

---

УДК 551.589.6, 551.515.7, 551.50

Е.В. Самчук<sup>1</sup>

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОТСЛЕЖИВАНИЕ ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО ПОДХОДА

**Ключевые слова:** объективная идентификация, барическое образование, циклон, антициклон, реанализ, траектория, программное обеспечение

*Целью исследования является разработка и программная реализация комплексного метода трехмерной идентификации и пространственного отслеживания барических образований в нижней и средней тропосфере. Разработанный метод обеспечивает быстрое получение надежных данных о перемещении циклонов и антициклонов и является базисом автоматизированной системы мониторинга атмосферных процессов на территории Северного полушария.*

**Постановка задачи.** Основными проявлениями атмосферной циркуляции в умеренных широтах является циклоническая и антициклоническая деятельность. Она включает образование, эволюцию, перемещение и заполнение или разрушение барических образований в нижней и средней тропосфере. Эти процессы обеспечивают глобальный перенос атмосферной энергии, тепла и влаги. Поэтому объективная информация необходима для описания и систематизации особенностей атмосферных процессов различного типа, временного и пространственного масштабов в разные сезоны в разных условиях, в связи с чем возникает необходимость в обеспечении точной идентификации барических образований, как во времени, так и в пространстве. Принимая во внимание то, что характеристики циклонов и, в меньшей степени, антициклонов умеренных широт, такие как интенсивность, длительность существования и даже геометрическая форма, могут сильно варьировать от случая к случаю, объективная идентификация барических образований является сложной задачей. Необходимо учитывать, что существующие методы идентификации барических образований преимущественно затрагивают проблему выделения именно ци-

---

<sup>1</sup> Украинский гидрометеорологический институт, г. Киев, Украина

клонов, в то время как антициклонам уделено гораздо меньше внимания. Общей чертой этих методов является то, что в них барическое образование идентифицируется исключительно на плоскости – в поле приземного давления или на одной из изобарических поверхностей. Такой подход не принимает во внимание вертикальную структуру барического образования, а результаты его применения не отражают состояние нижней и средней тропосферы в полной мере.

Особую актуальность данная задача имеет применительно к описанию и систематизации атмосферных процессов путем составления сборно-кинематических карт природных синоптических периодов в подразделениях Украинской гидрометеорологической службы. В отсутствие методов и, в особенности, прикладных инструментов идентификации барических образований данный вид работы выполняется исключительно в ручном режиме, что обуславливает с одной стороны значительное влияние человеческого фактора на конечный результат, с другой – значительные затраты времени. Как следствие, в полученную картину циклонической и антициклонической активности закладывается значительная доля субъективности, что нивелирует значимость полученных результатов.

Таким образом, целью данного исследования является разработка комплекса методов, направленных на идентификацию барических образований во всей толще нижней и средней тропосферы с учетом пространственных характеристик и эволюции во времени, а также разработки программного инструментария для автоматизации процедуры идентификации.

**Состояние изученности вопроса.** За последние десятилетия в рамках данной тематики было выполнено ряд исследований, большинство из которых посвящено исключительно идентификации циклонов. Относительно антициклонов предлагалось использовать обратные к идентификации циклонов методы, однако отдельно данный вопрос не рассматривался.

Поскольку существуют различные подходы к пониманию самой природы циклонов, различные методы идентификации циклонов используют различные величины, характеризующие состояние атмосферы. Среди них присутствуют приземный давление и его градиент [2], относительный вихрь скорости ветра [4], высота изобарических поверхностей  $AT_{1000}$  [3, 6] и  $AT_{850}$  [5], и лапласиан геопотенциала [1, 7]. Также сильно варьируют критерии идентификации циклонов. При использовании приземного давления в качестве диагностирующей величины критерием может выступать сочетание минимального давления и максимального его лапласиана или

градиента, или высокая ( $>10$  м/с) скорость приземного ветра. Отдельно выделяется группа методов, в которых каждый узел регулярной сетки рассматривается как «кандидат» на роль центра циклона путем сравнения значения определенных величин в нем с соответствующими значениями в соседних узлах сетки. Также для каждого метода установлены конкретные условия, при которых предварительно выделенный центр циклона может быть удален из результатов процедуры идентификации. Это могут быть как критические значения величин, используемых для идентификации, так и расстояние межсуточного смещения положения циклона, продолжительность его существования или высота над уровнем моря территории, где идентифицирован циклон [7].

