

Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений

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

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

Предложен новый метод автоматического расчета скоростей поверхностных течений по последовательности спутниковых ИК-изображений. Похожесть площадок на двух изображениях оценивается на основе максимума величины свертки нормированных на единицу критериев, характеризующих кросс-корреляцию, дисперсию и модуль рассогласования яркостей двух площадок. Для отбраковки некорректно рассчитанных перемещений используется не величина свертки, а новый критерий – априорная оценка точности расчета скорости. Применение критерия повысило надежность и точность расчета скоростей, что позволило отказаться от процедур сглаживания полученных векторов течений. Для оценки работоспособности метода использовалось сравнение с перемещениями термических маркеров, прослеженных экспертом. Показана высокая точность метода, рассмотрены некоторые проблемы расчета скоростей течений по спутниковым данным.

Ключевые слова: автоматический расчет скоростей течений моря, прослеживание маркеров, спутниковые ИК-изображения, максимум кросс-корреляции.

Введение

Расчет скоростей поверхностных течений по последовательности спутниковых изображений является наиболее перспективным способом получения мгновенных площадных оценок динамики океана. Визуально-ручное прослеживание перемещений яркостных неоднородностей (метод морских маркеров – МММ) дает приемлемые по точности результаты (Svejkovsky, 1982; Алексанин, 1991; Breaker et al., 1994). Автоматические методы дают менее точные значения. Существует много методов автоматического расчета скорости движения объектов, меняющих форму (Liu et al., 2011). Несмотря на схожесть схем решения, они существенно зависят от специфики задачи. Один из широко применяемых методов автоматического построения скоростей течений – это метод, основанный на поиске максимума кросс-корреляции (Maximum Cross Correlation – МСС) яркостей выбранной площадки первого изображения с ее образом на втором изображении (Emery et al., 1986). Основным недостатком этого метода является значительное количество ложных векторов при высоком проценте отбраковки корректных векторов. В частности, при гладких термических контрастах тангенциальная компонента рассчитываемой скорости содержит значительную ошибку (Crocker et al., 2007). В работе (Алексанин и др., 2011) предложен новый критерий отбраковки, получивший название «критерий априорной точности», который кардинально улучшил характеристики этого метода, что было продемонстрировано как для расчета дрейфа льда, так и для расчета перемещений термических неоднородностей на воде. Однако остались неисследованными вопросы зависимости точности и информативности модифицированного метода от размера используемых площадок, временного интервала между изображениями и от характеристик динамических процессов на поверхности. Следует отметить, что параметр кросс-корреляции не является единственным параметром

похожести площадок. Рассмотрению данных вопросов и сравнению точности и информативности создаваемого метода по сравнению с методом МММ посвящена данная работа. Ставились следующие цели:

- исследовать новые параметры для оценки похожести двух площадок ИК-изображений;
- разработать и исследовать новые критерии оценки априорной точности расчета перемещения площадок во времени;
- создать оптимальную схему расчета скоростей перемещений и исследовать зависимость точности и информативности расчетов от размеров площадок и динамических характеристик поверхностных течений.

Используемые данные и методики

В работе (Wangand et al., 2002) предложен индекс качества изображений IQI, использующийся для оценки похожести изображения-эталона и того же изображения с шумами различных типов. Утверждается, что он наиболее близок к визуальной оценке качества изображений и представляет собой произведение трех положительных, нормированных на единицу величин:

$$IQI = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \frac{2 * \bar{I}_1 \bar{I}_2}{\bar{I}_1^2 + \bar{I}_2^2} \cdot \frac{2 * \sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (1)$$

где первый множитель – это коэффициент корреляции r яркостей двух площадок с нулевыми средними значениями (σ_1, σ_2 – соответствующие стандартные отклонения), второй множитель характеризует меру похожести средних яркостей I , а третий – это параметр похожести контрастов S . При полном совпадении изображений максимальная величина индекса равняется единице. По аналогии и с учетом специфики обрабатываемых изображений (средняя яркость ИК-изображений может меняться значительно за период между моментами получения изображений) в качестве параметра похожести площадок возьмем этот индекс, заменив второй множитель более приемлемым:

$$K = r^\alpha \cdot E^\beta \cdot S^\gamma, \quad (2)$$

где α, β, γ – положительные величины; E – нормированное рассогласование яркостей площадки первого изображения с яркостями площадки второго изображения, сдвинутой относительно первой на вектор перемещения (p, q) :

$$E(p, q) = 1 - \frac{1}{e_1 + e_2} \sum_j \sum_i |[I(i, j) - \bar{I}_1] - [I(i + p, j + q) - \bar{I}_2]|,$$

$$e_1 = \sum_j \sum_i |I(i, j) - \bar{I}_1|, \quad e_2 = \sum_j \sum_i |I(i + p, j + q) - \bar{I}_2|.$$

