

## Изменения структурных показателей и среднего значения поля солености вод Азовского моря

Е. О. Спиридонова<sup>1</sup>, Б. Н. Панов<sup>1, 2, ✉</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» (КГМТУ), Керчь, Россия

<sup>2</sup> Азово-Черноморский филиал («АзНИИРХ») ФГБНУ «ВНИРО», Ростов-на-Дону, Россия  
✉ panov\_bn@mail.ru

Поступила в редакцию 18.08.2020 г., после доработки – 28.10.2020 г.

**Цель.** Цель исследования – продолжить начатые в предыдущих работах исследования структуры поля солености по материалам океанографических съемок, выполненных после 2000 г. Интерес к исследованию структуры поля солености вод Азовского моря обусловлен аномальным увеличением солености после 2006 г.

**Методы и результаты.** По материалам 49 сезонных океанографических съемок, выполненных в Азовском море Азово-Черноморским филиалом ВНИРО («АзНИИРХ») с 2001 по 2016 г. рассчитаны: радиусы области концентрации пространственной корреляционной функции поля в меридиональном и зональном направлениях для поверхностного и придонного слоев (характеристика однородности поля); соотношения этих радиусов; средние для моря значения поля солености поверхностного и придонного слоев. Выполнен временной графический и парный корреляционный анализ рядов рассчитанных показателей. Средние значения меридиональных и зональных радиусов области концентрации пространственной корреляционной функции (42,5 и 47,1 км) свидетельствуют о наличии в море двух сравнительно обособленных зон, связанных с циркуляцией вод. Эти зоны формируются в условиях преобладающих в регионе восточных ветров. Средние значения указанных радиусов в придонном слое вод были приблизительно равны, в поверхностном – средние зональные радиусы превышали средние меридиональные. Весной и летом в придонном слое меридиональный радиус был больше зонального. В многолетней изменчивости в поверхностном слое присутствовал тренд увеличения меридионального радиуса, в придонном слое – уменьшения зонального радиуса. Эти тренды демонстрируют изменения характера водообмена в море от преобладания зонального к преобладанию меридионального переноса.

**Выводы.** С 2006 г. изменения структуры поля солености вод Азовского моря (с трендами уменьшения зональных радиусов области концентрации пространственной корреляционной функции и увеличения меридиональных радиусов) происходили в результате уменьшения притока речных вод, усиления водообмена с Керченским проливом и сопровождались повышением средней солености. Наиболее активный водообмен с Керченским проливом происходил в придонном слое весной и летом. Упреждающий сдвиг структурных характеристик поля на один и два года относительно его средних значений позволяет прогнозировать эти значения с двухлетней заблаговременностью.

**Ключевые слова:** Азовское море, поле солености, структура поля, пространственная корреляция, тенденции, водообмен, соленость

**Благодарности:** авторы выражают благодарность С. В. Жуковой за содействие проведению исследований.

**Для цитирования:** Спиридонова Е. О., Панов Б. Н. Изменения структурных показателей и среднего значения поля солености вод Азовского моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 305–317. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-305-317

# Changes of the Structure Indicators and the Salinity Field Average Value in the Sea of Azov

E. O. Spiridonova<sup>1</sup>, B. N. Panov<sup>1, 2, ✉</sup>

<sup>1</sup> Kerch State Maritime Technological University (KSMTU), Kerch, Russia

<sup>2</sup> Azov-Black Sea Branch ("AzNIIRKH") of FGBNU "VNIRO", Rostov-on-Don, Russia

✉ panov\_bn@mail.ru

*Purpose.* The work is aimed at continuing the started in the previous papers investigations of structure of the Azov Sea salinity field based on the oceanographic survey data collected since 2000. Interest in studying this parameter is conditioned by its anomalous increase after 2006.

*Methods and Results.* The data of 49 seasonal oceanographic surveys carried out in the Sea of Azov by the Azov-Black Sea Branch of "VNIRO" ("AzNIIRKH") from 2001 to 2016 permitted to calculate the following: the radii in the concentration region of the field spatial correlation function in the meridional and zonal directions for the surface and bottom layers (the characteristic of the field homogeneity); the ratio between these radii; the sea-average values of salinity field for the surface and bottom layers. The time graphical and the paired correlation analyses of the calculated indicators' series were done. The average values of the meridional and zonal radii of the concentration region of the spatial correlation function (42.5 and 47.1 km) testify presence of two relatively isolated zones in the sea related to the water circulation. These zones are formed under the conditions of the eastern winds dominating in the region. The average values of the above-mentioned radii in the near-bottom sea layer were approximately equal, whereas in the surface layer, the average zonal radii exceeded the meridional ones. In spring and summer, the meridional radius in the bottom layer surpassed the zonal one. Long-term variability shows that in the surface layer, the meridional radius values tend to increase, and in the bottom layer, the zonal radius ones – to decrease. These trends demonstrate a change in the nature of water exchange in the sea, namely from predominance of the zonal transport to that of the meridional one.

*Conclusions.* Since 2006, the changes in the structure of the Azov Sea water salinity field (trends towards decrease of the zonal radii and increase of the meridional ones in the concentration region of the field spatial correlation function) resulted from decrease in the river water inflow and increase of water exchange with the Kerch Strait, and were accompanied by growth of average salinity. Water exchange with the Kerch Strait in the bottom layer was the most active in spring and summer. The anticipatory shift of the field structural characteristics by 1 and 2 years relative to its average values makes it possible to forecast them with a two-year advance time.