Общей проблемой разработанных методов является сложность определения единых критериев, которые удовлетворяли бы всем случаям, а именно величины давления, барического градиента, завихренности, лапласиана давления в центре циклона, его пространственную конфигурацию и прочее. Установленные же для данных методов критерии лучше всего описывают классические циклоны умеренных широт, которые имеют четко очерченные, геометрически правильные концентрические изобары. При таких условиях идентификация малоподвижной циклонической депрессии, которая сильно вытянута в одном из направлений и занимает большую площадь, осложняется тем, что заданным критериям могут соответствовать не один, а несколько узлов регулярной сетки, находящихся внутри. Это, в свою очередь, может привести к трудностям в дальнейшем построении траектории данного барического образования. Также такая процедура идентификации более ресурсоемка в связи с расчетом производных от давления величин. В данном контексте наиболее перспективными являются методы, в которых циклон идентифицируется не путем установления его центра, а путем выделения в поле давления изолированных областей низкого давления [6].

Так же разнообразны и методы объединения выделенных центров барических образований в траектории. Наиболее широко применяется метод «ближайшего соседа» в его классическом понимании. Поиск «соседа» проводится в ограниченной части пространства вокруг последней точки траектории циклона, размер которой может иметь радиус 600...800 км,  $10^\circ$  широты и долготы или площадью определенного размера, например 200 тыс. км<sup>2</sup>. В [8] данный метод расширен за счет вероятностного определения направления перемещения циклона в следующий интервал времени.

### **Характеристика исходных данных и методика исследований.**

При выполнении исследования были использованы данные проекта NCEP/NCAR Reanalysis II, а именно поля приведенного к уровню моря атмосферного давления, а также геопотенциала на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа. Расчетная область охватывает Северное полушарие до 20° с.ш. включительно. Сетка – регулярная, с шагом 2,5°. Временной интервал составляет 6 часов. Данные охватывают период с 1976 по 2015 гг. Расчетная часть исследования реализована на платформе Microsoft.NET с использованием языка программирования C# в среде разработки Microsoft Visual Studio 2015 Community Edition.

**Изложение основного материала.** Комплексная методика трехмерной идентификации барического образования предусматривает следующие этапы:

- выделение очагов высокого и низкого давления или геопотенциала в приземном поле и на изобарических поверхностях  $AT_{850}$ ,  $AT_{700}$  и  $AT_{500}$ ;
- формирование вертикального профиля отдельного барического образования на основе центров очагов, выделенных на предыдущем этапе;
- построение траектории перемещения барического образования и отслеживание его эволюционных изменений со временем.

*Выделение очагов высокого и низкого давления и геопотенциала в приземном поле и на изобарических поверхностях.* Для выделения очагов высокого и низкого давления и геопотенциала в приземном поле и на изобарических поверхностях разработан универсальный метод, который одинаково эффективен независимо от типа выделяемого очага, его интенсивности, текущего сезона года и положения относительно других очагов. Особенности метода будут описаны для случая выделения очага низкого давления в поле приземного давления. Все положения, изложенные ниже, справедливы и для выделения очагов низкого геопотенциала на изобарических поверхностях; для выделения очагов высокого давления и геопотенциала справедливы обратные положения. Существующие различия будут изложены отдельно.

Выделение очагов низкого давления в приземном поле предусматривает локализацию изолированных областей низкого давления путем итерационной фильтрации узлов регулярной сетки. Сначала определяется минимальное и максимальное значение давления в зоне расчета и устанавли-

ливается репер – ближайшее к минимуму значение давления, которое больше и кратное 5 гПа, что соответствует шагу построения изобар на картах приземного давления. После этого из рассматриваемого поля давления отбираются те узлы, в которых давление не превышает реперное.

