

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

Положения экстремумов уровня и стационарных течений, возникающих под действием ветра в открытой части Азовского моря

З використанням тривимірної нелінійної математичної моделі встановлено положення максимумів і мінімумів швидкостей поверхневих течій у відкритій частині Азовського моря. Наведено карти районів розташування найбільших змін рівня моря та швидкостей стаціонарних течій. Отримано оцінки впливу швидкості постійного вітру на час надходження найбільших підйомів та опускань рівня моря та швидкостей течій.

В обзорах [1, 2] установлены зависимости максимумов сгонов и нагонов, возникающих на береговых станциях Азовского моря, от скорости и направления ветра. Сгонно-нагонные колебания в Азовском море, вызываемые прохождением циклонов изучены в статье [3]. В данной работе с использованием трехмерной нелинейной сигма-координатной математической модели найдены координаты экстремумов скоростей течений и уровня Азовского моря, генерируемых стационарным ветром.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [4]. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости вычисляется с помощью формулы Смагоринского [5]. Для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости используется теория Меллора–Ямады [6]. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. Для численных расчетов коэффициент поверхностного трения выбран в соответствии с формулой, приведенной в работе [7]. На дне ($z = -H(x, y)$) нормальная составляющая скорости равна нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью жидкости квадратичной зависимостью [4]. На твердых боковых границах выполняется условие прилипания. В начальный момент времени $t = 0$ течения отсутствуют, свободная поверхность горизонтальна.

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты z к координате σ [4]. Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн. Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря в узлах сетки сняты с навигационных карт.

2. Анализ опубликованных метеорологических данных [8, 9], позволил выделить для района Азовского моря характерные типы погоды. *Антициклонический* — возникает в теплый период (апрель — октябрь) и определяется ветрами со скоростью 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. *Слабый циклонический*

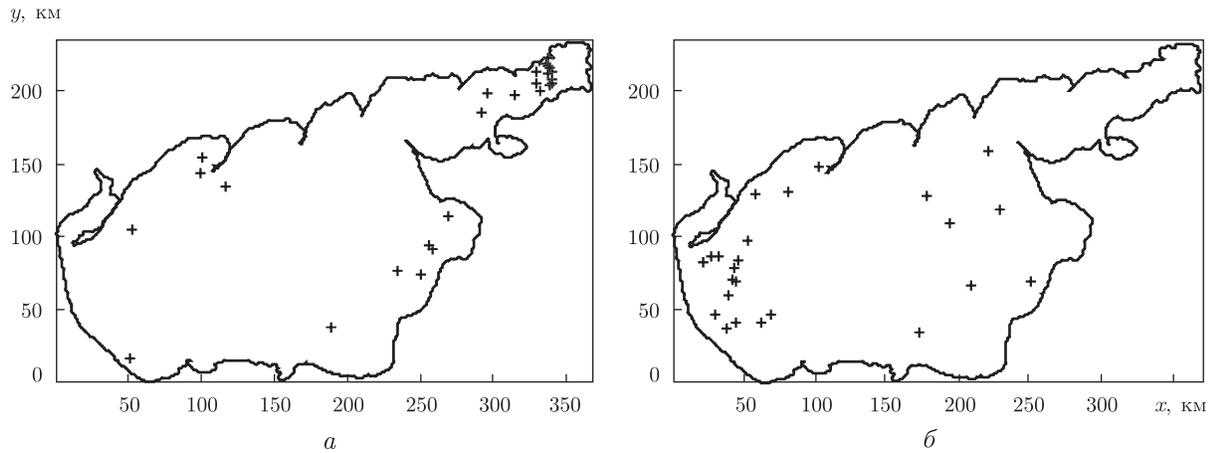


Рис. 1

кий — отмечается при прохождении над Азовским морем слабых атмосферных фронтов или периферий отдельных циклонов. Средняя повторяемость его 12% в холодный период и 22% в теплый. Этот тип погоды обуславливается слабыми и умеренными ветрами переменных направлений, облаками среднего и нижнего ярусов; иногда выпадают осадки. *Циклонический* — имеет место при прохождении над Черным и Азовским морями средиземноморских циклонов или циклонов, развивающихся на хорошо выраженных атмосферных фронтах севернее параллели 50° с. ш. Повторяемость ветровой ситуации зимой и летом не превышает 15%. Для него характерны ветры со скоростью 6–14 м/с вначале восточных, а затем южных и западных направлений. Западные ветры обычно бывают порывистыми и шквалистыми. Численные эксперименты моделируют ситуацию слабоциклонического типа погоды.

