УДК 551.465(262.5)

О РЕЗКИХ ПОНИЖЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А.Б. Полонский[1,2], Н.С. Дробосюк[2]

[1] Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru
[2] Филиал МГУ в г. Севастополе, РФ, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

Анализ спутниковых данных о температуре поверхности с начала 1980-х гг. и поле ветра с 1988 г. показал, что на акватории Черного моря регулярно возникают области резкого падения температуры, превышающего 2–9°С в сутки. Эти области приурочены не только к зонам прибрежного апвеллинга. Обширные области такого типа отмечаются в окрестности западного и восточного крупномасштабных циклонических круговоротов. Причиной формирования таких областей является циклоническая завихренность ветра в приводном слое атмосферы, генерирующих дополнительное турбулентное перемешивание и восходящие движения в верхнем слое моря и, как следствие, падение температуры поверхности в течении несколько суток после прохождения циклона через акваторию моря. Особенно эффективен этот механизм в случае медленно двигающихся циклонов. Повторяемость резких понижений температуры поверхности моря (ТПМ) и площадь, занятая отрицательными аномалиями ТПМ, имеют тенденцию к увеличению с конца 1990-х гг., что связано с интенсификацией циклонической активности в регионе в последние 20 лет.

Ключевые слова: температура поверхности моря, поле ветра, спутниковые данные, циклоническая завихренность в приводном слое атмосферы

Поступила в редакцию: 16.07.2018. После доработки: 02.08.2018.

Введение. Хорошо известно, что прибрежные районы Черного моря характеризуются регулярно повторяющимися апвеллингами, выносящими к поверхности подповерхностные и промежуточные воды. В теплое время года (с апреля по август-сентябрь) такие апвеллинги проявляются в виде резких понижений температуры поверхностного слоя, превышающих 5–10°С за 12 часов и продолжающихся несколько суток. Это явление чрезвычайно важно для эволюции прибрежных экосистем, рекреационного потенциала региона, решения ряда других задач [1–6]. Значительно менее детально описаны резкие понижения температуры поверхностных слоев в открытой части моря. Между тем, их влияние на характеристики теплообмена моря с атмосферой и параметры черноморской экосистемы не менее важно, чем влияние подъема вод в прибрежных районах. Так, например, малоподвижные циклоны, наблюдавшиеся в теплое полугодие в открытой части Черного моря, могут приводить к падению ТПМ на несколько градусов, что сопровождается сдвигом в экосистеме. Впервые подробно описать это явление удалось с помощью спутниковых данных [С.В. Станичный, частное сообщение]. В настоящее время накоплен значительный массив спутниковой информации более чем за 30–35 лет (для различных параметров), что дает возможность более точно описать физические механизмы этого явления и его статистические характеристики. Такое описание и представляет собой главную цель настоящей работы.

Материалы и методика обработки данных. В работе использованы регулярные данные о ТПМ в Черном и Азовском морях, полученные на основании анализа спутниковой информации и наблюдений in situ за 1982–2016 гг., а также данные о приводном ветре за 1988–2016 гг., полученные с помощью микроволновых радиометров (DMSP SSMI, TMI, AMSR-E) и скаттерометра (QuikSCAT), установленных на различных спутниках. Спутниковые данные по ТПМ получены усовершенствованными радиометрическими датчиками с высо-

ким разрешением (AVHRR), установленными на разных спутниках, и обработаны в Национальном Центре климатических данных NOAA. Все использованные данные обработаны до так называемого третьего или четвертого уровней (Level 3, 4), что предполагает выполнение коррекции измерений, контроль их качества и пр., а ежедневные поля проинтерполированы в узлы регулярной сетки с помощью процедуры оптимальной интерполяции (подробнее, см. [7–9]). Использованные массивы в настоящее время являются наиболее продолжительным непрерывным измерением физических параметров океана из космоса [10]. Пространственное разрешение всех данных (о ТПМ и приводном ветре) составляет 0.25×0.25 град. Кроме этого использовались данные о ТПМ для северной части Черного моря и Азовского моря с разрешением около 0.04×0.04 град (далее ТПМ-0.04). Пространственное разрешение в этих двух случаях (в км) представлено в табл. 1.

