

**О РАСЧЕТЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
ПО СЕРИЯМ СПУТНИКОВЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИК-ДИАПАЗОНЕ,
ОТНОСЯЩИХСЯ К ЧЕРНОМУ МОРЮ**

Е.В. Плотников, Г.К. Коротаев

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: *EV.Plotnikov@yandex.ru*

Описывается опыт построения архива последовательностей ИК-изображений AVHRR, относящихся к Черному морю, и рассчитанных по этим последовательностям полей скорости поверхностных течений. Для расчетов используется вариационно-ассимиляционная методика.

Введение. Изучение полей скорости морских поверхностных течений имеет большое теоретическое и прикладное значение. In situ данные об этих полях, полученные из различных источников, используются для задания начальных условий в уравнениях гидродинамики, для валидации численных моделей циркуляции морей и океанов. Изучение пространственных и временных особенностей структуры поверхностных течений играет важную роль в углублении наших знаний об океанических процессах. На сегодняшний день основными источниками информации о поверхностных полях скорости являются измерения с помощью спутниковых альтиметров и дрейфующих буев. К сожалению, эти источники данных не обеспечивают существенного пространственного покрытия изу-

чаемых акваторий. Для достижения этой цели надо было бы увеличить число соответствующих спутников и дрейфтеров в разы. Таким образом, задача привлечения новых источников информации является весьма актуальной. Одним из путей решения этой задачи может быть привлечение данных спутниковых радиометров, работающих в видимом и ИК-диапазонах. Главное достоинство спутниковых данных заключается в их широком пространственном покрытии. Однако методы расчета полей скорости по последовательностям изображений являются весьма нетривиальными. В данной статье рассматривается опыт применения вариационной методики, описанной в [1], к данным AVHRR, относящимся к Черному морю. На сегодняшний день существуют различные подходы к решению этой задачи. Подробности можно найти в [2-6]. Выбранный вариант метода из общих соображений представляется оптимальным для использования в данном случае.

Методика. Поле скорости вычисляется по последовательностям изображений, относящихся к временному интервалу, который достаточно мал, чтобы пренебречь изменчивостью характера поверхностного течения. Путь $\{\hat{T}_k\}_{k=1}^N$ – последовательность полей радиационной температуры, относящихся к области Ω . Решение задачи заключается в отыскании таких u, v, T_0 , что решение T уравнения

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1)$$

с начальным условием $T = T_0$ минимизирует функционал

$$J(\hat{T}, T, u, v) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_{\Omega} (T(t_k) - \hat{T}(t_k))^2 ds + \frac{b}{2} \int_{\Omega} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 ds + \frac{c}{2} \int_{\Omega} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) ds. \quad (2)$$

Здесь u и v – искомые компоненты поля скорости; a , b , c – эмпирические константы. Поле скорости подразумевается стационарным. Подробности о технике решения задачи можно найти в [1]. Заметим лишь, что

вопрос об оптимальных значениях параметров a , b и c пока не решен, и при расчетах для каждой серии эти константы подбирались чисто эмпирически. На рисунке 1 показан пример такой последовательности.

