

## Автоматический расчет скоростей перемещений ледовых полей

А.И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.Ю. Карнацкий

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

Рассмотрен усовершенствованный метод максимума кросс-корреляций для автоматического расчета скоростей перемещений ледовых полей по последовательности изображений спутников NOAA/AVHRR. Усовершенствование заключается в разработке критерия априорной оценки точности расчета. Чем выше величина кросс-корреляции яркости сравниваемых площадок двух изображений и чем резче убывают их автокорреляционные функции, тем выше априорная точность. Проведенное тестирование показало хорошую результативность нового метода. Введение критерия повысило достоверность и информативность расчетов скоростей перемещений. Приводятся также примеры применения метода для расчета скоростей поверхностных течений и рассматриваются пути усовершенствования предложенных процедур.

**Ключевые слова:** расчет скоростей перемещений, априорная оценка точности, ледовые поля, максимум кросс-корреляций.

### Введение

Расчет скоростей течений в море – одна из наиболее актуальных научных и практических задач. В настоящее время наиболее информативным и дающим общую картину является расчёт скоростей с помощью спутникового дистанционного зондирования. Прослеживание перемещений яркостных неоднородностей (feature tracking) по последовательности изображений моря с метеорологических спутников в ИК- и видимом диапазонах спектра позволяют в безоблачных случаях строить «плотные» поля наблюдений за течениями. Понятно, что прослеживаемые на изображениях маркеры, имеющие площадь в десятки квадратных километров, не могут содержать мелкомасштабную компоненту течения и в этом смысле занижают величину скорости. Но в потоках, присущих вихрям и течениям синоптического масштаба, эта компонента не столь существенна. Для таких потоков было доказано, что визуально-ручное прослеживание перемещений яркостных неоднородностей (метод морских маркеров – MMM) дает приемлемые результаты (Svejkovsky, 1982; Алексанин, 1991; Breaker, 1994). Было значительное количество попыток создания надежного автоматического метода расчета скоростей, все подходы к построению которого можно условно разделить на три группы:

- подход, позволяющий рассчитывать перенос трассера течениями в соответствии с уравнением неразрывности (Ильин Ю.П., 1989; Wu, 1992);
- подход на основе выделения контуров и прослеживания их характерных особенностей (Vastano, 1984, 1985; Бобков, 2003);
- подход на основе максимальной кросс-корреляции (МКК) яркости площадок двух изображений (перекрестной корреляции) (Emery, 1986; Kamachi, 1989; Tokmakian, 1990).

Можно выделить 2 существенных недостатка автоматических методов: занижение значений величин скоростей (более присуща первому и третьему подходам) и наличие зна-

тельного количества «ложных» векторов (не удовлетворяющих заданной точности), эффективная процедура фильтрации которых не была создана. Вторая проблема является наиболее острой и наиболее сложной. В первом подходе она не решается. Второй подход позволяет отбраковывать ложные маркеры по «его контексту». Но при этом либо остается незначительное количество векторов, либо пропускается значительное количество ложных. Третий подход для отбраковки использует статистические оценки достоверности кросс-корреляции площадок на основе анализа их автокорреляционной функции (Emery, 1986). Критерий пропускает значительное количество некорректных векторов, что приводит к необходимости сглаживания рассчитанного поля течений (Bowen, 2002), и, как следствие, искажаются величины скоростей. В идеале, нужные не статистические оценки достоверности построенной кросс-корреляции, а априорные оценки точности расчета скорости перемещения. Созданию критерия априорной оценки точности расчета перемещения маркера при построении скоростей дрейфа льда кросс-корреляционным методом и посвящена эта работа.

