

Е.Е.Лемешко<sup>1</sup>, А.А.Полозок<sup>2</sup>, Е.М.Лемешко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

<sup>2</sup>*Севастопольское отделение*

*Государственного океанографического института им. Н.Н.Зубова, г.Севастополь*

## **АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ АЗОВСКОГО МОРЯ МЕТОДОМ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ ПО ДАННЫМ АЛЬТИМЕТРИИ**

Метод самоорганизующихся карт применялся для анализа и классификации полей уровня Азовского моря с целью выделения аномальных значений уровня моря, определения повторяемости штормовых ситуаций и типизации пространственной изменчивости возвышения морской поверхности. Метод был применен для анализа суточных данных альтиметрии AVISO и срочных 6-ти часовых измерений уровня моря на четырех постах Азовского моря. Результаты валидации данных альтиметрии по береговым постам Азовского моря дают достаточно хорошее соответствие для среднесуточных данных и могут быть использованы для изучения пространственно-временной изменчивости уровня Азовского моря от суточных до синоптических масштабов. Применение метода самоорганизующихся карт позволило выделить типы пространственной изменчивости уровня моря, характерные для периода штормовых нагонов, которые согласуются с данными береговых наблюдений, в том числе и в дельте Дона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *уровень моря, штормовые нагоны, карты Кохонена, дельта Дона, альтиметрия*

Аномальные сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря возможны только при синоптических процессах, генерирующих поле ветра значительной скорости ( $> 15$  м/с). Большинство таких явлений наблюдается, в основном, в осенний и зимний сезоны. Наибольшие амплитуды колебаний уровня отмечаются в Таганрогском заливе и Геническе, наименьшие – в Керченском проливе. Длительное стояние уровня на опасных отметках возможно при устойчивых сильных восточных и северо-восточных ветрах. В таких случаях сильные нагоны будут отмечаться у северо-западного побережья моря и, соответственно, значительный спад уровня будет наблюдаться на восточном побережье моря. При смещении глубоких циклонов с юга или северо-запада, проходящих через центр Азовского моря и обуславливающих северо-западный ветровой поток над морем, возможны кратковременные, значительные повышения уровня в восточной и юго-восточной части моря.

Данные наблюдений показывают, что амплитуды сгонно-нагонных колебаний уровня в Азовском море бывают очень значительными. В качестве подтверждения в [1] приведены экстремальные характеристики колебаний уровня Азовского моря по данным береговой сети станций за весь исторический период наблюдений. Подъемы уровня более 2 м относительно нулевых отметок отмечались в районах Геническа, Таганрога и Темрюка. В свою очередь падения уровня более чем на 2,5 м наблюдались в Таганроге и Ейске. Максимальный размах колебаний на большинстве станций превышает 3 м.

Помимо изменчивости уровня в прибрежной зоне, большой интерес

представляет также пространственная изменчивость уровня моря по всей акватории. С развитием спутниковой альтиметрии появилась возможность оценить пространственно-временную изменчивость возвышений морской поверхности, что может быть использовано для валидации численных моделей циркуляции Азовского моря.

В работе использовались суточные аномалии уровня моря по альтиметрии *AVISO* на регулярной сетке  $0,25^\circ$  ( $\sim 40$  км), точность данных составляет 2 – 4 см [2, 3] и срочные 6-ти часовые измерения уровня моря на четырех постах Азовского моря (Мысовое, Геничск, Мариуполь, Приморско-Ахтарск), точность измерений 1 см. Дополнительная цель работы заключалась в проверке качества данных альтиметрии путем сопоставления со среднесуточными данными уровня моря, рассчитанными по срочным измерениям на постах. Для этого выбирался ближайший к посту узел сетки данных альтиметрии и формировался ряд аномалий уровня моря за 2010 – 2014 гг. Затем производилось визуальное сравнение временного хода уровня моря, определялись средние значения и среднеквадратичное отклонение (с.к.о.) разницы между данными поста и альтиметрии. Значение этой разницы (данные поста минус альтиметрия) за 2013 г. на постах в среднем составило минус 0,34 см, а с.к.о. отклонений 6,2 см. При графическом представлении данных видно, что кривая уровня моря по данным альтиметрии имеет более сглаженный характер. Она не описывает экстремальное повышение уровня моря в период штормовых нагонов, имеющих длительность менее двух суток, как, например, в марте 2013 г., что связано с суточной дискретностью данных альтиметра (рис. 1).

