся из NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) с помощью автоматической системы оформления и получения заказов собственной разработки в оперативном режиме.

Автоматическое выделение центра ТЦ

Метод автоматического выделения центра ТЦ основан на совместной работе следующих нескольких алгоритмов (*рис. 1*).

- *Базовая процедура – обнаружение круговой циркуляции.* Алгоритм основан на построении и анализе структурных карт облачности в форме доминантных ориентаций термических контрастов (ДОТК), рассчитываемых по ИК-изображениям.
- *Выделение «глаза» ТЦ.* Алгоритм основан на расчете модифицированного t -критерия разделимости двух участков изображения с различной яркостью (Алексанин, Ерёменко, 2009). Данный алгоритм используется для расчетов ИК-изображения со спутника MTSAT-1R. Алгоритм автоматического выделения центра «глаза» ТЦ, как правило, дает наилучшую оценку центра ТЦ, но отсутствие видимого «глаза» на стадии зарождения и разрушения ТЦ, а также в случае затянутости «глаза» облачностью и наличие ложных объектов затрудняет получение оценки положения центра ТЦ. В общей схеме поиска центра ТЦ алгоритм поиска «глаза» используется как вспомогательный. Данный алгоритм, анализируя кластеры низкотемпературной облачности, позволяет с высокой степенью достоверности (более 95% верных обнаружений) уточнить координаты центра «глаза» ТЦ в случае его наличия на ИК-изображении.
- *Отбраковка ложно выделенных центров.* В результате экспериментов было выявлено, что для успешной фильтрации ложных объектов необходимо задействовать серию как минимум из 3 подряд идущих ИК-изображений. У ложно выделенных

объектов расстояние до соседних объектов, выделенных на предыдущем изображении, обычно не менее 500 км. ТЦ физически не в состоянии переместиться на указанное расстояние в течение времени, прошедшего с момента предыдущего ИК-снимка (от 15–60 минут). Таким образом, данное свойство успешно используется для отбраковки ложных объектов.

- *Построение треков ТЦ.* После прохождения процедуры отбраковки по полученным центрам ТЦ строятся их треки (временные последовательности, состоящие из координат центров ТЦ). Однако в результате ранее проводимых экспериментов по отбраковке ложных объектов встречался случай, когда размер, структура облачности, форма облачных полос и скорость его перемещения не отличались от параметров обычного тайфуна (Алексанин, Ерёменко, 2009). Данное циклоническое образование существовало во времени около суток. В связи с этим в процедуре построения треков было введено дополнительное условие фильтрации треков на время их жизни – трек забраковывается, если его время жизни составляет менее суток.

