ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ АПВЕЛЛИНГА МЕТОДОМ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Е.Е. Лемешко, И.А. Репина*, Е.М. Лемешко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: egor.lem.88@gmail.com
*Институт физики атмосферы РАН
г. Москва, Пыжевский пер., 3

В статье рассмотрено применение нелинейного метода анализа данных на основе нейронной сети – алгоритма самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) для спутниковых данных акватории Черного моря. Представлены результаты анализа поля температуры поверхности моря (ТПМ) за период 2000 − 2009 гг. Сделан вывод о пригодности метода СОК для выделения аномалий температуры при анализе многолетней архивной спутниковой информации и идентификации проявлений апвеллинга.

Введение. Данные дистанционного зондирования широко используются в современной океанографии, обеспечивая пользователей оперативной и синоптической информацией для описания процессов в океане. Однако, зачастую трудно интерпретировать спутниковые изображения из-за больших массивов архивной информации и нелинейности процессов. В статье рассмотрено применение нелинейного метода анализа данных на основе нейронной сети – алгоритма самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) [1] для спутниковых данных о температуре поверхности моря для акватории Черного моря.

Цель работы заключалась в следующем: 1) адаптировать нелинейный метод самоорганизующихся карт для идентификации спутниковых изображений для акватории Черного моря; 2) продемонстрировать его пригодность для анализа многолетних архивных данных по дистанционному зондированию; 3) с его помощью идентифицировать проявления прибрежного апвеллинга по многолетним данным температуры поверхности моря в прибрежной зоне ЮБК.

Данные. В качестве спутниковых данных ТПМ использовался архив Pathfinder Version5 [2] с разрешением по пространству 4 км для пятидневных карт за период 2000 − 2009 гг. В статье авторы ограничились анализом данных для июня месяца. Точность данных ТПМ для Черного моря подробно обсуждалась в статье [3], в которой на основании сравнения дистанционных данных ТПМ с контактными измерениями сделан вывод, что среднее смещение составляет −0.05 °С, а среднеквадратичное отклонение (с.к.о) 0.62 °С.

Метод самоорганизующихся карт. Этот нелинейный метод анализа данных фактически является непараметрической регрессией и главным образом используется для представления многомерных, нелинейно связанных элементов в наглядной форме для выполнения классификации и идентификации данных. В результате данные представляются с определенной ошибкой аппроксимации – среднеквадратичным расстоянием MSE от точки данных X_i до ближайшего образца $y_{BMU}(X_i)$:

$$MSE = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - y_{BMU}(X_i))^2\right)^{1/2} \qquad (1)$$

Иллюстративная схема работы алгоритма самоорганизующихся карт представлена на рис. 1. Спутниковые данные в цифровом виде для каждого момента времени представлены в виде двухмерной матрицы размерностью pxq, p – количество узлов по широте, q – по долготе. Матрица затем трансформируется в вектор длиной pxq элементов, который в блоке расчета СОК используется для расчета весового вектора. Количество узлов (нейронов) СОК задается априори исходя из типа информации и количества спутниковых снимков. Далее сетка узлов инициируется – размещается в пространстве данных. Затем следует: 1) случайным образом выбирается точка данных X_i ; 2) среди узлов сетки выбирается ближайший к точке X_i , его радиус вектор – $y_{BMU}(X_i)$; 3) Все узлы сетки двигаются по направлению к X_i по правилу:

