

Т. Я. Шульга

Течения и сгонно-нагонные процессы, вызываемые переменным по пространству и времени ветром в Азовском море

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Л. В. Черкесовым)

З використанням прогностичних та модельних полів вітру та атмосферного тиску виконано аналіз згінно-нагінних процесів та течій в Азовському морі. Використано тривимірну нелінійну математичну модель та проведено порівняння результатів моделювання з даними безпосередніх вимірювань коливань рівня на прибережних станціях. Досліджено вплив інтенсивності атмосферних дій на максимальні значення рівня та швидкості течій.

В последние десятилетия освоение энергетических и биологических ресурсов Мирового океана выдвигает особые требования к прогнозам важнейших динамических характеристик морской среды и в первую очередь таких, как уровень моря, течения и волнение. Одним из способов, позволяющих прогнозировать сгонно-нагонные колебания уровня, является метод численного моделирования. При этом наибольшие сложности вызывает изучение волн и морских течений. В настоящее время информация о полях течений на различных горизонтах, изложенная на сайтах в интернете, не является обоснованной. Причиной тому — недостаточное количество наблюдений, которые позволили бы проверить и уточнить теоретически полученные результаты. В публикации [1] использовалась трехмерная нелинейная модель для исследования волн и течений, возникающих в Азовском море под действием постоянного по времени и однородного по пространству ветра. Динамические процессы и эволюция примеси в Азовском море, возникающие под действием возмущений, вносимых в поле стационарных течений перемещающимся модельным циклоном, были проанализированы в [2].

В настоящем сообщении эта модель применяется для изучения течений и сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызываемых переменными по пространству и времени полями приводного ветра и атмосферного давления, полученными по региональной прогностической модели *Skiron* [3]. Результаты моделирования сравниваются с данными натурных измерений колебаний уровня на станциях Геническ и Мариуполь.

1. Для расчета используются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [4, 5]. На свободной поверхности выполняются кинематическое и динамические условия. На дне нормальная составляющая скорости обращается в ноль. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью, на боковых границах удовлетворяется условие прилипания. В момент времени, соответствующий началу действия атмосферных возмущений, движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты z к координате σ . Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам соответствует критерию устойчивости Куранта для баротропных волн [6].

Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря [1, рис. 1], используемые для проведения численных экспериментов, интерполированы на расчетную сетку с навигационных карт. В качестве входных метеорологических данных берутся поля приводного ветра и атмосферного давления модели *Skiron* за период с 8 по 18 сентября 2007 г. (\mathbf{W}_{Skiron} ; P_{Skiron}). Пространственное разрешение атмосферных полей составляет 10 км, дискретность по времени — 2 ч. Моделирование динамических процессов в Азовском море, вызываемых действием прогностического ветра, проводится от нуля часов 8 сентября в течение десяти суток. Результаты, полученные для первых трех суток, не анализируются и применяются для получения начальных данных о скоростях течений и уровне моря на ноль часов 11 сентября 2007 г.

При проведении численных расчетов выполняется сравнение полученных при моделировании величин сгонов и нагонов с результатами наблюдений уровня моря на береговых гидрометеорологических станциях Азовского моря за период с 11 по 18 сентября 2007 г. Эти данные представляют собой ежечасные измерения уровня с помощью самописцев на станциях Геничеськ и Мариуполь.

Для изучения физических закономерностей влияния атмосферных воздействий на скорости течений и сгонно-нагонные процессы в Азовском море выполнена серия экспериментов, в которых в качестве возмущений выбраны скорости ветра, увеличенные и уменьшенные в два раза по сравнению с использованными в модели *Skiron*.

2. Анализ информации о характерных типах погоды для района Азовского моря [7, 8] свидетельствует о том, что в теплый период (апрель — октябрь) имеет место ее антициклонический тип. Он характеризуется ветрами со скоростью не более 8 м/с, когда Азовское море оказывается в тыловой части антициклона, смещающегося с запада на восток. В это время преобладают восточные и северо-восточные ветры. Данные многолетних наблюдений погодных условий согласуются с результатами численных расчетов, выполненных с применением модели *Skiron* и представленных в табл. 1, где приведены значения максимальных скоростей ветра как функции времени (над Азовским морем). При этом между двумя соседними значениями времени скорость ветра меняется монотонно. Из данных таблицы следует, что за указанное вре-

Таблица 1. Максимальные скорости ветра как функция времени по данным модели *Skiron* с 11 по 18 сентября 2007 г.

Время, ч	Скорость ветра, м/с	Время, ч	Скорость ветра, м/с	Время, ч	Скорость ветра, м/с
2	6,8	54	5,8	108	5,7
14	2,6	56	7,9	112	3,5
28	5,8	58	9,6	124	5,2
30	3,0	62	11,6	130	3,3
32	5,2	76	9,4	132	1,6
44	5,8	92	12,7	140	2,1
48	8,1	104	9,6	142	4,9
50	4,2	106	7,5	168	5,8

мя (168 ч) средняя величина его максимальной скорости равна 6,7 м/с, наибольшая — 12,7 м/с, наименьшая — 1,6 м/с. Преобладающими направлениями ветра являются северо-восточное, северо-западное и северное. Данные о направлениях и скоростях ветра по модели *Skiron* удовлетворительно согласуются с известной метеорологической информацией [7, 8].

