

УДК 519.6:551.515.1

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ

Б. Н. Иванов¹

Исходными данными для построения траекторий циклонов (трекинг циклонов от английского “tracking”) и антициклонов выступают изолинии полей давления на уровне моря и геопотенциала на стандартных высотах. Структура изолиний таких полей характеризуется своей вложенностью и динамической устойчивостью во времени. Вложенность изолиний определяется циклонами и антициклонами. Для их выделения вложенность изолиний исходного поля представляется структурой корневых деревьев. Обход такого рода деревьев позволяет выделить изолинии центров и оснований циклонов и антициклонов. Идентификация циклонов и антициклонов в различные моменты времени выполняется последовательно способом наложения упорядоченных по времени изолиний оснований. Продолжение траектории определяется циклоном (антициклоном), площадь пересечения с основанием которого наибольшая. Размеры оснований циклонов и антициклонов определяются действительными расстояниями между их центрами. При характерных смещениях циклонов (антициклонов), не превышающих размеры оснований, предложенная схема вычисления траекторий носит устойчивый характер. Для давления и геопотенциала интервал интерполяции исходных данных в 3 часа вполне удовлетворяет указанным ограничениям. Предложенная схема идентификации циклонов и антициклонов носит самый общий характер и применима к любому типу полей, если изолинии таких полей характеризуются своей вложенностью и обладают динамической устойчивостью во времени. Схема опирается лишь на поле изолиний и не использует каких-либо уникальных его свойств.

Ключевые слова: траектория циклона, идентификация циклона, трекинг циклона, tracking.

1. Введение. В настоящей статье рассматривается решение задачи построения траекторий перемещения циклонов и антициклонов при анализе карт погоды в оперативной практической работе. Задача имеет важное практическое значение и реализована в рамках действующей геоинформационной системы “Океан” [1] обеспечения безопасности полетов и мореплавания. Информационной базой задачи являются поля данных метеоэлементов (данные в узлах регулярной сетки) мировых центров прогноза погоды: Брекнелл, Вашингтон, Москва, Япония и др. Траектории циклонических образований строятся по данным полей давления на уровне моря и геопотенциала на всех стандартных высотах. Заблаговременность полей варьируется от 5 до 10 суток с шагом 6 и 12 часов.

Как правило, горизонтальный анализ распределения значений метеоэлементов в узлах регулярной сеточной области осуществляется в графическом виде. С этой целью строят поля изолиний [2]. Компьютерная реализация позволяет наблюдать динамику изменения во времени циклонов и антициклонов в изолиниях в форме мультипликации графических образов. В каждый момент времени на экране можно наблюдать только одно текущее поле. Траектории циклонов (антициклонов) — это дополнительный инструмент анализа карт погоды. Траектории связывают распределенные во времени карты, показывая направление развития синоптических процессов. На рис. 1 показан пример вычисленной траектории перемещения циклона по данным динамики полей давления на уровне моря в изолиниях. Перемещение циклона по траектории можно наблюдать в форме мультипликации и в пошаговом режиме.

Задача расчета траекторий циклонов — это одна из важнейших задач общей задачи прогноза погоды. Актуальность и интерес к ней с годами только растет, о чем можно судить по многочисленным современным публикациям в этой области [3]. Важное место среди них отводится климатологии циклонической активности. Распознавание образа циклона на карте погоды называется *идентификацией циклона*. Образ циклона, как правило, связывается с координатами его центра и размерами. Идентификация (формирование, построение) траектории циклона называется его *трекингом* (от английского слова “tracking”) [3].

Исторически трекинг начинался с ручной идентификации циклонов, основанной на визуальном анализе “бумажных” синоптических карт погоды. Сегодня в оперативной практической работе все карты

¹ Дальневосточный федеральный университет, Школа естественных наук, ул. Суханова, 8, 690091, г. Владивосток; доцент, e-mail: ibn8826@mail.ru

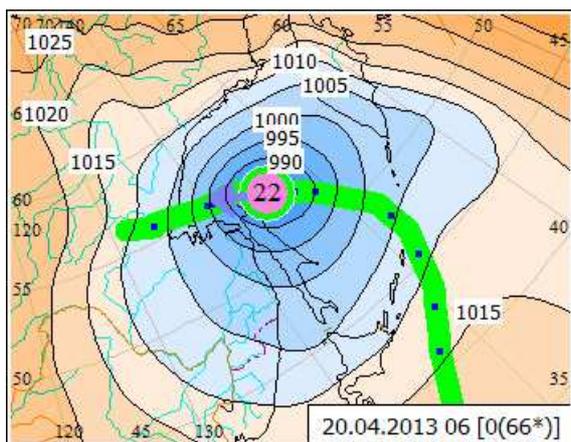


Рис. 1. Траектория перемещения циклона

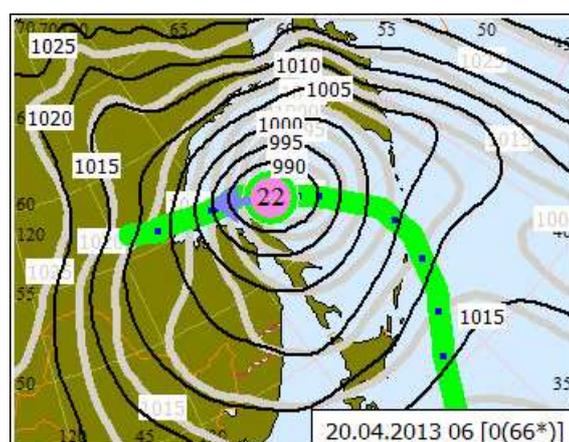


Рис. 2. Наложение полей изолиний

погоды формируются в электронном виде. Компьютерные технологии позволяют внести инструмент трекинга циклонов в оперативную работу, что дает возможность в любой момент времени наблюдать траектории их перемещения. Циклоны играют ключевую роль в погодных явлениях. С одной стороны, циклоны отвечают за важную часть нашей системы водоснабжения, а с другой — тесно связаны со многими опасными природными явлениями. В этой связи важно обеспечить точный прогноз циклонической активности, который включает в себя климатологию внетропических циклонов, а также оценить возможность их будущих изменений. Климатология циклонической активности позволяет выделить наиболее вероятные пути перемещения циклонов. Как только стали собирать первые синоптические анализы в климатические архивы, то помимо оперативных задач возник интерес к исследованию климатологии циклогенеза и стали развиваться автоматические схемы трекинга [4–8]. Практически все работы по трекингу рассматриваются сквозь призму климатологии циклонов.

Процедура трекинга циклона начинается с его идентификации. Как правило, центр циклона определяется областью пониженного давления или областью максимальной завихренности. Найденные в последовательные моменты времени координаты центра циклона объединяются в траекторию. За последние два десятилетия было предложено довольно значительное количество различных подходов к решению данной задачи. Все автоматические схемы трекинга являются уникальными, так как каждый автор вносит в нее свое понимание того, что лучше всего характеризует циклон. Они могут быть удивительно похожи в некоторых аспектах и значительно отличаться в других.

Отечественные разработки методов трекинга датируются с середины 90-х годов XX века [9]. Первый из таких методов [10, 11] был разработан в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. Как и большинство методов, он основан на стандартном выделении циклона как области пониженного давления, ограниченной замкнутыми изобарами (изогипсами при использовании данных геопотенциала). Критерием объединения циклонов в последовательные моменты времени в одну траекторию является минимальное расстояние между его центрами. Эта процедура определяется как алгоритм “ближайшего соседа”. При объединении центров циклонов в одну траекторию явно или неявно необходимо применить этот алгоритм, так как всегда существует выбор одного из многих. Как правило, данная процедура основана на определении минимального расстояния между центрами циклонов в последовательные моменты времени. В общем случае это расстояние не является минимальным в прямом смысле. Например, зная направление перемещения циклона и его скорость, легко оценить его примерное положение в следующий момент времени (прогноз). В этом случае в качестве текущего положения циклона естественно принять его прогноз, а следовательно, и содержание алгоритма “ближайшего соседа” становится уже другим. Далее, если специально не оговорено противное, то алгоритм “ближайшего соседа” будем понимать в непосредственной его интерпретации.