Как результат формируется массив, содержащий в себе информацию о широте, долготе и давлении в отобранных узлах. В дальнейшем этот массив разделяется на отдельные кластеры, в каждый из которых входят только те узлы, которые непосредственно примыкают друг к другу и не примыкают к другим узлам из числа отобранных. Каждый такой кластер представляет собой набор узлов, находящихся внутри определенной замкнутой изобары и изолированных от остальных отобранных узлов. Внутри каждого кластера определяется узел с минимальным давлением и узел, являющийся геометрическим центром точек, вошедших в кластер. Геометрический центр кластера определяется путем поиска в нем узла, сумма расстояний от которого до других узлов кластера минимальна. На этом этапе выделяются только те очаги низкого давления, интенсивность которых максимальна для данного поля. Поэтому реперное значение давления увеличивается на 5 гПа и процедура повторяется. При этом, начиная со второго шага итерации, проводится процедура отсеивания узлов сетки, которые прилегают к узлам, использованным на предыдущем шаге. Это предотвращает повторную обработку ранее выделенных очагов низкого давления и существенно сокращает затраты времени на обработку всего поля. Данная процедура повторяется до тех пор, пока реперное значение давления не превышает максимального значения давления для данного поля.

Зависимо от уровня, на котором производится выделение очага, и его типа применяются отдельные условия. Так, например, выделение очагов высокого давления выполняется в обратном направлении – в качестве реперного значения давления устанавливается максимальное значения давления, которое итерационно уменьшается до 1020 гПа, что соответствует принятой в синоптической практике границе между циклональным и антициклональным типом барического поля на уровне моря. На изобарических поверхностях итерационная фильтрация осуществляется для всех (от минимального до максимального) значений реперного геопотенциала; шаг итерации для изобарических поверхностей составляет 4 гп. дам.

При разработке данного метода большое внимание уделялось скорости его выполнения. Как показала практика, процедура кластеризации массива отобранных узлов является крайне медленным процессом. При

объеме массива более 500 узлов его обработка может длиться от 20 до 30 секунд; в отдельных случаях, например, при идентификации крайне глубоких циклонов, затраты времени могут возрастать в 3...5 раз, что является неприемлемым при обработке больших временных периодов. Поэтому для сокращения затрат времени на процедуру кластеризации перед ее началом проводится анализ массива отобранных узлов, и из него удаляются те, которые непосредственно прилегают к узлам, отобранным на предыдущих уровнях (рис. а, б, в). Это позволяет сократить затраты времени на обработку одного поля до 1 с независимо от структуры поля. Благодаря этому появляется возможность относительно быстро обрабатывать большие массивы данных даже на маломощных вычислительных машинах.

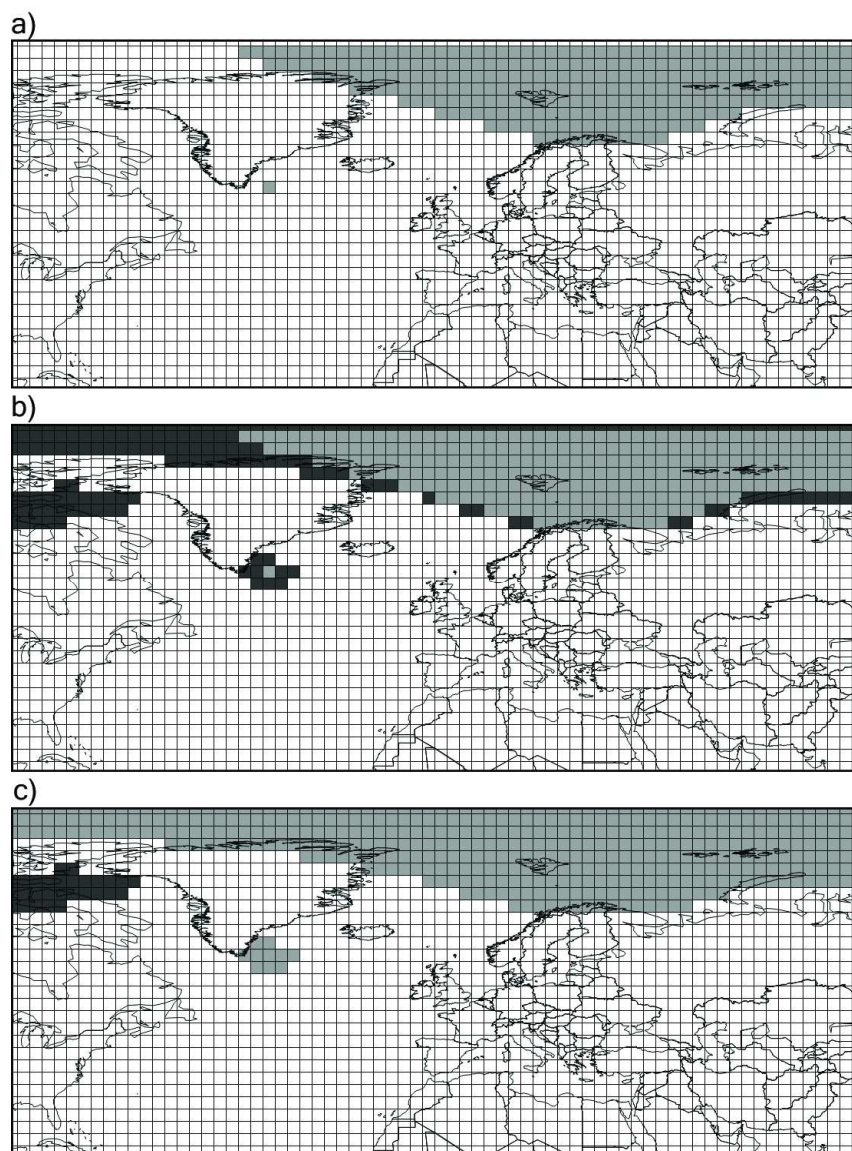
Результаты, полученные при выделении очагов низкого и высокого давления и геопотенциала, хранятся в реляционной базе данных, которая содержит информацию о центрах, идентифицированных в каждый отдельный срок, а именно:

