

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 621.391.837

В. А. Бобков, А. В. Казанский, М. А. Морозов

*(Владивосток)*ВЫДЕЛЕНИЕ РАЗМЫТЫХ КОНТУРОВ  
НА ПРИМЕРЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ  
ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ \*

Предложен новый подход к выделению размытых контуров на изображениях, представленных сгущениями изолиний. Применительно к решению задачи определения скоростей течений на поверхности океана на этой основе разработан эффективный алгоритм прослеживания перемещений естественных особенностей (трассеров) на спутниковых изображениях.

**Введение.** В последние годы предложены методы определения скоростей движения атмосферы и океана (ветра, течений), основанные на прослеживании перемещения трассеров на спутниковых изображениях в различных диапазонах спектра. Трассеры – это некоторые характерные особенности изображений, они переносятся потоком (адвективность) и при этом сохраняют свою индивидуальность на двух изображениях так, что на них прослеживается один и тот же объект (устойчивость). Впервые такие методы применены для определения скорости ветра по перемещению облаков [1]. Для безоблачных ситуаций подобный подход применен к неоднородностям водяного пара, проявляющимся в ИК-диапазоне его поглощения [2]. Используя изображения в видимом диапазоне, а с появлением локаторов с синтезированной апертурой – в СВЧ-диапазоне, этот подход применяли при измерении скоростей движения морского льда [3]. Наконец, было показано, что по измерениям перемещений термических неоднородностей на двух последовательных спутниковых изображениях (с оптимальным интервалом времени от 6 до 12 ч в зависимости от скорости течения) в ИК-диапазоне или концентрации фитопланктона на цветных изображениях можно получить разумные оценки векторов течений на поверхности океана [4].

Первоначально все эти методы реализовывались в виде человеко-машинных процедур, в которых трассеры находились и прослеживались оператором (операторный метод – ОМ). Очевидными недостатками такого подхода

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-01-00640), ФЦП «Интеграция» (проект № А0026).

являются субъективность, большая трудоемкость и невысокая оперативность. По этим причинам и в связи с огромным объемом спутниковых изображений, накопленных с начала 70-х годов, возникла необходимость создания алгоритмической процедуры выделения и прослеживания трассеров. Самым важным достоинством этой процедуры признаются ее объективный характер и, как следствие, возможность получения количественных оценок достоверности измерений. Однако по точности измерений перемещения трассеров все предложенные до сих пор алгоритмические процедуры сильно уступают ОМ. Например, автоматическая процедура определения скорости течений по последовательности спутниковых изображений, основанная на методе максимума перекрестной корреляции (МПК), использует площадные шаблоны (обычно размером  $22 \times 22$  пиксела). Векторы течений в этом методе строятся между центрами шаблонов на двух последовательных изображениях. Центры шаблонов на первом изображении берутся на узлах регулярной сетки, а положения соответствующих шаблонов на втором выбираются таким образом, чтобы коэффициент корреляции между ними достигал максимума. В ряде работ проводились сравнения векторов течений, полученных с использованием разных алгоритмических версий этого метода, с данными акустического доплеровского профилирования и наблюдений за дрейфтерами. В результате при спутниковых измерениях выявлено большое число ошибочных векторов течений при общей недооценке скоростей течений. Сделан вывод, что метод МПК заведомо хуже операторного метода, поскольку подменяет физически обоснованную (хотя и трудно автоматизируемую) процедуру визуального прослеживания примитивной статистической техникой, которая не выделяет информативные трассеры и не обеспечивает их идентификацию на двух последовательных изображениях [5].

