

Академик НАН Украины В. А. Иванов,
член-корреспондент НАН Украины Л. В. Черкесов, Т. Я. Шульга

Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море при наличии стационарных течений и водообмена с Черным морем

Наведено результати числового моделювання процесів згонів та нагонів в Азовському морі з урахуванням стаціонарних течій та водообміну через Керченську протоку. З використанням нелінійної математичної моделі виконано аналіз залежностей змін рівня поверхневих і глибинних течій від напрямку та швидкості вітру.

Изучению сгонно-нагонных процессов и течений в Азовском море без учета водообмена через Керченский пролив посвящены работы [1–4]. В данном сообщении представлены результаты исследования влияния водообмена с Черным морем на максимальные сгоны и нагоны в Азовском море при наличии стационарных течений. С использованием трехмерной нелинейной σ -координатной модели [5, 6] выполнен анализ экстремальных отклонений свободной поверхности и течений в зависимости от характеристик ветрового воздействия.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [5, 6]. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [5]. На твердых боковых границах выполняются условия прилипания, на жидкой границе принимается условие свободного прохождения жидкости (равенство нулю первой производной нормальной составляющей скорости к жидкой границе).

Расчетная область включает в себя Азовское море, Керченский пролив и примыкающую к нему часть Черного моря. Открытая зональная граница (Γ) соответствует вертикальному разрезу бассейна Черного моря по $44,81^\circ$ с. ш. (рис. 1). Во всех точках, расположенных на этой границе ($60 \leq x \leq 240$ км, $y = 0$), выполняется условие $\frac{\partial v}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0$, где \mathbf{n} — нормаль к жидкой границе. При решении задачи без учета пролива рассматривается замкнутый бассейн, в котором вдоль $39,33^\circ$ с. ш. ($177 \leq x \leq 192$ км, $y = 66$ км) имеет место вертикальная боковая стенка (см. рис. 1, пунктирная линия).

В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна. С момента времени $t = 0$ на водную поверхность действует однородный ветер, скорость которого нарастает со временем (3 ч) по линейному закону, достигает заданного значения и далее не меняется. Исследование проводится для трех направлений ветра (южного, западного и восточного) различной скорости: $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$ м/с, $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ м/с и $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$ м/с. Установлению стационарного режима течений соответствует изменение средней по объему моря полной энергии, не превышающее 1% на соседних временных шагах.

Для численной реализации в исходных уравнениях, граничных и начальных условиях выполняется переход от координаты z к координате σ [5, 6]. Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов

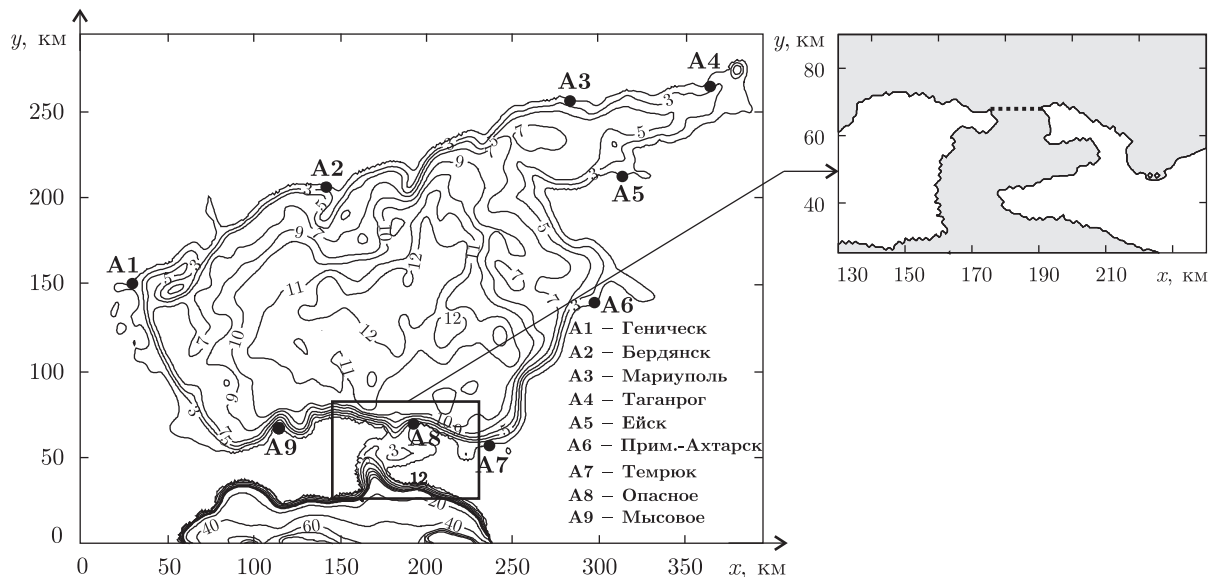


Рис. 1. Положение станций вдоль побережья Азовского моря и зональной границы

интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [7]. Топография дна расчетной области (см. рис. 1) на модельную сетку интерполирована из массива глубин, снятого с навигационных карт. Отклонения уровня Азовского моря анализируются на девяти станциях, расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

2. В серии численных экспериментов исследуется влияние скорости и направления постоянного ветра на стационарные течения, экстремальные значения сгонов и нагонов. Полученные результаты сравниваются с расчетами, выполненными при моделировании установившихся движений в Азовском море без учета водообмена с Черным морем. В табл. 1 приведены зависимости максимальных отклонений уровня на береговых станциях Азовского моря от направления и скорости ветра с учетом и без учета водообмена через пролив. Из анализа этих данных следует, что действие стационарного ветра одного направления, но большей скорости, приводит к возрастанию максимальных отклонений уровня ($|\zeta_{\max}|$)

Таблица 1. Максимальные отклонения уровня (ζ_{\max} , см), вызываемые действием постоянного ветра со скоростями 10 и 15 м/с различных направлений, без учета (1) и с учетом (2) пролива

Береговые станции	$W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$						$W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$					
	З		Ю		С		З		Ю		С	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Геническ	-29	-42	-1	0	1	0	-69	-112	-4	-2	4	1
Бердянск	-2	-4	11	17	-12	-18	-4	-5	28	46	-26	-47
Мариуполь	6	27	24	31	-25	-32	14	25	57	79	-60	-82
Таганрог	44	57	32	44	-34	-48	100	138	80	108	-82	-140
Ейск	22	38	16	14	-16	-13	52	96	41	36	-37	-29
Прим.-Ахтарск	21	29	3	-8	-4	8	49	73	-12	-20	8	14
Темрюк	7	5	-14	-22	13	22	20	15	-33	-59	31	55
Опасное	-3	-4	-12	-21	11	21	-5	-9	-29	-56	28	53
Мысовое	-13	-18	-15	-22	15	21	-30	-45	-35	-58	36	53

не более чем на 60%. Сравнение величин $|\zeta_{\max}|$, полученных при решении задачи с учетом и без учета пролива, показывает, что учет водообмена приводит к увеличению экстремальных значений уровня. Так, при скорости ветра 10 м/с, максимальные различия абсолютных максимумов на станциях составляют: 43% (западный ветер), 45% (южный ветер), 46% (северный ветер); при скорости ветра 15 м/с — 44% (западный ветер), 43% (южный ветер), 45% (северный ветер).

Направление стационарного ветра при учете водообмена через пролив существенно влияет на максимальные отклонения уровня. Отметим, что на рассматриваемых станциях наибольшие подъемы или опускания уровня имеют место при определенном направлении ветра одной и той же скорости. Наиболее опасным с точки зрения сгонов для станций Мариуполь, Таганрог и Ейск является северный ветер, максимальные нагоны здесь вызываются ветрами южного и западного направлений. На ст. Приморск — Ахтарск наибольшие сгоны возникают при северном ветре, ветер западного направления обуславливает максимальные подъемы уровня. На ст. Темрюк максимальные нагоны развиваются при северном ветре, а наибольшие сгоны — при южном. На ст. Геничеськ экстремальные нагоны возникают при южном ветре, а наибольшие сгоны — при западном и северном. В районе Бердянска максимальные подъемы уровня наблюдаются при южном ветре, максимальные опускания уровня — при северном. В районе ст. Опасное наибольшие подъемы уровня наблюдаются при северном ветре, наибольшие опускания уровня здесь отмечаются при ветрах южном и западном. На ст. Мысовое возникновение максимальных нагонов имеет место при северном ветре, а максимальных сгонов — при южном и западном.

