АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ, НА ПРИМЕРЕ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА

Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В.

Институт аридных зон Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону
ldashkev@ssc-ras.ru, kulygin@ssc-ras.ru

Таганрогский залив (ТЗ) Азовского моря – вытянутая эстуарная зона р. Дон, с характерными изменениями гидрологического режима на своем протяжении. На берегах акватории ТЗ функционируют три относительно крупных гидрометеостанции (ГМС): Таганрог, Ейск (Россия) и Мариуполь (Украина). В отличие от наземных наблюдений данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют оценить только некоторые параметры, измеряемые на ГМС. Но их несомненное преимущество – территориальный охват, позволяющий оценить то или иное явление одномоментно на всей акватории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные наземных наблюдений. Источником данных наблюдений на ГМС были общедоступные базы данных: Южного научного центра РАН [1]; российского сайта ООО «Расписание Погоды» (<http://rp5.ru>) и Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (<http://esimo.pacificinfo.ru>). Следует отметить пробелы в вековом ряду данных ГМС Мариуполь, т.к. данные наблюдений на территории Украины за исторический период в основном закрыты для свободного доступа.

Спутниковая информация. При формировании архива данных ДЗЗ использовались два источника информации: Европейский центр данных Copernicus (Marine environment monitoring service <http://marine.copernicus.eu>) и распределенный центр архивных материалов физической океанографии НАСА (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC), NASA <http://podaac.jpl.nasa.gov>).

Для целей настоящего исследования были выбраны наборы данных:

- температура поверхности моря по данным радиометров AVHRR (спутники серии NOAA), уровень обработки L4 за период 1981-2016 гг.;
- ветер над морской поверхностью по данным скаттерометра SeaWinds на Quiksat, уровень обработки L3 за период 1999-2009 гг.

Набор данных с температурой поверхности моря представляет собой средние суточные значения (с 1 ноября 1981 г. по настоящее время) в узлах регулярной сетки с размером ячейки $0.0417^\circ \times 0.0417^\circ$.

Набор данных скорости ветра над поверхностью моря представляет собой значения скорости и зональной и меридиональной компонент на каждую дату, соответствующие времени восходящих и нисходящих витков пролета спутника над акваторией ТЗ. Пространственное разрешение снимков 25 на 25 км. Спутник Quicksat прекратил свою работу в 2009 г., в качестве альтернативы могут быть использованы данные скаттерометров ASCAT, действующих спутников МЕТОР-А и МЕТОР-В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При оценках состояния экосистемы часто используют такой показатель гидрологического режима как средняя соленость (выполняется осреднение данных наблюдений по отдельным районам). Соленость Азовского моря характеризуется относительно большими горизонтальными градиентами (от практически пресных вод в приустьевых областях рек до вод значительной солености Керченского пролива и близ Геническа) [2]. Особенно большое отличие между оценками средней солености разными авторами наблюдается для сильно распресненного ТЗ, с соленостью в разные годы колеблющейся от 0 до 6 ‰ в устье р. Дон и от 4.5 до 12.8 ‰ на выходе из залива. В вековом ряду наблюдений четко прослеживаются периоды: опреснение – осолонение – опреснение (рис. 1). С 2007 года ТЗ находится в очередном периоде осолонения в связи с наблюдаемым снижением количества атмосферных осадков (рис. 2) и ростом антропогенного изъятия стока рек (сток р. Дон в период 2007-2015 гг. снизился до 11-17 км³/год (рис. 1)).

Рис. 1 Динамика средней солености ТЗ и сток р. Дон

В многолетней динамике с начала XX к началу XXI века для температуры воздуха, воды и количества осадков отмечается тенденция повышения, а для скорости ветра – снижения. Особенно ярко эти тенденции проявляются при сравнении метеоусловий начала XX и XXI веков [3]. Для температуры воздуха наибольший тренд отмечен в северо-восточной части акватории Азовского моря.

В период 2000-2016 гг. наблюдается наибольшее потепление климата в годовом исчислении за последнее столетие со следующими коэффициентами линейной регрессии: в Ейске $0.08^{\circ}\text{C}/\text{год}$, Мариуполе $0.07^{\circ}\text{C}/\text{год}$, Таганроге $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$. При этом на вековом отрезке времени (1915-2015 гг.) коэффициент регрессии для этих ГМС практически одинаков и составляет $0.02^{\circ}\text{C}/\text{год}$ или 2°C за 100 лет (рис. 3).