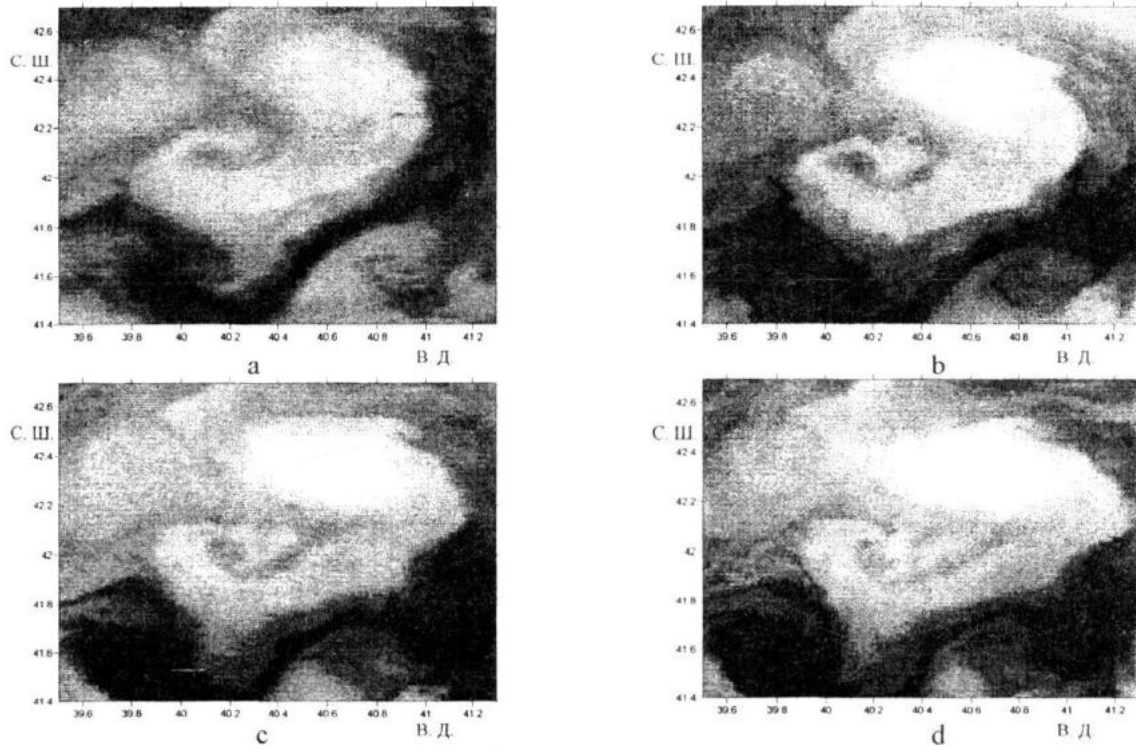


Рисунок 1 – Пример последовательности цифровых карт радиационной температуры поверхности моря, полученных в течение суток

На рисунке 2 показано поле скорости, рассчитанное по этой последовательности.

Для расширения области применимости, а также увеличения точности расчетов описанный метод был несколько модифицирован. Идея состоит в использовании нескольких потоков данных одновременно. Этими потоками могут быть данные радиометра в разных окнах прозрачности, или даже данные, полученные с разных спутников, но относящиеся к одному и тому же региону и временному интервалу. В этом случае уравнение (1) для каждой серии цифровых карт решается отдельно, а минимизируемый функционал принимает вид:

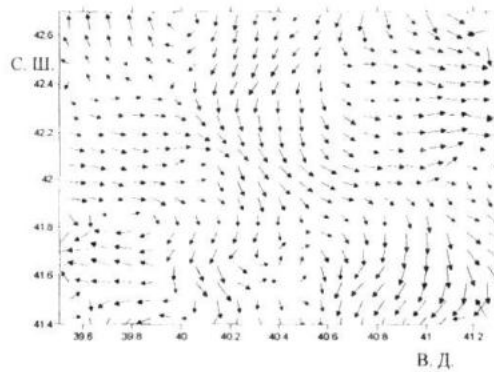


Рисунок 2 – Поле скорости, рассчитанное по показанной выше последовательности снимков

$$J = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \int_{\Omega} (T_l(t_k) - \hat{T}_l(t_k))^2 ds + \frac{b}{2} \int_{\Omega} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 ds + \frac{c}{2} \int_{\Omega} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) ds. \quad (3)$$

Здесь L – число серий, T_i и \hat{T}_i – решения уравнения (1) и наблюдения соответственно для каждой серии. Проиллюстрировать этот подход можно произведя описанный выше расчет, но несколько изменив при этом входные данные. Для

этого цифровые карты а и б рассмотренной выше последовательности заменим картами, рассчитанными при помощи оптических данных. Соответствующие изображения показаны на рисунке 3.

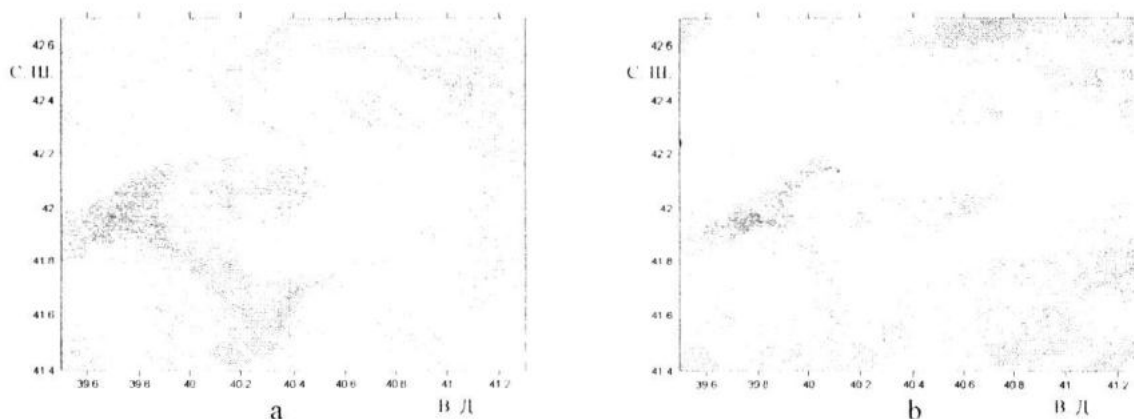


Рисунок 3 – Цифровые карты, построенные по оптическим данным

Рассчитанное по получившемуся набору изображений поле скорости показано на рисунке 4.

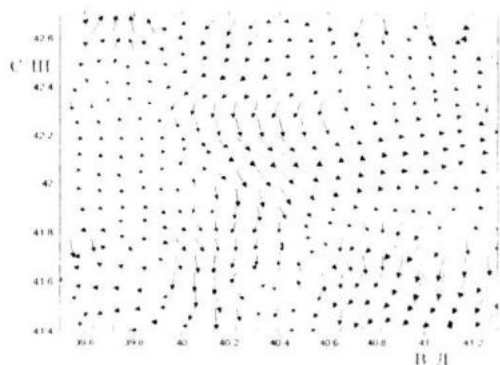


Рисунок 4 – Поле скорости, рассчитанное по многоканальной методике с использованием оптических и ИК-данных

Можно отметить, что, несмотря на различие во входных данных, рассчитанные поля отличаются очень незначительно.