Параметры r и E основаны на попиксельном сравнении площадок, поэтому их поведение необходимо исследовать отдельно, так как они характеризуют похожесть площадок. Третий параметр не обладает этим свойством и используется лишь как весовой

коэффициент. Образом площадки первого изображения является площадка на втором изображении, найденная в заданной окрестности поиска, которой соответствует максимальное значение критерия K^* . В данной работе величина параметра не будет использоваться для отбраковки сомнительных по точности векторов. Так же, как и в работе (Алексанин и др., 2011), в качестве критерия отбраковки будет использоваться критерий априорной точности. С этой целью для параметра K строятся аналоги автокорреляционных функций площадок (при $\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 0$ это просто автокорреляционные функции). Сечения аналогов автокорреляционных функций на уровне K^* позволяют рассчитать максимальные расстояния от центров площадок до границ сечений (R_1 и R_2), которые характеризуют неопределенность оценки вектора перемещения площадки. Критерий априорной оценки точности рассчитывается по формуле:

$$A_K = R^*/\Delta t, \quad (3)$$

где Δt – временной интервал между изображениями, а $R^* = \max(R_1, R_2)$.

Для исследования результативности предлагаемого подхода использовались архивные данные о скоростях течений, построенные методом морских маркеров по ИК-изображениям Охотского и Японского морей, полученным со спутников NOAA за июнь 1994 и октябрь–ноябрь 2000 гг. Строго говоря, скорость перемещения маркера не является скоростью поверхного течения в океанологическом смысле. Ее нельзя считать ни мгновенной, ни усредненной скоростью. Для получения скорости течения синоптического масштаба требуется учет и вычленение приливной и инерционной компонентов. Такой анализ является общим для любых способов измерения течений, но в данном случае он не требуется, так как сопоставляемые скорости течений рассчитываются по одинаковой схеме на одних и тех же изображениях. Поэтому здесь под скоростью течения будем подразумевать среднюю скорость перемещения термических неоднородностей за интервал наблюдения. Всего использовалось около 500 векторов, построенных по парам изображений с разными временными интервалами и относящихся к районам с разной динамической активностью. Сравнение векторов, рассчитанных разрабатываемым методом и МММ, проходило следующим образом. У рассчитанных автоматически векторов центр площадки первого изображения совпадал с выбранной экспертом характерной точкой прослеживаемой термической неоднородности. Модуль разницы векторов, построенных автоматическим способом и методом МММ, являлся оценкой точности расчета δ .

Сравнение результативности использования параметров r и E

Метод МСС использует для отбраковки некорректных векторов перемещений статистические оценки достоверности кросс-корреляции площадок на основе анализа их автокорреляционных функций. Статистически значимые корреляции ИК-изображений начинаются уже с величины 0,4 (Emery et al., 1986). В действительности для отбраковки некорректных векторов используются пороги в диапазоне величин (0,6–0,8). Тем не менее, такой критерий пропускает значительное количество некорректных векторов, что приводит

к необходимости сглаживания рассчитанного поля течений (Bowen et al., 2002), и, как следствие, искажаются величины скоростей. В идеале нужны не статистические оценки достоверности построенной кросс-корреляции, а априорные оценки точности расчета скорости перемещения. Предлагаемый новый критерий такими свойствами обладает в большей степени, чем исходный. На *рис. 1* для сравнения двух подходов приведен пример скоростей течений, построенных методом MMM, и автоматически построенных векторов методом МСС ($K=r$) с классическим критерием отбраковки и предлагаемым.