**Keywords:** the Sea of Azov, salinity field, field structure, spatial correlation, tendency, water exchange, salinity

**Acknowledgements:** the authors are grateful to S.V. Zhukova for her assistance in the research.

**For citation:** Spiridonova, E.O. and Panov, B.N., 2021. Changes of the Structure Indicators and the Salinity Field Average Value in the Sea of Azov. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(3), pp. 282-293. doi:10.22449/1573-160X-2021-3-282-293

**Введение.** Уже второе десятилетие экосистема Азовского моря находится в состоянии однонаправленной трансформации, вызванной аномально продолжительным и значительным ростом солености морской воды, более выраженным, чем в период осолонения 1970-х гг. [1, с. 14]. После аномально низкого среднего годового значения солености моря в 2006 г. (9,63 ‰ без учета Таганрогского залива) наблюдается устойчивое увеличение этой характеристики (до аномально высокого значения 13,99 ‰ в 2016 г.).

При повышении солености вод в 1973–1979 гг. было отмечено снижение первичной продукции вод в 2–3 раза, общей биомассы зоопланктона – в 2,5–3,2 раза; уловы рыб, принадлежащих к солонатоводному комплексу, в этот

период снижались, а уловы морских рыб возрастали [2, с. 164–165]. От изменений в экосистеме моря пострадали проходные и придонные виды рыб: осетровые, лещ, рыбец, шемая, судак, сельдь, тарань, бычки [3, с. 91; 3, с. 102; 4, с. 119–121].

В экосистемных оценках состояния Азовского моря средняя соленость моря используется как ключевая характеристика. Этот показатель определяется как средневзвешенное значение средней солености 13 районов моря. Таким образом, при расчете значений средней солености вод моря учитывается изменчивость структуры поля солености. Средние для моря в целом и для каждого из районов в отдельности значения солености связаны между собой в различной степени и иногда имеют разнонаправленные тренды изменений [5, с. 13–15; 6, с. 68], что осложняет анализ и моделирование структуры поля.

Структура поля солености Азовского моря формируется под влиянием изменчивости компонентов водного баланса моря в межгодовых и сезонных масштабах. Речной сток является основной составляющей водного баланса моря, обеспечивающей его относительно низкую соленость. Другими составляющими баланса являются осадки, испарение, а также водообмен с Черным морем через Керченский пролив.

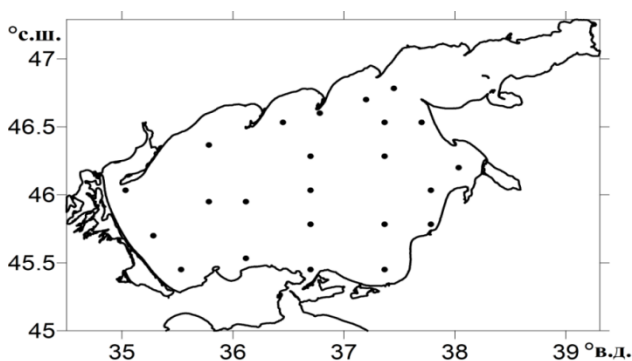
В результате действия указанных факторов в море формируются крупномасштабные, постоянно присутствующие фронтальные зоны. Периодически появляются малые фронтальные зоны у пролива Тонкого и в районах устьев малых рек. Центральный район моря занимает достаточно однородная водная масса, которая характеризуется незначительной внутригодовой изменчивостью солености [7, с. 233–234]. Структура поля солености постоянно трансформируется циркуляцией вод, в том числе и вызванной сгонно-нагонными ветрами [8, с. 220–221; 9, с. 58–62].

Изучению фронтогенеза солености вод в Азовском море был посвящен ряд экспедиций Южного научного центра Российской академии наук в 2005–2007 гг. Исследования показали значительное разнообразие фронтогенеза и динамику количественных оценок [10, с. 10–11, с. 15]. Существенную роль в длительном процессе изменения солености играют водность рек, антропогенное изъятие речного стока и водообмен в Керченском проливе [11, с. 63–89; 12, с. 16–17].

Структура поля солености Азовского моря исследовалась нами ранее [13, с. 152–158] по материалам океанографических съемок 1992–2003 гг., в период распреснения. В качестве характеристик горизонтальной структуры поля солености использовались радиусы области концентрации пространственной корреляционной функции поля (далее – радиусы ОК ПКФ) в меридиональном и зональном направлениях. Эти характеристики лишены инерционных свойств средних значений солености вод моря и свидетельствуют о значительной изменчивости структуры поля солености.

С учетом того, что в последние два десятилетия наблюдаются аномально высокие и низкие средние годовые значения солености вод Азовского моря, нам представляется целесообразным продолжить начатые исследования структуры ее поля по материалам океанографических съемок, выполненных после 2000 г.

**Материалы и методы.** Для расчета характеристик поля солёности Азовского моря были использованы материалы 49 весенних (апрель), летних (июль – август) и осенних (октябрь) океанографических съёмок, выполненных по стандартной сетке (рис. 1) Азово-Черноморским филиалом ВНИРО («АзНИИРХ») с 2001 по 2016 г. (всего 1101 станция). Ежегодно выполнялось три съёмки. Летом 2001 г. было выполнено две съёмки (данные июльской съёмки в определении средних годовых значений и в корреляционном анализе не учитывались). В 2003 и 2016 гг. весенние съёмки не выполнялись, но в определении средних годовых значений солёности их отсутствие частично компенсируется материалами съёмки, выполненной в эти годы дополнительно в июле. Продолжительность выполнения съёмки моря (без Таганрогского залива) составляла от 7 до 12 сут. Пробы воды для определения солёности отбирались батометрами из метрового поверхностного и придонного слоев. Солёность воды определялась аргентометрическим титрованием (по хлорности) с точностью до 0,01 ‰ с экспертной проверкой результатов определений.