Ветровые условия соответствуют условиям, при которых в Азовском море формируются установившиеся движения. При этом скорость ветра, достигнув определенного распределения над морем, продолжительное время меняется мало. В численных экспериментах поле ветра над морем задается в виде однородного по пространству ветра, действующего над Азовским морем, начиная с момента времени $t = 0$. Его стационарная скорость (\mathbf{W}_{st}) первые 3 ч ($0 < t \leq 3$ ч) нарастает со временем по линейному закону, достигает своего наибольшего значения и далее не меняется. Под действием этого ветра течения в море устанавливаются. Момент времени выхода течений на стационарный режим ($t = t_1$) определяется из условия, когда относительные изменения полной энергии, осредненной по объему моря, на смежных шагах по времени не превосходят 1% [1]. Результаты исследований представлены для трех возможных вариантов стационарных движений, вызываемых действием постоянного западного ветра трех скоростей, м/с: $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$, $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ и $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$.

Пункты расположений максимальных и минимальных отклонений уровня в открытой части Азовского моря, вызываемых действием западного ветра скорости 15 м/с, показаны на рис. 1. Эти пункты на рисунке отмечались в течение всего расчетного периода (72 ч). Из рис. 1, *а* видно, что максимумы сосредоточены в восточной части акватории моря, при этом имеет место смещение их координат в сторону Таганрогского залива. На рис. 1, *б* отмечено положение пунктов, соответствующих наибольшему понижению уровня, они находятся в западной части акватории моря. В центральной части Азовского моря имеют место понижения уровня, при этом координаты наблюдаемых минимумов в рассматриваемой части моря сосредоточены в прибрежных районах.

В табл. 1 указаны максимальные и минимальные значения отклонений уровня моря (ζ), время их достижения и соответствующие им координаты в зависимости от скорости ветра в течение всего расчетного периода. Полученные зависимости являются обобщением результатов, приведенных на рис. 1.

Из анализа данных, приведенных в таблице, следует, что координаты максимумов ζ_{\max} и минимумов ζ_{\min} для рассмотренных скоростей ветра отличаются мало. Различия состоят в величинах экстремальных отклонений уровня и времени их достижения. Из сравнения значений максимумов уровня моря следует, что они возрастают в 3,5 и 8,3 раза для больших в 2 и 3 раза значений \mathbf{W}_{st} (0,2 м при \mathbf{W}_{st}^1 ; 0,69 м при \mathbf{W}_{st}^2 ; 1,65 м при \mathbf{W}_{st}^3). Под действием ветра большей скорости достигаются и большие значения понижений уровня: -0,1 м при \mathbf{W}_{st}^1 ; -0,39 м при \mathbf{W}_{st}^2 ; -1,05 м/с при \mathbf{W}_{st}^3 . Согласно результатам расчетов, действие ветра со скоростями 10 и 15 м/с (в 2 и 3 раза большими, чем \mathbf{W}_{st}^1) приводит к увеличению $|\zeta_{\min}|$ в 4 и 10 раз соответственно.

Время достижения экстремальных отклонений уровня отмечается через 10–16 ч после начала действия ветра и зависит от его скорости. При сравнении изменений скорости ветра и времени наступления наибольших и наименьших значений ζ было отмечено, что последнее больше для больших скоростей ветра. Так, разница во времени достижения ζ_{\max} при \mathbf{W}_{st}^1 и \mathbf{W}_{st}^3 составляет 2 ч, а разница во времени достижения ζ_{\min} при тех же скоростях ветра только 1 ч. Таким образом, стационарный ветер в 3 раза большей скорости на 10% дольше формирует максимальный подъем уровня и на 7% — его минимальное понижение. Сравним величины максимальных и минимальных значений ζ в открытой части Азовского моря (см. табл. 1) с экстремальными значениями сгонов и нагонов, отмеченными в ряде пунктов его побережья [1]. Наибольшие нагоны при скоростях ветра 5, 10 и 15 м/с имеют место на ст. Таганрог и составляют 0,17, 0,60 и 1,42 м соответственно. При тех же скоростях ветра в открытой части Азовского моря достигаются ζ_{\max} , равные 0,20, 0,69 и 1,65 м. Следовательно, максимальные возвышения уровня на 15, 13 и 35% превышают нагоны на побережье. Аналогично, сравнивая наибольшие значения сгонов (Геничеськ) и $|\zeta_{\min}|$, отметим, что при рассматриваемых скоростях ветра максимума сгона и понижения уровня в открытой области моря отличаются мало.

В настоящее время прогнозы течений практически не составляются, причиной тому — недостаточное количество наблюдений, которые позволили бы проверить и уточнить расчеты скоростей течений. Чтобы разрабатывать и использовать методы расчета и прогноза скоростей морских течений в оперативной практике, необходимо в ряде пунктов моря проводить регулярные наблюдения скоростей течений.