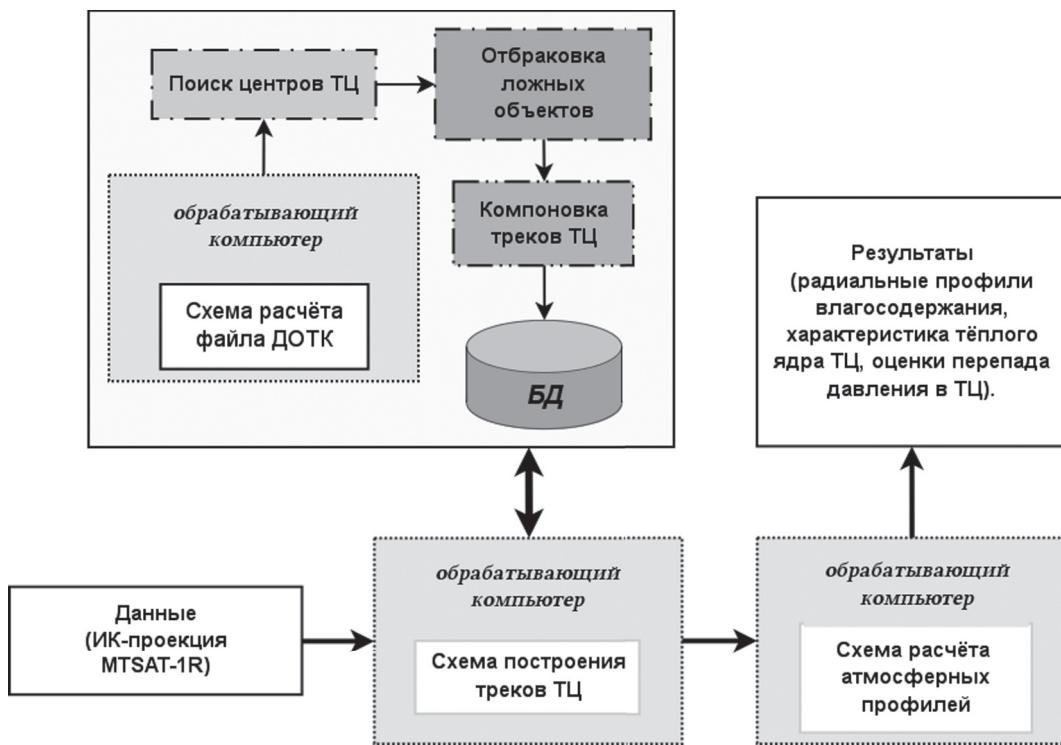


Рис. 1. Общая схема работы автоматической системы

Схема работы системы построения треков ТЦ

Для работы системы построения треков ТЦ используются ИК-изображения со спутника MTSAT-1R, получаемые в оперативном режиме в ЦКП Спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. ИК-изображения охватывают следующий регион: координаты левого нижнего угла по широте – $0^{\circ}00'00''S$ и долготе – $110^{\circ}00'00''E$; размер по широте и долготе – 70° (рис. 2). Размер пикселя изображения в надире составляет около 3,7 км.