Таким образом, данные альтиметрии не отображают временные осцилляции уровня моря с периодом, меньше 1 – 2 дней. Однако, они дают приемлемое описание временной изменчивости уровня моря на мезо- и синоптических масштабах и картину его пространственной изменчивости.

На рис.2 представлена линейная регрессия данных альтиметрии и уровня моря, осредненных по всему морю, коэффициент корреляции составил 0,78. В результате можно сделать вывод о приемлемости качества данных альтиметрии *AVISO* для изучения пространственно-временной изменчивости уровня Азовского моря с учетом упомянутых выше ограничений.

От аномальных сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря страдают, в основном, прибрежная зона и дельты рек Дон и Кубань. Анализ береговых данных наблюдений за 2010 – 2014 гг. и публикаций [4] выявил два экстремальных штормовых нагона в устье Дона: 21 – 23 марта 2013 г. и 23 – 25 сентября 2014 г. По данным автоматического измерителя уровня воды в устье Дона на посту в х.Донской штормовой нагон длился около суток. Начавшись вечером 23 сентября 2014 г., он достиг пика (более 2,8 м) к 18.00 24 сентября 2014 г.

Для всего Азовского моря могут возникать сгонно-нагонные колебания для разных участков побережья в зависимости от силы и направления ветра [1]. В условиях отсутствия информации по ряду уровенных постов полезно использование данных альтиметрии, осредненных по всей акватории Азовского моря, и их среднеквадратичных отклонений. Возникновение интенсивных колебаний уровня в различных частях Азовского моря можно выде-

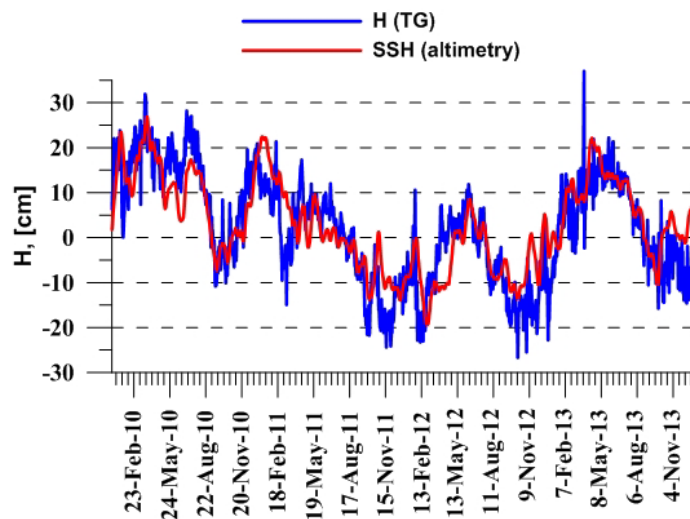


Рис. 1. Средний уровень Азовского моря по суточным данным береговых измерителей и альтиметрии за период 2010 – 2014 гг.