### **Модифицированный метод МКК – введение априорной оценки точности**

Стандартный метод использует площадные шаблоны (к примеру, площадки размером 30x30 пикселей) для построения векторов перемещений по двум последовательным изображениям километрового пространственного разрешения. Центр шаблона на первом изображении берется в узлах регулярной сетки, а положение соответствующего шаблона на втором изображении подбирается в области поиска (задаваемой по величине максимально допустимых перемещений) таким образом, чтобы коэффициент корреляции яркостей двух площадок достигал максимума. Для учета изменчивости освещенности площадок (при использовании изображений в видимом спектральном диапазоне), или их прогрева/остывания (для ИК-изображений) используется вычитание из яркостей среднего значения по площадке. Также предполагается, что за время наблюдения структура изображения, соответствующая шаблону, не искажается существенно и перемещается равномерно без поворотов.

Для улучшения работы метода МКК вводится критерий отбраковки построенных векторов, представляющий собой априорную оценку точности расчета скорости. Оценка базируется на естественном предположении, что точность зависит от свойств автокорреляционных функций шаблонов и величины полученной кросс-корреляции  $C^*$ : чем выше величина кросс-корреляции и чем резче убывают автокорреляционные функции при движении от центра шаблона к его границам, тем выше точность расчета перемещения. Пространственная функция автокорреляции при сдвиге ( $p, q$ ) определяется как:

$$C(p, q) = \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2} \times \sum_j \sum_i \{[I(i, j) - \bar{I}] \cdot [I(i + p, j + q) - \bar{I}]\} ,$$

где суммирование выполняется по всем точкам  $(i, j)$  окна-шаблона,  $\bar{I}$  соответствует среднему значению,  $\sigma_1, \sigma_2$  – стандартные отклонения шаблонов.

Для полученной величины кросс-корреляции  $C^*$  делаются сечения автокорреляционных функций шаблонов на этом уровне. Для каждого шаблона ищется максимальное расстояние от центра шаблона до точек изолинии сечения ( $R_1$  и  $R_2$ ). Схема расчета приведена на рис. 1. Ищется максимальное расстояние  $R^* = \max(R_1, R_2)$ .

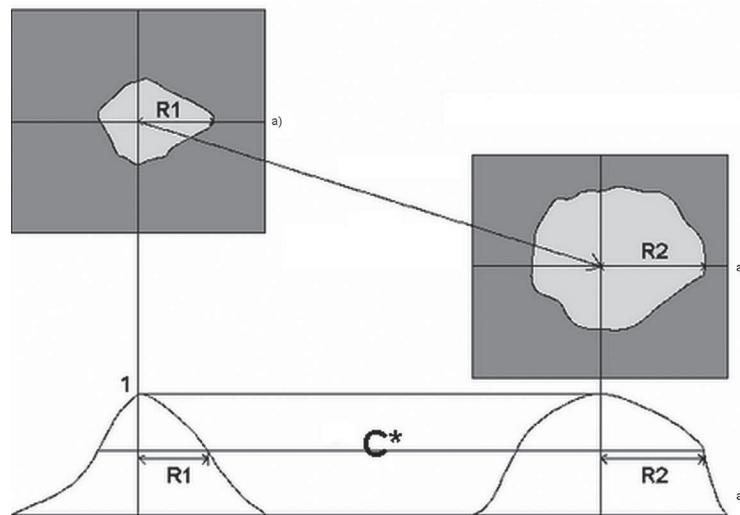


Рис. 1. Формы сечений автокорреляционных функций двух площадок и соответствующие вертикальные разрезы этих функций по линии «а». Светлые области – области автокорреляционных функций, которые больше величины максимальной кросс-корреляции  $C^*$

Критерий отбраковки должен быть пропорционален величине  $R^*$  и должен исключать по возможности все неточные вектора. На рисунке 2 приведен пример построения перемещений льда, когда отбраковывались все перемещения, большие, чем  $R^*$ . Как можно заметить, первое изображение в левом нижнем углу зоны построения скоростей содержит облачность, не позволяющую оценить перемещения. Соответствующие шаблоны имеют значительные по площади сечения автокорреляционной функции и отбраковываются. Оставшиеся перемещения сплошного ледяного поля имеют высокую когерентность и соответствуют перемещению такого поля под действием ветра. Данный пример показывает, что использование предложенного критерия отбраковки может позволить отказаться от высокоточных процедур фильтрации облачности и радиометрической коррекции изображений, так как эти сопутствующие задачи часто не менее сложные, чем основная задача.