Рис. 2 Динамика годовых сумм атмосферных осадков

Рис. 3 Среднегодовая температура воздуха по данным 3 ГМС

В последнюю четверть XX века разными авторами было отмечено некоторое потепление вод Азовского моря (вслед за температурой воздуха), особенно в холодный период года и смягчение его ледовых условий. Для середины 1980-х гг. по сравнению с началом XX века средние даты первого появления начальных форм льда сдвинулись примерно на неделю позже, а средние даты полного исчезновения льда по большинству пунктов стали отмечаться несколько раньше, сократилась средняя продолжительность ледового сезона по наблюдениям на всех ГМС [4, 5]. В современный период в динамике среднегодовых температур вод ТЗ по данным 3-х ГМС также наблюдается тенденция к повышению (рис. 4).

В период 2000-2015 гг. наибольшее потепление вод в годовом исчислении за последнее столетие со следующими коэффициентами линейной регрессии наблюдается: в Мариуполе $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$; Ейске $0.03^{\circ}\text{C}/\text{год}$; Таганроге $0.02^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Таким образом, коэффициенты для воды почти в 3 раза ниже, чем для воздуха. При этом на вековом отрезке времени (1915-2015 гг.) коэффициент регрессии по морю для всех ГМС практически одинаков и составляет $0.01^{\circ}\text{C}/\text{год}$ или 1°C за 100 лет.

Рис. 4 Среднегодовая температура воды ТЗ по данным 3 ГМС

Анализ ветровой активности по данным азовских прибрежных ГМС с конца 1940-х до середины 1980-х гг. свидетельствует о понижении скорости ветра как в среднем за год, так и для всех сезонов [6]. В последующие годы тенденция пониженной ветровой активности сохранилась и даже усилилась в начале XXI века (рис. 5).

В акватории ТЗ наибольшее снижение скорости ветра наблюдается по данным ГМС Ейск и Таганрог (-0.02 м/с в год). Следует отметить, что такие коэффициенты характерны как для современного периода (2000-2016 гг.), так

и для наблюдений в целом за столетие. Для ГМС Мариуполь наблюдается наименьшая тенденция снижения скорости ветра: -0.01 м/с в год для 2000-2016 гг. и отсутствие тренда на вековом отрезке времени.

Рис. 5 Среднегодовая скорость ветра над ТЗ по данным 3 ГМС

Выделяют несколько причин явного снижения скорости ветра на протяжении XX – начала XXI веков. Некоторые исследователи связывают данное явление со значительным увеличением плотности застройки территорий, прилегающих к ГМС, и изменением инструментария для измерения скоростей ветра. Однако, значительное снижение ветровой активности на всех прибрежных азовских ГМС безусловно имеет и климатическую составляющую, в частности смену циркуляционной эпохи в 1970–1975 гг. [6, 7]. Произошло увеличение повторяемости ветров западных направлений в течение года. Если в прошлом они преобладали лишь в летне-осенний период, то с 1989 г. они охватывают и зимнее время, а с 1996 г. – период с февраля по июнь [7].

Контрастный характер климата Приазовья предопределяется взаимодействием морских и континентальных воздушных масс умеренного пояса степной зоны. В условиях меняющегося глобального климата с годами также изменяется континентальность регионального климата, наиболее важной характеристикой которой является функция годовой амплитуды температуры воздуха или индекс континентальности. Результат расчета индекса континентальности по формуле С.П. Хромова [8] приведен на рис. 6. До 1950-х гг. наблюдался достаточно высокий уровень индекса континентальности [9], сменившийся длительным периодом снижения, но с начала 1990-х гг. в целом вновь наблюдается его рост (т.е. годовых амплитуд температуры воздуха), за исключением 2004 г., характеризовавшегося холодным летом и теплой зимой.

Рис. 6 Динамика индекса континентальности на 3 ГМС

При анализе температуры воды по данным ДЗЗ акватория ТЗ была разделена на три региона согласно схеме, которая является частью классического районирования Азовского моря [10]. Суточное значение для каждого региона рассчитывалось как среднее арифметическое значений всех ячеек сетки, попавших в соответствующий регион. Затем суточные значения осреднялись в пределах месяца, и далее в пределах года.

Было проведено сравнение полученных графиков температуры воды по данным ДЗЗ с данными наблюдений на береговых ГМС (рис. 7).

Рис. 7 Динамика среднегодовой температуры воды в ТЗ по наблюдениям на ГМС (1) и данным ДЗЗ (2)

Данные наблюдений ГМС Таганрог, Ейск и Мариуполь осреднялись, если среднегодовое значение было не менее чем на двух станциях. Выявлено, что графики имеют общий характер изменений, однако, температура воды по снимкам системно на 0.01-0.7°C выше, чем по данным ГМС. Вероятно, это связано с разницей между температурой поверхности моря (измеряемой дистанционными методами) и температурой поверхностного слоя вод (измеряемого контактными методами). Коэффициент корреляции между графиками

среднегодовой температуры воды по данным ДЗЗ и оценкам по 3 ГМС составил 0.91, при этом для безледного периода (весна-осень) коэффициент корреляции немного выше – 0.94, возможно это говорит о недооценке зимних температур воды по данным ДЗЗ.