По ежедневным данным в каждой точке сеточной области рассчитывались первые разности (ΔТПМ). Под резкими понижениями ТПМ понималось падение среднесуточной температуры, превышающее по абсолютной величине заданный порог. При выделении прибрежных апвеллингов в Черном море в теплое полугодие по данным инструментальных измерений ТПМ на морских гидрометеорологических станциях ранее использовался порог 5°С [5]. Для спутниковых данных такой критерий не применим из-за относительно низкого пространственного разрешения. Действительно, по данным ТПМ-0,25 по всей акватории Черного и Азовского морей с 1982 по 2016 гг. падение ТПМ свыше 5°С наблюдалось лишь однажды, свыше 4,5°С – дважды, свыше 4°С – 4 раза. При таком разрешении в среднем наблюдалось 7 дней в году с |ΔТПМ| больше 2°С (из них 5 случаев в апреле-августе). По данным с более высоким разрешением (ТПМ-0,04) число дней с падением ежедневной ТПМ, большей по абсолютной величине 2°С, превышало приведенные значения более, чем втрое. Так, например, число дней с апреля по август 1982–2016 гг. с падением ТПМ хотя бы на части исследуемой акватории на 2°С и более составило 591 (изменяясь в разные годы от 7 до 27 дней в этот сезон), а общее число дней с падением ТПМ на 5°С составило всего 19. В связи в этим, в настоящей работе в качестве базового критерия был выбран порог 2°С.

Для выделения зон с повышенным уровнем межсуточной (высокочастотной) изменчивости ТПМ по ежесуточным данным в каждом узле сетки рассчитывались внутримесячные дисперсии для каждого месяца. Эти дисперсии (или с.к.о.) сравнивались с дисперсиями (с.к.о.), обусловленные межгодовой изменчивостью. Последние рассчитывались по среднемесячным данным в узлах регулярной сетки. Более подробно эта методика описана в работе [11].

Для анализа причин резких падений температуры рассчитывались синхронные и асинхронные коэффициенты корреляции между изменениями компонент вектора ветра, скоростью ветра и ТПМ (в прибрежных районах и во внутренней части акватории) и между изменениями завихренности поля ветра и ТПМ (в открытой части моря).

Таблица 1. Пространственное разрешение данных

Разрешение (градусы)	Длина ребра (по долготе), км	Длина оснований (по широте), км	
		Крайняя северная	Крайняя южная
0,25	27,75	18,98	21,32
0,04	4,44	3,04	3,41

Результаты и их анализ. Как уже отмечалось выше, по данным ТПМ-0.25 в среднем за год по всей акватории наблюдалось 7 дней с |ΔТПМ| > 2°С. Однако выделяется несколько районов с повышенной повторяемостью резких падений ТПМ. К ним относятся центральная часть Азовского моря, акватория северо-западного шельфа и центральная часть восточного циклони-

ческого круговорота (ВЦК) в Черном море. Здесь повторяемость резких падений ТПМ в 3-4 раза выше, чем в среднем по всей исследуемой акватории (рис. 1). Азовское море в настоящей работе анализироваться не будет, поскольку оно характеризуется специфическим термическим и ледовым режимом. Повышенная же повторяемость резких падений ТПМ в указанных районах Черного моря подтверждается данными табл. 2, в которой представлены акватории, где |ΔТПМ| существенно превышает 2°С.