Из анализа пространственного распределения уровня следует, что постоянный ветер различных направлений формирует понижение уровня у подветренных берегов (сгон) и повышение у наветренных (нагон). При этом линия нулевых амплитуд ориентирована перпендикулярно направлению скорости ветра и пересекает центральную часть моря в зональном (северный и южный ветер) и меридиональном (западный ветер) направлениях.

Аналогичные сравнения значений $|\zeta_{\max}|$ по всей акватории моря, полученных при различных условиях в проливе и одинаковом ветровом воздействии, свидетельствуют о сравнительно небольших расхождениях результатов расчетов. Отклонения для трех указанных направлений постоянного ветра при скоростях 5, 10 и 15 м/с составляют соответственно 13, 19 и 24% (западный ветер); 17, 6 и 25% (южный ветер); 18, 19 и 23% (северный ветер). Отметим, что направление ветра также влияет на величины максимальных отклонений ζ . Так, под действием стационарного ветра со скоростью 15 м/с значения $|\zeta_{\max}|$, которые достигаются при западном ветре (162 см), превышают $|\zeta_{\max}|$, вызванные южным ветром (115 см), на 29%.

3. На рис. 2 представлены поля пространственного распределения скоростей установившихся течений в приповерхностном и придонном слоях моря, вызванные действием ветра различных направлений со скоростью 15 м/с. Как показывает анализ приведенных полей, течения в установившемся режиме характеризуются выраженными вихревыми образованиями. Их положение и конфигурация определяются направлением ветра, наиболее интенсивные течения имеют место в глубоководной части моря. При западном ветре (см. рис. 2, а) в Азовском море возникают две системы круговоротов, которые ориентированы в зональном направлении. На границе между этими круговоротами направление потока жидкости противоположно скорости действующего ветра. В Таганрогском заливе формируется пара вихрей различных знаков. При северном ветре в центральной части моря образуются два круговорота противоположных знаков (см. рис. 2, в). Бóльший по площади (циклони-