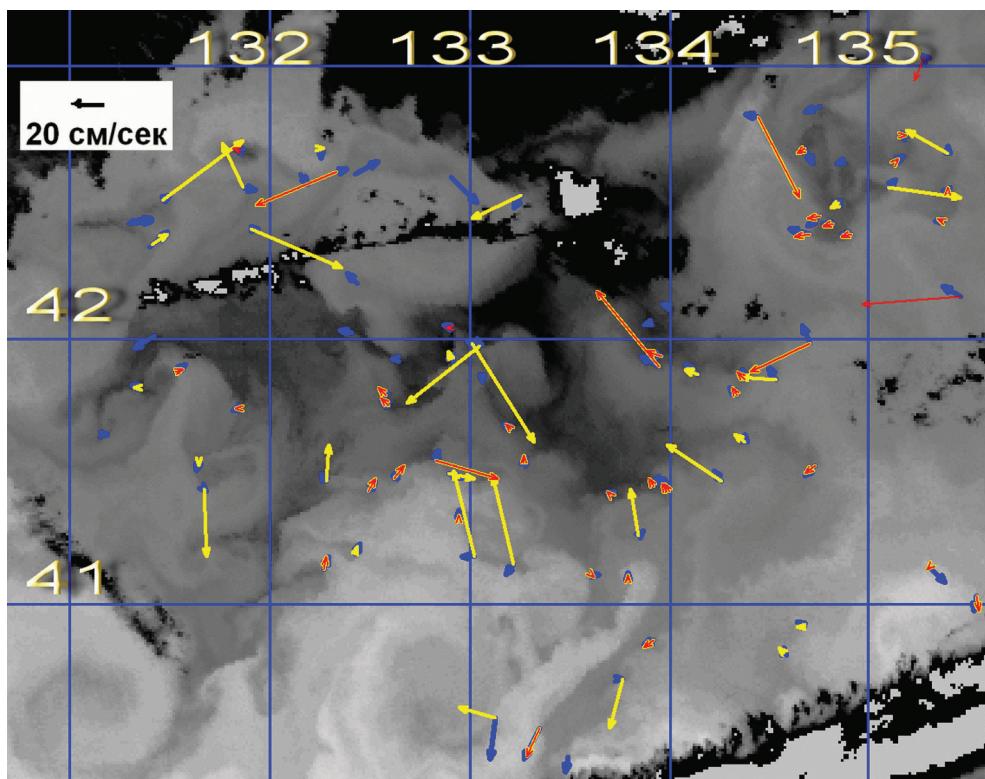


Рис. 1. ИК-изображение спутника NOAA-12 за 21 октября 2000 г. и нанесенные на него векторы течений: синим цветом обозначены вектора, построенные методом морских маркеров («толстые стрелки»); желтым – прошедшие отбраковку по величине корреляции ($r > 0,8$) («толстые» вектора, наложенные поверх); красным – прошедшие отбраковку по величине априорной точности ($Ar < 0,2$) и наложенные поверх остальных

Даже при наиболее жестком критерии отбора метод МСС дает больше некорректных векторов со значительными рассогласованиями с экспертными оценками. Для количественного сравнения критериев отбраковки на выбранном наборе векторов на *рис. 2* приведены графики зависимости точности расчета скорости от величин критериев для $K=r$ (*рис. 2a, б*) и для $K=E$ (*рис. 2в, г*).

Графики демонстрируют типичные зависимости точности расчета скорости от параметров отбраковки. В качестве критериев отбраковки были выбраны следующие величины: $r > 0,8$ (*рис. 2a*), $E > 0,66$ (*рис. 2в*), $A_r < 0,2$ м/сек и $A_E < 0,2$ м/сек. Будем полагать, что вектор посчитан корректно, если точность его расчета не хуже 20 см/сек. В *табл. 1* приведены оценки эффективности критериев отбраковки – количество правильно отобранных

векторов (первый столбец), ошибки первого рода (второй столбец) и ошибки второго рода (третий столбец). Можно отметить, что количество корректных векторов, отобранных по величине параметра, существенно меньше, чем векторов, отобранных по параметру априорной точности как для r , так и для E . При этом больше отобрано некорректных векторов (критерий $r > 0,8$ более жесткий, чем $A_r < 0,2$ м/сек, так как суммарное количество отобранных им векторов меньше). Соответственно, количество неправильно отбракованных векторов по критериям априорной точности по отношению к правильно отобранным существенно ниже. Отбор на основе параметра E обычно немного лучше (но не всегда), чем на основе параметра r . Основное достоинство параметра априорной точности – это компактность расположения корректных векторов (*рис. 2*). Существует некоторый порог (здесь он не более 0,2 см/сек), увеличение которого даже в 2 раза не приводит к существенному росту некорректных векторов.