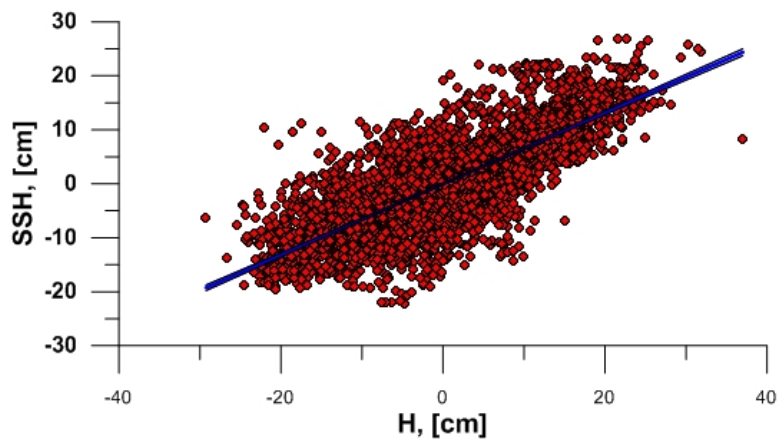
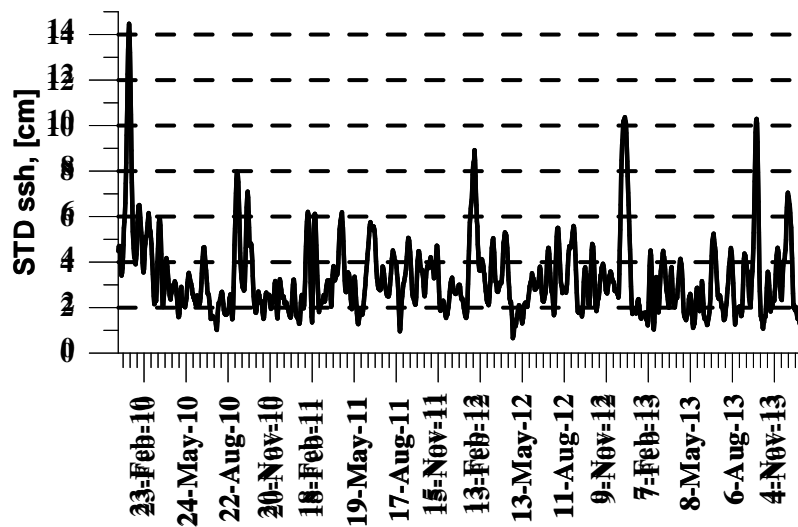


Рис. 2. Диаграмма рассеивания данных альтиметрии  $SSH$  и уровня моря  $H$ , осредненных по всему Азовскому морю за период 2010 – 2014 гг.

лить по графику с.к.о. среднего уровня Азовского моря. Из графика на рис.3 видно, что в эти периоды величины с.к.о. достигают 8 – 15 см.

Пространственная изменчивость уровня Азовского моря изучалась на основе анализа ежесуточных карт уровня по данным альтиметрии и их сопоставления с климатическими атласами уровня Азовского моря. При построении карт уровня моря по данным альтиметрии сигнал от возвышения поверхности воды в непосредственной близости от берега (до 20 км) не проявляется. Следовательно, непосредственно штормовые нагоны/сгоны в прибрежной зоне выделены быть не могут. Однако получается целостная картина пространственной изменчивости уровня всего моря.



Р и с . 3 . С.к.о. среднего уровня Азовского моря за период 2010 – 2014гг. по суточным данным альтиметрии.

Рассмотрим случай от 26 марта 2013 г. – начало интенсивного штормового нагона в дельте Дона. По данным альтиметрии в юго-западной части Азовского моря возникает понижение уровня и рост уровня в восточной части с максимумом в Таганрогском заливе (свыше 16 см), перепад уровня по морю составил 14 см. Аналогичная картина наблюдается и для другого периода экстремального штормового нагона (24 сентября 2014 г.): величины аномалий уровня составили до 5 см в Таганрогском заливе, перепад уровня по всему морю достиг 25 см.

Для анализа карт аномалий уровня моря был применен нелинейный метод анализа данных на основе нейронной сети – алгоритм самоорганизующихся карт Кохонена (СОК) [5]. Метод был адаптирован для идентификации и выделения пространственных и временных аномалий из больших массивов информации, его пригодность была продемонстрирована на примере анализа многолетних данных температуры поверхности моря (ТПМ) для Черного моря, по которым были выделены аномалии температуры поверхности моря и идентифицированы проявления апвеллинга [5].