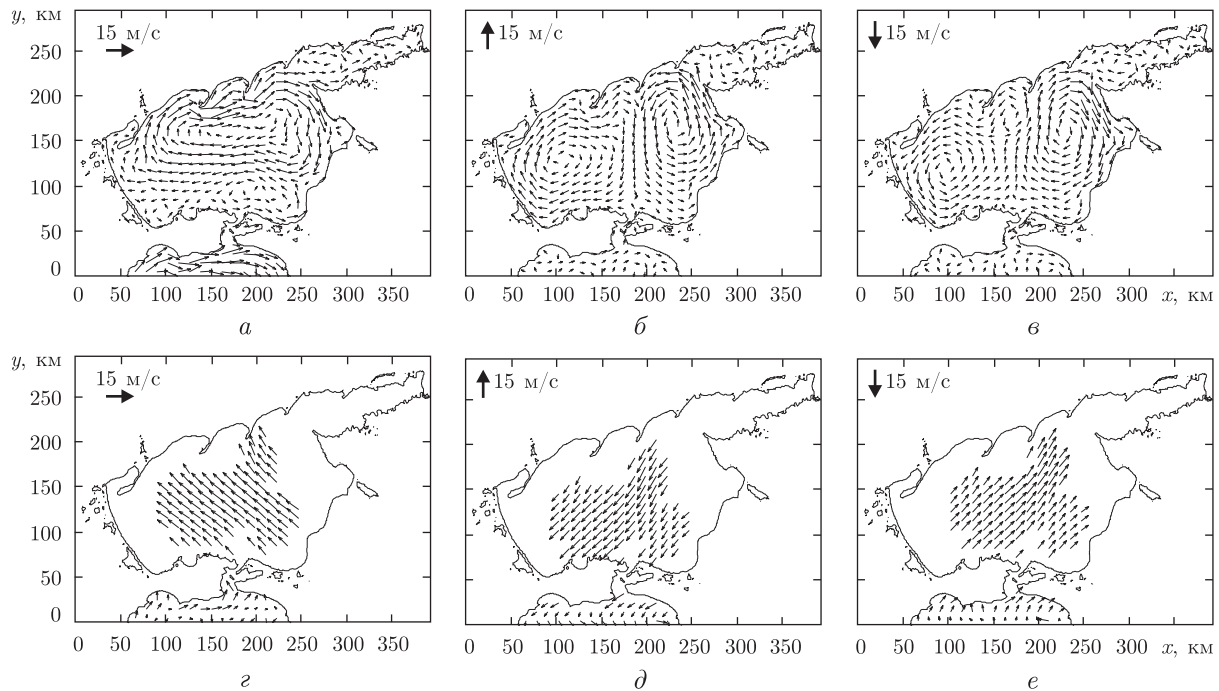


Рис. 2. Поля скоростей поверхностных (а–в) и придонных (г–е) стационарных течений в Азовском море, вызываемые действием постоянного ветра различных направлений со скоростью 15 м/с

ческий) примыкает к западному берегу и содержит малое вихревое образование. Меньший по площади, но более мощный (антициклонический), находится в восточной части моря. Между этими двумя круговоротами располагается узкая полоса переноса водных масс, противоположная скорости ветра. Южный ветер формирует течения (см. рис. 2, б), поля которых являются “зеркальным отражением” полей течений при северном ветре (прослеживается та же конфигурация вихревых образований, но они имеют различные знаки).

На глубине 10 м (рис. 2, г–е) в центральной части акватории наблюдаются течения, отклоняющиеся южнее на 135° и более от скорости ветра. Как следует из рис. 2, течения в проливе при ветре одного направления в поверхностном и придонном слоях противоположны. Отметим, что в придонном слое под действием западного и северного ветров (см. рис. 2, г, е) течения в Керченском проливе направлены из Черного в Азовское море, в поверхностном слое (см. рис. 2, а, в) — в противоположную сторону. При южном ветре (см. рис. 2, д) течения в придонном слое направлены из Азовского моря в Черное, в поверхностном слое (см. рис. 2, б) — в обратную сторону.

Из анализа максимумов скоростей стационарных течений на различных горизонтах следует, что скорости установившихся течений, найденные при моделировании с учетом пролива, больше, чем без его учета (для одинаковых скоростей и направлений ветра). При этом наличие водообмена приводит к разнице значений скоростей течений, не превышающей 45%. Наибольшие скорости течений, вызванные действием ветра одной и той же скорости, отмечаются при южном направлении ветра, наименьшие — при северном. Так, максимальные скорости поверхностных течений, вычисленные с учетом пролива при скорости ветра 15 м/с составляют 0,87 м/с (западный ветер); 0,99 м/с (северный ветер) и 1,22 м/с (южный ветер). Разница между наибольшим и наименьшим значениями этих скоростей со-

ставляет 30%. Аналогичное соотношение величин скоростей течений прослеживается и на других горизонтах. Ветер южного направления, действующий вдоль Керченского пролива из Черного моря в Азовское, вызывает течения, скорости которых превышают не более чем на 30% скорости течений, вызванных западным или северным ветрами.

1. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование стонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Доп. НАН України. – 2006. – № 11. – С. 109–113.
2. *Фомин В. В., Шульга Т. Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Там же. – 2006. – № 12. – С. 110–115.
3. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование влияния течений, вызванных западным ветром на эволюцию областей загрязнения в Азовском море // Там же. – 2007. – № 3. – С. 112–117.
4. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование эволюции поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // Там же. – 2007. – № 7. – С. 160–120.
5. *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of three-dimensional coastal ocean circulation model in three-dimensional coast ocean models // Coast. Estuar. Sci. – 1987. – 4. – P. 1–16.
6. *Фомин В. В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Науч. тр. УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
7. *Courant R., Friedrichs K. O., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – March. – P. 215–234.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 21.09.2009

Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov**,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine **L. V. Cherkesov, T. Ya. Shul'ga**

Research of the surge phenomena in the Sea of Azov in the presence of stationary currents and the water exchange with the Black Sea

We present the results of numerical modeling of the surge phenomena in the Sea of Azov taking stationary flows and the water exchange through the Kerch strait into account. With the use of a nonlinear model, the analysis of the dependences of the levels of superficial and deep currents on the direction and the speed of winds is executed.