ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА АЗОВСКОГО МОРЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЕТРОВОЙ СИТУАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А.Л. Чикин¹, А.В. Ключенков¹, Л.Г. Чикина²

¹ Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

chikin@sfedu.ru, geo@ssc-ras.ru, lchikina@sfedu.ru

Аннотация. В статье приводятся расчеты изменения солёности Таганрогского залива в зависимости от силы и направления ветра, выполненные на основе данных непрерывных измерений термосалинографом и с помощью математического моделирования. Предложен алгоритм учета ветровой ситуации при слабоизменчивом речном стоке реки Дон и выполнена оценка изменчивости значений солёности по районам Таганрогского залива.

Ключевые слова: солёность воды, Таганрогский залив, вычислительный эксперимент, статистический анализ.

Для Азовского моря характерна значительная пространственная неоднородность солёности. На участке от дельты Дона до Керченского пролива солёность возрастает от 0.5–0.7‰ до 13–14‰. Самый резкий градиент солёности до 10‰ закономерно формируется в эстуарном Таганрогском заливе. Здесь происходит сложное взаимодействие донских речных и трансформированных морских вод [1]. Таганрогский залив занимает особое место в экосистеме Азовского моря как эстуарный водоём, важнейшими особенностями которого помимо формирования в его пределах зоны смешения речных и морских вод являются малые глубины и формирование зоны хорогалиникума. Исследование устойчивости зон с экологически значимым диапазоном солёности в зависимости от ветровой обстановки стока Дона представляется весьма актуальной задачей.

Подготовка данных для проведения расчетов. Использование математической модели распределения солёности приводит к необходимости установления взаимно однозначного соответствия между координатами наблюдаемых данных, полученных в экспедициях, и индексами конечно-разностной сетки. На всей акватории Азовского моря, включая Таганрогский залив, была построена прямоугольная сетка 523×341 с шагами по горизонтали 660 м и вертикали 685 м [2]. Ячейка с индексом (1;1) была привязана к координате 45.2780°с.ш. и 34.7977°в.д. Шаги по горизонтали и вертикали, выраженные в радианах, были равны соответственно 0,0087684 и 0,0060088.

Для исследования пространственного распределения температуры и солёности морской воды ходе рейсов НИС «Денеб» в Азовское море и Таганрогском заливе проводилась непрерывная запись

данных о состоянии среды термосолёнографом SBE 21 SEACAT [3] с дискретностью 10 минут по ходу движения судна.

Были обработаны данные 10 экспедиций, проведенных в период с апреля по декабрь 2017 года (Табл. 1). Для каждой из проведенных экспедиций был оценен пресный сток Дона. Установлено, что во все исследованные периоды он колебался в узком диапазоне и характеризовался пониженными расходами в пределах 360–592 м³/с.

Составленная программа позволяет по траектории движения судна в зависимости от координат и полученных термосолёнографом значений задавать поля солёности в ячейках разностной сетки. Полученные поля солёности используются в дальнейших расчетах в качестве начальных данных. Кроме того, перенос данных на конечно-разностную сетку позволяет проводить более глубокий анализ наблюдений. Программа написана на языке FORTRAN и может быть реализована как на персональном компьютере, так и на высокопроизводительных вычислительных системах.

Сравнение рассчитанной и фактической траектории движения судна, показывает хорошее их совпадение (Рис. 1). Аналогичные траектории были составлены для всех исследуемых периодов наблюдений.

Так как данные термосолёнографа расположены вдоль одной линии, то поле солёности строилось с помощью экстраполяции в предположении однородности его вдоль нормали к траектории движения судна.

Расчет солёности проводится с помощью математической модели, основанной на конечно-разностной аппроксимации входящих в нее уравнений движения и переноса [4]. Результаты расчетов сравнивались с наблюдаемыми значениями солёности, полученными с помощью профилировщика. Относительные погрешности приведены в (Табл. 1).

Таблица 1
Даты проведения экспедиций
и погрешности расчетов

ID	Период	Погрешность, %
1.	16.04–20.04.2017	5.71
2.	11.05–16.05.2017	0.57
3.	09.06–18.06.2017	3.07
4.	24.06–06.07.2017	1.32
5.	25.07–30.07.2017	1.18
6.	07.08–15.08.2017	2.94
7.	09.09–22.09.2017	1.44
8.	06.11–22.11.2017	2.15
9.	26.11–06.12.2017	2.0
10.	12.12–24.12.2017	9.48

Данные о ветровой ситуации на расчетные периоды были взяты с сайта RP5 (<https://rp5.ru>). Из скачанных архивов были выбраны данные по направлению ветра и его скорости. В расчетах использовались данные с метеостанций Таганрог, Ейск, Мариуполь, Бердянск, Приморско-Ахтарск. Были обработаны данные по ветру за исследуемые периоды времени (Табл. 1):

Задание ветра (давления) во внутренних точках проводится следующим образом. Пусть известна скорость ветра (или атмосферное давление $p_1, p_2, \dots, p_6$) на береговых метеостанциях ($S_1, S_2, \dots, S_6$), расположенных вокруг исследуемого водоема (Рис. 2).