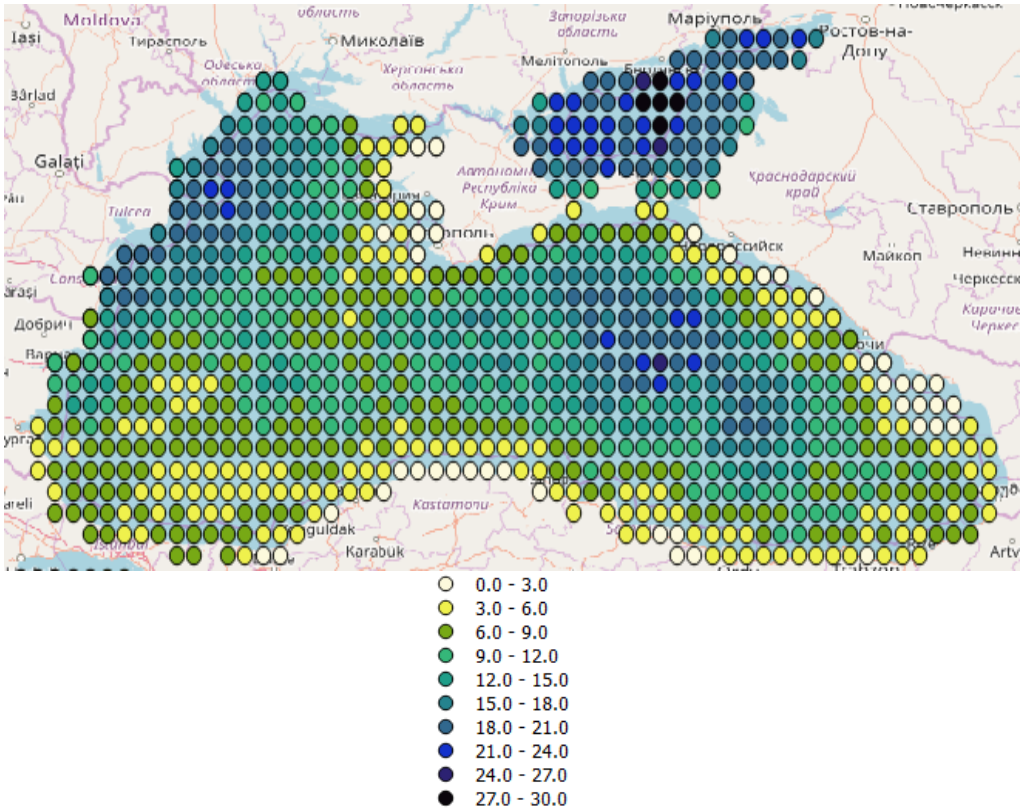

Рис. 1. Общее количество резких понижений ТПМ в Черном и Азовском морях в 1982–2016 гг. по данным ТПМ-0,25 при |ΔТПМ| > 2°С

Таблица 2. Случаи и регионы особенно резких падений ТПМ Черного моря (по данным ТПМ-0,25)

Суточное падение ТПМ, °С	Дата	Регион распространения аномалий ТПМ	Примечание
4	02.07.2013	ЗЦК, юг северо-западного шельфа, юго-восточное побережье моря, устье Дуная, румынское побережье, Синопский залив, прибрежные районы г. Самсун	
4,5	28.06. 2011	ЗЦК, северо-западный шельф, юго-западное побережье Крыма	27.06.11 падение ТПМ до 4,5°С наблюдалось и у побережья Турции
	08.10.2015	ВЦК и юго-восточное побережье Крыма	
5	24.09.2014 – 25.09.2014	ВЦК, восточная часть Черного моря, Керченский пролив	