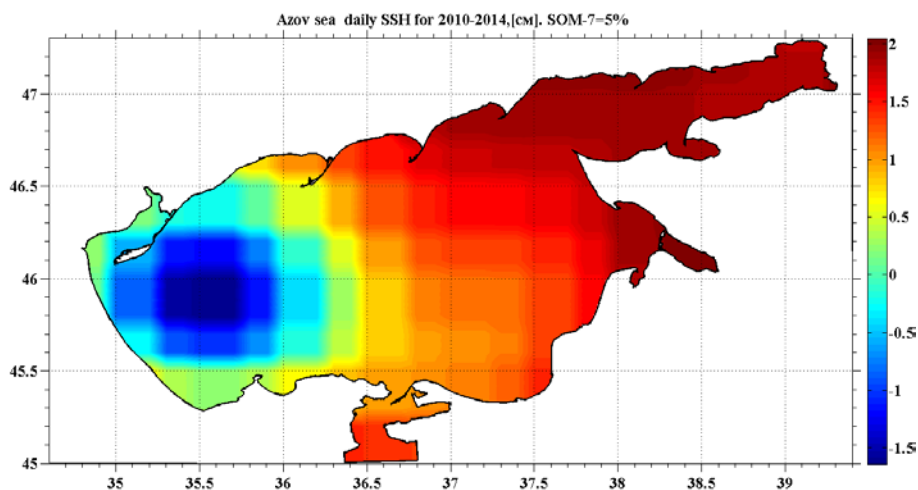
Метод самоорганизующихся карт – нелинейный метод анализа данных – фактически является непараметрической регрессией и используется, главным образом, для представления многомерных, нелинейно связанных элементов в наглядной форме для выполнения классификации и идентификации данных. Метод позволяет автоматизировать программное выделение аномалий или заданных величин. В данном случае были выделены аномалии уровня моря по данным альтиметрии за период 2010 – 2014 гг. и получены оценки повторяемости аномалий в процентах (табл.1).

Для анализа самоорганизующихся карт использовалась нейронная сеть из 12 карт. Применение данного метода позволило выделить 12 типов пространственной изменчивости уровня моря, в том числе типы, характерные для периода экстремальных штормовых нагонов, которые согласуются с дан-

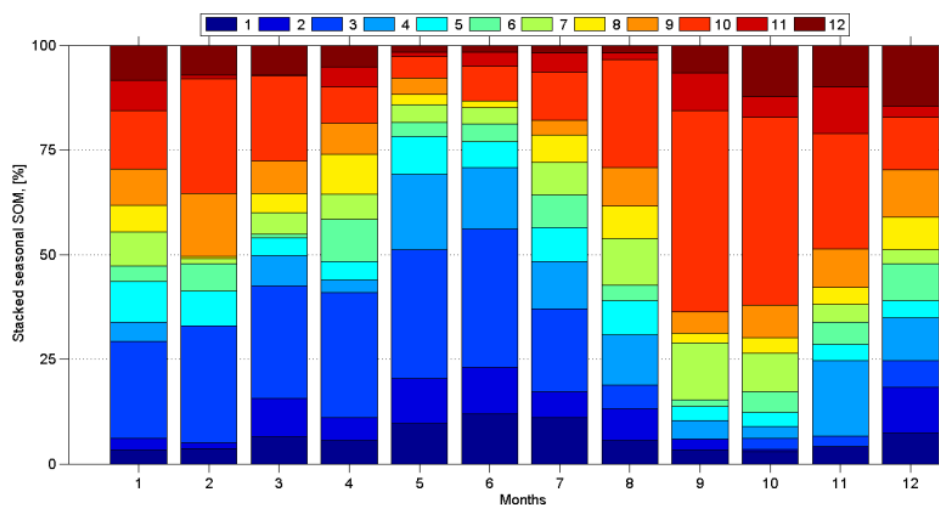
Т а б л и ц а 1 . Повторяемость самоорганизующихся карт за период 2010 – 2014 гг.

№ карты СОК	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
повторяемость СОК, %	5	6	19	12	5	3	5	7	5	20	4	9

ными береговых наблюдений на четырех береговых постах уровня моря и в дельте Дона. Из-за недостатка места все типы карт не приводятся. Однако, для целей статьи существенно, что самоорганизующаяся карта аномалий уровня Азовского моря № 7 описывает пространственное распределение уровня моря в период штормового нагона в северо-восточной части Азовского моря и имеет повторяемость 5 % от всех данных за период 2010 – 2014 гг. (табл.1, рис.4).