Второй метод предложен в Институте физики атмосферы [12, 13]. Как отмечают авторы, метод является развитием первого подхода [10]. В частности, повышена точность определения параметров циклонов. При временной дискретности данных в 6 часов в единую траекторию объединяются два ближайших циклонических центра, если максимальное расстояние между центрами в последовательные моменты времени не превышает 800 км и изменение давления в центре при этом не должно превышать 20 ГПа. При этом прогноз положения циклона определяется на основе полей ветра на высоте, соответствующей 700 ГПа.

Третий метод идентификации циклонов и их траекторий создан в Институте океанологии РАН [14–16]. При идентификации циклонов во внимание принимаются лишь те циклоны, значения давления в центре которых не более 1015 ГПа и время жизни не менее 24 часов. В траекторию объединяются два ближайших циклона в последовательные моменты времени с расстоянием между их центрами не более 10° при временном шаге 6 часов. Наиболее характерное смещение циклонов за 6 часов составляет 50–200 км. Однако для некоторых циклонов эти значения могут достигать и 1000 км. Таким образом, характерные смещения циклонов и расстояния между центрами циклонов могут становиться сравнимыми. Именно это порождает неопределенность в идентификации траекторий циклонов. Предлагается выполнить интерполяцию данных по времени с шагом 1 час. Это позволяет уменьшить характерный пробег для таких циклонов до 10–30 км, что существенно меньше типичных расстояний между центрами циклонов, которые при шаге смещения в 1 час можно полагать “неподвижными”.

Из зарубежных работ выделяют метод, разработанный в Климатическом диагностическом центре NOAA-CIRES (National Oceanic and Atmospheric Administration, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, USA), представлен в работах [6, 17]. В этом случае циклон определяется как область пониженного давления с замкнутыми изобарами с шагом 1 ГПа. Траектории вычисляются при условии, что максимальное расстояние, на которое может переместиться циклон за 6 часов, не может превышать 800 км (при максимальной скорости циклона 133 км/ч) и изменение давления в центре при этом не должно превышать 20 ГПа.

В отечественной практике анализу указанных выше схем трекинга уделяется довольно большое внимание. Так, в работе [13] представлены результаты сравнительного анализа данных схем. Авторы отмечают, что основная часть (около 70%) циклонов выделяется одинаково хорошо всеми указанными выше схемами трекинга.

Накопленный материал по схемам трекинга и значимость практического решения задачи климатологии циклонической активности привлекли к себе внимание международного сообщества. Так, в 2009 г. был открыт международный проект IMILAST (Intercomparison of Mid Latitude Storm Diagnostics), который поставил себе задачу сравнить на качество существующие схемы трекинга внетропических циклонов. Было предложено всем заинтересованным сторонам (командам) принять участие в данном проекте. Для участия необходимо было представить расчетную схему трекинга и ее публикации. Отбор прошли 15 проектов, которые в методической основе покрыли все множество существующих схем трекинга. В 2013 г. организаторы IMILAST опубликовали результаты сравнения и сопоставления отобранных трекинг-проектов [3]. С нашей стороны участие приняли ранее упомянутый проект [11, 12] и проект [16]. *Здесь и далее под проектами надо понимать статьи, представленные авторами в качестве публикаций по заявленным проектам.* Во втором проекте трекинг циклона начинается с поиска точек локального минимума давления на уровне моря по 13 точкам. Предварительная интерполяция полей давления с шагом 1 час позволяет уменьшить характерные смещения циклонов и отличить их от расстояний между центрами циклонов. При объединении центров циклонов в одну траекторию применяется алгоритм “ближайшего соседа”.

Свойства и возможности оставшихся проектов IMILAST рассмотрим в рамках решения ими задач трекинга циклона — это задача идентификации циклона и задача формирования его траектории. В подавляющем большинстве проектов (см. соответствующие им публикации [4, 18], [19], [20], [21], [6, 22], [4, 23], [24], [8, 25], [26] и [27]) идентификация выполняется по данным полей давления на уровне моря или геопотенциала H1000. За исключением проекта [20], все остальные к идентификации привлекают завихренность (лапласиан) или (и) градиент. Например, в проекте [6, 22] циклон — это область с минимальным давлением и градиентами (эквивалент скорости ветра) не менее 0.1 ГПа на 50 км. В качестве центра такого циклона принимается точка с максимальной завихренностью (лапласиан давления). Столь “жесткие” условия в идентификации циклонов направлены на исключение случайных циклонических образований. В проекте [4, 23] циклон характеризуется областью минимального давления и значением лапласиана в границах циклона. Величина лапласиана должна быть не менее 0.2 ГПа на площадь $1^\circ \times 1^\circ$ или 16 ГПа на 1 км^2 . Центром циклона объявляется точка с минимальным давлением.

Алгоритмы формирования траекторий циклонов в проектах также разнятся. В проектах [19], [21], [6, 22] и [4, 23] центры циклонов объединяются в траекторию согласно алгоритму “ближайшего соседа” в классическом его понимании. Поиск соседа (циклона) через 6 часов в различных проектах ограничивают радиусом 600 км, 800 км, 10° или областью определенных размеров.

В проектах [4, 18] и [4, 23] алгоритм “ближайшего соседа” расширен вероятностной процедурой оценки возможного направления перемещения циклона за последние 6 часов. Это позволило объективно расширить границы поиска в наиболее вероятных направлениях и уменьшить или свести к нулю эти границы в менее вероятных направлениях.

В проекте [24] алгоритму “ближайшего соседа” предшествует процедура вычисления прогноза центра циклона к моменту $t + \Delta t$ по данным координат центра в моменты $t - \Delta t$ и t , применяется линейная интерполяция. В последних двух проектах авторы пытаются повысить робастность алгоритма “ближайшего соседа” на основе данных текущего и прошлых состояний циклонов.

Часть проектов [5, 28, 29] выполняет трекинг по данным полей геопотенциала N850. Рассмотрим один из них [28]. Центры циклонов фиксируются в точках локального минимума геопотенциала. Для каждого выделенного циклона в момент времени t вычисляется прогноз его положения в следующий момент $t + \Delta t$. Для этого центр покрывается областью размером 2×10^5 км², что соответствует квадрату $4^\circ \times 4^\circ$. Сама область разбивается на части (локусы), которые переносятся по потоку в интервале времени от t до $t + \Delta t$. Из разлетевшихся локусов строят их выпуклую оболочку, которая обозначает предполагаемое расположение выделенного циклона в следующий момент времени $t + \Delta t$. В качестве истинного положения выделенного циклона в момент $t + \Delta t$ принимается тот циклон, для которого площадь пересечения с выпуклой оболочкой будет максимальной.

Из приведенного обзора работ видно, что сама идентификация циклонов не вызывает сложностей. Неопределенности возникают при построении траекторий в алгоритме “ближайшего соседа”, который с необходимостью надо исполнить. Стандартно вычисления выполняются с шагом 6 часов. За этот интервал времени характерные смещения циклонов и расстояния между центрами циклонов могут оказаться сравнимыми. Именно это порождает неопределенность в идентификации траекторий циклонов. Сегодня данную задачу пытаются решить двумя способами. В первом случае прибегают к интерполяции исходных данных по времени с шагом 1 час, как в проекте [14–16]. В другом случае пытаются построить прогноз координат центров циклонов на следующий расчетный срок. Тем самым уменьшают характерные смещения циклонов и облегчают работу алгоритму “ближайшего соседа”. Именно так поступают в проектах [24] и [28], а в проектах [4, 18] и [4, 23] это осуществляется неявно. Поиск в алгоритме “ближайшего соседа” ограничивается наиболее вероятными направлениями перемещения циклона.