Акватория северо-западного шельфа Черного моря относится к районам с повышенной повторяемостью ветровых сгонов в теплый период года [5, 6]. Поэтому повышенная повторяемость резких понижений ТПМ здесь вполне естественна. Что же касается ВЦК, то этот результат можно объяснить усилением перемешивания и восходящих движений из-за периодического усиления циклонической активности в атмосфере в анализируемом регионе [12]. В пользу справедливости такого объяснения свидетельствует и тот факт, что наибольшее количество резких понижений ТПМ отмечается здесь в сентябре-октябре при усилении штормовой активности. Отметим, что области прибрежного апвеллинга у побережья Крыма при грубом пространственном разрешении спутниковых данных вообще не выделяются (рис. 1). Вместе с тем в областях, охваченных прибрежным апвеллингом, отмечается существенное и значимое превышение внутримесячной дисперсии (с.к.о.) над межгодовой, особенно хорошо выраженное в весенний и начале летнего периода, когда толщина слоя прогретых перемешанных вод невелика (рис. 2). Это вообще типично для областей прибрежного апвеллинга [5, 11]. В большинстве районов северной части Черного моря максимальные величины внутримесячной дисперсии ТПМ и их отношения к величине межгодовой дисперсии наблюдаются в мае.

Статистические характеристики резких понижений ТПМ, полученные по данным с существенно лучшим пространственным разрешением (ТПМ-0.04) в целом подтверждают описанные выше закономерности (рис. 3). Естественно, при этом увеличивается общее количество резких понижений ТПМ, несколько видоизменяется конфигурация областей с |ΔТПМ| > 2°С и выделяются области прибрежного апвеллинга, не разрешаемые в массиве данных ТПМ-0.25 (ср. рис. 1 и 3). Одновременно удается выделить области, в которых падение среднесуточной ТПМ превысило 5–9°С (табл. 3). Отметим существенное увеличение площади аномально холодных вод после 2010 г.

Рис. 2. Прибрежные районы в северной части Черного моря со значимым преобладанием внутримесячной изменчивости ТПМ над межгодовой и месяцы с таким превышением:

- ○ апрель-июнь,сентябрь-ноябрь
- ● апрель-июнь, сентябрь-декабрь
- ● апрель-июль,сентябрь-декабрь

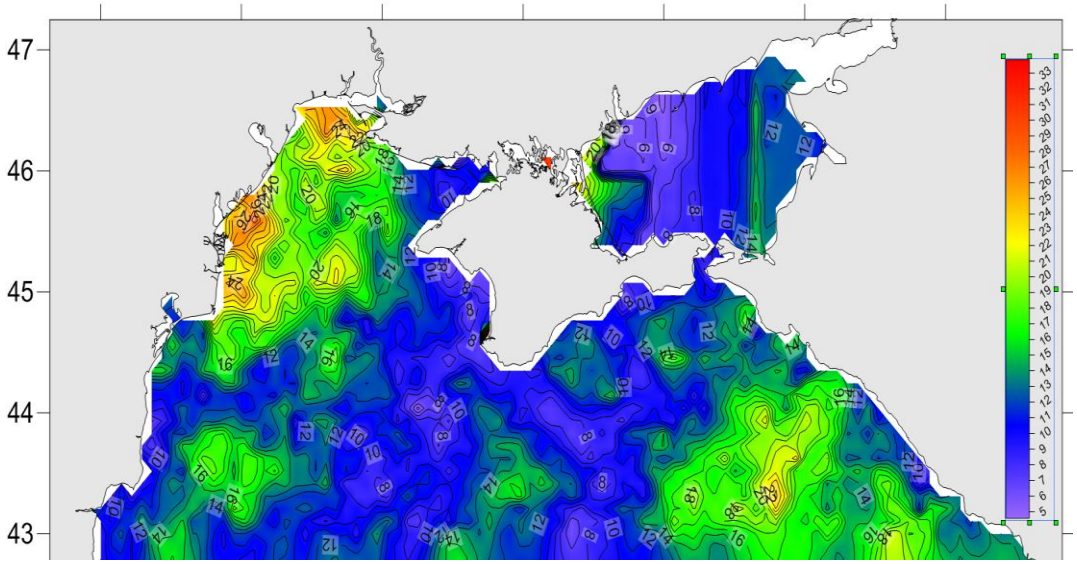

Рис. 3. Тоже, что и на рис. 1, но по данным ТПМ-0,04

Обобщая полученные результаты, можно предложить следующую карту-схему районов в северной части Черного моря, характеризующихся различным режимом резких падений ТПМ (рис. 4). Обширные районы таких падений приурочены к акватории северо-западного шельфа и ВЦК. При этом максимальное падение среднесуточной ТПМ (|ΔТПМ| > 8°С) отмечается на северо-западном шельфе и в окрестности западного циклонического круговорота (ЗЦК).

