

Е.Ф.Васечкина

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

На примере реконструкции последовательности полей концентрации хлорофилла «а» у южного берега Крыма изложена технология восстановления пропусков в спутниковых данных, обусловленных наличием облачности. Приведены результаты тестирования метода в виде зависимости средней ошибки реконструкции от числа пропусков. Показано, что применение предлагаемой технологии позволяет получать на ограниченных участках моря поля поверхностных характеристик с разрешением 1 км и дискретностью 1 сутки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *спутниковые данные, восстановление пропусков, концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое моря.*

Ранее, в работах [1, 2] была подробно изложена технология восстановления пропусков, присутствующих на спутниковых снимках вследствие облачности. Применяя ее, мы можем получать ежедневные непрерывные поля поверхностных характеристик моря с некоторым осреднением, которое определяется имеющимися вычислительными возможностями. Однако в ряде случаев необходима более детальная информация о пространственном распределении характеристик поверхности моря. К настоящему времени накоплен достаточно большой объем спутниковой информации, позволяющий реконструировать поля на ограниченных акваториях с разрешением 1 км. В работе будет показано решение такой задачи на примере поля содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое вблизи южного берега Крыма. Спутниковые данные, использованные в расчетах, взяты с сайта Отдела дистанционных методов исследований МГИ НАНУ [3].

Рассмотрим детально все этапы технологии построения ежедневных карт на примере полей содержания хлорофилла «а».

Первичная обработка данных. При рассмотрении спутниковых снимков, имеющих пропуски вследствие наличия непрозрачных облаков над морем, выясняется, что на некоторых из них присутствуют искажения в данных на краях «белых пятен», вызываемые недостаточно корректным удалением отсчетов в области, скрытой облаками. Эти искаженные данные оказывают существенное влияние на результирующую ковариационную функцию, поэтому их необходимо тщательно удалять с тех снимков, где они имеются.

Фильтрация искажений выполняется путем построения гистограмм распределения искомой характеристики и удаления аномально высоких и низких значений со значениями частот встречаемости менее 0,01 от максимума. После такой обработки амплитуда изменчивости поля заметно сокращается, и распределение приобретает вид, близкий к нормальному.

Осреднение данных с привязкой к сетке. Разрешение имеющихся в настоящее время спутниковых данных *MODIS* составляет 1 км [3]. Очевид-

но, что расчет четырехмерной пространственной ковариационной функции всего моря при сохранении разрешения 1 км невозможен. Есть несколько путей решения этой проблемы. Во-первых, можно разделить площадь снимка на квадраты, и рассчитывать ковариационную матрицу по этим квадратам, сохраняя мелкую сетку. Другой способ решения – суммировать в одну реализацию снимки, полученные за несколько дней, осредняя значения в повторяющихся точках. При этом мы вносим ошибку, «смешивая» изменчивость разных временных масштабов в одном поле.

И, наконец, мы можем осреднять по пространству исходные поля, тем самым понижая размер ковариационной матрицы. Этот путь более приемлем, особенно в тех случаях, когда мелкомасштабная изменчивость полей не представляет интереса для конечного пользователя. В работах [1, 2] применялось осреднение исходных спутниковых полей с дискретностью 1 сут на сетке 7×7 км.

Здесь же мы рассмотрим первый вариант, т.е. реконструкцию поля по квадратам с сохранением исходного разрешения 1 км. Для оценки точности реконструкции полей был выбран квадрат со стороной 50 км в районе б.Ласпи. Набор данных представлял собой массив полей содержания хлорофилла «а», полученных в результате обработки спутниковых снимков за период с февраля 2003 г. по май 2013 г. Учитывая незначительную сезонную изменчивость концентрации хлорофилла «а» в этом районе, данные за весну, лето и осень были объединены в один статистический ансамбль.