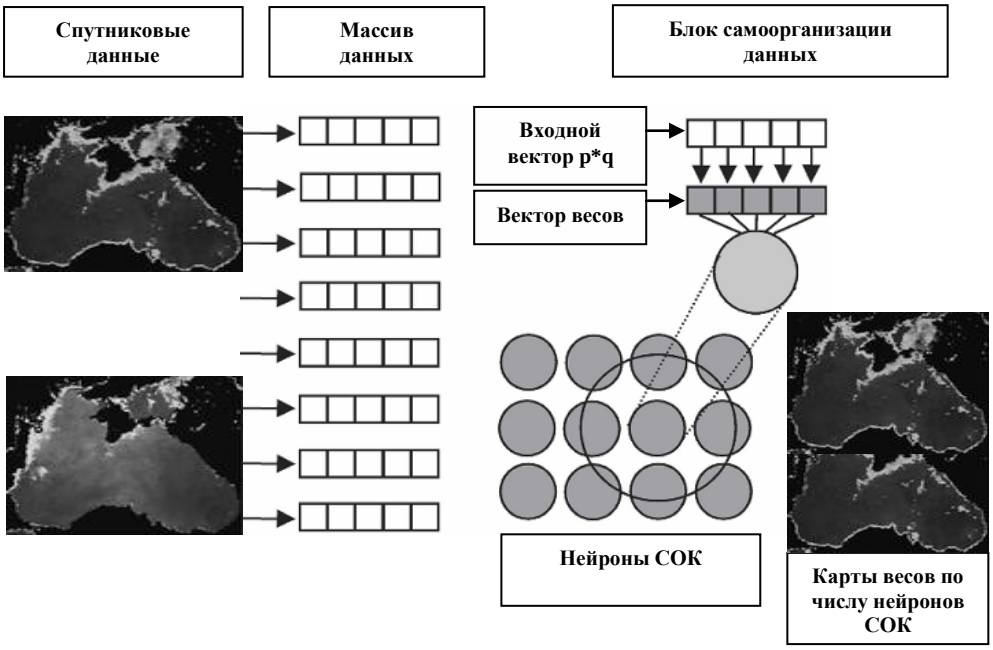
$$(y_j)' = y_j + h(r(y_j, y_{BMU}), t) * (X_i - y_j),\ j = 1...m, \quad (2)$$

где m – количество узлов СОК; h(x,t) – функция соседства (обычно имеет гауссов вид); $r(y_i, y_j)$ – расстояние между узлами y_i и y_j.

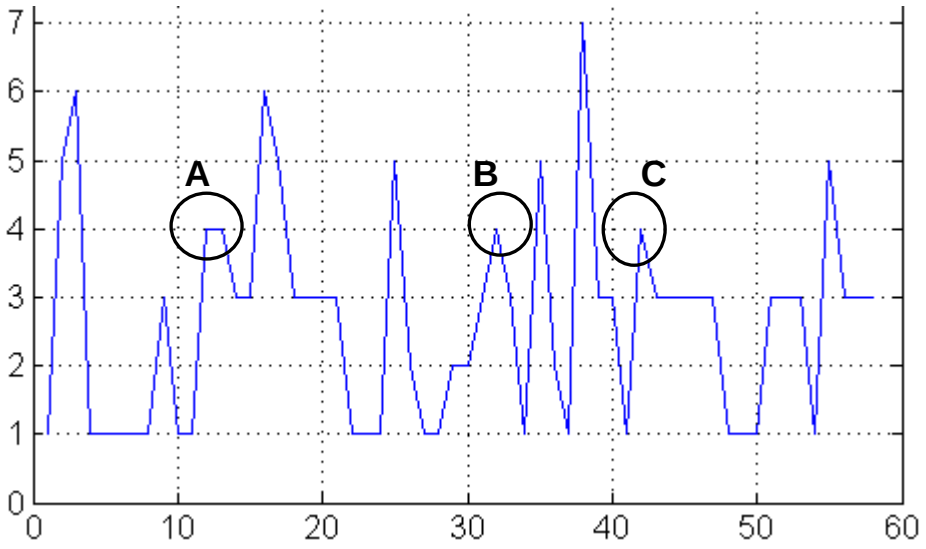
Далее процесс расчета идет итеративно, шаги 1−3 повторяются, пока не будет достигнута определенная точность с учетом (1). В результате полученные весовые вектора для каждого узла самоорганизующейся карты преобразуются в двумерную матрицу размерностью pxq, которая затем представляется в виде карты в географических координатах (рис. 1).

Анализ ТПМ. Входные пентадные данные ТПМ за июнь для периода 2000 − 2009 гг. выбирались с учетом флага качества данных, то есть 25% снимков было отбраковано из-за покрытия моря облачностью. Далее согласно рис. 1 проводились расчеты и строились карты весов для каждого нейрона сетки СОК. Следует отметить, что выходные карты имеют такую же размерность, что и входные поля, то есть (°С) На рис. 2 приведена последовательность нейронов СОК наилучшего приближения (best matching unit) данных ТПМ за июнь месяц для периода 2000 − 2009 гг. Использовалась карта размерностью 3x3 нейрона СОК, нумерация нейронов по оси Y, по оси X дана нумерация последовательности карт ТПМ (рис. 2). График рис. 2 позволяет оценить эволюцию поля ТПМ по времени, поскольку для каждого нейрона рассчитывалась также повторяемость, то есть какой % карт ТПМ ему соответствует. Повторяемость весовых карт ТПМ для каждого из девяти нейронов приведена в табл. 1.