**Рис. 1.** Схема стандартных станций океанографического мониторинга Азовского моря, используемая в исследованиях «АзНИИРХ»

**Fig. 1.** Scheme of standard stations for oceanographic monitoring of the Sea of Azov used in the "AzNIIRKh" research

Значения средней солёности поверхностного и придонного слоев, а также общей средней солёности вод Азовского моря определялись без учета Таганрогского залива по общепринятой методике, рекомендованной в работе [14, с. 99], с учетом глубины и площади 10 районов.

В качестве характеристик горизонтальной структуры поля солёности по данным съёмок для поверхностного и придонного горизонтов рассчитывались радиусы ОК ПКФ в меридиональном и зональном направлениях ( $r_{\text{мер}}$ ,  $r_{\text{зон}}$ ). При наличии постоянной сетки станций эти статистические характеристики поля позволяют исследовать изменчивость размеров его однородности [15]. Для определения радиусов ОК ПКФ выполнялась оптимизация поля, рассчитывались корреляционные и структурные функции поля отклонений значений солёности в пределах сегмента поля шириной 20 км, перемещаемого в меридиональном и зональном направлениях на расстояние до 150 км. Значения указанных параметров выбирались исходя из среднего расстояния между станци-

ями и размеров Азовского моря. При выполнении расчетов использовались методика и алгоритм вычислений, рекомендованные в работе [16, с. 38–51],  $r_{\text{мер}}$  и  $r_{\text{зон}}$  определялись по значениям нормированных корреляционных функций, вычисленных для каждого из 14 интервалов (количество интервалов рассчитывается следующим образом:  $150 : 20 \cdot 2$ ) между расчетными точками, по формуле

$$r = \sum_{i=1}^{14} \left( (\rho_{i+1} - \rho_i) * \left( \frac{\mu_{i+1} + \mu_i}{2} \right) / \max |\mu_i| \right),$$

где  $\rho_i$  – расстояние между расчетными точками поля;  $\mu_i$  – нормированная корреляционная функция.

Радиусы ОК ПКФ, в отличие от традиционно используемых в оценках однородности поля радиусов пространственной корреляционной функции с заданным пороговым ее значением, являются характеристиками, сглаживающими вариационные особенности корреляционной функции. Мы полагаем, что их использование повышает эффективность анализа сезонной и многолетней изменчивости однородности поля.

Этот метод и радиусы ОК ПКФ применялись нами ранее в работе [13]. Поэтому, продолжая начатые исследования, мы взяли те же характеристики структуры поля солености вод Азовского моря. Кроме радиусов ОК ПКФ, определяли их отношение  $r_{\text{мер}}/r_{\text{зон}}$  (далее – показатель однородности  $q$ ).

Таким образом, в работе представлен анализ изменений радиусов ОК ПКФ ( $r_{\text{мер. пов.}}$ ,  $r_{\text{зон. пов.}}$ ,  $r_{\text{мер. дно.}}$ ,  $r_{\text{зон. дно.}}$ ), рассчитанных для горизонтов каждой съемки и средних годовых; радиусов ОК ПКФ ( $r_{\text{мер. ср.}}$ ,  $r_{\text{зон. ср.}}$ ), средних для всей толщи вод; показателей однородности ( $q_{\text{пов.}}$ ,  $q_{\text{дно.}}$ ,  $q_{\text{ср.}}$ ); показателей средней солености морских вод ( $S_{\text{Аз.}}$ ,  $S_{\text{пов.}}$ ,  $S_{\text{дно.}}$ ) – для каждой съемки и средних годовых.

**Результаты исследований.** В рассматриваемый период радиусы ОК ПКФ в съемках изменялись от 16 до 68 км. Показатель  $q_{\text{ср}}$  изменялся более чем в три раза. Статистически достоверные связи изменений  $r_{\text{мер}}$  и  $r_{\text{зон}}$  (по горизонтам и средних для всей толщи вод значений) выявлены не были.

Средние по глубине значения меридиональных и зональных радиусов (42,5 и 47,1 км) сравнительно близки друг к другу с некоторым преобладанием зональной составляющей ( $q_{\text{ср}} = 0,93$ ). Эти размеры свидетельствуют о наличии в море двух (приблизительно одинаковых по размеру) сравнительно обособленных зон, связанных с циркуляцией вод [7, с. 356–358; 9, с. 59], формирующейся в условиях преобладающих в регионе Азовского моря восточных, северо-восточных и южных ветров [7, с. 62]. Это указывает на адекватность исследуемых характеристик структуры поля солености процессам, формирующим поле.