Аналогичный подход применен для автоматизации методов определения скоростей движения и в других случаях [6–8], при этом сохраняются все его отмеченные выше недостатки. Единственным исключением стали измерения движения морского льда, для которых, наряду с корреляционным алгоритмом, разработана автоматическая процедура выделения и прослеживания контуров границ отдельных льдин, основанная на принципах анализа изображений, которыми руководствуется опытный оператор [7]. Отмечались несомненные достоинства такого алгоритма, и предлагалось совместное использование этих двух взаимно дополняющих подходов. Не вполне разделяя последнего вывода, мы считаем тем не менее проблему разработки контурных алгоритмов для рассматриваемой области приложений весьма актуальной. Основным препятствием в разработке таких алгоритмов является то, что почти во всех случаях контуры размыты и не позволяют применять стандартные методы анализа изображений. В данной работе на примере измерения морских течений по последовательности спутниковых ИК-изображений предлагается новый подход к анализу размытых контуров, снимающий это естественное ограничение.

**Физические основы и техника определения скорости течений по спутниковым изображениям.** Измерения перемещений мелких (2–5 км) термических неоднородностей на последовательности спутниковых ИК-изображений – новый способ дистанционного мониторинга полей течений. В настоящее время это единственный способ определения течений поверхности на акваториях от нескольких сот до тысяч квадратных километров (т. е. для бассейна отдельного моря или на океанских акваториях такого порядка) с детальностью, большей, чем у любого другого существующего альтернатив-

ного дистанционного метода, например у спутниковой альтиметрии. Измерения векторов течений по спутниковым изображениям выполняются синхронно. Они значительно дешевле, чем полученные контактными методами. К тому же количественный анализ циркуляции вод, основанный на такого рода информации, может быть выполнен для отдаленных районов Мирового океана, где не проводятся соответствующие контактные измерения или они довольно редки.

В ОМ прослеживается не весь объект (он нужен только для надежной идентификации по контексту), а некоторые локальные особенности его формы – маркеры моря, в качестве которых чаще всего используются изломы границ трассера, центры его наиболее теплых или холодных частей. Хотя такая стратегия обеспечивает точность позиционирования порядка одного пиксела, она создает предпосылки для появления ошибок идентификации. Ошибки идентификации возникают вследствие неоднородности поля скорости (адвекции), приводящей к вращению и деформации трассера, а также различных неадвективных процессов (неравномерного нагрева и охлаждения поверхности, перемешивания верхнего слоя океана). В результате действия всех этих факторов возможно изменение формы трассера, затрудняющее его локализацию и прослеживание. Более того, в зависимости от используемой техники измерений возможна потеря исходного трассера целиком и прослеживание вместо него другого похожего, т. е. возрастает вероятность ложной идентификации.

Фундаментальное отличие ОМ от метода МПК связано именно со способностью первого отмечать особенности, соответствующие одному и тому же минимальному объему воды, что влечет за собой необходимость выделять маркеры моря с точностью до одного пиксела. Очевидно, что для выделения такого рода нульмерных (на растре) объектов-маркеров требуется, по меньшей мере, два признака, каждый из которых понижал бы размерность пространства поиска на единицу. В операторном методе такими признаками служат линии термических контрастов и некоторые характерные особенности их формы. В противоположность этому метод МПК использует принципиально другой тип объектов: площадные объекты-шаблоны, не имеющие адекватного физического содержания. В частности, не имеет физического смысла само отождествление концов векторов течений с центрами шаблонов на двух последовательных изображениях, поскольку в этом случае центры шаблонов не соответствуют каким-либо особенностям, отмечающим один и тот же объем воды. На таких объектах нет также возможности выделить характерные, но достаточно слабые контрасты, отвечающие малым адвективным объектам, на неинформативном фоне сильных и гладких контрастов, направленных обычно вдоль линии тока измеряемого геострофического течения и поэтому скрывающих направленную туда же компоненту векторов течений. Кроме того, даже если представить гипотетический метод, который такое выделение обеспечивает, метод МПК все равно будет усреднять измерения по всей площади шаблона, что автоматически приведет к упомянутой выше недооценке скоростей течений. Наконец, существенным недостатком данного метода является его неустойчивость к изменению контекста, что, как правило, и происходит при перемещении маркера в другое место. Все эти причины, являющиеся результатом прослеживания не точечных, а площадных объектов, приводят к низкой точности и неустойчивости метода МПК.