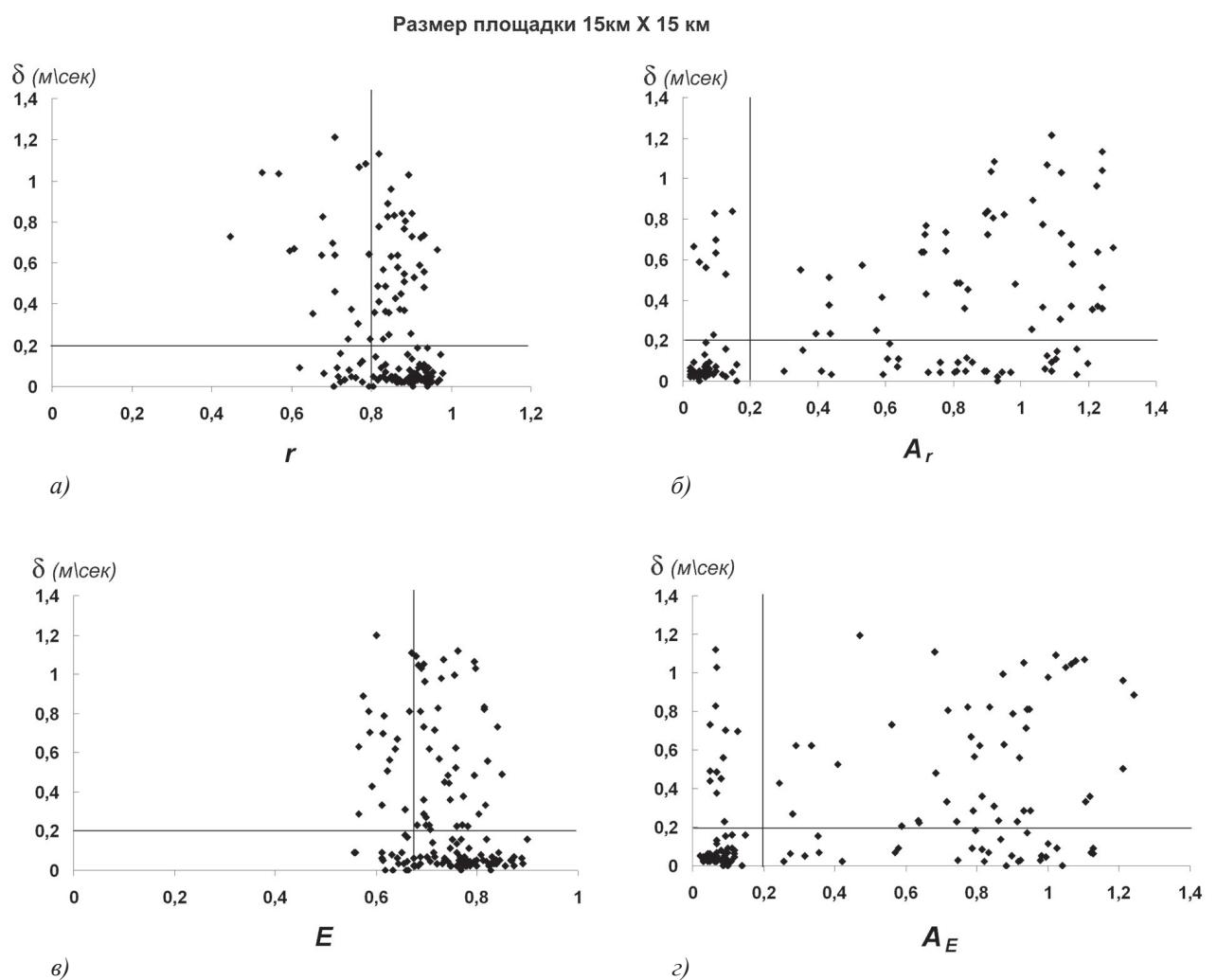


Рис. 2. Зависимость точности расчета вектора скорости от величины критерия отбраковки: а, в – от величины параметра схожести площадок (r и E); б, г – от априорной точности (A_r и A_E).

Вертикальные линии – выбранные пороги отбраковки по параметрам r и E , горизонтальные – выбранная допустимая точность расчета – 0,2 м/сек

Таблица 1. Эффективность критериев отбраковки

<i>Критерии</i>	<i>Количество допустимых по точности векторов</i>	<i>Количество допустимых по точности, но отбракованных векторов</i>	<i>Количество отобранных некорректных векторов</i>
$R > 0,8$	92	24	7
$E > 0,66$	97	24	8
$A_r < 0,2$ м/сек	103	13	7
$A_E < 0,2$ м/сек	102	19	3

Влияние условий расчета на эффективность критериев отбраковки

К условиям расчета, от которых зависит эффективность выбора корректных векторов, можно отнести следующие: размер прослеживаемой площадки, временной интервал между наблюдениями, величина критерия отбраковки, особенность динамики рассматриваемого региона (в первую очередь это характерные величины скоростей поверхностных течений). Понятно, что чем меньше размер прослеживаемой площадки, тем менее надежно будут выделяться вектора, так как растет вероятность нахождения похожего рисунка яркостных контрастов в произвольном месте зоны поиска. Надежность уменьшается и при росте временного интервала между выбранными изображениями, так как увеличивается деформация рисунка площадки со временем. В зонах с более интенсивной динамикой вод деформации растут быстрее, поэтому надежность автоматического прослеживания будет хуже. У площадок с большим размером должна падать точность расчета скорости перемещения, так как не учитываются компоненты скорости, обусловленные изменчивостью потока внутри площадки. Рост размера площадки в общем случае должен приводить к недооценке величины скорости. Учет поворота площадки (например, Kamachi, 1989) не улучшает существенно точность расчета скорости, так как для характерных синоптических масштабов течений и при наиболее подходящем временном интервале прослеживания (порядка полусуток) погрешность оценки скорости из-за недоучета кривизны перемещения составляет несколько процентов (Ro et al., 1997). Надежность идентификации тоже при этом рasti не будет, так как деформация рисунка площадки не сводится только к повороту, а введение дополнительно подбираемого параметра (угла поворота) должно приводить к падению надежности и росту ошибочных векторов. Эти закономерности иллюстрирует *рис. 3*, на котором представлены зависимости точности расчета скоростей от линейного размера площадки и временного интервала между изображениями.