Таблица 3. Случаи падений ежесуточной ТПМ в Черном море, превышающих 5°С (по данным ТПМ-0,04)

Год	Месяц	День	Количество квадратов	Максимальное падение ТПМ, °С
1985	6	1	145	-7,87
1985	6	4	195	-6,92
1989	5	26	1	-5,01
1996	7	19	409	-5,97
1999	6	27	42	-5,72
2001	8	5	332	-5,61
2002	7	26	154	-5,66
2005	6	3	44	-5,44
2006	7	4	79	-5,2
2006	7	5	978	-6,33
2006	7	6	37	-6,06
2008	5	29	45	-5,2
2009	7	15	1	-5,05
2011	6	28	22	-5,32
2011	6	29	5056	-8,37
2011	6	30	1	-5,04
2013	4	17	363	-5,69
2013	7	4	566	-5,94
2013	8	28	12575	-9,22

В зоне действия прибрежного апвеллинга значимая корреляция между изменением ветров сгонных направлений и резким падением ТПМ повсеместно отмечается по данным с достаточно хорошим разрешением (ТПМ-0.04). При использовании спутниковых данных с грубым разрешением (ТПМ-0.25) соответствующий коэффициент корреляции оказывается значимым лишь в малом числе точек (рис. не приведен). Вместе с тем, данные с грубым пространственным разрешением указывают на преобладание на значительной части акватории положительной корреляции между скоростью приводного ветра и падением ТПМ (взятым по абсолютной величине, рис. 5). Знакопеременный коэффициент корреляции между этими характеристиками отмечается в некоторых прибрежных акваториях (где принципиально важно направление ветра) и в области ВЦК. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что в ВЦК важны не только изменения самой скорости ветра или его компонент (что приводит к дополнительной генерации кинетической энергии турбулентности в верхнем перемешанном слое), но и изменение завихренности в поле ветра. Усиление циклонической завихренности ветра в приводной атмосфере вызывает дополнительный подъем вод и приводит к понижению ТПМ. Соответствующие коэффициенты корреляции превышают 0.6 при запаздывании понижений температуры относительно завихренности ветра от одних до нескольких суток. Оценка вертикальной скорости, индуцируемой атмосферными циклонами, дает величину порядка $5\cdot10^{-4}$ – $1\cdot10^{-3}$ км/сут (или 0,5–1 м/сут). Это означает, что в среднем за несколько суток к поверхности будут вынесены подповерхностные воды с глубины в несколько метров. В ЗЦК и ВЦК толщина верхнего перемешанного слоя обычно не превышает в теплый период года несколько метров. При типичных вертикальных градиентах температуры в слое скачка и сезонном термоклине подъем подповерхностных вод с глубины несколько метров как раз и приведет (совместно с турбулентным вовлечением холодных вод термоклина) к падению ТПМ на несколько градусов.