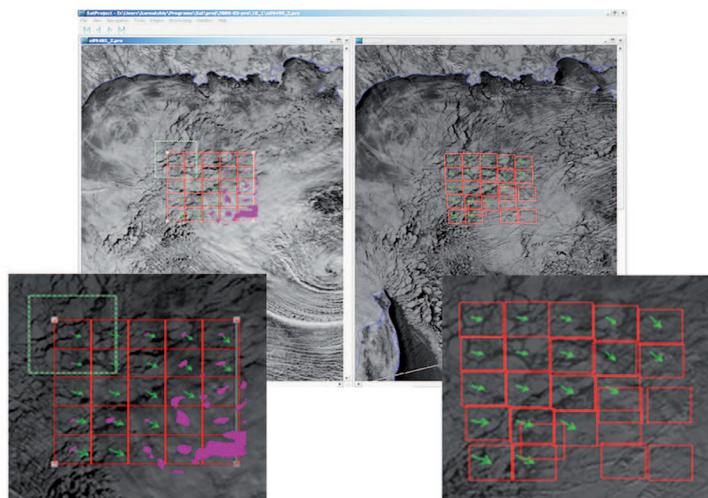


Рис. 2. Результаты работы критерия отбраковки на примере изображения Охотского моря за март 2009 года в видимом канале NOAA-18\AVHRR (витки N89485-N89499). На первом изображении приведены непересекающиеся шаблоны, для одного из которых обозначена область поиска. Для каждого шаблона приведено сечение его автокорреляционной функции. На втором изображении образы шаблонов и их перемещения, прошедшие фильтрацию

## Тестирование критерия отбраковки

Тестирование свойств предложенного критерия отбраковки проводилось для разных условий наблюдения за перемещением ледяных полей по спутниковым изображениям AVHRR\NOAA. Для различных пар изображений методом морских маркеров строились скорости перемещения льда. Выбранные экспертом точки исходного изображения являлись центрами шаблона для автоматического расчета скорости перемещения. Исследовалась зависимость ошибки расчета вектора скорости в зависимости от значения максимальной кросс-корреляции  $C^*$  и априорной оценки точности  $A_R = R^*/\Delta t$  ( $\Delta t$  – временной интервал между изображениями). Использовались пары изображений с суточным интервалом.

Для оценки работоспособности критерия были отобраны все основные случаи, которые могут приводить к росту «ложных» векторов:

- присутствие ячеистой и полупрозрачной облачности;
- присутствие сплошной облачности;
- значительная трансформация ледяных полей (поворот и сдвиг).

В качестве эталона для сравнения использовались данные, построенные по изображениям с безоблачной атмосферой и без значительных трансформаций поля льда. В каждом эксперименте участвовали по 2 пары изображений льда Охотского моря за 2010 год. При сравнении скоростей, рассчитанных автоматически и оператором, рассматривалась информативность критерия (процент правильно построенных перемещений) и его эффективность (процент векторов, чья точность хуже заданного порога). Автоматический расчет скоростей велся при следующих параметрах: область поиска=79x79 пикселей; окно шаблон 30x30 пикселей. Такой выбор параметров был обусловлен значением типичных скоростей на поверхности моря и масштабами неоднородностей изображений льда. Рассчитывались величины:  $\|\Delta V\|$  – длина вектора рассогласования двух оценок скорости перемещения; и величина критерия  $A_R$ . Для сравнения использовались графики зависимости  $\|\Delta V\|$  от величины кросс-корреляции  $R^*$ . Оценивались информативность метода и точность при заданном пороге отбраковки. Для единообразия оценки результатов считалось, что допустимой точностью будет величина 0.1м/сек. Порог отбраковки  $A_R$  тоже был зафиксирован и тоже равнялся 0.1 м/сек.