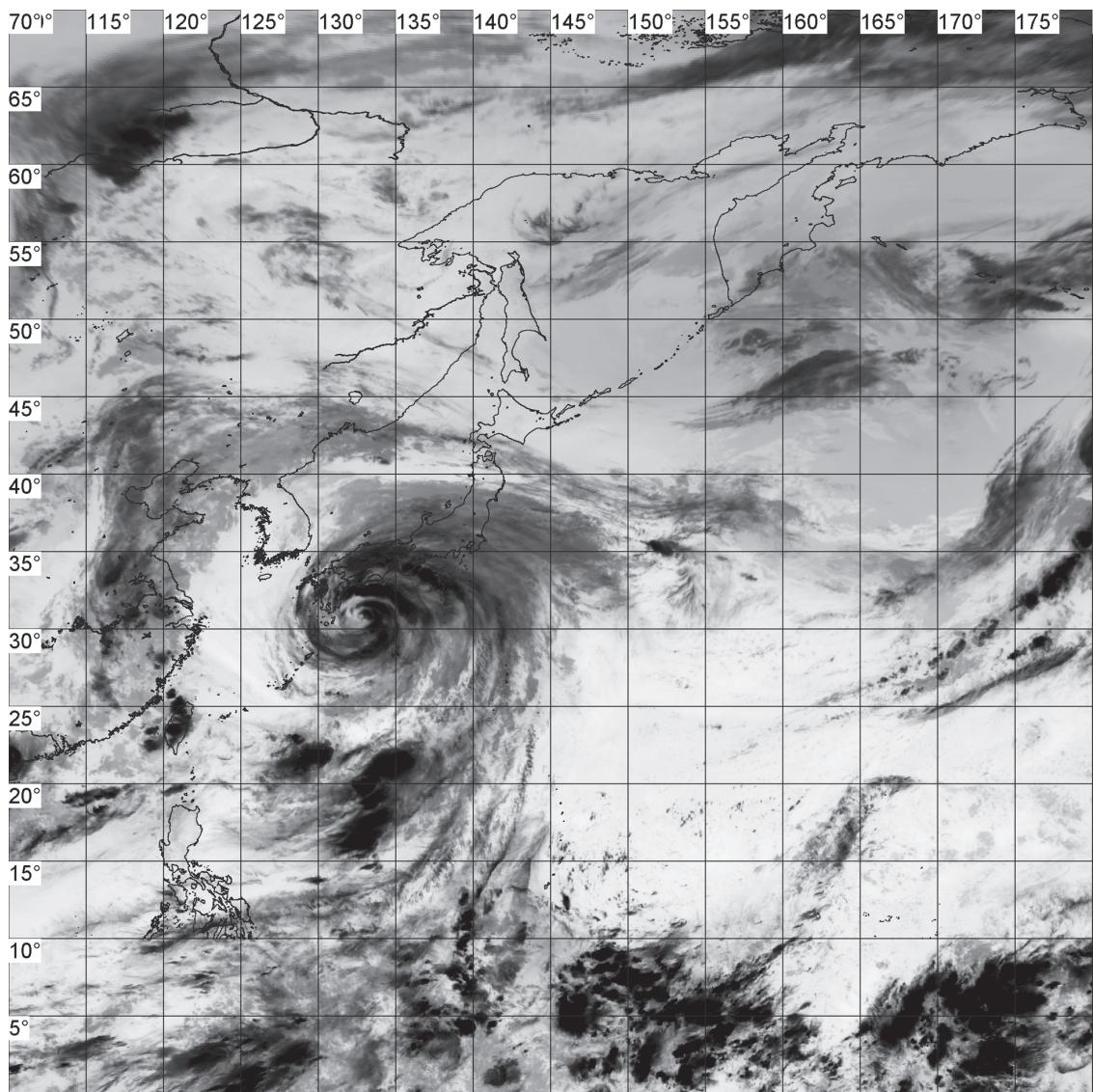


Рис. 2. Пример исходного изображения области поиска ТЦ. По оси абсцисс отложены градусы в. д., по оси ординат – градусы с. ш.

При поступлении в режиме оперативной обработки нового ИК-изображения происходит автоматический запуск процедуры построения карты ДОТК для данного изображения. Для достижения максимальной эффективности по времени процесс построения карты ДОТК осуществляется на многопроцессорном кластере (SMH-11 с пиковой производительностью до 16 Тфлопс) с использованием до 20 процессоров одновременно.

После расчета карты ДОТК автоматически производится запуск обрабатывающей программы. В данной программе в первую очередь запускается алгоритм поиска центра ТЦ по круговой циркуляции с использованием карт ДОТК. В результате работы алгоритма получаются начальные приближения предполагаемых центров ТЦ. Все полученные в результате пересчета значения точек заносятся далее в базу данных.

После этого запускается алгоритм поиска «глаза» ТЦ, который независимо от первого алгоритма производит оценку положений «глаза» ТЦ. После того как алгоритм поиска «глаза» ТЦ завершил свою работу, запускается процесс построения треков ТЦ на основе полученных точек. При этом, если расстояние от рассматриваемого центра по циркуляции

до ближайшего центра по «глазу» составляет не более 80 км, то в качестве оценки центра ТЦ берется значение по «глазу», как более точное. Далее каждая точка проверяется на наличие соседа на предыдущем снимке. Соседняя точка определяется установленными критериями близости: по расстоянию и по времени. В ходе ранее проведенных экспериментов была установлена величина стандартного отклонения центров ТЦ по *базовой процедуре*, равная 37 км (Алексанин, Ерёменко, 2009). Время между точками не должно превышать 1 часа. После завершения данной процедуры все точки будут либо отнесены к какому-либо существующему треку ТЦ, либо будут образовывать новый трек, либо будут забракованы, как не имеющие соседей.

Все существующие треки также проходят проверку на время их жизни. Если время жизни какого-либо из треков составляет менее суток, то такой трек будет отбракован. Критерий отбраковки взят исходя из минимально возможного времени жизни ТЦ.

Трехмерная структура ТЦ

Траектория ТЦ является основой для автоматического вычисления и анализа трехмерной структуры ТЦ. Вертикальные профили температуры и влажности, рассчитываемые на основе измерений радиометров ATOVS/NOAA пакетами программ Европейского космического агентства (AAPP, RTTOV и MetOffice-1Dvar), используются для проведения анализа ТЦ. Профили предоставляют информацию для вычисления в ТЦ кросс-секций поля аномалий температуры атмосферы (Alexanin et al., 2010). Кросс-секция – плоское изображение вертикального сечения пространства, проходящего через центр ТЦ. Данное изображение получается путём упорядочивания точек по расстоянию на каждом уровне с последующим осреднением значений (по горизонтали) (Stanley et al., 2000).