Ориентация на выделение трассеров по форме контрастов и прослеживание точечных объектов-маркеров подсказывают необходимость перевода спутниковых изображений в векторную форму и создания на этой основе объективной алгоритмической процедуры выделения и прослеживания маркеров моря. Такие процедуры с успехом используются для прослеживания перемещения льда по изображениям в видимом диапазоне спектра и радарным изображениям, но применительно к рассматриваемой задаче до сих пор такой подход успеха не имел. Это объясняется не только слабостью термических контрастов по сравнению с контрастами между льдом и водой, но главным образом упомянутым выше несоответствием между силой контраста и его информативностью. Выделение таких размытых контрастов каким-либо дифференциальным оператором приводит к трудоемкой и неустойчивой операции кластеризации, дающей обычно слишком много вариантов соединений и осложненной необходимостью выделения информативных особенностей – маркеров моря. Пример типичного изображения приведен на рис. 1.

Маркеры моря определяются в нашем случае как точки (пиксели) максимальной кривизны на линиях пучка изотерм, т. е. небольших участков с не менее чем двумя смежными изотермами (достаточная для распознавания длина таких участков составляет не менее 6–10 пикселей, но при этом допускаются разрывы в 1–2 пикселя). В идее пучка лежит объединение свойств изолиний и контрастов (перепадов), причем в качестве изолиний используются все изотермы на изображении (очевидно, что на байтовых изображениях их не более 256), проходящие по всем границам между пикселями с отличающимися значениями. Таким образом, осуществляется перевод изображения из растровой формы в векторную без потери информации. Важно, что введение пучков позволяет избежать операции кластеризации контрастов, заменяя ее вполне определенной операцией проверки на близость. Отметим, что наличие не менее двух смежных изотерм гарантирует существование устойчивого контраста (с точностью, определяемой степенью близости), тог-

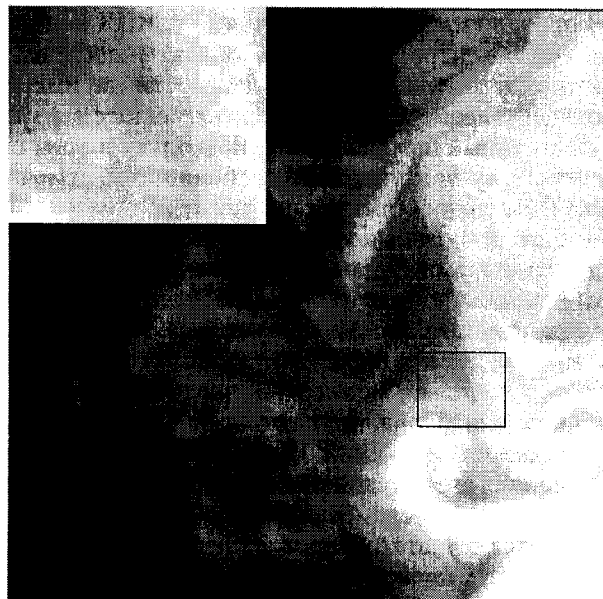


Рис. 1. Исходное изображение с увеличенным и осветленным фрагментом

да как линия одиночной изотермы может проходить произвольно. После того как контуры выделены, становятся возможными содержательный анализ и идентификация маркеров. Последняя проводится по близости температур, форме линии пучка, контексту маркера (с учетом состава его окрестности) и физическим признакам (объективный анализ с использованием принципов геострофики).

Для проведения такого анализа необходима предварительная обработка изображений, состоящая в геометрической коррекции и привязке с точностью до 1 км (по известной береговой линии), удалении облачности и суши путем наложения маски и выравнивании температур на двух изображениях (нормализация). Выравнивание температур позволяет ограничиться при идентификации только теми маркерами моря, которые находятся в одинаково узких температурных пределах на двух изображениях.