На рисунке 3 приведены результаты тестирования критерия  $A_R$  и для сравнения аналогичные результаты для обычного кросс-корреляционного метода для безоблачных изображений льда в видимом (рис.3 а,б) и инфракрасном (рис.3в,г) спектральных диапазонах. Как можно заметить, основная масса скоростей рассчитана с хорошей точностью, а видимый канал дает лучшие результаты. При пороге  $A_R = 0.05$ м/сек как для видимого, так и для ИК-каналов «ложные» вектора отсутствуют. При этом использование такого порога для видимого канала не приводит к существенному увеличению отбраковки корректных векторов, что нельзя сказать о ИК-канале. При использовании обычного кросс-корреляционного метода показано (Emery, 1986), что величина  $R^*$  часто статистически значима уже при значении более 0.35, хотя на практике порог выбирают из диапазона 0.6-0.8. Можно отметить, что при любом пороговом отсечении по величине  $R^*$  ложные вектора останутся. При высоких порогах при этом отфильтруется наибольшая часть корректных векторов.

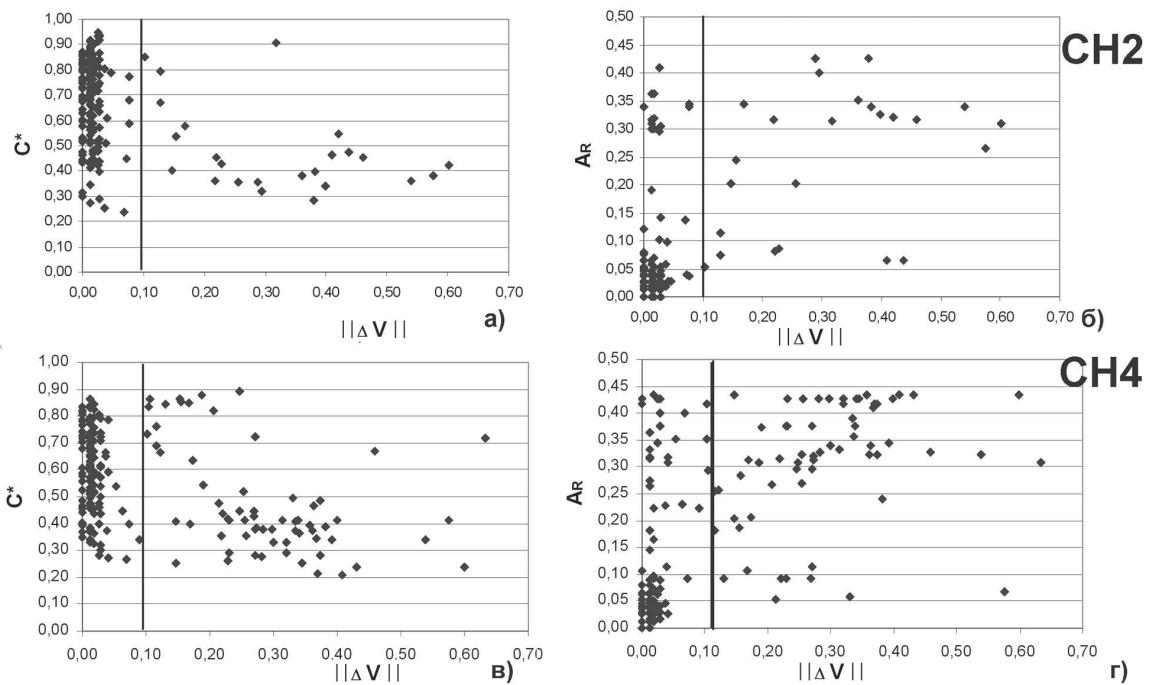


Рис.3. Зависимости точности расчета скоростей перемещения льда от параметров двух автоматических методов в видимом (CH2) и ИК (CH4) каналах. Изображения а и в соответствуют стандартному кросс-корреляционному методу, б и г – предложенной модификации метода