В настоящей статье предлагается общий геометрический подход к построению траекторий циклонов и антициклонов в оперативной практической работе. Сегодня у синоптика в распоряжении довольно развитые программные средства автоматизации обработки данных и их визуализации. Один из таких комплексов — ГИС “Океан” [1], в рамках которого выполняется вся оперативная работа по составлению прогнозов погоды. Реализация рассматриваемого подхода к построению траекторий выполнена в среде данного комплекса. Исходными данными выступают изолинии синоптических полей. Структуру произвольного поля изолиний можно интерпретировать как поле циклонических и антициклонических образований (низких и высоких значений). Пусть изолинии таких полей характеризуются своей вложенностью (рис. 3). Если такого рода образования могут обладать динамической устойчивостью во времени, то они допускают и построение их траекторий перемещения. К таким полям можно отнести поля давления на уровне моря, геопотенциала любой стандартной изобарической поверхности, вихря ветра, лапласиана давления и геопотенциала. Для малоградиентных полей давления и геопотенциала построение траекторий вихря и лапласиана приобретает важное практическое значение. Вложенностью изолиний и их динамической устойчивостью характеризуются такие поля, как тенденция давления, тенденция геопотенциала и тенденция температуры.

Далее, с учетом сказанного, под полем давления будем понимать поле атмосферного давления на уровне моря и все, что будет сказано в отношении трекинга циклонов и антициклонов, в равной степени будет относиться к произвольным полям с вложенной и динамически устойчивой структурой их изолиний.

2. Поле изолиний. Исходными данными для построения траекторий циклонов и антициклонов являются изолинии [2], составленные для функции двух переменных $z = f(x, y)$, где $x, y \in D$ и D — некоторая область. Под изолинией понимают изображение на плоскости линии $f(x, y) = b$, где b — константа. Говорят, что значение b определяет уровень проведения изолинии. Под полем изолиний будем понимать множество изолиний, составленных для различных уровней b в интервале $\min_{x, y \in D} f(x, y) \leq b \leq \max_{x, y \in D} f(x, y)$. Частота проведения изолиний определяется шагом изменения значения b . В нашем случае функция $z = f(x, y)$ задается множеством значений в узлах регулярной сеточной области. Незамкнутые изолинии дополним до замкнутых соответствующими участками границы области D . Обозначим через $F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ множество всех изолиний (уже замкнутых) рассматриваемой области D . Каждая изолиния представляется замкнутым вектором своих опорных точек $C_k = (c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kn_k})$, где $c_{ki} = (x_{ki}, y_{ki})$ — координаты опорных точек, n_k — количество точек на k -й изолинии.

Определение 1. Определим на $F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ бинарное отношение вложенности \subset . Отношение $C_i \subset C_j$ выполняется, если изолиния C_i вложена в изолинию C_j или, наоборот, изолиния C_j

охватывает изолинию C_i .

Дадим определение в изолиниях циклона (антициклона), его основания и центра.

Определение 2. Изолинию, которая не охватывает ни одной другой изолинии, будем называть *центром циклона*. Уровень вложенности изолинии центра будет максимальным для циклона. Циклоном будем называть последовательность охватывающих изолиний, начиная с изолинии центра. Уровень вложенности каждой следующей охватывающей изолинии уменьшается на единицу. Каждая изолиния циклона, за исключением его центра, должна охватывать ровно одну изолинию циклона предыдущего уровня. *Основанием циклона* будем называть последнюю охватывающую изолинию циклона.

Замечание 1. Заметим, что если в определении 2 слово “циклон” заменить на “антициклон”, то получим равносильное определение антициклона в изолиниях. Поэтому далее поле изолиний циклонов и антициклонов будем интерпретировать просто как поле изолиний циклонов.

На рис. 3 представлен модельный пример поля изолиний, а на рис. 4 — все циклоны этого поля. Для решения задачи вычисления траекторий циклонов необходимо выполнить построение в изолиниях циклонов данного поля. В основе предлагаемого метода выделения циклонов лежит структура вложенности изолиний исходного поля данных. Описание самой структуры рассматривается ниже в разделе 4.

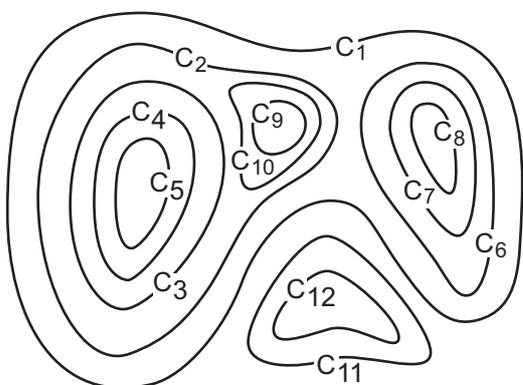


Рис. 3. Пример поля изолиний

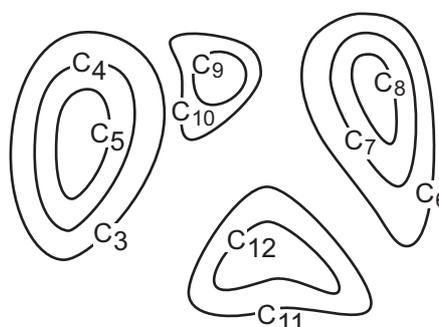


Рис. 4. Поле циклонов

3. Идентификация циклонов и траекторий. В настоящей статье трекинг рассматривается в условиях оперативной практической работы и в условиях визуализации динамики синоптических полей в форме мультипликации графических образов. Исходными данными выступают поля давления на уровне моря и геопотенциала на всех стандартных высотах от мировых центров прогноза погоды: Брекнелл, Вашингтон, Москва, Япония и др. Заблаговременность полей варьируется от 5 до 10 суток с шагом 6 и 12 часов на сеточную область с разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и $1.25^\circ \times 1.25^\circ$. В практической работе будет по меньшей мере странным, если в визуальном восприятии траектория циклона не будет проходить через его центры. Поэтому в данной технологии первоначальная *идентификация циклона* для построения его траектории осуществляется *по полю изолиний* в интерактивном режиме и выносится на уровень синоптика как пользователя. Для выбора циклона достаточно курсором мыши попасть в область его основания.

Визуализация динамики синоптических полей в форме мультипликации предполагает достаточно плавную смену кадра на экране дисплея. Исходные данные с шагом 12 часов представляют довольно дискретную картину. Достаточно устойчивую смену кадра дает интерполяция исходных полей с шагом 3 часа.

Траектория циклона — это ломаная, которая соединяет упорядоченные во времени точки с координатами центра циклона, поэтому для построения траектории циклона необходимо знать его местоположение на карте в каждый момент времени. Задача идентификации циклона — это распознавание его образа в следующий момент времени при известном его положении в текущий момент. При диаметре циклона у основания в 10 градусов (1 градус = 60 миль, 1 миля = 1.852 км) и довольно значительной скорости перемещения 60 км/час. центр его основания за 3 часа сдвинется лишь на 180 км, или 1.6 градуса. Это третья часть радиуса циклона. Можно утверждать, что шаг интерполяции, равный 3 часам, будет гарантировать пересечение изолиний оснований циклона, отстоящих на указанное время. На рис. 2 показан пример наложения двух полей изолиний давления на уровне моря со сдвигом 6 часов при скорости циклона 22 км/час.