В связи с небольшой длиной исследуемого ряда сезонных характеристик их средние значения (табл. 1) имеют достаточно широкие доверительные интервалы. Тем не менее следует отметить, что значения средних зональных радиусов в поверхностном слое заметно превышают значения средних меридиональных радиусов. В придонном слое это превышение не велико, а среднее отношение радиусов в придонном слое даже незначительно больше 1.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Средние сезонные значения радиусов ОК ПКФ ( $r_{\text{мер}}, r_{\text{зон}}$ ), км,  
и показателей однородности ( $q$ ) поля солености вод Азовского моря  
в 2001–2016 гг.**

**Seasonal values of the radii of the concentration region of the spatial  
correlation function ( $r_{\text{mer}}, r_{\text{zon}}$ ), km, and the uniformity indicators ( $q$ )  
of the Azov Sea salinity field in 2001–2016**

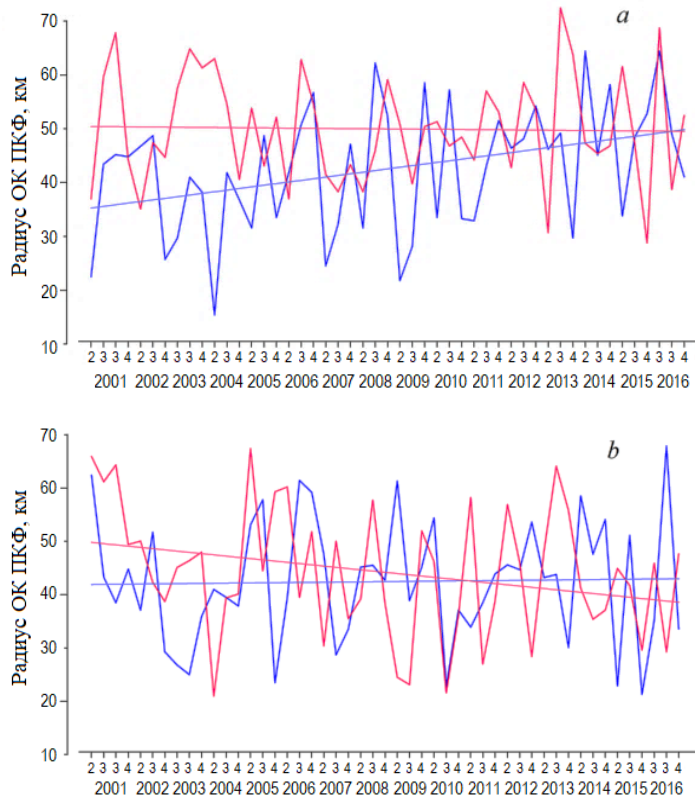
| Показатель / Indicator                         | Весна / Spring   | Лето / Summer    | Осень / Autumn   |
|--|------------------|------------------|------------------|
| $r_{\text{мер. пов}} / r_{\text{mer. surf}}$   | $35,22 \pm 6,75$ | $46,31 \pm 5,05$ | $44,66 \pm 5,28$ |
| $r_{\text{зон. пов}} / r_{\text{zon. surf}}$   | $45,31 \pm 5,12$ | $52,82 \pm 4,95$ | $49,83 \pm 4,22$ |
| $r_{\text{мер. дно}} / r_{\text{mer. bottom}}$ | $46,11 \pm 5,12$ | $42,33 \pm 5,23$ | $39,11 \pm 5,31$ |
| $r_{\text{зон. дно}} / r_{\text{zon. bottom}}$ | $46,73 \pm 7,60$ | $42,78 \pm 6,01$ | $42,92 \pm 4,51$ |
| $q_{\text{пов}} / q_{\text{surf}}$             | $0,83 \pm 0,20$  | $0,90 \pm 0,11$  | $0,93 \pm 0,16$  |
| $q_{\text{дно}} / q_{\text{bottom}}$           | $1,12 \pm 0,30$  | $1,06 \pm 0,17$  | $0,96 \pm 0,17$  |
| $r_{\text{мер. ср}} / r_{\text{mer. mean}}$    | $40,85 \pm 4,18$ | $44,30 \pm 4,05$ | $41,88 \pm 4,81$ |
| $r_{\text{зон. ср}} / r_{\text{zon. mean}}$    | $46,02 \pm 3,70$ | $47,80 \pm 4,59$ | $46,37 \pm 3,78$ |
| $q_{\text{ср}} / q_{\text{mean}}$              | $0,91 \pm 0,12$  | $0,95 \pm 0,10$  | $0,93 \pm 0,13$  |

Наибольшие значения радиусов ОК ПКФ в поле солености поверхностного слоя отмечаются летом. Показатель  $q_{\text{пов}}$  от весны к осени увеличивается, а  $q_{\text{дно}}$  – уменьшается. Причем весной и летом в поверхностном слое преобладает зональный водообмен, а в придонном – меридиональный. Оценить характер временной изменчивости и связи исследуемых характеристик позволяет ряд графиков, представленных на рис. 2–5.

В поверхностном слое в течение первых 15 съемок (до 2006 г.) зональный радиус заметно превышал меридиональный, позднее их значения становятся приблизительно равными. В придонном слое незначительное превышение зонального радиуса над меридиональным наблюдается в течение первых 10 съемок (до 2004 г.), а в течение последних 9 съемок (2014–2016 гг.) меридиональный радиус был больше зонального (рис. 2).

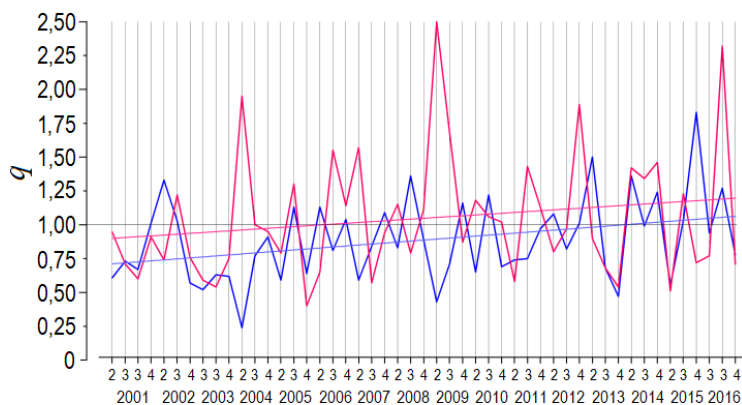
На графиках средней солености вод поверхностного и придонного слоев (рис. 4) видно, что именно с весны 2007 г. соленость придонного слоя начала заметно превышать поверхностную и это наблюдалось до осени 2013 г., когда соленость поверхностных и придонных вод стала приблизительно одинаковой.