На основе данных ДЗЗ был рассчитан среднесезонный (1982-2015 гг.) сезонный ход температуры воды по трем районам ТЗ. Среднемесячные значения температуры воды по районам отличаются не значительно (на 0.05...0.8 °С), поэтому на рис. 8 приведен средний сезонный ход. Наибольшее отличие температуры вод по районам закономерно наблюдается между приустьевым и западным районами ТЗ. В весенний период отмечается максимальная разница в прогреве вод, а минимальная – в летний сезон.

Рис. 8 Сезонная динамика температуры вод ТЗ по данным ДЗЗ (1982-2015 гг.)

В многолетней динамике температуры воды по данным ДЗЗ (1982-2015 гг.), также как и по данным ГМС, наблюдается тенденция ее роста с середины 1990-х гг., несколько замедлившаяся после наиболее теплого за имеющийся период спутниковых наблюдений 2010 года. Весьма вероятно, что отмеченные тенденции являются примером внутривековых природных циклов [6, 11].

Средняя месячная скорость ветра над ТЗ по данным ДЗЗ составила 10.9 м/с. Максимальная повторяемость (11 %) – наблюдается у ветра со скоростями 10–11 м/с (интервал анализа 1 м/с) (рис. 9а). Слабые и умеренные ветры со скоростью от 3 до 8 м/с составляют 23 % от всех наблюдений, сильные ветры (выше 15 м/с) – около 17 %. Максимальная наблюденная скорость ветра – 30.1 м/с.

На основе данных ДЗЗ был рассчитан среднесезонный (1999-2009 гг.) сезонный ход скорости ветра по трем районам ТЗ. Т.к. среднемесячные значения скорости ветра по районам отличаются не значительно (до 0.8 м/с), на рис. 9б приведен средний сезонный ход скорости ветра для ТЗ. Как видно на рисунке, сезонная изменчивость скорости ветра выражена слабо, однако, наблюдается увеличение скорости ветра в весенне-осенний период и уменьшение в зимний и летний.

Отмечено системное превышение значений скорости ветра, полученных по данным ДЗЗ, над наблюдениями на береговых ГМС, что вероятно связано с усилением ветра над морем за счет гладкой подстилающей поверхности. В многолетней динамике и по данным ДЗЗ, и по данным ГМС, отмечена тенденция уменьшения скорости ветра (рис. 10). Однако, по данным ДЗЗ она более выражена: до 0.1 м/с в год.

Рис. 9 Распределение скоростей ветра над ТЗ (А) и среднемноголетняя сезонная динамика (Б) по данным ДЗЗ (1999-2009 гг.)

Рис. 10 Среднегодовая скорость ветра (м/с) над ТЗ по данным ДЗЗ

Таким образом, в современный период относительно XX века в Приазовье наблюдается увеличение среднегодовой температуры воздуха, особенно в зимний сезон (снижение доли отрицательных температур и рост доли положительных), и соответственно некоторое потепление вод моря и смягчение его ледовых условий. Эта тенденция более выражена для северо-восточной части Приазовья. Для вод Азовского моря в последние годы отмечен очередной период осолонения, вероятно связанный со снижением годового количества осадков в регионе и увеличением уровня антропогенного изъятия стока рек. При этом в многолетнем ряду наблюдений отмечается снижение скорости ветра и неко-

торое увеличение континентальности климата Приазовья. Данные утверждения основаны на анализе данных наблюдений на ГМС и анализе спутниковых снимков. Тенденции потепления вод моря и снижения скорости ветра системно выше по данным ДЗЗ, чем по данным контактных наблюдений на ГМС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16–35–00290 мол_а и № 15–05–0854.