Р и с . 4 . Самоорганизующаяся карта уровня Азовского моря № 7, повторяемость 5 % за период 2010 – 2014 гг.



Р и с . 5 . Сезонный цикл индекса повторяемости (ось Y) самоорганизующихся карт за период 2010 – 2014 гг.

Данный подход позволяет по-иному оценить сезонный цикл повторяемости различных типов полей уровня моря. Для этого рассчитывался индекс повторяемости самоорганизующихся карт для каждого климатического месяца. В результате на рис.5 отображен сезонный ход индекса повторяемости самоорганизующихся карт аномалий уровня Азовского моря за период 2010 – 2014 гг., что позволяет выделять для каждого месяца года тип экстремальной изменчивости аномалий уровня для различных районов моря по процентному вкладу каждой из 12 самоорганизующейся карты в индекс повторяемости.

Подводя итоги, можно отметить следующие результаты.

Данные альтиметрии пригодны для изучения пространственно-временной изменчивости уровня Азовского моря от суточных до синоптических масштабов.

Результаты валидации данных альтиметрии по береговым постам Азовского моря дают достаточно хорошее соответствие для среднесуточных данных.

Преимуществом данных альтиметрии является получение карт изменчивости уровня моря и оценки тенденции изменения уровня в различных районах моря.

Получены оценки среднего уровня Азовского моря и среднеквадратичных значений уровня за период 2010 – 2014 гг. Это позволило выделить периоды интенсивной пространственной изменчивости уровня, которая характерна для периодов интенсивных штормовых ситуаций.

Для анализа и классификации полей уровня моря, а также их наглядного визуального представления предложен метод самоорганизующихся карт. Его применение позволило выделить типы пространственной изменчивости уровня моря, характерные для периода штормовых нагонов, которые согласуются с данными береговых наблюдений.

Работа выполнена в рамках гос. задания по теме «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и грит-технологий» (шифр «Фундаментальная океанология»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяков Н.Н., Фомин В.В. Синоптические условия возникновения аномальных колебаний уровня Азовского моря // Тр. УкрНИГМИ.– 2002.– вып.250.– С.332-341.
2. Интернет ресурс. <ftp://ftp.avisioceanobs.com/AVISO/pub/global/delayed-time/grids/msla/all-sat-merged/h/>
3. A new version of SSALTO/Duacs products available in April 2014 // CNES.– Issue 1.0.– 2014, Mar.17.– P.1-36. [ftp://ftp.avisioceanobs.com/pub/oceano/AVISO/SSH/duacs/quality\\_report/](ftp://ftp.avisioceanobs.com/pub/oceano/AVISO/SSH/duacs/quality_report/)
4. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В., Клеценков А.В., Кириллова Е.Э. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // Вестник Южного научного центра.– 2014.– т.10, № 1.– С.17-24.

5. Лемешко Е.Е., Ретина И.А., Лемешко Е.М. Идентификация проявлений апвеллинга методом самоорганизующихся карт температуры поверхности Черного моря // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2013.– 19.– С.135-139.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.  
После доработки 13.09.2016 г.

E.E.Lemeshko, A.A.Polozok, E.M.Lemeshko

**ANALYSIS OF AZOV SEA LEVEL VARIABILITY  
BY SELF ORGANIZATION MAPS ON ALTIMETRY DATA**

The self organizing maps method is used for analysis and classification of the Azov sea level field with the aim of the sea level anomaly values identification, determination of storm events frequency and typification of spatial variability of sea surface height. The method was applied for analysis of daily AVISO altimetry data and six hour sea level measurements on four tide gauges of the Sea of Azov. The results of altimetry data validation versus tide gauges of the Sea of Azov give sufficient agreement for daily data and may be used for investigation of spatial-temporary variability of Azov sea level since daily till synoptic scales. The self organizing map method application allows to identify the types of sea level spatial variability that are representative for intensive storm surge events period which are agreed with tide gauge observations as well as Don River delta.

KEYWORDS: *sea level, storm surge, Kohonen maps, Don River delta, altimetry*