Можно предположить, что явное преобладание меридионального переноса вод в придонном слое ( $q_{\text{дно}} > 1,5$ ) в съемках, выполненных весной 2004, 2007 и 2009 гг., летом 2006, 2009 и 2016 гг., осенью 2012 г. (рис. 5, а), определялось активным поступлением вод из Керченского пролива. Причем активная адвекция соленых вод чаще проявлялась в структуре поля солености придонного слоя весной и летом (в периоды наибольшей плотностной стратификации вод Азовского моря).



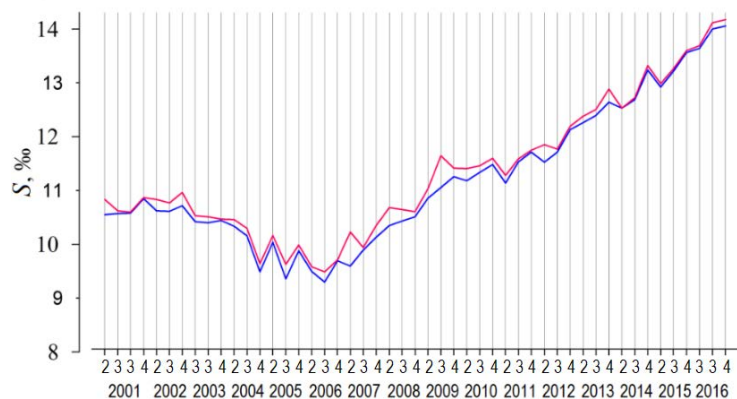
**Р и с. 2.** Изменения меридионального (синяя кривая) и зонального (красная кривая) радиусов ОК ПКФ на поверхности (*a*) и у дна (*b*) и их линейные тренды (по горизонтальной оси сезон выполнения съемки обозначен цифрой: 2 – весна; 3 – лето; 4 – осень)

**F i g. 2.** Changes in the meridional (blue curve) and zonal (red curve) radii of the concentration region of the spatial correlation function on the surface (*a*) and at the bottom (*b*), and their linear trends (on the horizontal axis, the seasons of a survey are indicated by the numbers: 2 – spring; 3 – summer; 4 – autumn)



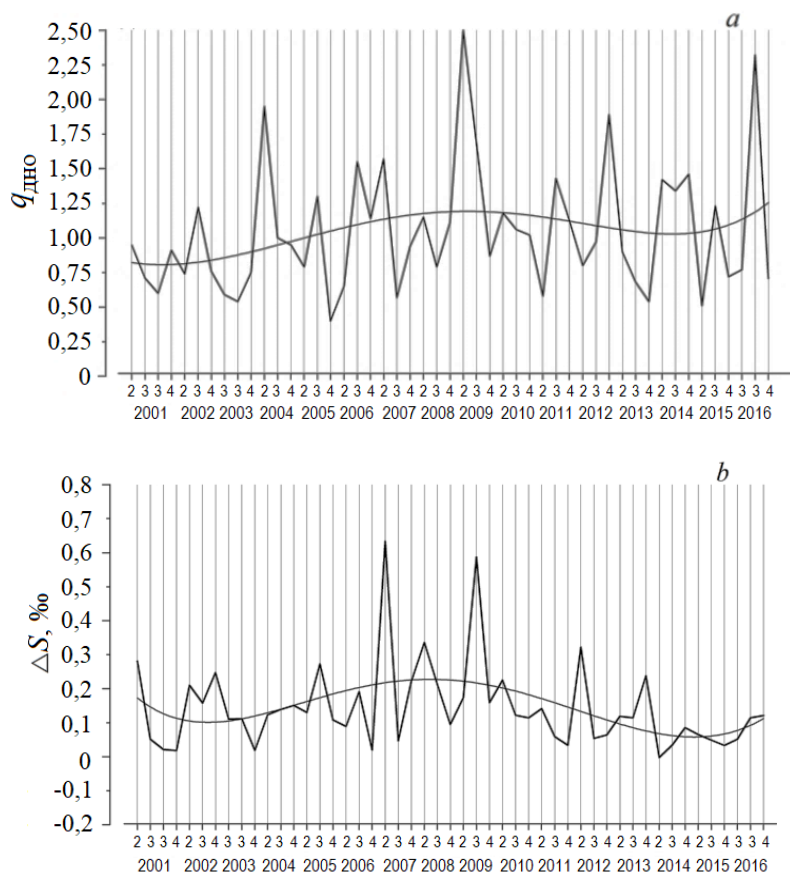
**Р и с. 3.** Изменения показателя однородности поля солёности ( $q$ ) на поверхности (синяя кривая) и у дна (красная кривая), а также их линейные тренды. Обозначения см. на рис. 2

**F i g. 3.** Changes in the index of the salinity field uniformity ( $q$ ) on the surface (blue curve) and at the bottom (red curve), as well as their linear trends. See designations in Fig. 2