В таблице 1 приведены результаты количественного сравнения работы двух методов на данных видимого канала для: чистой атмосферы; атмосферы с полупрозрачной и ячеистой облачностью; для полей льда со значительными трансформациями за период наблюдения. В последнем случае использовались районы выноса дробленого льда в море с интервалом наблюдения двое суток. В обычном кросс-корреляционном методе использовался порог отбраковки  $R^*<0.6$ . Параметры эффективности методов рассчитывались для трех вариантов требуемой точности расчетов. Как можно заметить, по количеству «ложных» векторов оба метода работают довольно успешно (процент незначительный). Однако, для обычного кросс-коорреляционного метода это достигается ценой увеличения потерь правильно построенных векторов в 2-3 раза. Примерно та же тенденция наблюдается и при использовании ИК-изображений. Но если процент отбракованных «правильных» векторов меняется незначительно, то рост «ложных» векторов значителен, особенно у стандартного метода. Так, уже для первого случая с «идеальными» условиями наблюдения, количество «ложных» векторов превысило 10% (против 2% у нового метода).

Таблица 1. Точность и информативность двух кросс-корреляционных методов

Допустимая ошибка м/сек	Чистые от облачности изображения льда без поворотов		При автокорреляционном критерии $A_R=0,1$	
	При корреляционном критерии $C^*=0,6$		При автокорреляционном критерии $A_R=0,1$	
	Ложно принятые векторы %	Ложно отбракованные векторы %	Ложно принятые векторы %	Ложно отбракованные векторы %
0,05	4,1	19,5	0,5	6,7
0,1	3,1	20,0	0	7,7
0,5	2,6	23,6	0	11,8

Чистые от облачности изображения при значительной трансформации поля льда				
Допустимая ошибка м/сек	При корреляционном критерии $C^*=0,6$		При автокорреляционном критерии $A_R=0,1$	
	Ложно принятые векторы %	Ложно отбракованные векторы %	Ложно принятые векторы %	Ложно отбракованные векторы %
0,05	2,9	32,9	4,3	12,9
0,1	2,9	35,7	2,9	14,3
0,5	2,9	48,6	1,4	25,7
Изображения льда с полупрозрачной облачностью				
Допустимая ошибка м/сек	При корреляционном критерии $C^*=0,6$		При автокорреляционном критерии $A_R=0,1$	
	Ложно принятые векторы %	Ложно отбракованные векторы %	Ложно принятые векторы %	Ложно отбракованные векторы %
0,05	1,7	43,2	3,4	18,6
0,1	1,7	44,9	2,5	19,5
0,5	1,7	54,2	0,00	26,3

Попытка объединить оптимальным образом два критерия отбраковки –  $R^*$  и  $A_R$  не увенчалась успехом. Для оптимального сочетания двух критериев в условиях, как чистой атмосферы, так и полупрозрачной облачности, с целью наилучшей фильтрации ложных векторов, ярко выраженной тенденции не наблюдалось. Значительные группы правильно построенных точек одновременно имели низкие величины обоих критериев. Ярко выраженной зависимости ошибки расчета скорости от её величины также не наблюдалась.

Очень хорошие данные были получены при попытке построить скорости перемещений в условиях сплошной облачности, то есть когда все посчитанные перемещения являются неправильными. Новый критерий отбраковал все вектора, не пропустив ни одного, в отличие от обычного МКК (рис.4.)