Список литературы

1. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Archipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. G. Matishov, S. Levitus, Eds., NOAA Atlas NESDIS 65, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2008. – 148 p. CD-ROM.
2. Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы, 2017. т. 44, №5. С. 563–572.
3. Дашкевич Л.В., Бердников С.В. Математическое моделирование температурного режима и ледовитости Азовского моря в период 1920–2008 гг. / Труды ЮНЦ РАН, Ростов н/Д: изд. ЮНЦ РАН, 2009. С. 186–196.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.
5. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013) / Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhnyi V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N., Shatohin B.M., Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A., 2014. Matishov G.G., Sherman K., Levitus S. (Eds.), NOAA Atlas NESDIS 78, 131 pp.
6. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Гаргопа Ю.М. Климатогенные изменения экосистем южных морей в условиях антропогенных воздействий // Известия РАН. Серия географическая, 2008. № 3, с. 26–34.
7. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1999. №4. С. 90–97.
8. Хромов С.П., Мамонтова Л.Н. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 586 с.
9. Дашкевич Л.В. Динамика индекса континентальности в азовском регионе за 100 лет // Экология. Экономика. Информатика (8–13.09.2013 г.) Материалы конф.: в 2 т. – Ростов н/Д. Изд. ЮФУ, 2013. Т 2.: Геоинф. науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. Геоинф. технологии и космический мониторинг, 2013. С.40–43.
10. Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. А.А. Аксенова Л.: Гидрометеорологическое изд., 1962. 856 с.
11. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Гаргопа Ю.М., Дашкевич Л.В. Замерзание Азовского моря и климат в начале XXI века // Вестник Южного научного центра РАН 2010. Т.6. №1, С. 33–40.

CLIMATIC FACTORS ANALYSIS BASED ON CONTACT OBSERVATIONS DATA AND ON SATELLITE IMAGES: THE TAGANROG BAY CASE

L.V. Dashkevich, V.V. Kulygin

Institute of Arid Zones Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences

ldashkev@ssc-ras.ru, kulygin@ssc-ras.ru

Abstract. Air temperature increase in the Sea of Azov region is observed in the modern period, especially during the winter season (the decline of negative temperatures proportion and the increase of positive temperatures proportion). Certain warming of the Sea of Azov waters and its ice conditions mitigation are also observed. This tendency is expressed stronger in north-eastern part of the Sea of Azov region. The next period beginning of the Sea of Azov waters salinity increase is marked in recent years, that is probably connected with reduction of annual precipitation in the region. Along with that, the wind speed decrease and a slight increase of the Sea of Azov region climate continentality are observed. These assertions are based on weather stations observations data analysis and satellite imagery analysis. The sea waters warming and wind speed decrease trends are expressed stronger based on remote sensing data compared to weather stations contact observations data.

Keywords. climatic changes, contact observations data, satellite images, the Sea of Azov

References

1. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Archipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. G. Matishov, S. Levitus, Eds., NOAA Atlas NESDIS 65, U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C., 2008. – 148 p. (In English)
2. Dashkevich L.V., Berdnikov S.V., Kulygin V.V. Many-Year Variations of the Average Salinity of the Sea of Azov // Water Resources, 2017, Vol. 44, No. 5, pp. 749-757. (In English)
3. Dashkevich L.V., Berdnikov S.V. 2009. [Mathematical modeling of the temperature regime and ice cover of the sea of Azov in the period 1920-2008] / Trudy Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra RAN, Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers:186-196. (In Russian)
4. Gidrometeorologiya i gidrohimija morej SSSR. T. V. Azovskoe more. 1991. [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the USSR. T. V. The Sea of Azov.] L.: Gidrometeoizdat, 237 p. (In Russian)
5. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827-2013) / Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhniy V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N.,

- Shatohin B.M., Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A., 2014. Matishov, G.G., Sherman, K., Levitus, S. (Eds.), NOAA Atlas NESDIS 78, 131 pp. (In English)
6. Matishov G.G., Matishov D.G., Gargopa Ju.M. 2008. [Climatogenic changes of ecosystems of the southern seas in the conditions of anthropogenic impacts] // Izvestija RAN. Serija geograficheskaja. 3 p. 26-34. (In Russian)
 7. Lur'e P.M., Panov V.D. 1999 [Impact of climate change on the hydrological regime of the river. Don at the beginning of the twenty-first century] Meteorologija i gidrologija. 4. p. 90–97. (In Russian)
 8. Hromov S.P., Mamontova L.N. 1974. Meteorologicheskij slovar' [Meteorological dictionary]. L: Gidrometeoizdat, 586 p. (In Russian)
 9. Dashkevich L.V. 2013. [Dynamics of the index of continentality in the Azov region for 100 years] Ecology. Economy. Informatics (8-13 sept. 2013) Materials of conference: V. 2: Geoinformacionnye nauki i jekologicheskoe razvitie: novye podhody, metody, tehnologii. Geoinformacionnye tehnologii i kosmicheskij monitoring, p.40-43. (In Russian)
 10. Gidrometeorologicheskij spravocnik Azovskogo morja [Hydrometeorological reference of the Sea of Azov] 1962. pod red. A.A. Aksenova L: Gidrometeorologicheskoe izd., 856 p. (In Russian)
 11. Matishov G.G., Matishov D.G., Gargopa Yu.M., Dashkevich L.V. 2010. [The freezing of the Sea of Azov and climate at the beginning of the XXI century]. Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra. 6 (1): 33-40. (In Russian)