**Р и с. 4.** Средняя соленость поверхностного (синяя кривая) и придонного (красная кривая) слоев вод Азовского моря. Обозначения см. на рис. 2

**Fig. 4.** Average salinity of the surface (blue curve) and bottom (red curve) layers of the Sea of Azov. See designations in Fig. 2



**Р и с. 5.** Изменения по данным съемок показателя  $q_{\text{дно}}$  (a) и разницы ( $\Delta S$ ) между придонной и поверхностной соленостью (b) с полиномиальным сглаживанием

**Fig. 5.** Surveys-derived changes of  $q_{\text{bottom}}$  indicator (a) and difference ( $\Delta S$ ) between the bottom and surface salinity (b) with polynomial smoothing



Этот механизм поступления черноморских вод в Азовское море может объяснить совпадение трендов (кривые полиномиальной аппроксимации) изменений разности солёности вод ( $\Delta S$ ) в придонном и поверхностном слоях (рис. 5, *b*) и показателя  $q_{\text{дно}}$  (рис. 5, *a*). Активизация притока солёных вод в придонном слое моря в течение 2005–2012 гг. увеличивала показатели  $\Delta S$  и  $q_{\text{дно}}$  (рис. 5) до формирования гомохалинной вертикальной структуры вод при средней солёности выше 12 ‰ (см. рис. 4). В 2013–2016 гг. поступление черноморских вод, по-видимому, продолжалось, но менее активно, не нарушая вертикальной халинной однородности вод. Указанные изменения проявились в тенденциях снижения показателей  $\Delta S$  и  $q_{\text{дно}}$  в эти годы. В конце исследуемого периода (летом 2016 г.) был зафиксирован сезон резкого увеличения  $q_{\text{дно}}$  (см. рис. 5, *a*), что отразилось и на увеличении солёности вод в придонном слое в этом сезоне (см. рис. 4 и 5, *b*).

Интересно, что в экстремальных точках полиномиальных аппроксимаций кривая значений  $q_{\text{дно}}$  примерно на три съёмки (то есть на год) опережает изменения  $\Delta S$ .

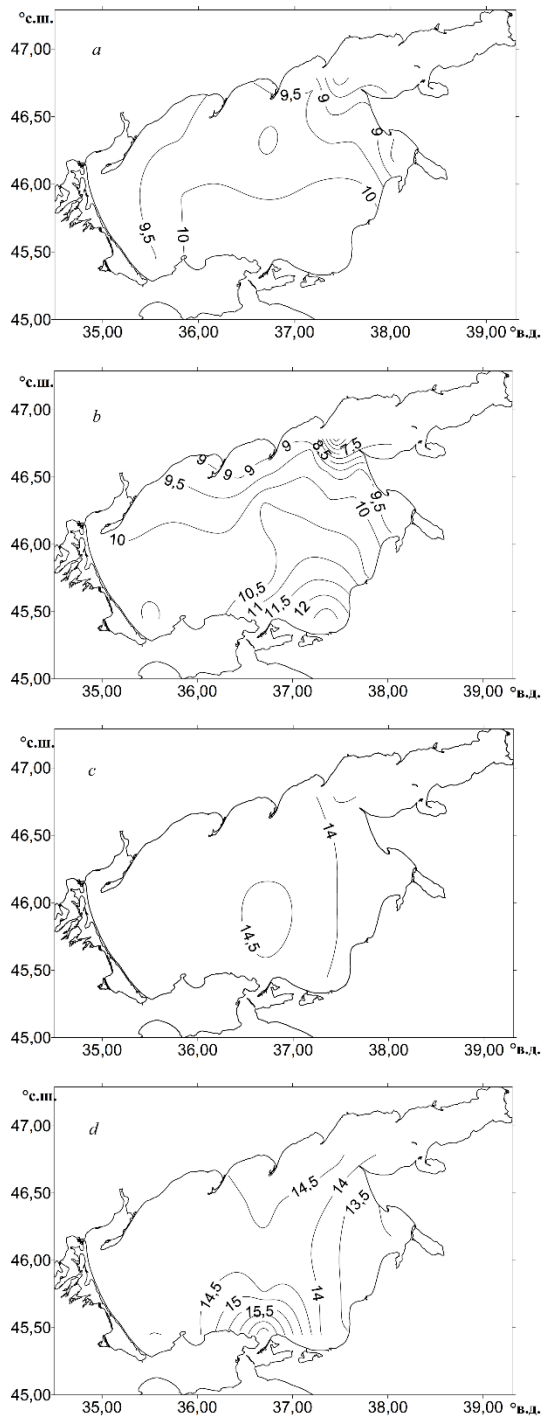
В качестве примера особенностей распределения солёности вод в съёмках с аномально высокими и низкими значениями  $q_{\text{ср}}$  (табл. 2) в период опреснения (2005 г.) и осолонения (2016 г.) Азовского моря на рис. 6 представлены поля солёности в придонном слое, в котором разница между  $r_{\text{мер}}$  и  $r_{\text{зон}}$  выражена наиболее ярко.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Показатели структуры поля солёности в придонном слое вод Азовского моря для съёмок с экстремальными значениями  $q_{\text{ср}}$  в периоды опреснения и осолонения вод**  
**Indicators of the salinity field structure in the bottom layer of the Sea of Azov waters for the surveys with extreme values of  $q_{\text{mean}}$  during the periods of desalination and salinization of sea waters**

| Период съёмки /<br>Survey period   | $r_{\text{мер.дно}} / r_{\text{mer. bottom}}$ | $r_{\text{зон.дно}} / r_{\text{zon. bottom}}$ | $q_{\text{дно}} / q_{\text{bottom}}$ | $q_{\text{ср}} / q_{\text{mean}}$ |
|------------------------------------|---|---|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Июль 2005 г. /<br>July, 2005       | 57,8  | 44,5  | 1,30                                 | 1,23                              |
| Октябрь 2005 г. /<br>October, 2005 | 23,5  | 59,3  | 0,40                                 | 0,50                              |
| Август 2016 г. /<br>August, 2016   | 67,9  | 29,3  | 2,32                                 | 1,74                              |
| Октябрь 2016 г. /<br>October, 2016 | 33,6  | 47,6  | 0,71                                 | 0,76                              |