Рис. 4. Общая характеристика резких падений ТПМ в северной части Чёрного моря. Темно-синим, зеленым и голубым показаны области с наибольшей, повышенной и средней повторяемостью резких падений ТПМ.
Области прибрежного апвеллинга даны желтым и ярко-зеленым цветом.
Максимальное межсуточное падение ТПМ:

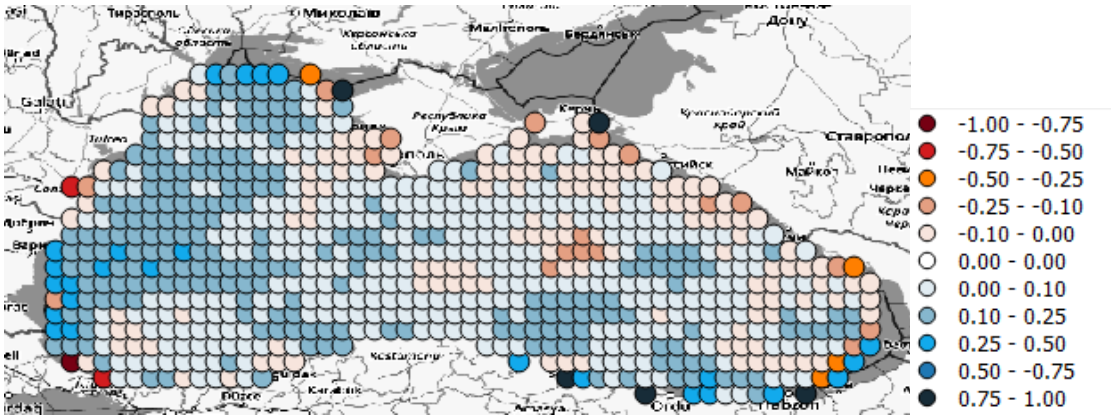

Рис. 5. Коэффициенты корреляции между падением ТПМ (по абсолютной величине), и скоростью ветра в первые сутки. Разрешение 0.25×0.25 град. Ярко-красные/синии кружки указывают на наличие значимой отрицательной/положительной корреляции. Положительная корреляция указывает на падение среднесуточной ТПМ при усилении ветра любого направления

Подчеркнем, что описанный механизм эффективно воздействует на ТПМ, если циклоны не перемещаются с большой скоростью. Типичная скорость движения циклонов в регионе порядка 1000 км в сутки [12, 13]. Это означает, что за одни сутки циклон обычно пересекает все Черное море и не способен вызвать существенное понижение ТПМ за счет воздействия на верхний слой моря дополнительной циклонической завихренности. Вместе с тем, часть циклонов в рассматриваемом регионе двигаются со значительно меньшей скоростью или вообще являются квазистационарными на масштабах нескольких суток. Эта ситуация возникает в тех случаях, когда над северо-восточной частью Европы формируется обширный блокирующий антициклон. При этом циклоны различного происхождения относительно медленно перемещаются по периферии этого антициклона или даже стационируют, что приводит к образованию устойчивых барических систем. Такая синоптическая ситуация формирует штормовые условия над западной частью Черного моря, продолжительностью до 5–6 суток. Как показано в работе [13], этот тип атмосферной циркуляции является основной причиной штормовых условий, наблюдаемых на некоторых станциях в северной и северо-восточной частях Черного моря в период с сентября по март. С конца 1990-х гг. наблюдается выраженная тенденция увеличения количества дней с падением среднесуточной ТПМ более, чем на 2°С (рис. не приведен). Это подтверждает важную роль атмосферных циклонов в формировании отрицательных аномалий ТПМ, поскольку их повторяемость также увеличивается с конца 1990-х гг. [12].

Заключение. Проведенный анализ спутниковых данных с начала 1980-х гг. показал, что на акватории Черного и Азовского морей в теплый период года регулярно возникают области резкого падения ТПМ, превышающего 2–9°С в сутки. Эти области приурочены не только к зонам прибрежного апвеллинга. Обширные области такого типа отмечаются в окрестности западного и восточного крупномасштабных циклонических круговоротов в Черном море. Причиной формирования таких областей является циклоническая завихренность ветра в приводном слое атмосферы, генерирующих дополнительное турбулентное премешивание верхних слоев морской воды, восходящие движения в верхнем слое и падение ТПМ в течение несколько суток после прохождения циклона через акваторию моря. Повторяемость таких резких понижений ТПМ и площадь, занятая отрицательными аномалиями ТПМ, имеют тенденцию к увеличению из-за интенсификации циклонической активности в регионе с конца 1990-х гг.