Помимо упомянутых выше закономерностей, *рис. 3* позволяет сделать дополнительные выводы. При малых размерах площадок наблюдается значительное количество «выбросов», когда рассчитанные скорости по величине в несколько раз превосходят экспертные оценки скорости. Это можно использовать для дополнительной фильтрации некорректных векторов. Задавая окрестность поиска достаточно большой, мы, в случае отсутствия на выбранной площадке уникального рисунка (не похожего на другие, существующие

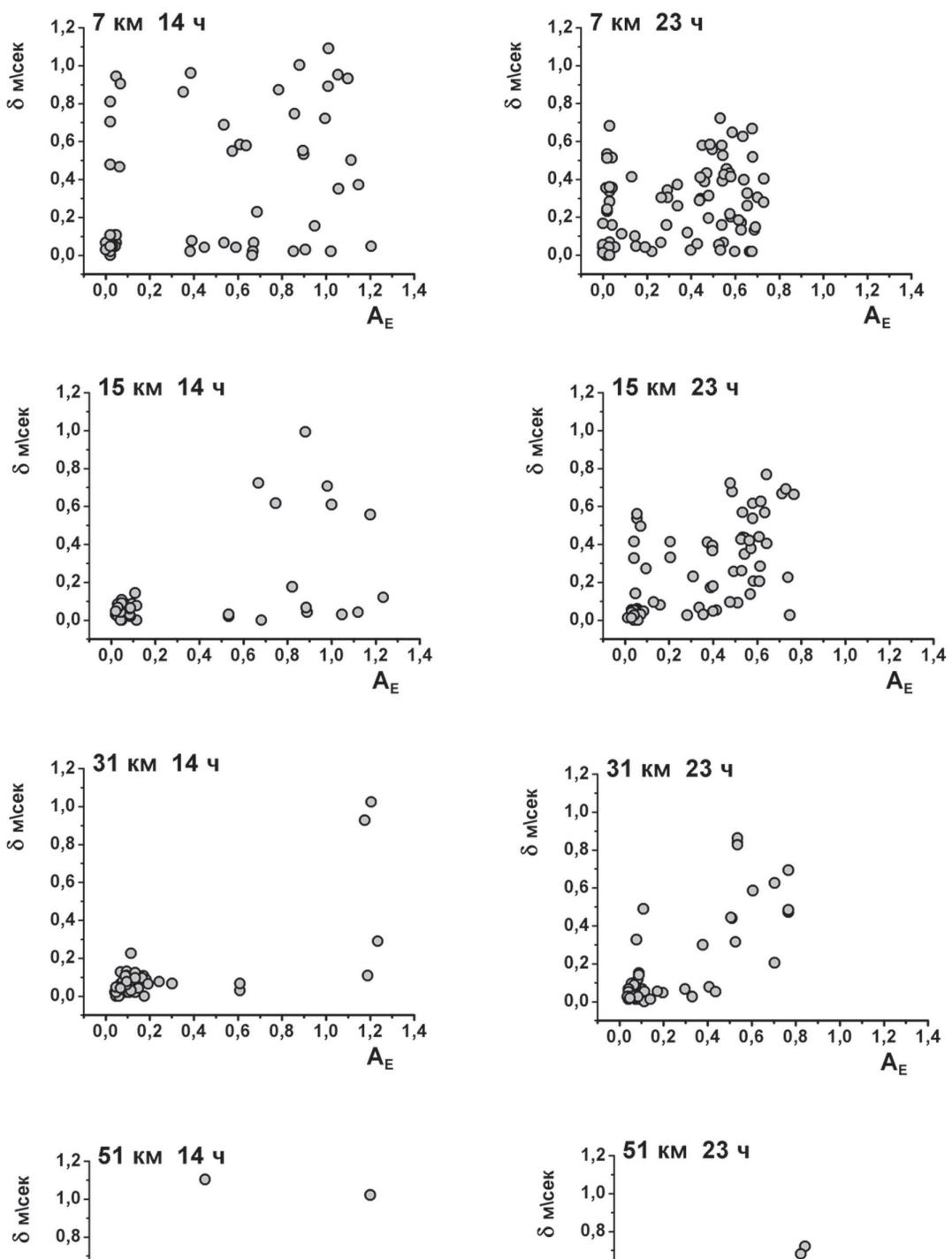


Рис. 3. Зависимость точности расчета скоростей поверхностных течений от величины критерия отбраковки A_E за 15 октября 2000 г. для четырех размеров окон и разных временных интервалов прослеживания: 14 часов – левый столбец и 23 часа – правый столбец

в окрестности поиска), наиболее вероятно получим значительное перемещение. Это некорректное перемещение можно отбраковать, если его величина лежит за разумными пределами. Другой способ отбраковки выбросов – сравнение перемещений, посчитанных с разными размерами площадок. Так, ошибки-выбросы при окне 51 км фактически все отбраковываются, а ошибка расчета скорости менее 20 см/сек. Эта величина может являться гарантированной точностью, если перемещение с таким размером окна построено.

На основе *рис. 3* можно также заметить, что при росте размера площадок и временного интервала растет минимальная величина параметра A_E , которая может характеризовать трансформацию рисунков площадок и использоваться для формализации условий отбраковки расчета в заданной акватории.

Реальная точность расчета векторов обычно существенно лучше, чем величина априорной точности. Например, для набора скоростей за 15 октября (верхний ряд *рис. 3*) при критерии отбраковки $A_E < 0,2$ м/сек и после фильтрации выбросов (допустимое рассогласование не превышало 20 см/сек) средняя ошибка δ для заявленных размеров площадок, расположенных по возрастанию, составила 5 см/сек, 5 см/сек, 6 см/сек и 9 см/сек, соответственно. Наблюдается также занижение длин векторов скоростей при росте размеров площадок. Так, например, для довольно значительного размера площадки в 31 км (рекомендуемый размер площадки для МСС метода в 2–3 раза меньше) среднее занижение модулей скоростей для разных наборов векторов варьировалось в пределах 1–3 см/сек. При оценке точности расчета величин скоростей, превосходящих 15 см/сек, занижение достигало иногда