В качестве примера на рис. 3 показана карта ТПМ для узла 4 СОК, ее повторяемость составила 6%, остальные карты из-за лимита объема статьи не приводятся. Карта ТПМ для первого узла СОК, ее повторяемость 35% (табл. 1, рис. 2), представляет собой поле температуры, характерное для среднемноголетних значений июня. величины ТПМ в среднем составляют 16 − 18 °С, есть также области с более низкими значениями ТПМ 13 − 15 °С в местах проявления прибрежного апвеллинга: район южного берега Крыма (ЮБК), северо-западная часть шельфа, Каркинитский залив, турецкое побережье в районе Синопа. Повторяемость для нейрона 2 составляет 7% (табл. 1), температура западной части моря в среднем 16 − 18 °С, восточной 18 − 20 °С, выделяется фронтальная зона по изотерме 16 °С у побережья Румынии и Болгарии.



Р и с. 1. Схема работы алгоритма самоорганизующихся карт для спутниковой информации



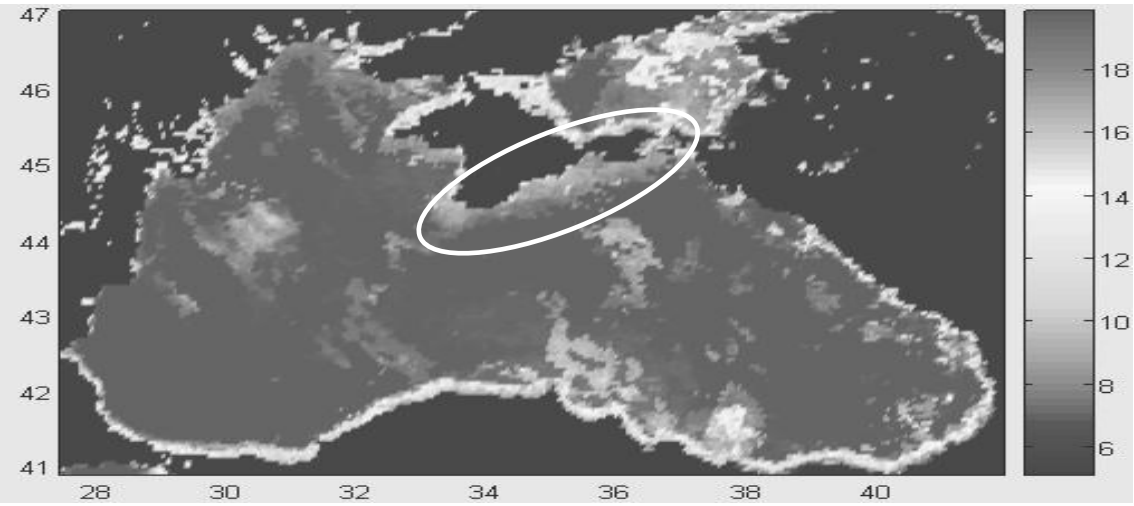
Р и с. 2. Последовательность нейронов СОК по данным ТПМ за июнь месяц для периода 2000 – 2009 гг. Всего 3х3 нейрона СОК, нумерация нейронов по оси Y, по оси X нумерация карт ТПМ. Идентификация апвеллинга: случаи A, B, C для нейрона № 4 (рис. 3)

Как видно из рис. 2 и табл. 1 для нейрона 3 также велика повторяемость – 37%, а его весовая карта ТПМ представляет собой слабо градиентное поле температуры 18 − 19 °С. Повторяемость узла 4 составила 6%, в поле ТПМ наблюдаются отчетливые зоны холодных вод 14 − 16 °С в районе от ЮБК до Керченского пролива и в районе Каркинитского залива (рис. 3), которые мы идентифицируем как проявление апвеллинга: случаи А (05.06.2002 − 10.06.2002), В (13.06.2005 − 25.06.2005) и С (31.05.2007 − 04.06.2007) на рис. 2. Для случаев А и С апвеллинг у ЮБК более детально выделяется при анализе исходных карт ТПМ и с.к.о. температуры, полученных при пятидневном осреднении исходных данных для указанных периодов в июне 2002 г. и 2007 г. Случай В характеризует длительный и интенсивный апвеллинг в период 13.06.2005 − 25.06.2005. На рис. 4. приведена карта температуры поверхности моря, осредненная за 5 дней для 20 − 25 июня 2005 г, на которой выделено проявление апвеллинга в ТПМ 10 − 15 °С у Крыма, а также на северо-западном шельфе моря и в Каламитском заливе. На карте с.к.о. температуры за тот же период для выделенного на рис. 3 и рис. 4 района у Крыма значения с.к.о. составили 6 − 8 °С. Следует отметить, что контуры ТПМ на рис. 4, на карте с.к.о. ТПМ и весовой карте для узла 4 (рис. 3) совпадают для выделенной области. Данные анализа спутниковых данных по ТПМ подтверждаются контактными измерениями температуры поверхности воды на океанографической платформе в Кацивели [4]. Более детальный анализ этих данных позволил авторам идентифицировать длительное проявление интенсивного апвеллинга, значения температуры воды составили 9 − 15 °С в течение 13.06 − 28.06.2005 г. (рис. 5). На карте ТПМ для пятого узла СОК, повторяемость 8% (табл. 1), выделяются фронтальные зоны в температуре: 14 − 17 °С в северо-западной части шельфа в районе дельты Дуная, Днестра, в Одесском заливе и Днепро-Бугском лимане, по-видимому они связаны со