Указанное свойство циклонов динамического поля предлагается использовать в качестве признака их идентификации в следующий момент времени. Заметим, что основание текущего циклона может иметь пересечение с основаниями одновременно двух и более циклонов следующего момента времени. При неоднозначности выбора предпочтение отдается циклону, площадь пересечения с которым наибольшая. Данная процедура выбора является еще одной интерпретацией алгоритма “ближайшего соседа” [3].

Предложенная схема идентификации циклонов и антициклонов носит *общий характер* и применима к любому типу полей, если изолинии таких полей характеризуются своей вложенностью и обладают динамической устойчивостью во времени. Действительно, схема опирается лишь на поле изолиний и не использует каких-либо уникальных свойств конкретного поля: например, величины градиента, лапласиана и др.

Центральное место в схемах трекинга [3] занимает такой параметр, как характерное смещение циклона за выбранный интервал времени. Для однозначного вычисления траектории циклона значение этого параметра должно быть меньше расстояния между центрами циклонов. В противном случае гарантировать правильность траектории не приходится. Для уменьшения характерных смещений циклонов за интервал 6–12 часов поступают одним из двух способов. В первом случае прибегают к интерполяции исходных данных с шагом 1 час, во втором случае пытаются построить прогноз координат центра текущего циклона к следующему моменту времени и приблизить его к истинному местоположению.

Важно отметить, что для различных типов полей (давления, геопотенциала различных высот и др.) характерные смещения структур вложенности изолиний могут значительно отличаться друг от друга. Многие схемы трекинга из обзора [3] закладывают такого рода параметры непосредственно в саму схему, ориентируясь на один конкретный тип поля.

В предложенную схему характерные смещения циклонов не закладываются, поэтому схема носит самый общий характер. Размеры оснований циклонов определяются (ограничиваются) действительными расстояниями между циклонами и не превышают их. Для неглубоких и слабо выраженных циклонов размеры их оснований могут оказаться небольшими и меньше характерных смещений, что не позволит найти продолжения циклона в следующий момент времени. Однако это не позволит выбрать и ошибочное продолжение траектории, так как размеры оснований циклонов не превышают расстояний между их центрами. Поэтому интервал проведения расчетов должен быть согласован с возможными реальными размерами оснований циклонов. Для давления и геопотенциала интервал в 3 часа вполне удовлетворяет указанным ограничениям (см. начало данного раздела статьи). Если перейти к интервалу интерполяции в 1 час, как поступают в некоторых проектах [3], то предложенная схема будет устойчиво выделять траектории для произвольного типа полей (вихря, лапласиана, тенденции температуры и др.).

Далее рассматривается практическая реализация предложенной схемы идентификации циклонов и траекторий их перемещения. Исходными данными являются поля изолиний. Задачей идентификации циклонов является выделение их центров и оснований.

4. Корневые деревья структуры вложенности изолиний. Введем на исходном множестве изолиний $F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ (см. раздел 2) ряд отношений с целью определения новых структур данных, которые обеспечат доступ к перечню изолиний C_1, C_2, \dots, C_{n_F} в соответствии с их структурой вложенности.

Определение 3. Определим на $F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ бинарное отношение охватывающего соседства \prec . Отношение $C_i \prec C_j$ выполняется, если $C_i \subset C_j$ и для всех C_k , не равных C_j , выполняется отношение $C_i \subset C_k \Rightarrow C_j \subset C_k$. Это означает, что C_j — наименьшая охватывающая изолиния для C_i .

Поставим в соответствие структуре вложенности изолиний $F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ ориентированный граф $G_F = (X_F, U_F)$, где $X_F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ — множество вершин и U_F — множество ребер, ребра представляются парами вершин. Ребро $u = (C_i, C_j) \in U_F$, если для изолиний C_i и C_j выполняется отношение $C_i \prec C_j$. Направленное ребро (C_i, C_j) ориентировано от вложенной изолинии C_i к наименьшей охватывающей ее изолинии C_j ($C_i \rightarrow C_j$).

Определение 4. Определим на $F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ бинарное отношение эквивалентности \sim . Будем полагать, что $C_i \sim C_j$, если существует маршрут из C_i в C_j по ребрам неориентированного графа $G_F = (X_F, U_F)$. Данное отношение является отношением эквивалентности (см. работы [30, 31]) и выполняет разложение множества F на непересекающиеся классы эквивалентности D_1, D_2, \dots, D_{n_D} , для которых $F = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_{n_D}$, $D_i \cap D_j = \emptyset, i \neq j$. Классы эквивалентности далее будем называть компонентами связности.

В рассматриваемой интерпретации каждая компонента связности D_k будет представлена *корневым деревом изолиний*. Корнем дерева будет внешняя изолиния компоненты D_k . Все ребра ориентированы в направлении от листьев к корню и показывают для каждой изолинии (вершины) направление доступа

к соседней охватывающей ее изолинии (вершине). Соседней нет только у корня дерева, так как внешняя изолиния компоненты D_k не имеет охватывающей изолинии. На рис. 5 показаны корневые деревья компонент связности для примера поля изолиний, представленного на рис. 3.

Исходное представление графа вложенности изолиний $G_F = (X_F, U_F)$ формируется в алгоритме 3 *ориентированным* реберным списком $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{n_F})$, где элемент Q_i определяется для изолинии C_i и равен номеру наименьшей охватывающей ее изолинии. Следовательно, $Q_i = j$, если выполняется отношение $C_i \prec C_j$ (см. определение 3), а в графе определяется ребро $(C_i \rightarrow C_j)$ или $(i \rightarrow j)$. Для изолиний C_i , которые не имеют охватывающих изолиний, значение $Q_i = 0$. Такими вершинами являются корни деревьев. В описании алгоритма 2 для представления неориентированного графа вложенности изолиний $G_F = (X_F, U_F)$ будет использоваться его структура смежности $Adj[x]$ — множество вершин, смежных с данной вершиной $x \in X_F$. Процедура преобразования реберного списка $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{n_F})$ в структуру смежности $Adj[x]$ представлена в алгоритме 1. Сложность алгоритма 1 определяется двумя вложенными циклами и составляет $O(|X_F|^2)$.

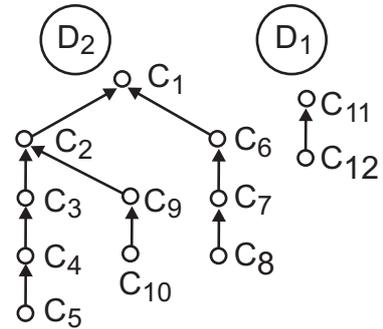


Рис. 5. Корневые деревья компонент связности

Алгоритм 1. Преобразование реберного списка Q в структуру смежности Adj

Procedure *CreateAdj*(Q, Adj);

for $x \in X_F$ do begin

$Adj[x] = \emptyset$; {Начальный пустой список для x }

 if $Q_x \neq 0$ then $Adj[x] = \{Q_x\}$; {Ребро, выходящее из x }

 for $v \in X_F$ do begin

 if $Q_v = x$ then $Adj[x] = Adj[x] \cup \{v\}$; {Редра, входящие в x }

 end;

end;

end.

5. Выделение оснований и центров циклонов. Корневые деревья D_k графа $G_F = (X_F, U_F)$ структуры вложенности изолиний позволяют выделить все циклоны исходного поля изолиний. Заметим, что каждый лист такого дерева — это изолиния центра одного из циклонов. Степень листа равна единице. Для определения недостающих изолиний циклона достаточно перебрать вершины корневого дерева D_k , перемещаясь по нему от листа соответствующего циклона к корню дерева. Изолинии, соответствующие вершинам, последовательно будут добавляться к циклону до тех пор, пока не будет найдено основание циклона. В качестве признаков, что найдено основание циклона, могут служить условия следующего утверждения.