Основными особенностями этих полей является наличие повышенных горизонтальных градиентов солёности в западной и восточной частях моря в июле 2005 г., северной и южной – в октябре 2005 г., восточной – в августе 2016 г. и южной – в октябре 2016 г. Это указывает на более активное распространение вод в придонном слое в меридиональном направлении летом, а в зональном направлении – осенью, что и определяет соответственно высокие и низкие значения поля  $q$ .



**Р и с. 6.** Поля солёности придонного слоя вод Азовского моря по материалам съёмок с аномально высокими и низкими значениями  $q_{\text{ср}}$  в период опреснения: июль (a), октябрь (b) 2005 г. – и осолонения: август (c), октябрь (d) 2016 г.

**Fig. 6.** Salinity fields of the Azov Sea bottom layer from the surveys data with abnormally high and low  $q_{\text{mean}}$  values during desalination: July (a), October (b), 2005 and salinization: August (c), October (d), 2016

Зависимость увеличения солености морских вод от активизации меридионального водообмена подтверждается результатами парного линейного корреляционного анализа исследуемых сезонных характеристик поля солености (табл. 3). Этот анализ позволил выявить статистически значимые связи структурных характеристик ( $r_{\text{мер. пов.}}$ ,  $q_{\text{пов}}$  и  $q_{\text{ср}}$ ) со значениями средней солености вод Азовского моря в рамках сезонной изменчивости.

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Коэффициенты корреляции (с достоверностью корреляции  $\geq 0,95$ ) характеристик поля солености вод Азовского моря в 48 съемках 2001–2016 гг.**  
**Correlation coefficients (with correlation reliability  $\geq 0,95$ ) of the characteristics of the Azov Sea salinity field based on 48 surveys in 2001–2016**

| Характеристики /<br>Characteristics           | $S_{\text{Аз}} / S_{\text{Az}}$ | $S_{\text{пов}} / S_{\text{surf}}$ | $S_{\text{дно}} / S_{\text{bottom}}$ |
|---|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| $r_{\text{мер. пов.}} / r_{\text{mer. surf}}$ | 0,32                            | 0,33                               | 0,30                                 |
| $q_{\text{пов}} / q_{\text{surf}}$            | 0,29                            | 0,29                               | 0,28                                 |
| $q_{\text{ср}} / q_{\text{mean}}$             | 0,31                            | 0,30                               | 0,31                                 |

Т а б л и ц а 4  
T a b l e 4

**Коэффициенты корреляции (с достоверностью корреляции  $\geq 0,95$ ) средних годовых характеристик поля солености вод Азовского моря в 2001–2016 гг.**  
**Correlation coefficients (with correlation reliability  $\geq 0,95$ ) of the average annual characteristics of the Azov Sea salinity field in 2001–2016**

| Характеристики /<br>Characteristics           | $S_{\text{Аз}} / S_{\text{Az}}$ | $S_{\text{пов}} / S_{\text{surf}}$ | $S_{\text{дно}} / S_{\text{bottom}}$ |
|---|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Сдвиг 0 / 0 Shift                             |                                 |                                    |                                      |
| $r_{\text{мер. пов.}} / r_{\text{mer. surf}}$ | 0,56                            | 0,56                               | 0,55                                 |
| $q_{\text{пов}} / q_{\text{surf}}$            | 0,55                            | 0,55                               | 0,55                                 |
| $q_{\text{ср}} / q_{\text{mean}}$             | 0,51                            | 0,50                               | 0,50                                 |
| Сдвиг 1 год / 1-year shift                    |                                 |                                    |                                      |
| $r_{\text{мер. пов.}} / r_{\text{mer. surf}}$ | 0,57                            | 0,56                               | 0,58                                 |
| $q_{\text{пов}} / q_{\text{surf}}$            | 0,66                            | 0,65                               | 0,67                                 |
| $q_{\text{ср}} / q_{\text{mean}}$             | 0,50                            | 0,51                               | 0,52                                 |
| Сдвиг 2 года / 2-year shift                   |                                 |                                    |                                      |
| $r_{\text{мер. пов.}} / r_{\text{mer. surf}}$ | 0,65                            | 0,65                               | 0,65                                 |
| $q_{\text{пов}} / q_{\text{surf}}$            | 0,61                            | 0,61                               | 0,62                                 |
| $q_{\text{ср}} / q_{\text{mean}}$             | 0,59                            | 0,58                               | 0,58                                 |
| Сдвиг 3 года / 3-year shift                   |                                 |                                    |                                      |
| $r_{\text{мер. пов.}} / r_{\text{mer. surf}}$ | 0,49                            | 0,49                               | 0,48                                 |
| $q_{\text{пов}} / q_{\text{surf}}$            | –                               | –                                  | –                                    |
| $q_{\text{ср}} / q_{\text{mean}}$             | –                               | –                                  | –                                    |

Результаты парной линейной корреляции средних годовых значений исследуемых характеристик поля солёности (табл. 4) указывают на наиболее тесную их связь со структурными характеристиками при упреждающем сдвиге структурных показателей на 1 и 2 года относительно значений средней солёности вод, что позволяет использовать эти связи в прогнозировании средней солёности моря с заблаговременностью до двух лет.