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за конструктивную критику первого варианта рукописи. Работа частично была поддержана РФФИ (грант № 18-45-920014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Т. 4: Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоиздат, 1991. 469 с.

2. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Т. 4: Черное море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 220 с.

3. *Oguz T.* The role of physical processes controlling the Oxycline and Suboxic Layer structures in the Black Sea // Global Biogeochem. Cycles, 2002, 16 (2). doi: 10.1029/2001GB001465.

4. *Staneva J.V., Stanev E.V.* Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets: intercomparison study for the Black sea // Oceanol. Acta. 1997. P. 393–417.

5. *Ловенкова Е.А., Полонский А.Б.* Климатические характеристики апвеллинга у побережья. Крыма и их изменчивость // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 44–51.

6. *Polonsky A.B.* Upwelling in the Northern Black Sea: Description, Mechanisms and Impact on Chlorophyll-A concentration / In book: Upwelling: Mechanisms, Ecological Effects and Threats to Biodiversity (Editors: Williams E. Fischer and Adams B. Green). Nova Science Publishers, Inc., New York, USA, 2013. P. 59–76.

7. *AVHRR* Pathfinder version 5.3 level 3 collated (L3C) global 4km sea surface temperature [Электронный ресурс]. – режим доступа: URL: https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.nodc: AVHRR_Pathfinder-NCEI-L3C-v5.3 (дата обращения: 27.11.2017).

8. *AVHRR*-Pathfinder/NASA's Physical Oceanography Distributed Active Archive Cente [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://podaac.jpl.nasa.gov/AVHRR-Pathfinder (дата обращения: 01.04.2017).

9. *NOAA* Satellite Data Access by Datasets [Электронный ресурс]. – режим доступа: https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/satellite-data/satellite-data-access-datasets (дата обращения: 18.02.2018).

10. *Серебренников А.Н.* Анализ современных спутниковых баз данных в исследовании Земли из космоса // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. Вып. 3 (23). 2016. С. 52–58.

11. *Полонский А.Б., Серебренников А.Н.* Межгодовые и внутримесячные флуктуации поля ветра и температуры поверхности окена в зоне западноафриканского апвеллинга по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2017. № 5. С. 14–19.

12. *Полонский А.Б., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Статистические характеристики циклонов и антициклонов над Черным морем во второй половине XX века // Морской гидрофизический журнал. 2007. № 6. С. 47–58.

13. *Евстигнеев В.П., Наумова В.А. Воскресенская Е.Н. и др.* Ветроволновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона. Севастополь: ИПТС. 2017. 320 с.

ON AN ABRUPT SEA SURFACE TEMPERATURE (SST) DECREASE IN THE BLACK SEA USING DATA OF LONG-TERM SATELLITE OBSERVATIONS

A.B. Polonsky[1,2], N.S. Drobosuk[2]

[1] Institute of Natural end Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28
[2] Sevastopol Branch of Moscow State University,
Russian Federation, Sevastopol, Ger. Sevastopolya St., 7

Analysis of satellite data on SST from early 1980s and wind field from 1988 showed that abrupt SST decrease (between 2 to 9°C per day) is a regular phenomenon. Such SST decreasing is typical not only for the coastal upwelling zones in summer. More extended areas arise in the vicinity of the western and eastern large-scale cyclonic gyres in the Black Sea. Transient (but not too fast) cyclonic atmospheric eddies passing through this region are the main cause of additional turbulent entrainment, upward motion and SST anomalies generation. These anomalies are usually developed in a few days after stormy conditions. Frequency of the abrupt SST fall and anomalous area tend to be higher as a result of intensified cyclonic activity in the Black Sea region since 1990s.

Keywords: sea surface temperature, wind field, satellite data, cyclonic vorticity in the low-troposphere.