Утверждение. (i) Пусть при подъеме снизу-вверх достигнута вершина, степень которой больше двух; тогда соответствующая ей изолиния охватывает не менее двух циклонов. Следовательно, на предыдущем шаге подъема по дереву было найдено основание формируемого циклона. (ii) Если же при подъеме достигнут корень дерева, степень которого равна двум или более, то изолиния корня охватывает не менее двух циклонов. Следовательно, на предыдущем шаге было найдено основание циклона.

Последовательный порядок перебора вершин от листьев к корню обеспечивает обход дерева снизу-вверх. Воспользуемся описанием общей схемы данного обхода, представленного в работе [30, с. 218]. Модификация этой схемы с учетом условий перебора вершин, обозначенных выше в утверждении, позволяет построить все циклоны поля изолиний. Сама модификация представлена ниже в алгоритме 2. В качестве примера, на рис. 6 отмечены все циклоны корневых деревьев, представленных на рис. 5.

В описании алгоритма 2 будут использоваться следующие обозначения: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ — исконое множество циклонов текущего поля, где n — общее число циклонов; $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in_i}\}$ — множество вершин i -го циклона. При формировании циклона V_i первой его вершиной будет v_{i1} — изолиния центра циклона, последней вершиной будет v_{in_i} — изолиния основания циклона.

Замечание 2. В алгоритме 2 граф вложенности изолиний $G_F = (X_F, U_F)$ задается структурой смежности $Adj[x]$, формирование ее рассматривалось в алгоритме 1. Корневая же структура деревьев графа G_F должна быть сохранена и в структуре смежности $Adj[x]$. При обходе графа G_F это будет выполнено, если в перечне X_F корни деревьев будут встречаться раньше своих вершин.

Чтобы отличить уже пройденные вершины, вводится вектор меток вершин $Mark[x]$, значения которых равны 1 для пройденных вершин и 0 для непройденных. Рекурсивная процедура $Lift(x, root)$ выпол-

няет обход поддерева снизу-вверх с корнем в вершине $x \in X_F$. Вторым параметром $root$ является признаком первого параметра. Для корня дерева x значение $root$ равно $true$. Если же вершина x является корнем поддерева, то параметр $root$ принимает значение $false$. Степень вершины $x \in X_F$ определяется по числу вершин в ее списке смежности $Adj[x]$. Это число обозначается через $|Adj[x]|$.

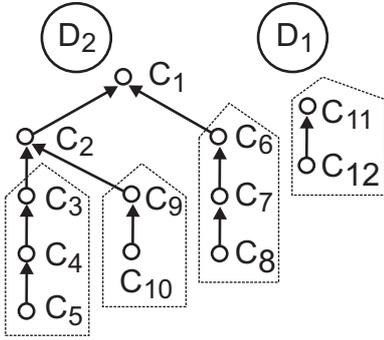


Рис. 6. Циклоны корневых деревьев

Спуск по дереву — это последовательный вызов рекурсивной процедуры $Lift(v, root)$. Спуск вниз означает, что далее будет формироваться очередной циклон V_n , что фиксируется значением переменной $curl$, равной $true$. Вызов $Lift(v, root)$ будет повторяться до тех пор, пока вершина v не окажется листом — началом формирования циклона.

Далее делается подъем по дереву и формирование изолиний нового циклона. Подъем — это последовательный выход из ранее рекурсивно вызванных процедур $Lift(v, root)$. После выхода проверяется значение переменной $curl$, значение которой является характеристикой вершины v . Значение, равное $true$, соответствует условию включения вершины v в текущий циклон $V_n = V_n \cup \{v\}$. Отметим, что при первом выходе из рекурсивной процедуры $Lift(v, root)$ (начало подъема по дереву) значение переменной $curl$ равно $true$, а вершина v является листом дерева. Изолиния такой вершины — это начало циклона и его центр.

Далее оценивается условие возможного завершения формирования текущего циклона. Для вершины x , из которой спустились по рекурсии в вершину v , проверяются условия (i) и (ii) из сформулированного ранее утверждения. Эти условия направлены на установление значения переменной $curl$ для указанной вершины x , включение которой в текущий циклон будет оцениваться на следующем шаге рекурсивного выхода из $Lift(x, root)$. В принятых обозначениях строка данного условия в алгоритме 2 имеет вид **if** $(|Adj[x]| \geq 3 \wedge \neg root) \vee (|Adj[x]| \geq 2 \wedge root)$ **then**. Условие (i) $|Adj[x]| \geq 3 \wedge \neg root$ означает, что вершина x — не корень дерева и степень ее больше двух. Такая изолиния вершины x охватывает не менее двух циклонов. Условие (ii) $|Adj[x]| \geq 2 \wedge root$ означает, что вершина x — корень дерева и степень корня равна двум или более. В этом случае изолиния корня x также охватывает не менее двух циклонов. Таким образом, при выполнении условия (i) или (ii) изолиния вершины v становится основанием циклона V_n и формирование его завершается, что фиксируется значением переменной $curl$, равной $false$. Далее подъем по дереву будет идти “вхолостую” без изменения циклона V_n . Холостой ход обеспечивает значение $false$ переменной $curl$. Подъем выполняется до следующего спуска (вызова процедуры $Lift(v, root)$ и установки переменной $curl$, равной $true$) по дереву за очередным циклоном.

Алгоритм 2. Формирование множества циклонов V_1, V_2, \dots, V_n текущего поля

```

n = 1; {Индекс первого циклона}
for v ∈ XF do Mark[v] = 0; {Метки непройденных вершин}
for v ∈ XF do if Mark[v] = 0 then begin {Поиск начала обхода}
    curl = true; {Признак формирования циклона — спуск вниз}
    Lift(v, true); {Обход корневого дерева, v — корень дерева}
    if curl then begin {Формирование изолиний циклона — подъем вверх}
        Vn = Vn ∪ {v}; {Добавить изолинию к циклону}
        curl = false; {Текущий циклон сформирован}
        n = n + 1; {Индекс следующего циклона}
    end;
end;
n = n - 1; {Количество циклонов}

```

```

Procedure Lift(x, root); {Обход поддерева снизу-вверх с корнем в x}
    Mark[x] = 1; {Вершина пройдена}
    for v ∈ Adj[x] do begin {Перебор смежных вершин}
        if Mark[v] = 0 then begin {Поиск непройденной вершины}
            curl = true; {Признак формирования циклона — спуск вниз}
            Lift(v, false); {Обход поддерева, v — корень поддерева}
            if curl then begin {Формирование изолиний циклона — подъем вверх}
                Vn = Vn ∪ {v}; {Добавить изолинию к циклону}
                if  $(|Adj[x]| \geq 3 \wedge \neg root) \vee (|Adj[x]| \geq 2 \wedge root)$  then begin
                    curl = false; {Текущий циклон сформирован}
                end;
            end;
        end;
    end;

```

```

        n = n + 1; {Индекс следующего циклона}
    end;
end;
end;
end;
end.

```

Сложность алгоритма 2 формирования циклона является линейной $O(|X_F|)$ относительно числа вершин в графе $G_F = (X_F, U_F)$.