Вычисление четырехмерной ковариационной матрицы. В соответствии с алгоритмом определялся набор переменных, для которого затем рассчитывалась ковариационная матрица. Каждая переменная представляла собой последовательность значений наблюдаемого поля $f(\mathbf{x}_k, t)$ в некотором узле сетки $k = 1 - N$. Эти переменные объединялись в массив $\mathbf{F}$ размерности $T \times N$, который представлял собой множество квазинезависимых значений переменных $f(\mathbf{x}_k, t)$ в различные моменты времени t_i , $i = 1 - T$. Здесь T – объем выборки двумерных реализаций поля, N – число переменных ($N = 1923$ с учетом части береговой полосы, попавшей в выбранный нами квадрат). Данный массив использовался для расчета среднего поля и ковариационной матрицы. Вычисленная ковариационная матрица имела размер $N \times N$. Каждая k -я строка такой матрицы представляла собой пространственную ковариационную функцию для k -го узла сетки. С помощью специальной процедуры такая запись могла преобразовываться в обычное представление в виде двумерного поля.

Расчет ЭОФ. Следующий этап после вычисления ковариационной матрицы – расчет ее собственных функций, т.е. ЭОФ. Первая мода описывала 65,9 % общей дисперсии, вторая 4,5 %, и третья 3,3 %, более высокие моды вносили экспоненциально уменьшающийся вклад в общую дисперсию. Используя 15 собственных функций для реконструкции поля, теоретически мы описывали 83 % дисперсии поля.

Применение генетического алгоритма поиска коэффициентов разложения. Согласно алгоритму, далее процесс делится на две ветви. Эмпирически установлено, что для полей, имеющих не более 80 % пропусков, коэффициенты разложения могут быть достаточно хорошо вычислены ме-

тодом наименьших квадратов (МНК). Для реализаций с меньшим количеством данных предусмотрено использование генетического алгоритма поиска (ГА), позволяющего учитывать дополнительную информацию об искомом поле при формировании функционала качества получаемого решения.

Реконструкция данных. После вычисления коэффициентов разложения a_k для получения оценки поля $\hat{f}(\mathbf{x}, t)$ применялись формулы:

$$\begin{aligned}\hat{f}(\mathbf{x}, t) &= [f(\mathbf{x}, t)] + f'(\mathbf{x}, t), \\ f'(\mathbf{x}, t) &= \sum_k a_k(t) \psi_k(\mathbf{x}),\end{aligned}$$

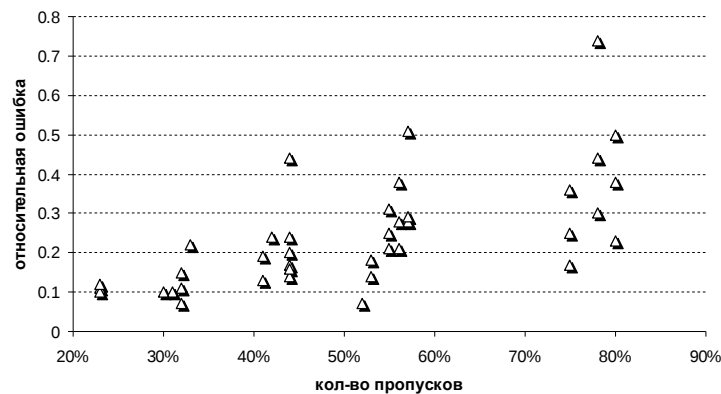
где $[f(\mathbf{x}, t)]$ – математическое ожидание $f(\mathbf{x}, t)$; ψ_k – собственные функции ковариационной матрицы $P(\mathbf{x}, \mathbf{y})$

Тестирование. Для тестирования были отобраны полные реализации без пропусков – т.н. контрольные, не использовавшиеся при расчете ковариационной матрицы. Параллельно отбирались реализации, имеющие разное число пропусков, – от 20 до 80 %. Паттерн «белых пятен», обусловленных пропусками (маска облачности), с одной из этих реализаций накладывался на контрольную реализацию без пропусков, после чего поле подавалось на вход алгоритма реконструкции.

Результат на выходе алгоритма сравнивался затем с исходным полем без пропусков, и вычислялись абсолютная и относительная ошибки. Качество восстановления пропусков оценивалось по отношению среднеквадратической ошибки к среднеквадратическому отклонению «истинного» поля. Под «истинным» полем понималось контрольное поле, сглаженное с помощью p ЭОФ, как и восстановленные поля. На рис.1 показан рост ошибки реконструкции при увеличении числа пропущенных значений для трех контрольных реализаций при наложении маски облачности различной степени сложности.