Обсуждение. Одним из главных недостатков данных, получаемых при помощи спутниковых радиометров, является отсутствие информации на фрагментах, закрытых облачностью. Особенно остро эта проблема встает в случае, когда требуется наличие серии разнесенных во времени цифровых карт, относящихся к одному региону. Значимые по масштабам последовательности фрагментов изображений, незначитель-

но искаженных облаками, встречаются довольно редко, из-за чего получение данных о полях скорости поверхностных течений по спутниковым данным в ИК и оптическом диапазонах на регулярной основе представляется крайне затруднительным. Вместе с тем опыт изучения отдельных сцен показал перспективность такого подхода для изучения мезомасштабных и субмезомасштабных особенностей морской бассейновой циркуляции, в связи с чем в 2009 году в МГИ была начата работа над созданием архива годных для обработки последовательностей спутниковых изображений *AVHRR*, относящихся к Черному морю, и базы данных полей скоростей, рассчитанных по этим последовательностям. Серьезным препятствием является проблема валидации метода. Из-за временно-пространственной разреженности используемых данных попытки построить статистически значимую выборку для сопоставления расчетов с измерениями, полученными при помощи дрейфтеров, оказались неудачными. Планируется использование для этой цели данных альтиметрических измерений. Но в целом, на сегодняшний день оценивать точность и выявлять слабые места методики можно лишь путем эмпирической оценки соответствия исходных данных и получаемых результатов. Эта проблема

весьма актуальна, например, для решения вопроса об оптимальных значениях коэффициентов a , b и c в (1) и (2). Следует заметить, что результаты расчетов сильно зависят от значений этих параметров.

В ходе работ по реализации и модификации методики на основе карт, содержащих данные о радиационной температуре Черноморской акватории, а также построению базы данных серий снимков и результатов их обработки были выявлены ограничения области применимости метода, возникающие в силу специфики данных. Одной из таких особенностей является суточные прогрев и выхолаживание поверхности моря. Если такая изменчивость температуры равномерна во всей рассматриваемой области, то проблема легко решается. Однако в весенне-летний период часто наблюдаются небольшие по пространственным масштабам прогревы, когда суточных перепад радиационной температуры может достигать 6-7 градусов. Результаты расчетов, выполненных с использованием цифровых карт, содержащих такие фрагменты, как правило, содержат значительные ошибки.

Также исследование последовательностей изображений показало, что поля скоростей часто обладают сильно выраженной изменчивостью даже на небольших временных интервалах. Это обстоятельство противоречит условию стационарности скорости и также может приводить к значительным ошибкам. Опыт показал, что при проведении расчетов с использованием различных подмножеств изображений в серии, можно получить результаты, обладающие существенно выраженными отличиями, из чего можно сделать вывод, что во многих случаях динамику поверхностных течений при помощи уравнения распространения тепла (1) корректно описать нельзя.

Выводы. Реализация и отработка описанной выше методики расчета скорости морских поверхностных течений позволила вскрыть проблемы, возникающие при решении этой задачи, и обеспечила углубление знаний о специфике необходимой методологии. В ходе построения архива по-

следовательностей спутниковых изображений стало ясно, что обеспечение такими данными на регулярной основе невозможно. Также на сегодняшний день можно говорить о том, что данный метод ограничен довольно жесткими требованиями, не позволяющими в некоторых случаях рассчитывать поля скоростей с высокой точностью. Хотя в ряде расчетов были получены результаты, представляющиеся довольно качественными, описанная технология требует доработки, расширяющей границы ее применимости.

Литература

1. Korotaev, G. K. et al. Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images. *Remote Sensing of Environment* (2007), doi 10.1016/j.rse.2007.04.020
2. Courtier, Ph., & Talagrand, O. (1987). Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint equations Part2. Numerical results. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 113.
3. Herlin, I., Le Dimet, F.X., Huot E., & Berroir, J.P. (2004). Coupling models and data: which possibilities for remotely-sensed images? chapter e-Environment: progress and challenges (P. 365–383). México: Instituto Politécnico Nacional.
4. Huot, E., Herlin, I., Isambert, T., & Korotaev, G. (2006). Data assimilation of satellite images within an oceanographic circulation model. *Proceedings of ICASSP*, Toulouse, France: IEEE Edt.
5. Le Dimet, F. -X., & Talagrand, O. (1986). Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects. *Tellus*, 38A. P. 97–110.
6. Бабий В.И., Погребной А.Е., Ратнер Ю.Б., Станичный С. В. Возможности восстановления поля скорости поверхностных течений по спутниковым данным (на примере Черного моря) // Сб. науч. Трудов / Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2002. – С. 254–261.