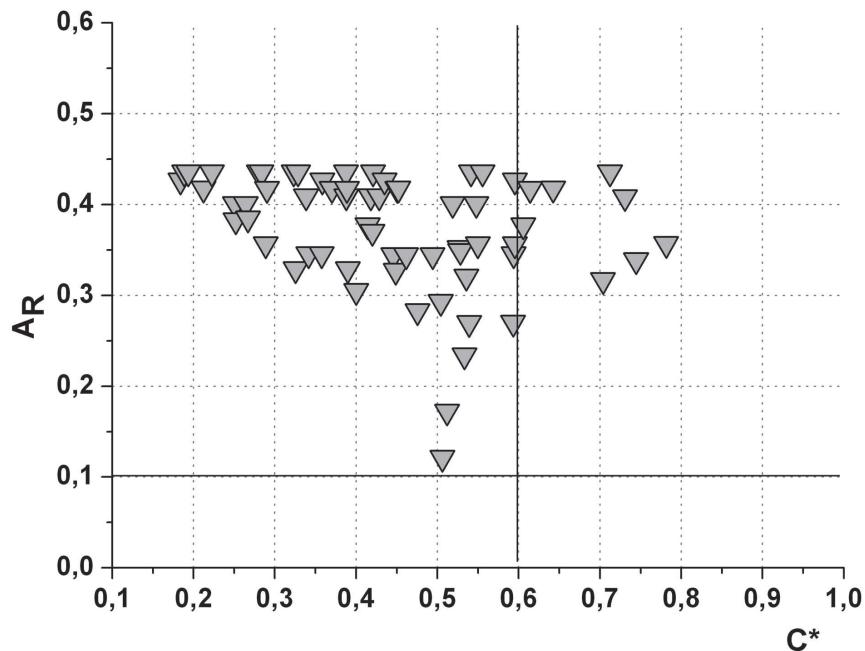


Рис. 4. Параметры векторов перемещений, построенных в условиях сплошной облачности (все вектора «ложные»)

Использование кросс-корреляционной методики для расчета скоростей поверхностных течений приводит, в общем случае, к занижению скорости. Для этого существует две причины. Во-первых, размер площадки часто сопоставим с характерным поперечным размером потока. Поэтому максимальные скорости будут занижены. Во-вторых, наибольшие термические контрасты расположены часто вблизи границы потока, где скорости небольшие. В то же время центр шаблона является точкой расчета скорости. Если центр шаблона находится на центре струи, а наибольшие контрасты находятся на периферии шаблона, то будет значительное занижение скорости течения. Тем не менее были проведены 2 эксперимента по применению новой методики для оценки скоростей поверхностных течений в Охотском море. На рисунке 5 приведены скорости течений, посчитанных новым методом и методом морских маркеров. На рисунке 6 построено распределение точности расчета скоростей в зависимости от критерия  $A_R$ . Хороший результат работы критерия получился на паре за 4 и 5 июля 1994 года. В 80 % случаев ошибка расчета не превысила заданную точность 0.2 м/сек. За 18-19 июня 1994 года ошибка расчета не превысила заданную точность 0.2 м/сек только в 40 % случаев. Рассогласование скоростей основной массы векторов лежало в диапазоне от 0 до 0.5 м/сек. Но самое главное то, что подавляющая масса векторов, имеющая значительные рассогласования с векторами, построенными методом морских маркеров, была отфильтрована. Понятно, что уменьшение размера шаблона должно улучшать точность расчета. Но при этом падает надежность построения вектора (растет количество «ложных» векторов). Естественным выходом будет использование иерархии шаблонов. Шаблонами большого размера рассчитывается перемещение поверхностных вод значительной площади, а мелкоразмерными шаблонами осуществляется более точный расчет скоростей. За счет уменьшения зоны поиска мелкоразмерными шаблонами должна расти надежность нахождения образа шаблона.