6. Формирование траекторий циклонов. Пусть $V^t = \{V_1^t, V_2^t, \dots, V_{n_t}^t\}$ обозначает множество циклонов на поле изолиний в момент времени t и $V^{t+\Delta t} = \{V_1^{t+\Delta t}, V_2^{t+\Delta t}, \dots, V_{n_{t+\Delta t}}^{t+\Delta t}\}$ — в момент $t + \Delta t$. Для рисования траекторий множества циклонов V^t с момента t до момента $t + \Delta t$ необходимо знать их смещение по полю за это время. Циклоны полей изолиний для моментов t и $t + \Delta t$ строятся отдельно согласно алгоритму 2. Поэтому для построения траекторий необходимо идентифицировать положение каждого из циклонов в момент t и $t + \Delta t$.

Эта задача решается способом геометрического наложения поля циклонов V^t в момент t на поле циклонов $V^{t+\Delta t}$ в момент $t + \Delta t$. Обозначим через $\mu(V_i^t)$ площадь, заключенную в области изолинии основания циклона V_i^t . Тогда $\mu(V_i^t \cap V_j^{t+\Delta t})$ — площадь, заключенная в области пересечения изолиний оснований циклонов V_i^t и $V_j^{t+\Delta t}$. Циклон V_i^t будет занимать в момент $t + \Delta t$ положение $V_j^{t+\Delta t}$, если $\mu(V_i^t \cap V_j^{t+\Delta t}) = \max_{k=1,2,\dots,n_{t+\Delta t}} \mu(V_i^t \cap V_k^{t+\Delta t}) \neq 0$. Следовательно, траектория циклона V_i^t с момента t до $t + \Delta t$ пройдет от изолинии ее центра к изолинии центра циклона $V_j^{t+\Delta t}$. Согласно алгоритму 2 формирования циклонов, структура каждого из них имеет вид $V_i^t = \{v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{im_t}^t\}$, где v_{i1}^t — изолиния центра циклона и $v_{im_t}^t$ — изолиния основания циклона. Изолинии представляются замкнутыми векторами своих опорных точек (см. раздел 2). Пусть изолиния центра циклона v_{i1}^t определяется вектором $v_{i1}^t = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, где $a_i = (x, y)$ — координаты опорных точек. Тогда координаты центра $(x_{V_i^t}, y_{V_i^t})$ данного циклона V_i^t вычисляются как средние значения $x_{V_i^t} = \left(\sum_{i=1}^m a[i].x \right) / m$ и $y_{V_i^t} = \left(\sum_{i=1}^m a[i].y \right) / m$.

В том случае, если $\max_{k=1,2,\dots,n_{t+\Delta t}} \mu(V_i^t \cap V_k^{t+\Delta t}) = 0$, то траектория циклона V_i^t обрывается в момент t . Для оценки площади пересечения замкнутых изолиний воспользуемся реализацией эффективной процедуры, рассмотренной в работе [2].

7. Определение данных корневой структуры графа вложенности изолиний. Рассмотрим формирование начальных данных для поиска изолиний циклонов по алгоритму 2.

Для представления графа вложенности изолиний $G_F = (X_F, U_F)$ необходимо сформировать его реберный список (см. раздел 4) и выполнить разложение множества изолиний $X_F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ на компоненты связности $X_F = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_{n_D}$ корневых деревьев.

По замечанию 2 требуется перенумерация вершин множества X_F , которая должна поддерживать корневую структуру деревьев графа G_F , заданного структурой смежности $Adj[x]$. В нашем случае это будет выполнено, если в перечне вершин X_F корни деревьев будут встречаться раньше своих вершин.

Данными для практической реализации обозначенных задач является исходное множество замкнутых изолиний $F = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_F}\}$ рассматриваемой области D (см. раздел 2). Геометрически изолинии C_i являются замкнутыми векторами точек на плоскости без самопересечений.

Для описания алгоритма 3 формирования начальных данных введем дополнительные обозначения. В векторе $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{n_F}$ будем хранить площади, заключенные в изолиниях C_1, C_2, \dots, C_{n_F} . Выражение $\mu(C_i \cap C_j)$ будет обозначать значение площади, заключенной в пересечении изолиний C_i и C_j . Для вычисления μ_i и оценки площади пересечения $\mu(C_i \cap C_j)$ воспользуемся эффективной практической процедурой из работы [2].

Разложение графа вложенности изолиний $G_F = (X_F, U_F)$ на компоненты связности будем фиксировать в векторе D_1, D_2, \dots, D_{n_F} . Значение элемента D_i — это номер компоненты связности, которой принадлежит изолиния C_i . Количество компонент связности равно числу различных значений среди элементов D_1, D_2, \dots, D_{n_F} .

В рамках каждой компоненты связности вычисляются: (i) номера минимальных охватывающих изолиний Q_1, Q_2, \dots, Q_{n_F} , т.е. формируется реберный список графа $G_F = (X_F, U_F)$, и (ii) уровни вложенности изолиний R_1, R_2, \dots, R_{n_F} . Значение $Q_i = j$ определяет в графе ориентированное ребро $C_i \rightarrow C_j$, или $i \rightarrow j$. Значение R_i показывает уровень вложенности изолинии C_i в соответствующем корневом поддереве (компоненте связности). Если $R_i = 0$, то изолиния C_i является корнем дерева.

Алгоритм 3. Формирование реберного списка корневой структуры графа G_F

```

for  $i = 1$  to  $n_F$  do begin {Начальная установка данных}
     $D_i = 0$ ; {Номера компонент связности размещения изолиний}
     $\mu_i = \mu(C_i)$ ; {Вычисление площадей изолиний}
     $R_i = 0$ ; {Значения счетчиков вложенности изолиний}
     $Q_i = 0$ ; {Номера наименьших охватывающих изолиний}
     $\mu Q_i = +\infty$ ; {Начальные площади наименьших охватывающих изолиний}
end;
 $count = 0$ ; {Число компонент связности}

for  $k = 1$  to  $n_F$  do begin {Перебор изолиний  $C_k$ }
    if  $D_k = 0$  then begin {Начать новую компоненту связности}
         $count = count + 1$ ; {Увеличить номер новой компоненты связности}
         $D_k = count$ ; {Отнести изолинию  $C_k$  к новой компоненте  $D_k$  с номером  $count$ }
    end;
    for  $j = k + 1$  to  $n_F$  do begin {Перебор изолиний  $C_j$ }
        if  $\mu(C_k \cap C_j) \neq 0$  then begin {Вложенность изолиний  $C_k$  и  $C_j$ }
            if  $D_k \neq D_j$  then begin {Слияние компонент связности  $D_k = D_k \cup D_j$ }
                 $w = D_j$ ; {Переназначить изолинии компоненты  $D_j$ }
                if  $w \neq 0$  then for  $i = 1$  to  $n_F$  do if  $D_i = w$  then  $D_i = D_k$ ;
                 $D_j = D_k$ ;
            end;
            if  $\mu_k < \mu_j$  then begin {Изолиния  $C_k$  вложена в  $C_j$ }
                 $R_k = R_k + 1$ ; {Счетчики вложенности изолиний  $C_k \subset C_j$ }
                if  $\mu Q_k > \mu_j$  then begin {Уточнить соседнюю сверху изолинию для  $C_k$ }
                     $\mu Q_k = \mu_j$ ; {Новая площадь изолинии сверху}
                     $Q_k = j$ ; {Новая изолиния сверху для  $C_k$ }
                end;
            end
            else begin {Изолиния  $C_j$  вложена в  $C_k$ }
                 $R_j = R_j + 1$ ; {Счетчики вложенности изолиний  $C_k \supset C_j$ }
                if  $\mu Q_j > \mu_k$  then begin {Уточнить соседнюю сверху изолинию для  $C_j$ }
                     $\mu Q_j = \mu_k$ ; {Новая площадь изолинии сверху}
                     $Q_j = k$ ; {Новая изолиния сверху для  $C_j$ }
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
end;

```

Вычисленный реберный список Q_1, Q_2, \dots, Q_{n_F} задания графа $G_F = (X_F, U_F)$ определяет корневую структуру его компонент связности (поддеревьев). Сортировка (перенумерация) множества вершин X_F графа в порядке возрастания их уровней вложенности R_1, R_2, \dots, R_{n_F} гарантирует, что корни деревьев в списке X_F будут встречаться раньше своих вершин.