**Алгоритм прослеживания маркера.** *Предобработка растровых изображений.* Предобработка растра заключается в выравнивании пары изображений с использованием порядковых статистик. В частности, пары выравнивались по квантилям 10 и 90 %.

*Построение изолиний.* Построение изолиний необходимо как промежуточный шаг на пути выделения более сложных структур. Растр можно представить в виде регулярной (по  $x$  и  $y$ ) сетки трехмерных точек. Координаты  $x$  и  $y$  берутся по номерам столбцов и строк соответственно, координата  $z$  – значение пиксела. Имея такую сетку, можно построить изолинии (изотермы) для всех значений  $z$ , встречающихся на изображении. Пусть пикселы принимают значения в диапазоне  $0, 1, 2 \div 255$ , тогда строим изолинии с высотами  $0,5, 1,5 \div 254,5$ . Так как изолиния высоты  $z$  проходит практически по границе между пикселами  $z_1 \geq z + 0,5$  и  $z_2 \leq z - 0,5$ , для ее построения достаточно отследить соответствующие границы пикселов на растре (рис. 2).

*Пучки.* Введем понятие пучка как совокупности изолиний и/или частей изолиний, расположенных в непосредственной близости друг от друга. В алгоритме применяются следующие уточняющие определения.

1. Пучок состоит из изолиний (частей изолиний).

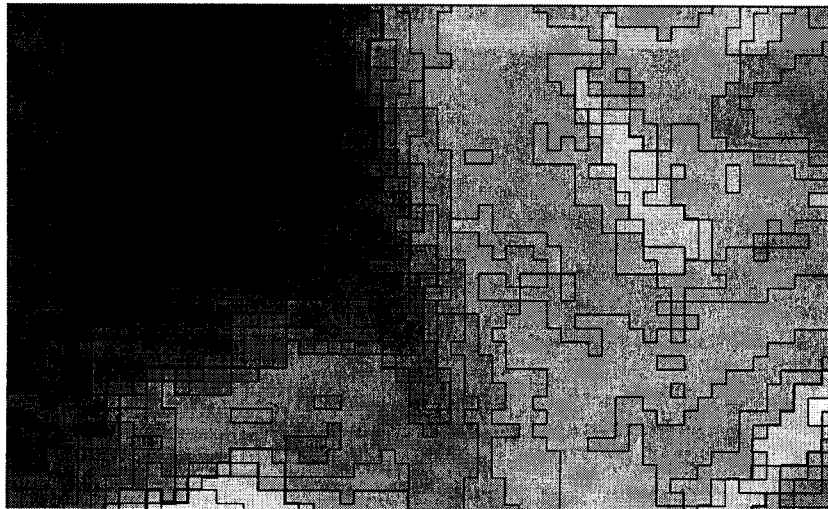


Рис. 2. Изолинии (утолщения пропорциональны количеству совпавших изолиний)

2. Следует различать базовую изолинию (часть изолинии) и сопутствующие изолинии (части изолиний).

3. Существует буферная зона, построенная вокруг базовой изолинии, любая другая изолиния (часть изолинии), попадающая в эту зону, является сопутствующей.

4. Минимальный пучок состоит из базовой изолинии (части изолинии) и хотя бы одной сопутствующей изолинии (части изолинии).

Буферная зона имеет определенную форму, которая задается формой сечения в плоскости, перпендикулярной базовой изолинии. На практике достаточно окружности или окружности, усеченной сверху и снизу.

#### *Построение пучков.*

1. Берем одну из множества изолиний и назначаем ее базовой.

2. Строим буферную зону.

3. Двигаясь вдоль базовой изолинии, находим места вхождения других (сопутствующих) изолиний в буферную зону. Каждый пучок начинается с места вхождения в буферную зону хотя бы одной сопутствующей изолинии и заканчивается в месте выхода последней сопутствующей изолинии.

4. Повторяем процедуру п. 1 для всех остальных изолиний.