- тип центра (высокий или низкий);
- экстремальное значение давления или геопотенциала в центре очага;
- широта и долгота геометрического центра ячейки и узла с минимальным (максимальным) давлением (геопотенциалом).

*Построение вертикальных профилей барических образований.* В предыдущем разделе термины «циклон» и «антициклон» не употреблялись по следующим соображениям. Согласно классификации барических образований, выделяются те, которые наблюдаются во всей толще тропосферы (высокие), только в нижних ее слоях (низкие), и только на высоте (высотные). Поэтому анализ барического поля лишь на одном из уровней не дает возможности с уверенностью говорить о том, соответствует ли замкнутая область низкого или высокого давления или геопотенциала реальному циклону или антициклону в тропосфере. Для понимания полной картины состояния атмосферы в данный момент необходимо иметь представление не только о взаиморасположении барических образований, но и об их вертикальной структуре. Поэтому понятия «барическое образование», «циклон» и «антициклон» могут быть введены только после построения и анализа вертикального профиля барического образования на основе результатов предыдущего этапа идентификации.

Входной информацией для алгоритма построения профиля барического образования является массив, который содержит отсортированные по вертикальным уровням характеристики очагов. Для построения вертикаль-

ного профиля циклона в качестве точек профиля используются данные об узлах с наименьшим давлением или геопотенциалом, в то время как для антициклона – об узлах, представляющих геометрический центр соответствующего очага высокого давления или геопотенциала. Данное различие обусловлено большими линейными размерами антициклонов, в связи с чем их геометрический центр и соответствующий узел с максимальным давлением могут находиться на значительном расстоянии друг от друга.



*Рис. Стадии процесса кластеризации узлов регулярной сетки.*

Построение вертикального профиля барического образования начинается с приземного слоя. Центры, идентифицированные в поле приземного давления, становятся первой точкой профиля, после чего последовательно на всех выше расположенных уровнях начинается поиск центра очага, который находится на следующем по высоте уровне в радиусе не более 1000 км от предыдущей точки вертикального профиля. Данное ограничение по расстоянию обусловлено тем, что вертикальный профиль барических образований чаще всего имеет наклон к земной поверхности и лишь на поздних стадиях их существования становится квазивертикальным.

Конечным результатом выполнения процедуры построения профилей является коллекция их характеристик, построенных для конкретного момента времени. Данная коллекция включает информацию о типе профиля (циклональный или антициклональный), географические координаты и значения давления или геопотенциала в каждой точке профиля, количество уровней, которые охватывает профиль, а также усредненные по профилю географические координаты, характеризующие общее положение барического образования. Во избежание переполнения базы данных хранению подлежат характеристики только тех профилей, которые охватывают не менее двух уровней.

*Построение траекторий барических образований.* Важной характеристикой каждого барического образования является продолжительность периода его существования и особенности его перемещения. Поэтому для решения таких задач синоптической практики, как, например, построение сборно-кинематических карт естественных синоптических периодов, необходимо построение траекторий перемещения барических образований.