величины в 5 см/сек. К сожалению, часто количество значительных по величине векторов в наборе недостаточно, чтобы делать статистически значимые выводы. Сколь-либо яркого эффекта, связанного с ухудшением точности при ухудшении условий построения скоростей (росте временного интервала между изображениями, выборе района с более интенсивной динамикой), не наблюдается, так как обычно строится меньшее количество векторов. При этом обычно выбывают точки с наибольшими скоростями. Выбывание носит «драматический» характер. Так, если построить распределение прошедших по критерию априорной точности векторов от величины скорости течения, рассчитанной экспертом, то получается следующая типичная картина (*табл. 2*), в которой приведено распределение автоматически посчитанных векторов для всех наборов данных при проведении расчетов по параметру E с размером площадки в 31 км и критерием отбраковки $A_E < 0,2$ м.

Данные результаты объясняют ряд некорректных выводов об эффективности автоматических методов расчета скоростей поверхностных течений и ошибочности применяемых для этих целей схем сравнения с *in situ* данными. Так, например, в работе (Kelly et al., 1992) при сравнениях скоростей течений для решения проблемы пространственно-временного рассогласования данных использовалась процедура интерполяции данных на сетку на основе сплайн-аппроксимации. Было получено заключение, что спутниковые оценки, рассчитанные методом МСС, более чем в 2 раза занижают реальные величины скоростей поверхностных течений. В то же время на тех же спутниковых изображениях вектора скоростей, рассчитанные методом МММ, были в 1,5 раза длиннее автоматически рассчитанных. Полученные нами результаты показывают, что какого-либо существенного занижения скоростей не происходит. Лишь резко уменьшается количество векторов со значительными длинами. Аппроксимация набора векторов на сетку, из которого исключены вектора с большими длинами, приводит к кажущемуся занижению величин скоростей.

Уменьшение размера площадки не приводит к появлению корректно посчитанных векторов, имеющих большие длины. Как правило, в силу сдвигового характера синоптических течений в океане, при больших скоростях существенно меняется рисунок

площадок, что ограничивает применение автоматических методов. Анализ расположения таких площадок показывает, что они часто располагаются в зонах максимальных скоростей вихрей, где контрасты слабые.