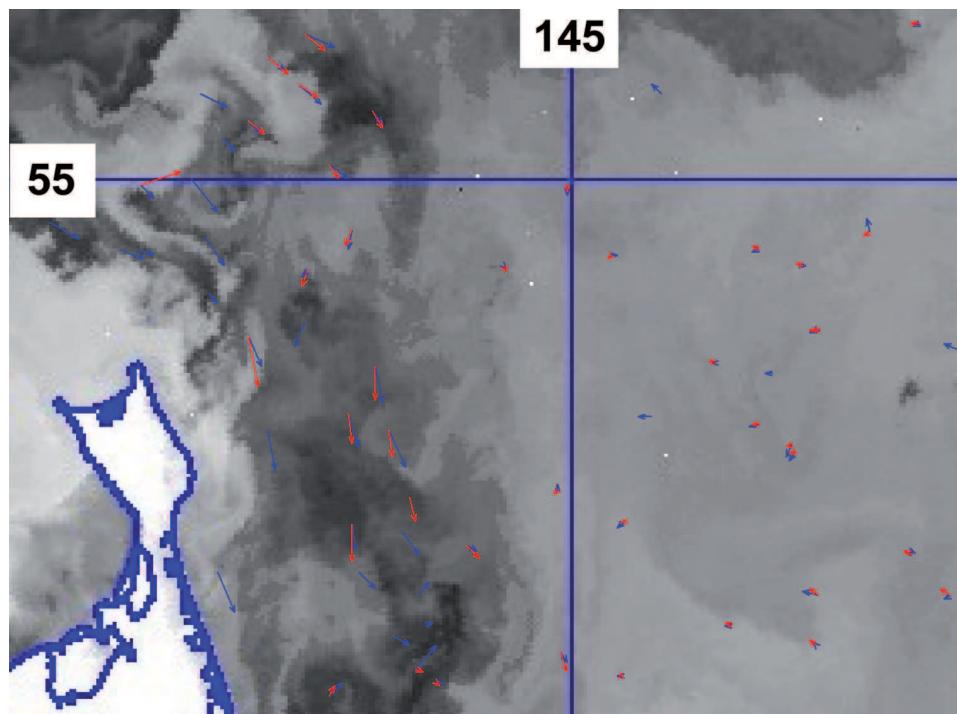
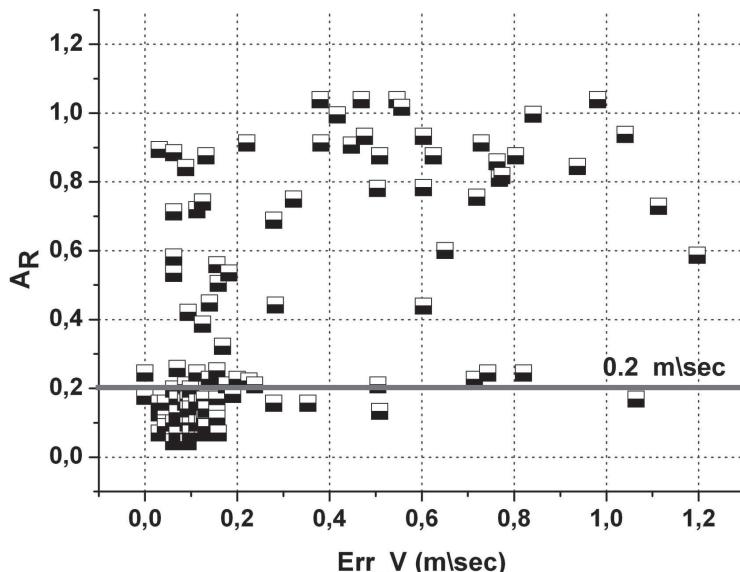


Рис. 5. ИК-изображение поверхности Охотского моря за июль 1994 года. Красные стрелки - скорости, построенные автоматически, синие стрелки - оператором



*Рис. 6. Распределение точности расчета векторов скоростей поверхностных течений Охотского моря за 4-5 июля 1994 г.*

### Заключение

Созданная процедура отбраковки векторов перемещений льда, построенных методом максимума кросс-корреляций по последовательности изображений, решает эту основную проблему автоматического построения скоростей дрейфа льда. Рассмотрены ситуации, которые приводят к значительному росту числа «ложно» построенных векторов – наличие не отфильтрованной облачности на изображениях и значительные трансформации полей льда за период наблюдений. Показано, что основная масса неточных векторов отбраковывается, а подавляющее число оставшихся имеют точность лучше 10 см/сек. Наблюдается сто-процентная отбраковка векторов, построенных по изображениям, полностью закрытых облачностью (случай полного отсутствия корректных векторов). Сравнение информативности и точности нового метода с классическим методом МКК показывает его существенное преимущество при разных условиях наблюдения.