Сложность формирования реберного списка определяется тремя вложенными циклами размерности $n_F = |X_F|$ и составляет $O(|X_F|^3)$. Отметим, что операция $\mu(C_k \cap C_j)$ проверки вложенности изолиний C_k и C_j по сути является циклической, так как изолинии в практической реализации представляются векторами. Пусть сложность операции $\mu(C_k \cap C_j)$ равна γ . Тогда сложность алгоритма 3 составит $O(\gamma|X_F|^3)$.

С учетом линейной сложности $O(|X_F|)$ алгоритма 2 и квадратичной сложности $O(|X_F|^2)$ алгоритма 1 общая сложность рассмотренного алгоритма формирования траекторий циклонических образований составит $O(\gamma|X_F|^3)$.

8. Заключение. Предложенный геометрический подход к вычислению траекторий циклонов и антициклонов в равной степени применим и к другим типам полей. Так, структуру произвольного поля изолиний можно интерпретировать как поле циклонов и антициклонов (низких и высоких значений), что дает основание использовать геометрический подход для вычисления траекторий перемещения указанных образований в соответствующей интерпретации. Ключевое место в предложенном подходе занимает алгоритм выделения оснований циклонов и антициклонов. Практическая реализация рассмотренного в

настоящей статье метода построения траекторий циклонов и антициклонов выполнена в рамках ГИС "Океан" [1] для использования траекторий в оперативной практической работе при составлении прогнозов погоды. Исходными данными выступают поля давления на уровне моря и геопотенциала на всех стандартных высотах от мировых центров прогноза погоды: Брекнелл, Вашингтон, Москва, Япония и др. Заблаговременность полей варьируется от 5 до 10 суток с шагом 6 и 12 часов на сеточную область с разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и $1.25^\circ \times 1.25^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Б.Н.* Решение задачи расчета оптимальных маршрутов судов в рамках геоинформационной системы "ОКЕАН" // Вычислительные методы и программирование. 2012. **13**. 226–234.
2. *Иванов Б.Н.* Структуры вложенности поля изолиний в задаче градиентного заполнения // Вычислительные методы и программирование. 2006. **7**. 30–40.
3. *Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N., et al.* IMILAST: a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2013. **94**, N 4. 529–547.
4. *Murray R.J., Simmonds I.* A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme // Aust. Met. Mag. 1991. **39**. 155–166.
5. *Sinclair M.R.* An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere // Mon. Wea. Rev. 1994. **122**, N 10. 2239–2256.
6. *Serreze M.C.* Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic // Atmos. Ocean. 1995. **33**, N 1. 1–23.
7. *Sinclair M.R.* Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology // Wea. Forecasting. 1997. **12**, N 3. 595–612.
8. *Blender R., Fraedrich K., Lunkeit F.* Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1997. **123**, N 539. 727–741.
9. *Бардин М.Ю.* Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. 1995. № 11. 24–37.
10. *Бардин М.Ю.* Основные моды изменчивости повторяемости циклонов зимой в Атлантическом секторе // Метеорология и гидрология. 2000. № 1. 42–52.
11. *Bardin M.Yu., Polonsky A.B.* North Atlantic oscillation and synoptic variability in the European-Atlantic region in winter // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2005. **41**, N 2. 127–136.
12. *Akperov M.G., Bardin M.Yu., Volodin E.M., Golitsyn G.S., Mokhov I.I.* Probability distributions for cyclones and anticyclones from the NCEP/NCAR reanalysis data and the INM RAS climate model // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2007. **43**, N 6. 705–712.
13. *Акперов М.Г., Мохов И.И.* Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2010. **46**, № 5. 620–637.
14. *Gulev S.K., Zolina O., Grigoriev S.* Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data // Clim. Dyn. 2001. **17**, N 10. 795–809.
15. *Zolina O., Gulev S.K.* Improving accuracy of mapping cyclone numbers and frequencies // Mon. Wea. Rev. 2002. **130**. 748–759.
16. *Rudeva I., Gulev S.K.* Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle // Mon. Wea. Rev. 2007. **135**. 2568–2587.
17. *Serreze M.C., Carse F., Barry R.G., et al.* Icelandic low cyclone activity: Climatological features, linkages with the NAO and relationships with recent changes in the Northern Hemisphere circulation // J. Clim. 1997. **10**, N 3. 453–464.
18. *Pinto J.G., Spanghel T., Ulbrich U., Speth P.* Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: Individual tracks and climatology // Meteorol. Z. 2005. **14**. 823–838.
19. *Benestad R.E., Chen D.* The use of a calculus-based cyclone identification method for generating storm statistics // Tellus A. 2006. **58**, N 4. 473–486.
20. *Hewson T.D., Tittley H.A.* Objective identification, typing and tracking of the complete life-cycles of cyclonic features at high spatial resolution // Meteorol. Appl. 2010. **17**. 355–381.
21. *Trigo I.F.* Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses // Clim. Dyn. 2006. **26**. 127–143.
22. *Wang X.L., Swail V.R., Zwiers F.W.* Climatology and changes of extratropical cyclone activity: comparison of ERA-40 with NCEP/NCAR reanalysis for 1958–2001 // J. Clim. 2006. **19**, N 13. 3145–3166.
23. *Simmonds I., Burke C., Keay K.* Arctic climate change as manifest in cyclone behavior // J. Clim. 2008. **21**, N 22. 5777–5796.
24. *Hanley J., Caballero R.* Objective identification and tracking of multicentre cyclones in the ERA-Interim reanalysis data set // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2012. **138**, N 664. 612–625.
25. *Raible C.C., Della-Marta P.M., Schwierz C., Wernli H., Blender R.* Northern Hemisphere extratropical cyclones: a comparison of detection and tracking methods and different reanalyses // Mon. Wea. Rev. 2008. **136**, N 3. 880–897.

26. *Lionello P., Dalan F., Elvini E.* Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO2 climate scenarios // *Clim. Res.* 2002. **22**. 147–159.
27. *Wernli H., Schwierz C.* Surface cyclones in the ERA-40 dataset (1958–2001). Part I: novel identification method and global climatology // *J. Atmos. Sci.* 2006. **63**, N 10. 2486–2507.
28. *Kew S.F., Sprenger M., Davies H.C.* Potential vorticity anomalies of the lowermost stratosphere: a 10-yr winter climatology // *Mon. Wea. Rev.* 2010. **138**, N 4. 1234–1249.
29. *Inatsu M.* The neighbor enclosed area tracking algorithm for extratropical wintertime cyclones // *Atmos. Sci. Lett.* 2009. **10**, N 4. 267–272.
30. *Иванов Б.Н.* Дискретная математика. Алгоритмы и программы. Расширенный курс. М.: Известия, 2011.
31. *Оре О.* Теория графов. М.: Наука, 1980.