Атмосферные профили могут быть использованы для вычисления скорости ветра и/или перепада давления (Alexanin et al., 2010). Эти параметры являются ключевыми в оценке интенсивности ТЦ в любой его точке. Также атмосферные профили могут позволить уточнить центр ТЦ в тех случаях, когда ТЦ находится в фазе зарождения или затухания. Во время процесса затухания происходит размытие структуры облачности ТЦ, в то время как вертикальный разрез температурной аномалии, проходящий через его центр, сохраняет явно выраженные границы ядра. Таким образом, оценив положение центра теплого ядра ТЦ, мы получим положение его центра.

Структура распределенной системы обработки

Для реализации представленной системы используется распределенная система обработки данных. Вся система построена на GRID-вычислениях, где каждый вычислительный узел (в том числе задействованный для вычислений многопроцессорный кластер) является независимым компьютером, связанным с другими посредством сети (*рис. 3*). Это позволяет одновременно решать несколько задач независимо друг от друга.



Рис. 3. Общая структура работы распределенной вычислительной системы

При срабатывании установленных триггеров (чаще всего по появлению новых данных) происходит запуск схемы, обрабатывающей данную задачу. Схема является формальным описанием того, как и на каких обрабатывающих машинах должна запускаться та или иная задача. При запуске схемы она получает порядковый номер, который в дальнейшем используется для контроля процесса выполнения данной задачи. Все соединения с сервером управления обработкой, а также обрабатывающими машинами, происходят по протоколу *ssh*, что обеспечивает простоту взаимодействия и высокий уровень безопасности устанавливаемых соединений. После успешного выполнения задачи обрабатывающий сервер выставляет соответствующий флаг. Все результаты работы задачи сохраняются на сервере базы данных.

Такая автоматическая распределенная система позволяет достичь нескольких целей: полностью автоматический запуск необходимых задач с возможностью их ручного запуска; оперативность обработки поступающих данных; автоматическое распределение вычислительных ресурсов между задачами; устойчивость к выходу из строя тех или иных обрабатывающих машин; все поставленные в очередь задачи в итоге будут обработаны в порядке их поступления.

Во время построения треков ТЦ происходит автоматический запуск процедуры расчета атмосферных профилей температуры и влажности для регионов с центром в узлах трека и геометрическими размерами 1000×1000 км.

Результаты опытной эксплуатации

Опытная эксплуатация системы автоматического мониторинга ТЦ проводилась на ТЦ 2011 г. В результате опытной эксплуатации системы автоматически были построены треки для нескольких ТЦ: НАИМА (2011.06.16 – 2011.06.25); МА-ОН (2011.07.1 –

2011.07.31); MUIFA (2011.07.27 – 2011.08.15) (рис. 4). Для сравнения приведена траектория (best-track) Японского метеорологического агентства. При детальном анализе полученных треков можно обнаружить, что существующие отклонения точек от центров ТЦ лежат в пределах точности работы алгоритмов (37 км от реального центра ТЦ) (Александин, Ерёменко, 2009). При наличии «глаза» в ТЦ его центр определяется с пиксельной точностью. В целом треки ТЦ строятся устойчиво, но довольно редкие большие отклонения точек (до 150 км) приводят к разрывам треков. Также разрывы треков происходят в результате задержки ИК-изображений либо их выпадения из оперативной обработки. Данные проблемы могут решаться дополнительным пересчетом частей треков при поступлении недостающих данных и корректировкой выбросов процедурой интерполяции трека в точках отклонения.