Таблица 2. Процент векторов, оставшихся после отбраковки

	Диапазоны скоростей (см/сек)				
	0–10	10–20	20–30	30–60	Более 60
Всего векторов	254	134	38	29	48
Проценты	85	70	42	33	0

Метод расчета скоростей поверхностных течений

Для построения оптимального алгоритма анализировалась зависимость точности расчета перемещения от параметров «похожести» площадок. Как и ожидалось, основная часть перемещений, рассчитанных по параметрам r и E , была близка. Отбраковка одновременно по двум критериям Ar и A_E существенно сокращала количество выбросов. Свертка критериев (1) с разными степенями (α , β , γ) улучшала результат, но несущественно. Результаты проведенных экспериментов показывают необходимость использования иерархии размеров площадок. Большие размеры обеспечивают надежность расчета – минимальное количество «выбросов». Использование площадок небольшого размера позволяет уточнить построенные вектора. Предполагалось использовать три размера площадок – 31, 15 и 7 км. Однако практика показала, что на третьем уровне иерархии количество уточняемых векторов, прошедших отбраковку, незначительно.

Общая схема работы алгоритма близка к схемам, которые используются в обработке изображений при расчете движения по последовательности изображений. Соответствующие обзоры можно найти в работах (Гришин и др., 2008; Liu et al., 2011). Однако применение этих методов не приводит к решению задачи. Принципиальным отличием метода расчета скоростей течений является то, что даже если фрагменты двух изображений уникальны и полностью совпали, то это не гарантирует корректность расчета скорости. Необходимы специальные критерии отбраковки векторов, чему и посвящена представленная работа.

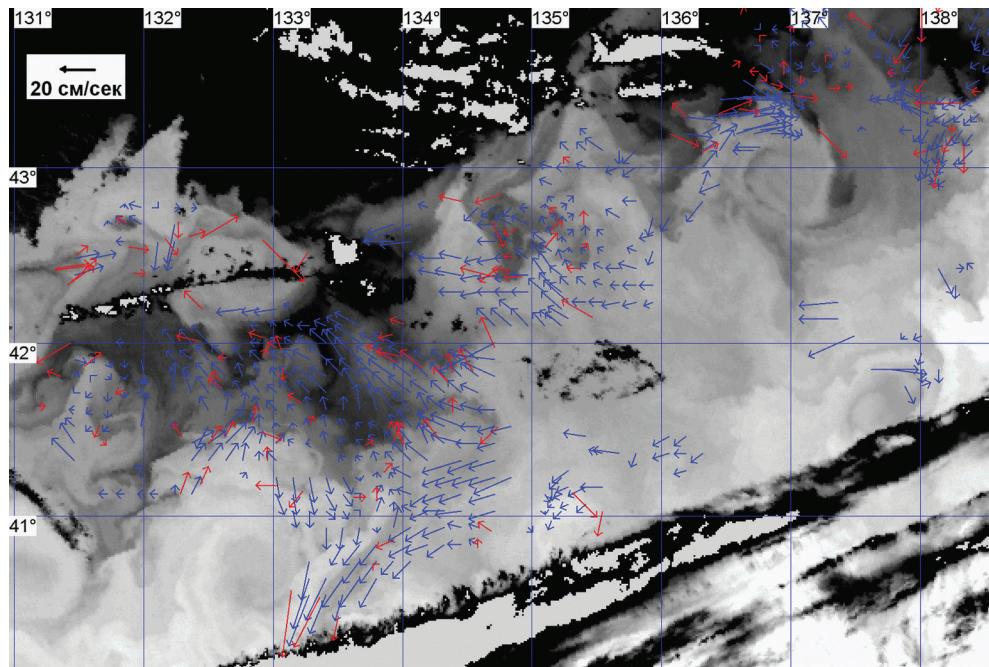
Алгоритм автоматического расчета скоростей

Шаг 1. Устанавливаем размер окна – (31 км для изображений с пространственным разрешением около 1 км).

Шаг 2. Расчет перемещений по критерию K ($\alpha = \beta = \gamma = 1$). Зона поиска с первым окном максимальная – обеспечивающая расчет скорости перемещения до 2,5 м/сек.

Шаг 3. Фильтрация по двум критериям Ar и A_E и по величине перемещения.

Шаг 4. Уменьшаем размер окна площадки и зоны поиска.



*Рис. 4. ИК-изображение спутника NOAA-12 за 21 октября 2000 г.
и нанесенные на него векторы течений, рассчитанные новым методом (синие стрелки).
Красным цветом обозначены вектора, построенные методом морских маркеров*

Если размер окна предельный, то оцениваем полученные поправки к начальному вектору перемещения по заданной характерной величине точности расчета вектора и формируем конечный вектор.

Иначе переходим на шаг 2, используя полученную точку перемещения как центр новой зоны поиска на втором изображении.