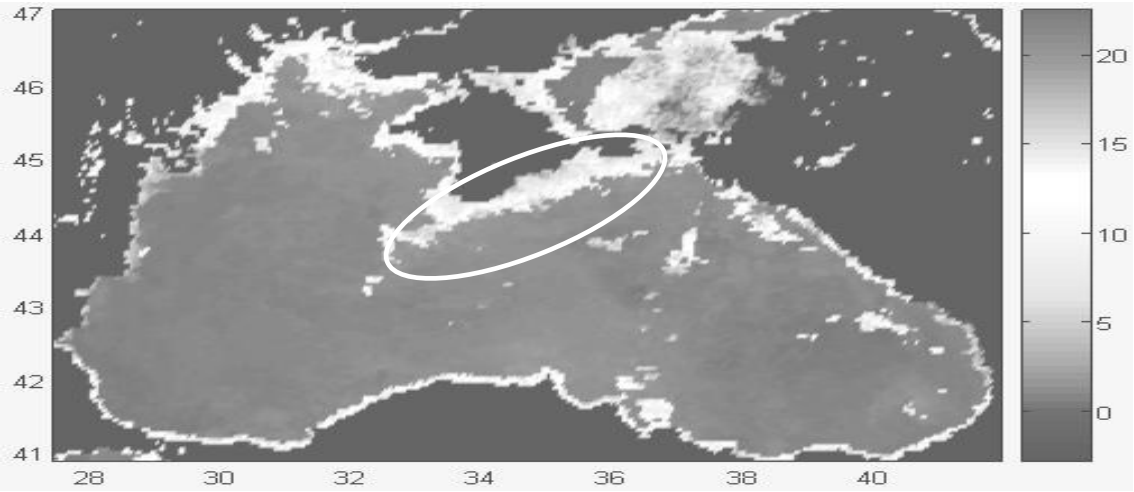
Т а б л и ц а 1

Повторяемость в % весовых карт ТПМ для узлов СОК 3х3 за июнь для периода 2000 – 2009 гг.

№ узла	СОК-1	СОК-2	СОК-3	СОК-4	СОК-5	СОК-6	СОК-7	СОК-8, 9
Повторяемость, %	35	7	37	6	8	5	3	0

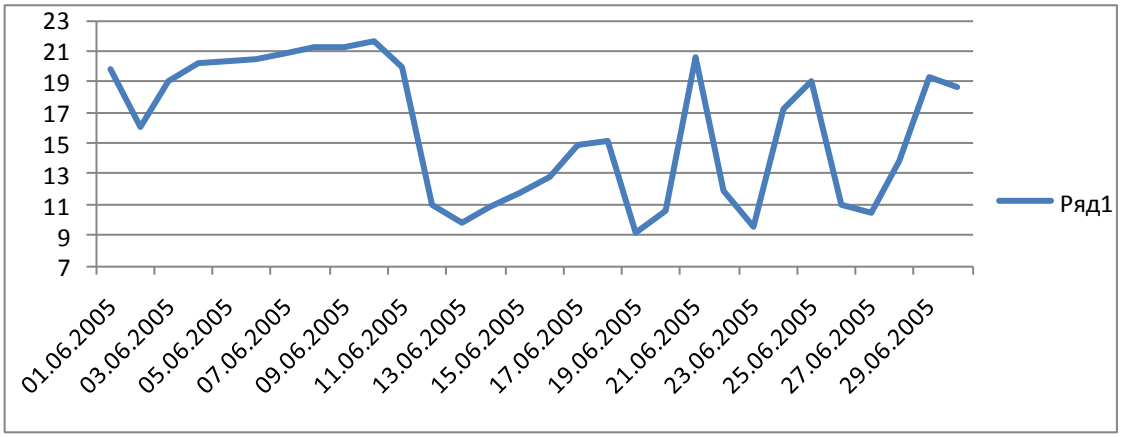


Р и с. 3. Карта СОК для узла 4, повторяемость 6% − идентификация апвеллинга у Крыма (случай В на рис. 2). Шкала в (°С)