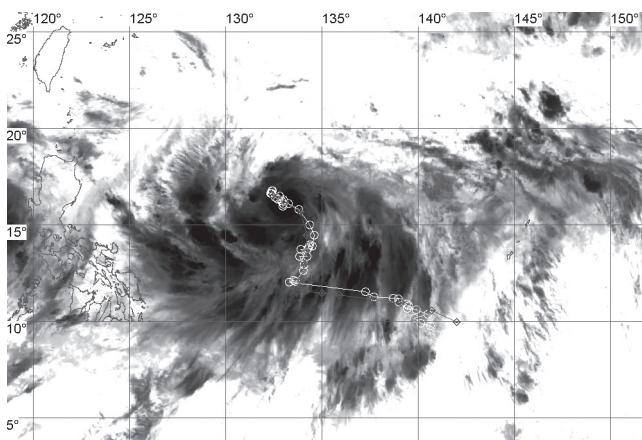


Рис. 4. Пример автоматического построения траектории ТЦ MUIFA (2011.07.27 – 2011.08.01) – представлена белым цветом с центрами в виде кружочков. Для сравнения на изображение нанесена траектория, построенная JMA (best-track), – представлена черным цветом в виде ромбиков. По оси абсцисс отложены градусы в. д., по оси ординат – градусы с. ш.

В результате эксплуатации автоматической процедуры построения треков ТЦ с одновременной отбраковкой ложных объектов удалось добиться устойчивого выделения реальных ТЦ по серии спутниковых ИК-изображений.

Заключение

В работе рассмотрена опытная эксплуатация системы автоматического построения треков ТЦ на основе алгоритмов выделения центра ТЦ с привлечением данных атмосферных профилей температуры и влажности. Система прошла апробацию на нескольких ТЦ за 2011 г. Во время опытной эксплуатации системы выявились некоторые особенности, связанные с работой приёмных систем, а именно пропуск одного или более ИК-изображений из непрерывной серии с возможным поступлением их позднее. В связи с этим была реализована возможность добавления точек в существующие треки, а также «склейка» нескольких отдельных треков ТЦ.

Работа выполнена на оборудовании, уникальных стендах и установках Центра коллективного пользования «Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Работа поддержана грантом РФФИ 11-01-00593 и грантами ДВО РАН.

Литература

1. Алексанин А., Еременко А. Автоматический расчет траекторий тропических циклонов по данным геостационарных метеорологических спутников // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 22–31.
2. Alexanin A.I., Eremenko A.S., Bolovin D.A., Dyakov S.E. Automatic Computation of Tropical Cyclone Tracks on Geostationary Satellite Imagery // Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010), 6–9 September 2010, Vladivostok (Russia). – Vladivostok: IACP FEB RAS. – 2010. – ISBN: 978-0-9803267-3-4 (CD). P. 255–258.
3. Dvorak V.F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data // NOAA Tech. Rep. NESDIS 11. Available from NOAA/NESDIS, 5200 Auth Rd.. Washington DC, 20233. 1984, 47 p.
4. Kidder S.Q., Goldberg M.D., Zehr R.R., DeMaria M., Purdom J.F.W., Velden C.S., Grody N.C., Kusselson S.J. Satellite analysis of tropical cyclones using the advanced microwave sounding unit (AMSU) // American Meteorological Society. 2000. P. 1241–1259.
5. Tsang Long Pao, Jun Heng Yeh, Min Yen Liu et al. Locating the Typhoon Center from the IR Satellite Cloud Images // Proc. System, Man and Cybern. 2006. V. 1. P. 484–488.
6. Wimmers A., Velden C. Satellite-based center-fixing of tropical cyclones: new automated approaches. – University of Wisconsin – Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies. 2004.
7. Wimmers A., Velden C. Objectively determining the rotational center of tropical cyclones in passive microwave satellite imagery – CIMSS, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin. 2010.

Test exploitation of tropical cyclone' automatic tracking system

A.S. Eremenko

Institute of Automation and Processes Control FEB RAS
690041 Vladivostok, 5 Radio Str.
E-mail: academy21@iacp.dvo.ru

The test version of tropical cyclone (TC) automatic tracking system was created. The system is created on the basis of several center fixing algorithms with automatic false objects dropout. The trajectory is a basis for TCs' 3d-structure calculation using temperature and humidity atmosphere profiles. All results are stored in the database. The testing exploitation in the operative mode was made on several TCs during 2011 summer months. The system is based on the grid-computations. After test exploitation it was found a necessity in algorithms parallel realisation. For this purpose the SMH-11 super-computer was used.

Keywords: tropical cyclone, automatic system, detection, trajectory, grid-system.