А

Б

Рис. 1. Траектории судна и данные термосоленографа на конечно-разностной сетке (А) и на океанологической карте (Б), построенные по материалам рейса в период с 25.07.2017 по 30.07.2017.

Рис. 2. Схема расчета приземного ветра по данным береговых метеостанций

Для каждой текущей точки M находим три ближайших метеостанции, например, $S_1(x_1, y_1)$, $S_2(x_2, y_2)$, $S_3(x_3, y_3)$ и строим плоскость $Ax + By + Cz + D = 0$, проходящую через три точки, соответствующих этим трем

метеостанциям. Аппликатами этих точек являются значения координат скорости ветра или величина давления (P_1, P_2, P_3).

Значения коэффициентов вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} A &= (y_2 - y_1)(p_3 - p_1) - (y_3 - y_1)(p_2 - p_1) \\ B &= -(x_2 - x_1)(p_3 - p_1) - (x_3 - x_1)(p_2 - p_1) \\ C &= (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \\ D &= -(Ax_1 + By_1 + Cp_1) \end{aligned}$$

Значения соответствующего метеорологического параметра P в текущей точке будет лежать на построенной плоскости:

$$P = -\frac{A \cdot i + B \cdot j + D}{C}.$$

После этого надо провести осреднение полученных значений по соседним точкам, т.к. две соседние точки могут лежать в разных плоскостях с большим разрывом значений.

Данный алгоритм используется при создании файлов для статистической обработки наблюдаемых значений солёности, когда необходимо знать

направление и силу ветра на линии следования профилировщика.

Статистический анализ. Для каждого из двенадцати периодов наблюдения была создана таблица значений солёности, соответствующих началу и концу периода. В эту же таблицу были внесены сеточные координаты точки наблюдения, W_x , W_y – составляющие вектора скорости ветра в точке наблюдения, а также $W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$ – скорость ветра в точке наблюдения. В таблицу добавили переменную «Район», характеризующую принадлежность точки наблюдения одному из трех районов – VII, VIII, IX, на которые традиционно разделяют Таганрогский залив при океанологическом районировании [5]. Отметим, что VII район расположен между косой Долгая и косой Ейская, VIII район расположен между Ейской косой и Чумбур-Косой, а IX район (иногда называемый районом XIIIa) расположен между Чумбур-Косой и аванделтой Дона.

Исследовалась зависимость абсолютной солёности (S), а также разности значений солёности в конце и начале периода наблюдений (dS) от ветровой ситуации. Всего было рассмотрено 10 периодов, соответствующих экспедициям на НИС «Денеб». Было принято следующее предположение: корреляционная связь между параметрами считалась сильной при $r \geq 0,6$, средней при $0,4 < r < 0,6$, слабой при $r \leq 0,4$.

Корреляционный анализ показал, что отсутствие сильной корреляции в целом по заливу не означает отсутствие сильной корреляции в отдельных районах. В то же время корреляционная зависимость S , и dS от ветра различная для времен года. Так за весь период 2017 года корреляционная зависимость практически отсутствует.

Весной и особенно осенью усиливается зависимость разности значений солёности dS от ветра. Летом эта зависимость отсутствует, зато велика зависимость самой солёности S от ветра, особенно от его направления. Действительно, ветра восточного направления понижают солёность ($r = -0,75 < 0$), а ветра южного направления солёность повышают ($r = 0,83 > 0$).

Таблица 2
Наиболее частые значения скорости ветра и его румба

	Румб	Частота, %
Весь залив	В-ВЮВ	40
VII	ЮВ-ВЮВ	32
VIII	ЮВ-ВЮВ	49
IX	В	39

Однофакторный дисперсионный анализ по группирующей переменной «Район» дал следующий результат. Солёность S с уровнем значимости $p < 0,05$ дискриминирует все три района, что естественно,

Таблица 3
Основные характеристики для 1 и 4 квартилей по заливу в целом и отдельно по районам

1 квартиль						4 квартиль				
Таганрогский залив в целом										
	N	M	m	min	max	N	M	m	min	max
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S	174	6,13	0,23	0,61	12,67	175	9,16	0,21	1,51	13,91
Wx	174	-0,72	0,15	-5,35	2,94	175	-0,91	0,22	-7,87	3,39
Wy	174	0,03	0,11	-2,78	3,26	175	0,39	0,07	-2,01	2,62
W	174	2,21	0,08	0,00	5,35	175	2,82	0,12	0,00	7,99
IX район										
	N	M	m	min	max	N	M	m	min	max
S	60	10,16	0,14	7,97	12,79	60	11,17	0,13	9,33	13,91
Wx	60	-1,13	0,31	-5,35	2,94	60	-1,86	0,50	-7,87	3,39
Wy	60	0,12	0,10	-0,82	1,92	60	0,34	0,13	-2,01	1,62
W	60	2,48	0,16	0,77	5,35	60	3,97	0,25	1,61	7,99
VIII район										
	N	M	m	min	max	N	M	m	min	max
S	47	7,10	0,14	4,95	8,58	47	9,05	0,17	5,97	10,86
Wx	47	-1,37	0,24	-4,34	2,19	47	-0,43	0,33	-5,23	2,90
Wy	47	-0,50	0,11	-1,62	2,16	47	0,56	0,14	-1,30	2,18
W	47	2,05	0,16	0,77	4,42	47	2,43	0,12	1,58	5,23
VII район										
	N	M	m	min	max	N	M	m	min	max
S	68	3,33	0,22	0,61	7,37	68	5,47	0,27	1,04	9,26
Wx	68	-0,44	0,23	-3,16	2,57	68	-0,31	0,16	-2,57	2,07
Wy	68	0,43	0,23	-2,78	3,26	68	0,33	0,13	-1,28	2,70
W	68	2,52	0,14	0,00	4,15	68	1,67	0,07	0,00	2,78