Поступила в редакцию
05.02.2014

A Geometric Approach to Solving the Problem of Tracking Cyclones and Anticyclones

B. N. Ivanov¹

¹ *Far Eastern Federal University, School of Natural Sciences; ulitsa Sukhanova 8, Vladivostok, 690950, Russia; Associate Professor, e-mail: ibn8826@mail.ru*

Received February 5, 2014

Abstract: Initial data for tracking cyclones and anticyclones are the isolines of sea-level pressure and geopotential fields at standard heights. The isoline structure of such fields is characterized by its nesting and dynamic stability over time. The nesting of isolines is specified by cyclones and anticyclones. The isolines nesting of the original field is represented by the structure of rooted trees. The tree tracing allows one to extract the isolines of the centers and bases of cyclones and anticyclones. The identification of cyclones and anticyclones at various time instants is performed sequentially by overlapping the isolines. The continuation of a trajectory is specified by the cyclone (anticyclone) whose area of intersection with this cyclone base is maximal. The dimensions of cyclones and anticyclones are determined by the actual distance between their centers. For the typical displacements of cyclones (anticyclones), not exceeding the size of the bases, the proposed computing scheme is stable. For pressure and geopotential, the 3 hours interpolation interval for the initial data satisfies the above constraints. The proposed scheme of cyclone and anticyclone identification is of the most common character and is applicable to any type of fields if the isolines of such fields are characterized by their nesting and are stable with time. The scheme is based only on the isolines and does not use any unique properties of the fields.

Keywords: cyclone trajectories, cyclone identification, cyclone tracking.

References

1. B. N. Ivanov, “Solution of the Optimal Ship Route Problem in the Framework of the OKEAN Geoinformation System,” *Vychisl. Metody Programm.* **13**, 226–234 (2012).
2. B. N. Ivanov, “Enclosure Structures of Equal Level Line Fields in the Gradient Filling Problem,” *Vychisl. Metody Programm.* **7**, 30–40 (2006).
3. U. Neu, M. G. Akperov, N. Bellenbaum, et al., “IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms,” *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **94** (4), 529–547 (2013).
4. R. J. Murray and I. Simmonds, “A Numerical Scheme for Tracking Cyclone Centres from Digital Data. Part I: Development and Operation of the Scheme,” *Aust. Met. Mag.* **39**, 155–166 (1991).
5. M. R. Sinclair, “An Objective Cyclone Climatology for the Southern Hemisphere,” *Mon. Wea. Rev.* **122** (10), 2239–2256 (1994).
6. M. C. Serreze, “Climatological Aspects of Cyclone Development and Decay in the Arctic,” *Atmos. Ocean* **33** (1), 1–23 (1995).
7. M. R. Sinclair, “Objective Identification of Cyclones and Their Circulation Intensity, and Climatology,” *Wea. Forecasting* **12** (3), 595–612 (1997).
8. R. Blender, K. Fraedrich, and F. Lunkeit, “Identification of Cyclone-Track Regimes in the North Atlantic,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **123** (539), 727–741 (1997).

9. M. Yu. Bardin, "Variations in Cyclonicity Characteristics in the Middle Troposphere of Middle Latitudes," *Meteorol. Gidrol.*, No. 11, 24–37 (1995).
10. M. Yu. Bardin, "Major Modes of Variability in the Frequency of Winter Cyclones in the Atlantic Sector," *Meteorol. Gidrol.*, No. 1, 42–52 (2000).
11. M. Yu. Bardin and A. B. Polonsky, "North Atlantic Oscillation and Synoptic Variability in the European-Atlantic Region in Winter," *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* **41** (2), 127–136 (2005).
12. M. G. Akperov, M. Yu. Bardin, E. M. Volodin, et al., "Probability Distributions for Cyclones and Anticyclones from the NCEP/NCAR Reanalysis Data and the INM RAS Climate Model," *Izv. Akad. Nauk., Fiz. Atmos. Okeana* **43** (6), 764–772 (2007) [*Izv., Atmos. Ocean. Phys.* **43** (6), 705–712 (2007)].
13. M. G. Akperov and I. I. Mokhov, "A Comparative Analysis of the Method of Extratropical Cyclone Identification," *Izv. Akad. Nauk., Fiz. Atmos. Okeana* **46** (5), 620–637 (2010) [*Izv., Atmos. Ocean. Phys.* **46** (5), 574–590 (2010)].
14. S. K. Gulev, O. Zolina, and S. Grigoriev, "Extratropical Cyclone Variability in the Northern Hemisphere Winter from the NCEP/NCAR Reanalysis Data," *Clim. Dyn.* **17** (10), 795–809 (2001).
15. O. Zolina and S. K. Gulev, "Improving Accuracy of Mapping Cyclone Numbers and Frequencies," *Mon. Wea. Rev.* **130**, 748–759 (2002).
16. I. Rudeva and S. K. Gulev, "Climatology of Cyclone Size Characteristics and Their Changes During the Cyclone Life Cycle," *Mon. Wea. Rev.* **135**, 2568–2587 (2007).
17. M. C. Serreze, F. Carse, R. G. Barry, et al., "Icelandic Low Cyclone Activity: Climatological Features, Linkages with the NAO and Relationships with Recent Changes in the Northern Hemisphere Circulation," *J. Clim.* **10** (3), 453–464 (1997).
18. J. G. Pinto, T. Spanghel, U. Ulbrich, and P. Speth, "Sensitivities of a Cyclone Detection and Tracking Algorithm: Individual Tracks and Climatology," *Meteorol. Z.* **14**, 823–838 (2005).
19. R. E. Benestad and D. Chen, "The Use of a Calculus-Based Cyclone Identification Method for Generating Storm Statistics," *Tellus A* **58** (4), 473–486 (2006).
20. T. D. Hewson and H. A. Titley, "Objective Identification, Typing and Tracking of the Complete Life-Cycles of Cyclonic Features at High Spatial Resolution," *Meteorol. Appl.* **17**, 355–381 (2010).
21. I. F. Trigo, "Climatology and Interannual Variability of Storm-Tracks in the Euro-Atlantic Sector: A Comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR Reanalyses," *Clim. Dyn.* **26**, 127–143 (2006).
22. X. L. Wang, V. R. Swail, and F. W. Zwiers, "Climatology and Changes of Extratropical Cyclone Activity: Comparison of ERA-40 with NCEP/NCAR Reanalysis for 1958–2001," *J. Clim.* **19** (13), 3145–3166 (2006).
23. I. Simmonds, C. Burke, and K. Keay, "Arctic Climate Change as Manifest in Cyclone Behavior," *J. Clim.* **21** (22), 5777–5796 (2008).
24. J. Hanley and R. Caballero, "Objective Identification and Tracking of Multicentre Cyclones in the ERA-Interim Reanalysis Data Set," *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **138** (664), 612–625 (2012).
25. C. C. Raible, P. M. Della-Marta, C. Schwierz, et al., "Northern Hemisphere Extratropical Cyclones: A Comparison of Detection and Tracking Methods and Different Reanalyses," *Mon. Wea. Rev.* **136** (3), 880–897 (2008).
26. P. Lionello, F. Dalan, and E. Elvini, "Cyclones in the Mediterranean Region: The Present and the Doubled CO₂ Climate Scenarios," *Clim. Res.* **22**, 147–159 (2002).
27. H. Wernli and C. Schwierz, "Surface Cyclones in the ERA-40 Dataset (1958–2001). Part I: Novel Identification Method and Global Climatology," *J. Atmos. Sci.* **63** (10), 2486–2507 (2006).
28. S. F. Kew, M. Sprenger, and H. C. Davies, "Potential Vorticity Anomalies of the Lowermost Stratosphere: A 10-Yr Winter Climatology," *Mon. Wea. Rev.* **138** (4), 1234–1249 (2010).
29. M. Inatsu, "The Neighbor Enclosed Area Tracking Algorithm for Extratropical Wintertime Cyclones," *Atmos. Sci. Lett.* **10** (4), 267–272 (2009).
30. B. N. Ivanov, *Discrete Mathematics. Algorithms and Software* (Izvestiya, Moscow, 2011) [in Russian].
31. O. Ore, *Theory of Graphs* (AMS Press, Providence, 1962; Nauka, Moscow, 1980).