Для построения траекторий применяется метод ближайшего соседа в классическом его понимании. Согласно этому методу составным звеном траектории может быть только та точка, абсолютное расстояние от которой до предыдущей и последующей точки траектории является минимальной из всех возможных. При построении траекторий барических образований точками траекторий выступают усредненные по профилю положения барического образования, полученные на предыдущем этапе идентификации. Максимально допустимое расстояние между средними положениями барического образования, которые могут быть объединены в одну траекторию, составляет 700 км. Такое расстояние соответствует средней скорости перемещения барического образования за прошедшие 6 часов



около 110 км/час, что превышает фактические скорости движения циклонов и антициклонов, за счет чего исключается возможность разрыва траектории быстро движущегося барического образования. Также при построении траектории циклонов, начиная с ее второго звена, учитывается направление его перемещения относительно предыдущего шага. Если эти направления являются противоположно направленными, данная точка не включается в траектории, но ее построение не прерывается. Максимально допустимое расстояние между звеньями траектории увеличивается в 1,5 раза и поиск центра циклона, который удовлетворил бы условиям построения траектории, проводится среди центров следующего срока. В случае отсутствия такого центра построение траектории прерывается окончательно. После нахождения следующего звена траектории максимально допустимое расстояние возвращается к первоначальному значению.

Для каждой траектории определяются подробные и обобщенные характеристики, которые сохраняются в базу данных для дальнейшего использования. Игнорируются барические образования, продолжительность существования которых составляет менее 24 часов.

*Верификация результатов.* Анализ публикаций показывает, что оценка точности методов идентификации барических образований, является крайне неоднозначной задачей, прямое и полноценное решение которой не представляется возможным. Причиной тому является в первую очередь отсутствие эталонной информации, с которой можно сравнить полученные результаты. Поэтому зачастую ограничиваются сравнением между собой результатов, полученных путем использования разных методов идентификации, а именно количества барических образований, идентифицированных на одной территории за один временной период. Однако такой подход способен обеспечить лишь относительные оценки, практическая ценность которых минимальна, поскольку, как было показано, подходы к каждому отдельному этапу идентификации существенно отличаются. Возможной является лишь частичная оценка точности предложенного метода идентификации, а именно его первого этапа – выделения центров очагов высокого и низкого давления или геопотенциала. Данная оценка проводилась путем визуального контроля соответствия идентифицированных центров очагов областям низкого и высокого давления и геопотенциала, представленных на картах приземного давления и абсолютной барической топографии за 2015 г., которые построены на основе той же исходной информации, что используется при идентификации. Принцип

работы алгоритма выделения центров подразумевает его точность на уровне 100 %. Однако, в процессе верификации результатов была выявлена особенность работы алгоритма, связанная со спецификой исходной информации. Речь идет об избыточной идентификации центров очагов высокого и низкого давления или геопотенциала, происходящей в случаях, когда в сетке присутствуют единичные узлы, которые согласно правилам проведения изолиний должны находиться внутри замкнутой изолинии. Поскольку карты для процедуры верификации строятся с предварительной адаптацией прямоугольной сетки к конической проекции, такие единичные узлы (особенно в полярных регионах) могут быть вообще не отражены на картах барической топографии. Поэтому фактическая точность метода выделения центров очагов высокого и низкого давления или геопотенциала составляет 98,1 % (табл.). В то же время данная погрешность не способна повлиять на конечный результат идентификации барических образований, получаемый на этапах построения его вертикального профиля и траектории, поскольку избыточно выделенные центры не используются в последующих этапах идентификации. Точность построения траекторий барических образований практически не поддается оценке в связи с отсутствием соответствующих объективных методов.

Таблица

Точность выделения центров очагов низкого (Ц) и высокого (АЦ) давления и геопотенциала

Уровень	Ц		Точность, %	АЦ		Точность, %
	всего	лишние		всего	лишние	
Приземный	12838	510	96,0	10854	595	94,5
АТ <sub>850</sub>	12468	124	99,0	7680	80	98,9
АТ <sub>700</sub>	10534	110	98,9	5290	37	99,3
АТ <sub>500</sub>	10663	105	99,0	3775	32	99,2