так как разбиение на эти районы и было проведено с учетом различной солености. Разность значений солености dS дискриминирует только районы VII и IX. Переменные W и W_x также дискриминируют все районы, причем средние значения W_x везде отрицательны, что говорит о преобладании ветров восточного направления в рассматриваемые периоды наблюдений. Ниже (Табл. 2) приведены наиболее частые направления ветра для залива в целом и по районам отдельно. Наиболее частое значение скорости для всех направлений составляло 1,5–2,5 м/с.

Средняя скорость ветра при переходе от района IX к району VII уменьшается. Средние значения вертикальной составляющей скорости W_y между районами существенно не отличаются. Их положительные значения говорят о преобладании ветров южного направления в рассматриваемые периоды наблюдений.

Наибольшие (положительные) и наименьшие (отрицательные) значения изменения солености dS расположены в четвертом (0,50) и первом (-1,24) ее квартилях. Во втором и третьем квартилях расположены значения dS с меньшими колебаниями. Средние значения переменных S , W_x , W_y , W для квартильных значений dS в целом по заливу и отдельно по районам приведены в (Табл. 3)

Работа выполнена в рамках проекта «Современное состояние и многолетняя изменчивость прибрежных экосистем южных морей России» (№ госрегистрации 01201363187). и в рамках реализации ПФИ Президиума РАН 1.49 «Взаимодействие физических, химических и биологических процессов в Мировом океане» (ГЗ ЮНЦ РАН, № проекта АААА-А18-118011990307-8).

Список литературы

1. Матишов Г.Г. 2015. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // Вестник Южного научного центра. 11(1): 6–15.
2. Чикин А.Л. 2005. Об одном из методов расчета параметров течений в водоемах с большой неоднородностью глубин. Водные ресурсы. 32 (1): 55–60.
3. SBE 21 SeaCAT Thermosalinograph [Электронный ресурс] / адрес доступа
4. <http://www.seabird.com/sbe21-seacat-thermosalinograph> (дата обращения 10.07.2018)
5. Матишов Г.Г., Архипова О.Е., Чикин А.Л. 2008. Модельный подход к восстановлению пропущенных данных по солености на примере Азовского моря // ДАН. 420 (5): 687–690.
6. Симов В.Г. Гидрология устьев рек Азовского моря. – М.: Гидрометеиздат. 1989. – 327 с.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE RESPONSE OF THERMOCHALIN STRUCTURE OF THE TAGANROGA BAY OF THE AZOV SEA TO CHANGE THE WIND SITUATION BY THE MATHEMATICAL MODEL

A.L.Chikin¹, A.V.Kleshchenkov¹, L.G.Chikina²

¹ Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences

² Southern Federal University

chikin@sfnedu.ru, geo@ssc-ras.ru, lchikina@sfnedu.ru

Abstract. The article presents the calculations of the change of salinity of the Taganrog Bay depending on the wind force and direction, based on the data of continuous measurements by thermosalinograph and mathematical modeling. An algorithm for taking into account the wind situation under a weakly variable river runoff of the Don River is proposed and an estimation of the variability of the salinity values for the areas of Taganrog Bay.

Key words: salinity of water, Taganrog Bay, computational experiment, statistical analysis.

References

1. *Matishov G.G.* 2015. [The Kerch strait and the Don delta: the security of communications and population] *Kerchenskij proliv i del'ta Dona: bezopasnost' kommunikatsij i naseleniya*. Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra. 11(1): 6–15. In Russian.
2. *Chikin A.L.* 2005. [On one of the methods for calculating the parameters of currents in water bodies with a large inhomogeneity of depths] *Ob odnom iz metodov rascheta parametrov techenij v vodoemakh s bol'shoj neodnorodnost'yu glubin*. Vodnye resursy. (Water resources). 32(1): 55–60. In Russian.
3. SBE 21 SeaCAT Thermosalinograph / Available at: <http://www.seabird.com/sbe21-seacat-thermosalinograph> (accessed 10.07.2018)
4. *Matishov G.G., Arkhipova O.E., Chikin A.L.* Model Approach to Restoration of Salinity Data: Evidence from the Sea of Azov // *Doklady Earth Sciences*, 421(5): 800–803..(In English)
5. *Simov V.G.* 1989. [Hydrology of the mouths of the Azov Sea]. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya*. M.: Gidrometeoizdat. 327 p. In Russian.