*Выделение маркеров-кандидатов и сопутствующего контекста.* Маркер-кандидат – это точка, являющаяся экстремумом кривизны базовой изолинии. Сопутствующий маркеру контекст (геометрический) – часть базовой изолинии, непосредственно прилегающая к точке маркера.

Для вычисления экстремумов кривизны изолинии интерполируются кубическими сплайнами. Так как изолинии строятся по растровому представлению (межпиксельным границам), то в этой форме они имеют ортогональный характер, который приводит к возникновению экстремума кривизны на каждом повороте изолинии (рис. 3). Излишняя детализация полилинии приводит к множеству экстремумов, которые не отражают общей формы. Поэтому до интерполяции кубическими сплайнами к полилинии применяется процедура сглаживания, заключающаяся в аппроксимации исходной полилинии меньшим числом отрезков. Анализируя деятельность оператора по выделению маркеров, можно предположить, что при этом происходит некоторый процесс, в ходе которого сначала выделяется общая форма линии контраста.



Рис. 3. Изолиния (выделена пунктиром) в исходной форме ортогональной полилинии

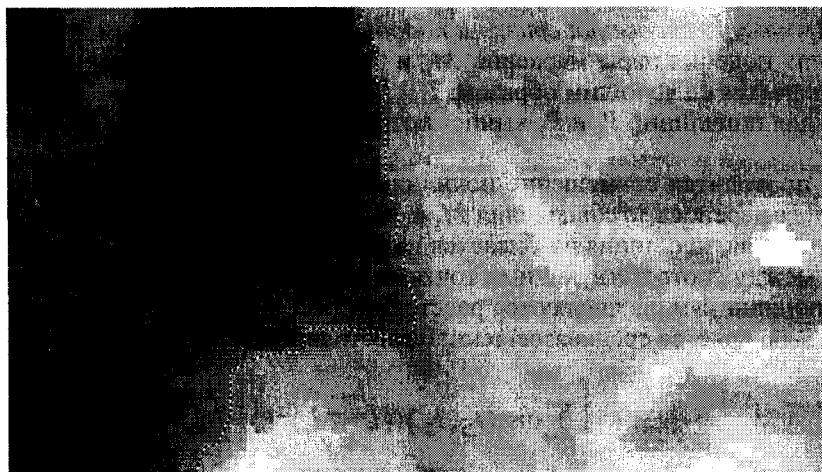


Рис. 4. Базовая полилиния (выделена пунктиром)

Отбрасываются локальные детали – небольшие изломы линии, колеблющиеся вблизи «общего» направления. И так, получается более сжатое описание изолинии, и, следовательно, в окрестностях оставшихся изломов следует искать потенциальные маркеры. Таким образом, применяя процедуру сглаживания итеративно с уменьшением количества отрезков аппроксимации, получаем иерархическое описание полилинии. Это описание позволяет более точно локализовать области, где возможно наличие маркеров.

Полученная после сглаживания полилиния (рис. 4) служит опорной для построения кубических сплайнов (рис. 5). Не все маркеры-кандидаты являются потенциально пригодными для построения векторов перемещения, поэтому к ним применяется набор пороговых фильтров, отсеивающих «ненадежные» маркеры на основе некоторого набора атрибутов: кривизны, наличия контекста определенного размера, средней толщины пучка.