*Перспективы дальнейших исследований.* Предложенная методика идентификации барических образований имеет высокую точность, что в сочетании с небольшими затратами времени на выполнение делает ее высокоэффективным инструментом структуризации нижней и средней тропосферы. Построение траекторий барических образований за длительные промежутки времени позволяет отслеживать их в течение всего периода существования и получать их подробные динамические характеристики на разных этапах развития. Разработанная методика заложена в основу перспективной автоматизированной системы построения сборно-кинематических карт естественных синоптических периодов и монито-

ринга развития атмосферных процессов. Разработанное в ходе исследования программное обеспечение позволяет выделять группы сходных по характеристикам барических образований. Это открывает возможность изучать отдельные типы атмосферных процессов (блокирование западного переноса, южные циклоны, ультраполярные вторжения), а также получать подробную информацию об их современном состоянии и динамике за последние 40 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабух В.О. Объективная идентификация барических систем синоптического масштаба // Вестник Киевского национального ун-та им. Тараса Шевченко. Серия: География. – 2005. – № 51. – С. 49-50.
2. Benestad, R. E. The use of a calculus-based cyclone identification method for generating storm statistics // D. Chen. – 2006. – Vol. 58A. – P. 473-486.
3. Blender R, Schubert M. Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions // Monthly Weather Review. – 2000. – Vol. 128. – P. 377-384.
4. Hewson, T.D. Objective identification, typing and tracking of the complete life-cycles of cyclonic features at high spatial resolution // Meteorological Applications. – 2010. – Vol. 17. – P. 355-381.
5. Kew S.F. Potential vorticity anomalies of the lowermost stratosphere: A 10-yr winter climatology // Monthly Weather Review. – 2010. – Vol. 138. – P. 1234-1249.
6. Klaus – An exceptional winter storm over northern Iberia and southern France / M. R. L. Liberato [et al] // Weather. – 2011. – Vol. 66. – P. 330-334.
7. Leckebusch G.C., Koffi B., Ulbrich U., Pinto J.G., Spanghel T., Zacharias S. Analysis of frequency and intensity of winter storm events in Europe on synoptic and regional scales from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales // Climate Research. – 2006. – Vol. 31. – P. 59-74.
8. Sensitivities of a Cyclone Detection and Tracking Algorithm: Individual Tracks and Climatology / Joaquim G. Pinto [et al] // Meteorologische Zeitschrift. – 2005. – Vol. 14, № 6. – P. 823-838.

Поступила 20.07.2017

Е.В. Самчук

**СОЛТУСТІК ЖАРТЫШАРДЫҢ ТРОПИКАДАН ТЫС  
ЦИКЛОНДАРЫ МЕН АНТИЦИКЛОНДАРЫН ҮШ ӨЛШЕМДІ ЖОЛ  
НЕГІЗІНДЕ СӘЙКЕСТЕНДІРУ ЖӘНЕ БАҚЫЛАУ**

**Түйінді сөздер:** объективті сәйкестендіру, бар құрылу, циклон, антициклон, шынайы талдау, траектория, бағдарламамен қамсыздандыру

*Зерттеудің мақсаты, төменгі және орта тропосферадағы бар құрылымдарын үш өлшемді сәйкестендіру және кеңістіктік бақылаудың кешенді әдістемесін өңдеу және бағдарламалық жүзеге асыру, болып табылады. Өңделген әдістеме циклондар мен антициклондардың ауытқуы бойынша сенімді мәліметтерді аз уақытта алу және Солтүстік жартышар аумағындағы атмосфералық процесстер мониторинг жүйесін автоматтандыру негізі.*

Samchuk E.V.

### **IDENTIFICATION AND TRACKING OF EXTRATROPICAL CYCLONES AND ANTICYCLONES IN THE NORTHERN HEMISPHERE BASED ON THREE-DIMENSIONAL APPROACH**

**Keywords:** objective identification, baric system, cyclone, anticyclone, reanalysis, trajectory, software

*The purpose of this research is to analyze existing methods and algorithms used for identification and tracking of baric systems in low and middle troposphere to choose the most reliable data and methods for further research.*

*Developed a unified methodology of baric system identification based on step-by-step localization of isolated clusters of low and high sea level pressure and geopotential height on ground level and standard isobaric levels. Centers of clusters on different levels are combined in single vertical profile which represents one certain baric system. Tracking of baric system movement realized with improved nearest neighbor method. Software for the purposes of an automatic identification of baric systems in the Northern Hemisphere was developed. Also, created a database of Northern hemisphere baric systems existed during 1976...2015.*