Следовательно, рост солёности вод в рамках сезонной и межгодовой изменчивости связан с активизацией меридионального водообмена в море (прежде всего, в поверхностном слое) и ослаблением зонального, что обеспечивало после 2006 г. интенсификацию поступления в Азовское море вод из Керченского пролива.

**Выводы.** С 2001 по 2016 г. средние значения меридиональных и зональных радиусов ОК ПКФ (42,5 и 47,1 км) были сравнительно близки с некоторым преобладанием зональной составляющей и свидетельствовали о наличии в море двух сравнительно обособленных зон, связанных с циркуляцией вод. В придонном слое средние значения зональных и меридиональных радиусов также были приблизительно равны, в поверхностном – зональные радиусы превышали меридиональные, что свидетельствует о влиянии речного стока.

Весной и летом в поверхностном слое вод был больше зональный радиус, а в придонном – меридиональный, что указывает на усиление влияния в эти сезоны водообмена с Таганрогским заливом в поверхностном слое и с Керченским проливом в придонном. Тренды многолетних изменений радиусов ОК ПКФ поля солёности демонстрируют в поверхностном слое увеличение меридионального радиуса, в придонном – уменьшение зонального.

Изменения структуры поля солёности (с трендами уменьшения зональных радиусов ОК ПКФ и увеличения меридиональных радиусов) связаны с повышением средней солёности вод моря после 2006 г. и, вероятно, являются следствием уменьшения притока речных вод и усиления водообмена акватории собственно Азовского моря с Керченским проливом.

Тесная связь средних годовых значений структурных показателей поля солёности при их упреждающем сдвиге на 1 и 2 года относительно значений средней солёности вод моря позволяет использовать эти связи в прогнозировании средней солёности моря с заблаговременностью до двух лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX – начале XXI вв. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 2. С. 7–19. doi:10.47921/2619-1024\_2019\_2\_2\_7
2. Дроздов В. В. Особенности многолетней динамики экосистемы Азовского моря под влиянием климатических и антропогенных факторов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. № 15. С. 155–176.
3. Бронфман А. М., Хлебников Е. П. Азовское море: основы реконструкции. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 270 с.
4. Бронфман А. М., Дубинина В. Г., Макарова Г. Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М. : Пищевая промышленность, 1979. 288 с.
5. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / Г. Г. Матишов [и др.]. М. : Наука, 2006. 304 с.

6. *Кочергин А. Т., Жукова С. В., Малыгин Е. Ю.* Межгодовая изменчивость солености и вертикальной термохалинной устойчивости в различных районах Азовского моря в летний период 1992–2016 гг. // Системы контроля окружающей среды. 2018. Вып. 131. С. 63–68. doi:10.33075/2220-5861-2018-1-63-68
7. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1 : Азовское море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь, 2009. 400 с.
8. Современная термохалинная структура вод Азовского моря / Н. Н. Дьяков [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. Вып. 14. С. 215–224.
9. *Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2017. 228 с.
10. Результаты морских научных исследований Южного научного центра Российской Академии Наук (ЮНЦ РАН) в Азовском море в 2003–2018 гг. Часть 1: Гидрология и гидрохимия / С. В. Бердников [и др.] // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 3. С. 7–19. doi:10.47921/2619-1024\_2019\_2\_3\_7
11. *Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Shiganova T. A.* The Sea of Azov // The Black Sea Environment / A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.). Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 63–89. (The Handbook of Environmental Chemistry ; vol. 5Q). doi:10.1007/698\_5\_091
12. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006 / G. Matishov [et al.] ; Eds. G. Matishov, S. Levitus. Washington, D.C. : U. S. Government Printing Office, 2006. 103 p. (NOAA Atlas NESDIS ; No. 59). CD-ROM.
13. *Панов Б. Н., Спиридонова Е. О.* Некоторые закономерности формирования поля солености Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 152–158.
14. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3 : Азовское море. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 217 с.
15. *Андрющенко А. А., Беляев В. И.* Изучение статистической структуры полей температуры и солености Черного моря применительно к задаче их объективного анализа // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1972. Т. 8, № 9. С. 1004–1008.
16. *Андрющенко А. А., Беляев В. И.* Математическое обеспечение расчетов океанографических полей по данным наблюдений (Алгоритмы и программы). Киев : Наукова думка, 1978. 134 с.

*Об авторах:*

**Спиридонова Елена Олеговна**, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» (КГМТУ) (298309, Россия, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1029-6565**, **Author ID: 949714**, **Scopus Author ID: 6603687318**, helena.spyrydonova@gmail.com

**Панов Борис Николаевич**, ведущий научный сотрудник, Азово-Черноморский филиал («АзНИИРХ») ФГБНУ «ВНИРО» (Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону ул. Береговая 21в), доцент ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет» (КГМТУ) (298309, Россия, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82), кандидат географических наук, старший научный сотрудник, **ORCID ID: 0000-0001-6875-8713**, **Author ID: 855131**, **Scopus Author ID: 6701762844**, panov\_bn@mail.ru