Р и с. 4. Температура поверхности моря, осредненная за 5 дней для 20 − 25 июня 2005 г. Проявление апвеллинга в ТПМ у Крыма (случай В (рис. 2)). Шкала в (°С)

стоком этих рек. Для шестого узла СОК повторяемость 4%, на его весовой карте ТПМ выделяется область с пониженными значениями температуры 12 − 15 °С от Одесского залива и в Каркинитском заливе до берегов Крыма, что характеризует интенсивный апвеллинг. Для седьмого узла СОК повторяемость 3% (табл. 1), контрасты температуры составляют 0,5 − 0,8 °С для центральной области западного шельфа и в западной части моря вдоль изобат 500 − 800 м, по-видимому, они связаны с особенностями циркуляции вод на шельфе. Повторяемость восьмого и девятого узлов составляет 0%, это означает, что на рис. 2 они отсутствуют, хотя сами весовые карты представляют собой сглаженное поле температуры 18 − 20 °С , выделяется понижение температуры до 13 − 15 °С в западной части Азовского моря и в Днепро-Бугском лимане, но для детального анализа изменчивости ТПМ в этих областях требуется более высокое разрешение спутниковых данных по пространству. Таким образом, эволюция поля температуры для июня за период



Р и с. 5. Температура воды на поверхности моря на океанографической платформе в Кацивели, ЮБК для июня 2005 г. Проявление апвеллинга в ТПМ у Крыма (случай В (рис. 2)). Ось Y в (°C)

2000 – 2009 гг. на рис. 2 выглядит следующим образом: 82% повторяемости узлов 1 и 3 соответствует достаточно сглаженным полям со значениями температуры в среднем 16 − 18 °C и 13 – 15 °C у турецкого побережья – зоне апвеллингов в районе Синопа – мыс Ясон; хорошо выраженным апвеллингам у Крыма (узел 4, повторяемость 6%) и апвеллингу в северо-западной части шельфа (узлы 5 и 6).

Выводы. Применение метода самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) для анализа многолетних данных ТПМ для июня за период 2000 – 2009 гг. с целью выделения аномалий температуры поверхности моря и идентификации проявлений апвеллинга позволяет сделать следующие выводы:

✓ Выделены проявления апвеллинга в районе Крыма в июне 2002 г., июне 2005 г. и в начале июня 2007 г. (случаи А, В, С на рис. 2). Им соответствует карта СОК-4 (рис. 3), повторяемость проявления 6% от всего количества снимков.

✓ Идентифицированные проявления апвеллинга в прибрежной зоне ЮБК в июне 2005 г. (рис. 3, 4) согласуются с данными контактных наблюдений за тот же период.

✓ Преимущества алгоритма СОК по сравнению с другими методами анализа данных, например, эмпирическими ортогональными функциями, заключаются в том, что в результате весовые вектора для каждого узла СОК имеют размерность исходных данных (в случае ТПМ это (°C)), что упрощает их анализ и интерпретацию.

✓ Метод СОК может также применяться к данным, в которых имеются пропуски, что делает возможным анализ ТПМ, когда из-за облачности пропущена часть входных карт.

Е.Е. Лемешко и И.А. Репина благодарят РФФИ за поддержку, работа была выполнена в рамках гранта РФФИ 13-05-90907 мол_ин_нр.гранта.

Лемешко Е.М. благодарит проект PERSEUS за поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Richardson* A.J., *Risien* C., *Shillington* F.A. Using self-organzing maps to identify patterns in satellite imagery // Progress in Oceanography.– 2003. – Vol. 59. – P. 223 – 239 .
2. *4 km* Pathfinder Version5 User Guide. – 2009. http://www.nodc.noaa.gov/
3. *Nardelli* B.B., *Colella* S., *Santoleri* R., *Guarracino* M., *Kholod* A. – A reanalysis of Black Sea surface temperature // J. Mar. System. – 2010. – Vol. 79. – P. 50 – 64.
4. *Чухарев* А.М., *Репина* И.А. Взаимодействие пограничных слоев моря и атмосферы на малых и средних масштабах в прибрежной зоне // Морской гидрофизический. журнал. – 2012. – № 2. – С. 60 – 78.