Вейвлет-фильтрация. Для удаления шумов, вызванных ошибками оценок коэффициентов разложения и ограничением числа ЭОФ в алгоритме предусмотрена вейвлет-фильтрация реконструированного поля.

Интерполяция во времени. Последним этапом построения ежедневных карт поверхностных характеристик является выполнение линейной интерполяции во времени между полями, реконструированными с помощью



Р и с . 1 . График зависимости относительной ошибки восстановления пропусков от их числа.

описанного выше алгоритма. В итоге, применяя данную технологию, мы можем на основе спутниковых данных строить ежедневные карты с заданным разрешением по пространству и временной дискретностью, соответствующей частоте получения спутниковых изображений.

Изображения последовательности полей, восстановленных таким образом, были смонтированы в видеоролик, демонстрирующий динамику изменений поля хлорофилла «а» в исследуемом районе. Прокручивая этот ролик, можно видеть не только западный перенос водных масс, несущих различающуюся концентрацию хлорофилла «а», но и прохождение через исследуемый полигон мезомасштабных вихревых образований с характерным масштабом порядка 25 – 30 км.

Далее рассматривалась более сложная задача реконструкции поля с разрешением 1 км в северо-западной части Черного моря. Расчетная область делилась на равные квадраты согласно схеме, и для каждого из квадратов применялась технология, описанная выше. Представляет интерес вид пространственной ковариационной функции для центральных точек квадратов. Во-первых, необходимо отметить, что во всех расчетных областях ковариационная функция существенно анизотропна. Характер вытянутости изолиний определяется, по всей видимости, рисунком меандров Основного Черноморского течения. Радиус корреляции заметно изменяется по пространству, минимум его наблюдается на СЗШ в районе Днестровского лимана, максимум в центральных областях вдали от берегов.

Как и в предыдущих экспериментах были отобраны контрольные поля, которые не использовались при расчете ковариационной матрицы, что позволяло адекватно оценить результирующую ошибку реконструкции. Соединение реконструированных полей в единое поле вносило, естественно, дополнительную ошибку (порядка 3 – 5 %), однако, в целом ошибки не существенно отличались от полученных на отдельном квадрате.

Заключение. Основной проблемой рассматриваемого варианта технологии реконструкции полей является увеличение размеров области, для которой возможен расчет ковариационной матрицы. Квадрат со стороной в 50 км был использован нами в качестве примера, но для практических задач расчетная область должна быть существенно увеличена с тем, чтобы ее размеры соотносились с размерами белых пятен на снимках. Решение этой проблемы видится в усилении вычислительных возможностей, привлекаемых для решения данной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васечкина Е.Ф. Реконструкция полей температуры поверхности по фрагментарным данным дистанционного зондирования // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С.48-65.
2. Васечкина Е.Ф. Возможности вейвлет-анализа для изучения пространственно-временной изменчивости содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 2. – С.50-59.
3. Морской портал НКАУ – МГИ НАН Украины. <http://dvs.net.ua>.
4. Полонский А.Б., Джиганин Г.Ф. Структура и мезомасштабная изменчивость Основного Черноморского течения у побережья Крыма // Доп. НАН України. – 2011. – № 6. – С.107-112.

Матеріал поступив в редакцію 18.06.2013 г.

АНОТАЦІЯ На прикладі реконструкції послідовності полів концентрації хлорофілу «а» біля південного берега Криму викладена технологія відновлення пропусків у супутникових даних, обумовлених наявністю хмарності. Наведено результати тестування методу у вигляді залежності середньої помилки реконструкції від числа пропусків. Показано, що застосування пропонованої технології дозволяє отримувати на обмежених ділянках моря поля поверхневих характеристик з дозволом 1 км і дискретністю 1 добу.

ABSTRACT Algorithm of reconstruction gaps in satellite data due to the presence of clouds has been demonstrated on the example of recovering the sequence of fields of chlorophyll "a" concentration in the region near southern Crimea. The results of method testing has been shown as a function of mean error of reconstruction to the number of gaps. Application of the proposed algorithm allows one to get fields of surface characteristics on limited areas with 1 km resolution and 1 day discreteness.