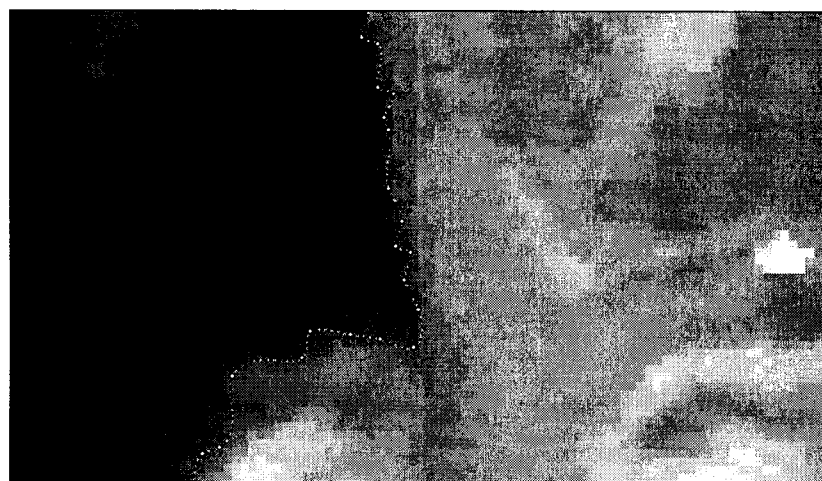


Рис. 5. Изолиния, сглаженная сплайном (выделена пунктиром). Кружки – экстремумы кривизны

*Процедура сравнения степени подобия маркеров с учетом контекста.* Степень подобия пары маркеров  $M_1$  и  $M_2$  по геометрическому контексту определяется следующим образом:

- для полилиний  $P_1$  и  $P_2$  вычисляются аппроксимирующие прямые  $L_1$  и  $L_2$ ;
- проводится совмещение полилиний  $P_1$  и  $P_2$  контекста путем параллельного переноса до совпадения  $M_1$  и  $M_2$  и поворота до совпадения  $L_1$  и  $L_2$ ;
- каждая полилиния разбивается на  $n$  равных отрезков;
- между соответствующими точками разбиения, принадлежащими разным полилиниям, вычисляются расстояния;
- вычисляется средневзвешенное расстояние по формуле

$$D = \left[ \sum \text{dist}(t_{1i}, t_{2i})((L - \Delta l_i)/L) \right] / n,$$

где  $t_{1i}, t_{2i}$  – точки;  $\text{dist}$  – функция расстояния;  $L$  – половина длины полилиний контекста (их длины равны);  $\Delta l_i$  – отклонение  $i$ -точки от точки маркера (отклонение берется вдоль полилинии).

Средневзвешенное расстояние используется как мера подобия геометрических контекстов маркеров.

*Процедура отбора пар маркеров (векторов перемещения).* В процессе построения векторов перемещения возникают ситуации, когда из начальной точки на первом (по времени) снимке выходит несколько векторов и в конечной точке на втором снимке сходится несколько векторов перемещения. Для разрешения таких ситуаций применяется двухступенчатая процедура отбора. На первой ступени отбирается один «наилучший» вектор из множества векторов, выходящих из начальной точки (применяется ко всем начальным точкам с несколькими векторами), на второй ступени – то же самое по отношению к конечным точкам. Критерий отбора – максимальное подобие геометрии контекста.