В серии численных экспериментов исследуется влияние скорости переменного по времени и пространству ветра на отклонения уровня и скорости генерируемых им течений. В табл. 2 приведены значения максимумов нагонов (верхняя часть таблицы) и сгонов (нижняя часть таблицы) на береговых станциях Азовского моря, вызванных действием прогностического (W_{Skiron}) и модельных ветров ($W_{Skiron}/2$ и $2W_{Skiron}$). Согласно данным таблицы, наибольшие нагоны, генерируемые прогностическим ветром, достигаются на станции Приморско-Ахтарск (57,1 см). Для модельного ветра ($2W_{Skiron}$) максимальный нагон на этой станции равен 80,4 см и возрастает в 1,4 раза. При уменьшении интенсивности ветра в два раза ($W_{Skiron}/2$) максимальный нагон составляет 40,6 см и снижается в 1,3 раза. Наибольшие сгоны для прогностического ветра (42,5 см) имеют место на станции Геническ. При этом увеличение и уменьшение интенсивности атмосферных воздействий в 2 раза приводят к их росту в 1,8 раза и снижению в 1,9 раза соответственно.

Сравним результаты моделирования и натуральных измерений уровня моря, полученные из таблиц ежечасных данных высот уровня Государственной метеорологической службы Украины за сентябрь 2007 г. Оценим отклонения его экстремальных значений, рассчитанных для полей прогностического ветра. На станции Геническ величина расчетного максимума составляет 25,4 см, что на 5,7 см (18%) меньше, чем по данным наблюдений. На станции Мариуполь полученный по расчетам максимальный нагон (29,3 см) на 4,1 см (12%) меньше измеренного.

Таблица 2. Максимальные нагоны и сгоны, возникающие на береговых станциях Азовского моря под действием прогностического и модельных ветров

Береговые станции	Скорость ветра					
	$\frac{1}{2}W_{Skiron}$		W_{Skiron}		$2W_{Skiron}$	
	ζ_{max} , см	время, ч	ζ_{max} , см	время, ч	ζ_{max} , см	время, ч
Геническ	20,0	33,6	25,4	34	32,2	34,6
Бердянск	4,9	161,2	9,1	161,5	16,9	162,0
Мариуполь	18,5	129,0	29,3	129,2	46,4	130
Таганрог	40,6	162,1	50,6	162,4	63,1	162,6
Ейск	19,1	141,5	38,1	142,1	76,0	143
Приморско-Ахтарск	40,6	141,6	57,1	142,3	80,4	142,8
Темрюк	20,2	140,0	24,5	140,5	29,7	141
Опасное	5,5	122,1	9,4	122,5	16,1	122,1
Мысовое	7,5	34,0	12,1	34,6	19,6	36
Геническ	22,3	131,6	42,5	132,2	76,5	132
Бердянск	9,7	131,3	17,3	131,5	30,9	132
Мариуполь	12,7	29,0	18,2	29,4	26,0	30
Таганрог	21,2	39,5	29,0	40,0	42,4	39,6
Ейск	8,7	41,7	18,9	42,1	41,1	43
Приморско-Ахтарск	8,4	32,1	14,1	32,2	23,8	33,0
Темрюк	6,8	165,7	8,7	166,2	11,2	166
Опасное	5,5	162,2	10,6	162,6	20,5	162,8
Мысовое	12,6	161,5	22,3	161,8	39,4	162,2

Таблица 3. Максимальные скорости течений в Азовском море, вызываемые действием прогностического и модельных ветров

Горизонт, м	Скорость ветра					
	$\frac{1}{2}W_{Skiron}$		W_{Skiron}		$2W_{Skiron}$	
	U_{max} , см/с	время, ч	U_{max} , см/с	время, ч	U_{max} , см/с	время, ч
1	34,6	131,8	48,2	132,0	57,8	132,6
3	25,9	132,0	46,2	133,5	60,5	134,1
5	31,1	135,3	43,9	135,4	61,6	136,4
8	23,9	140,0	31,5	140,2	40,5	142,6

Наибольшие значения скоростей течений в Азовском море, вызываемых действием прогностического (W_{Skiron}) и модельных ветров ($W_{Skiron}/2$ и $2W_{Skiron}$) иллюстрирует табл. 3. Из анализа данных, представленных в этой таблице, следует, что при увеличении скорости ветра в 2 раза максимумы скоростей течений на горизонтах 1, 3, 5 и 8 м возрастают соответственно в 1,2; 1,3; 1,4 и 1,3 раза. При двукратном уменьшении скорости ветра максимумы скоростей течений уменьшаются в 1,4; 1,8; 1,4 и 1,3 раза соответственно.

1. Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Моделирование колебаний уровня Азовского моря, вызываемых ветром // Мор. гидрофиз. журн. – 2008. – № 6. – С. 53–65.
2. Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Доп. НАН України. – 2006. – № 11. – С. 109–113.
3. Weather and Wave Forecast for Greece, Europe. – Mediterranean Sea. – <http://forecast.uoa.gr>.
4. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model: Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed. N. Heaps // Amer. Geophys. Union. – 1987. – 4. – P. 208.
5. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Науч. тр. Укр. науч.-исслед. гидрометеорол. ин-та. – 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
6. Courant R., Friedrichs K. O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – No 3. – P. 215–234.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1991. – 234 с.
8. Лоция Азовского моря. – <http://katamaran.ru/maps/azov/2.htm>.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 21.06.2010

T. Ya. Shul'ga

Currents and surge processes induced by a wind variable in space and time in the Sea of Azov

Surge processes and currents in the Sea of Azov are analyzed using the prognostic and model fields of winds and atmospheric pressure. A three-dimensional non-linear mathematical model is applied, and the results of numerical calculations are compared with the data of direct measurements of the level carried out at a number of coastal stations. The influence of a variation of the atmospheric forcing intensity upon maximum values of the level and current velocities is studied.