На рис. 4 приведены расчеты на заданной сетке для региона, представленного на рис. 1. Даже в сложных условиях наблюдения (при неотфильтрованной облачности) алгоритм дает незначительное количество выбросов. Поэтому не требуется сглаживание построенных скоростей перемещений, использующееся в методе МСС. Сравнение с векторами, рассчитанными методом МММ, показало, что средняя точность расчета составляет $\delta = 6$ см/сек, а среднее рассогласование длин векторов скоростей – 1 см/сек. Около 30% векторов, построенных экспертом, алгоритм не построил.

Заключение

Применение критерия априорной точности расчета скорости перемещения маркеров по последовательности изображений и ряд приемов повышения точности и надежности проводимых расчетов позволяют решить проблему «выбросов» при автоматическом расчете скоростей поверхностных течений. Это дает возможность отказаться от процедуры сглаживания векторов, присущей кросс-корреляционному методу. Сравнение автоматически рассчитанных векторов с экспертными оценками показывает, что для ИК-изображений с пространственным разрешением 1 км и характерным временем между изображениями

в 12–24 часа точность расчета составляет несколько (менее десяти) см/сек. При этом не наблюдается значимое занижение длин автоматически рассчитанных векторов. Однако резко падает количество автоматически прослеживаемых векторов в областях, где характерные скорости перемещения превышают 50 см/сек. Это объясняется быстрым размыванием характерного рисунка прослеживаемой площадки в сдвиговом потоке, присущем синоптическим течениям. Этим фактом, по-видимому, объясняется некорректность заключения о занижении реальных скоростей течений спутниковыми методами, так как такие выводы базировались на технологии сравнения разнородных и асинхронных данных посредством аппроксимации измерений на регулярную сетку. Исключение из набора данных больших скоростей автоматически понижает среднюю скорость потока, что говорит о некорректности применения такой схемы сравнения.

Работа поддержана грантами РФФИ 11-01-00590-а, 11-07-00511-а, 13-01-1244-офи-м 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. Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Карнацкий А.Ю. Автоматический расчет скоростей перемещений ледовых полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 9–17.
3. Гришин С.В., Ватолин Д.С., Лукин А.С., Путилин С.Ю., Стрельников К.Н. Обзор блочных методов оценки движения в цифровых видеосигналах // Программные системы и инструменты: Тематический сборник. № 9. М.: Изд-во факультета ВМиК МГУ, 2008. С. 50–62.
4. 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. Vol. 19. P. 1665–1676.
5. Breaker L.C., Krasnopol'sky 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.
6. Crocker R.I., Matthews D.K., Emery W.J., Baldwin D.G. Computing Coastal Ocean Surface Currents From Infrared and Ocean Color Satellite Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. No. 2. P. 435–447.
7. Emery W.J., Thomas A.C., Collins M.J., Crawford W.R., and Mackas D.L. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91. No. C11. P. 12865–12878.
8. 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. Vol. 94. P. 18227–18233.

9. *Kelly K.A., Strab P.T.* Comparison of velocity estimates from Advanced Very High Resolution Radiometer in the costal transition zone // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 9653–9668.
10. *Liu W., Ribeiro E.* A survey on image-based continuum-body motion estimation // *Image and Vision Computing*. 2011. Vol. 29. No. 8. P. 509–523.
11. *Ro Y., Alexanin A., Kazansky A.* Synoptic approach to estimation of sea surface current fields from sequential satellite images: improved technique and validation study // *Journal of the Korean society of remote sensing*. 1997. Vol. 13. No. 3. P. 204–222.
12. *Svejkovsky S.* Sea surface flow estimation from Advanced Very High Resolution Radiometer and Costal Zone Color Scanner satellite imagery: a verification study // *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93. P. 6735–6743.
13. *Wangand Z., Bovik A.C.* A universal image quality index // *IEEE Signal Processing Letters*. 2002. Vol. 9. P. 81–84.

Automatic computation of sea surface velocities on a sequence of satellite images

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

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

A new method for automatic computation of sea surface current velocities on a set of IR-images is proposed. The similarity of two image templates is estimated by maximum value of convolution of three parameter normalized: cross-correlation, dispersion, and brightness discrepancies of two templates. A new criterion (“a priori accuracy estimation”) is proposed for screening incorrect velocities. The criterion use has increased the reliability and accuracy of velocity computation. It leaded to reject a smoothing procedure used usually. The new method testing was based on a comparison of vectors computed automatically with ones calculated by expert. High accuracy of the method has been shown, and some problems of automatic sea surface velocity computation have been considered.

Keywords: automatic computation of sea current velocities, feature tracing, satellite IR-imagery, maximum of cross-correlations.