Новая процедура также апробирована для расчета скоростей поверхностных течений. Показана высокая эффективности отбраковки некорректных векторов. В то же время наблюдается значительная ошибка расчета скоростей, обусловленная, по-видимому, большим размером шаблонов прослеживаемых площадок. Предлагаются дальнейшие пути усовершенствования метода.

Работа поддержана грантами РФФИ №11-07-00511, №11-01-00590 и грантами ДВО РАН.

### Литература

1. Алексанин А.И. Скорость геострофического течения на поверхности: сопоставление спутниковых и судовых измерений // Исследование Земли из космоса, 1991. №6. С.55-61.
2. Бобков, 2003; Бобков В.А., Казанский А.В., Морозов М.А., Щебенькова А.А.. Релаксационно-контурный алгоритм определения векторов морских течений по спутниковым изображениям и его синоптическая верификация // Автометрия, 2003. № 1. С.73-81.

3. Ильин Ю. П. Метод оценки морских течений по спутниковым данным посредством обращения модели переноса трассера. Севастополь: Морской гидрофизический институт АН УССР. 1989. 51с.
4. Breaker L.C., Krasnopolsky V.M., Rao D.B., Yan X.-H. The feasibility of estimating ocean surface currents on an operational basis using satellite feature tracking method // Bulletin of the American Meteorological Society, 1994. Vol.75. No. 11. P.2085-2095.
5. Bowen M.M., Emery W.J., Wilkin J.L.; Tildesley P.C., Barton I.J., Knewton, R. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002. 19. P. 1665–1676.
6. Emery W. J., A. C. Thomas, M. J. Collins, W. R. Crawford, and D. L. Mackas. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // J. Geophys. Res., 1986. Vol.91. No.C11. P.12865–12878.
7. Kamachi M. Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: Limitations and applications of maximum cross-correlation method with rotational registration // J. Geophys. Res., 1989. 94 . P.18 227-18 233.
8. Svejkovsky S. Sea surface flow estimation from Advanced Very High Resolution Radiometer and Coastal Zone Color Scanner Satellite Imagery: A verification study // J. Geophys. Res., 1988. 93. P.6735-6743.
9. Tokmakian R., P.T. Strub, and J. McClean-Padman. Evaluation of the maximum cross-correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images // J. Atmos. Ocean. Technology., 1990. 7. P.852-865.
10. Vastano A.C., and S.E. Borders. Sea surface motion over an anticyclonic eddy on the Oyashio Front // Remote Sens. Environ. 1984. 16. P.87-90.
11. Vastano A.C., S.E. Borders, and R. Wittenberg. Sea surface flow estimation with infrared and visible imagery // J. Atmos. Ocean. Technology, 1985. 2. P.401-403.
12. Wu, 1992, Wu Q. X., D. Pairman, S. McNeil, E.J. Barnes. Computing advective velocities from satellite images of sea surface temperature // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1992. 30. P.166-176.

## Automatic calculation of movement velocities of sea ice fields

A.I. Alexanin, M.G. Alexanina, A.Y. Karnatsky

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS,  
690041 Vladivostok, st. Radio 5  
E-mails: margeo@satellite.dvo.ru*

An advanced method of maximum of cross-correlations for automatic calculation of sea ice movement on a set of NOA/AVHRR images is proposed. Improvement consists in the use of an aprioristic estimation of calculation accuracy. For this purpose the autocorrelation functions of brightness of two templates corresponded to a velocity estimated is analyzed. The testing realized has shown more high accuracy and productivity of the new method. A samples are considered of new method use for sea surface velocity estimations. The ways of the method improvement are considered too.

**Keywords:** automatic calculation of moving speed, aprioristic estimation of accuracy, fields of sea ice, maximum of cross-correlations.