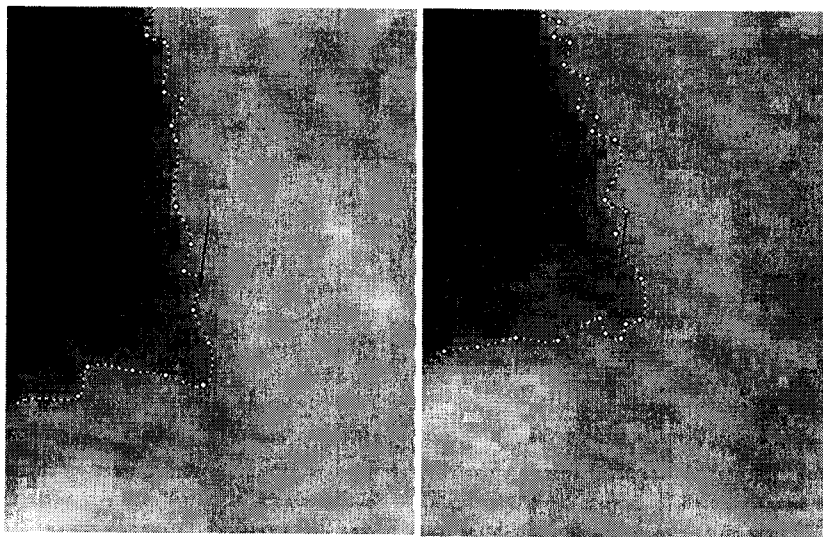


Рис. 6. Векторы перемещения маркера



Входными данными для алгоритма являются сканерные изображения, полученные со спутников серии NOAA/AVHRR. Спутниковое изображение представляет собой растр, каждый пиксел которого имеет значение, являющееся дискретным отсчетом радиационных температур (1024 градации). После выделения диапазона температур, соответствующего физически допустимым температурам водной поверхности, изображение преобразуется в байтовый формат, имеющий 256 градаций. Предполагается, что облачность отфильтрована, географическая привязка по орбитальным данным и необходимая геометрическая коррекция проведены. Также уточнена географическая привязка по видимой береговой черте. Алгоритмом одновременно обрабатывается пара растровых изображений, полученных в одном районе с временным интервалом 6–12 ч.

Результатом работы алгоритма является набор векторов перемещения обнаруженных маркеров моря (рис. 6).

**Заключение.** Предложен новый подход к выделению размытых контуров на изображениях, позволяющий создавать эффективные алгоритмы определения скоростей движения атмосферы и океана (ветра, течений), основанные на прослеживании перемещения трассеров на спутниковых изображениях в различных диапазонах спектра. Достоинством его является привлечение методов анализа изображений, позволяющих учесть как контекстные условия, так и физические принципы, которыми руководствуется опытный оператор. В частности, в результате использования этого подхода получаются алгоритмы, превосходящие по точности и достоверности измерений корреляционные алгоритмы, традиционно применявшиеся в данной прикладной области.

Разработана алгоритмическая процедура, реализующая предложенный метод применительно к решению задачи определения скоростей течений на поверхности океана. Первые эксперименты по проверке эффективности автоматической процедуры в сравнении с операторным методом на примере ИК-изображений по акватории Японского моря, полученных со спутников серии NOAA/AVHRR, показали перспективность данного подхода. Предполагается, что предложенный подход может быть с успехом применен и для решения других задач, когда отсутствуют четко выраженные контуры. В дальнейшем планируется проведение работ по совершенствованию метода и дальнейшей оценке его достоверности и эффективности. Предполагается также целесообразным разработать объективную методику сравнительной оценки различных методов, основанную на модельных изображениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shenk W. E., Kreines E. R.** A comparison between observed winds and cloud motions derived from satellite infrared measurements // *Journ. Appl. Meteorol.* 1970. 9, N 4. P. 702.
2. **Eigenwilling N., Fisher H.** Determination of midtropospheric wind vectors by tracking pure water vapour structure in METEOSAT water vapour image sequences // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1982. 63. P. 44.
3. **Fily M., Rothrock D. A.** Extracting sea ice data from satellite SAR imagery // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1986. **GE-24**, N 11. P. 849.
4. **Svejkovsky S.** Sea surface flow estimation from advanced very high resolution radiometer and coastal zone color scanner satellite imagery: A verification study // *Journ. Geophys. Res.* 1988. 93. P. 6735.

5. Tokmakian R., Strub P. T., McClean-Padman J. Evaluation of the maximum cross-correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images // Journ. Atmos. Ocean. Technology. 1990. 7, N 12. P. 852.
6. Leese J. A., Novak C. S. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross-correlation // Journ. Appl. Meteorol. 1971. 10. P. 118.
7. Vesecky J. V., Samadani R., Smith M. P. et al. Observation of sea-ice dynamics using synthetic aperture radar images: Automated analysis // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1988. GE-26, N 1. P. 38.
8. Emery W. J., Thomas A. C., Collins M. J. et al. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // Journ. Geophys. Res. 1986. 91, N 11. P. 12865.

*Институт автоматики  
и процессов управления ДВО РАН,  
E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru*

*Поступила в редакцию  
18 апреля 2000 г.*

---

**Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!**