Положения максимальных и минимальных скоростей поверхностных течений в открытой части Азовского моря, вызываемых действием постоянного ветра скорости 15 м/с иллюстрирует рис. 2: отметки максимальных скоростей течений (*а*) смещены в сторону Таганрогского залива, а минимальных (*б*) — значительно разбросаны по акватории.

Таблица 1

Скорость ветра, м/с	ζ_{\max} , М	x_{\max} , КМ	y_{\max} , КМ	t_{\max} , Ч	ζ_{\min} , М	x_{\min} , КМ	y_{\min} , КМ	t_{\min} , Ч
\mathbf{W}_{st}^1 — 5	0,20	366,51	219,61	17,10	-0,10	4,02	95,07	13,23
\mathbf{W}_{st}^2 — 10	0,69	367,86	218,27	18,487	-0,39	4,02	107,13	13,47
\mathbf{W}_{st}^3 — 15	1,65	343,69	224,96	19,48	-1,05	5,37	87,04	14,09

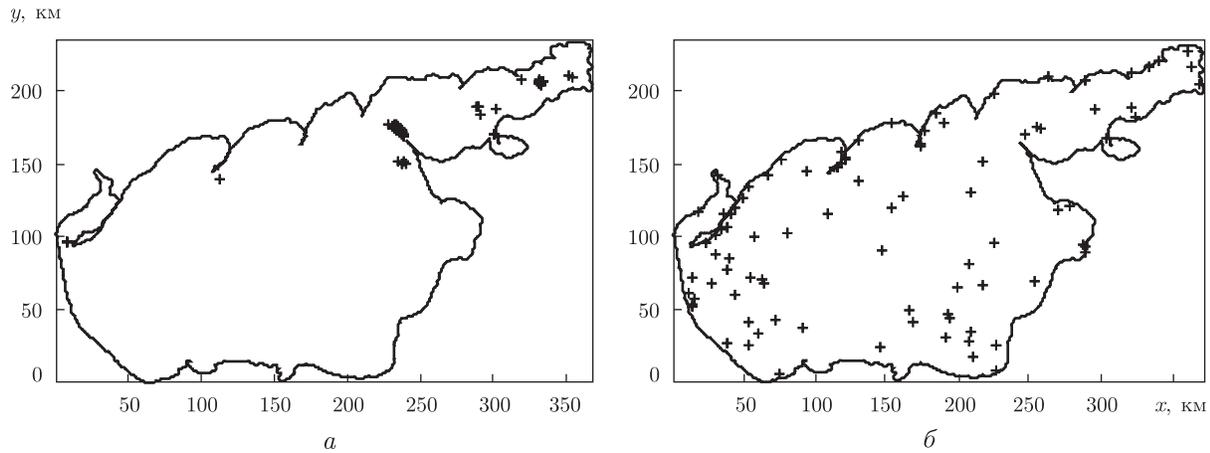


Рис. 2

Наибольшие значения скоростей течений на различных горизонтах Азовского моря, время их достижения и соответствующие им координаты в зависимости от скорости ветра в течение всего расчетного периода приведены в табл. 2. Анализируя представленные в таблице данные, следует, что при увеличении скорости постоянного ветра в 2 и 3 раза скорости течений в поверхностном слое достигают значений 0,16; 0,49 и 1,06 м/с (возрастают соответственно в 4 и 6,6 раза). Такое же соотношение между величинами скоростей течений для рассматриваемых \mathbf{W}_{st} прослеживается и на других горизонтах. С глубиной происходит уменьшение скоростей течений, их наименьшее значение отмечается в придонном слое.

Сравнивая значения координат максимумов, отметим, что и с глубиной и при разных значениях скорости их положение меняется мало. Время достижения наибольших значений скорости течений увеличивается (на 6 и 25%) под действием ветра больших скоростей (\mathbf{W}_{st}^2 и \mathbf{W}_{st}^3 соответственно). При различных скоростях действующего ветра положение максимумов смещено в сторону Таганрогского залива. Координаты минимальных скоростей течений значительно разбросаны по акватории. Оценивая разницу во времени достижения максимумов скоростей течений, видим, что t_{\max} в поверхностном слое моря под действием постоянного ветра достигается на 11 и 24% раньше, чем в придонном.

Таблица 2

Скорость ветра, м/с	Горизонт, м	U_{\max} , м/с	x_{\max} , км	y_{\max} , км	t_{\max} , ч
\mathbf{W}_{st}^1 — 5	1	0,16	236,29	174,08	8,35
	3	0,13	236,39	173,44	8,02
	5	0,12	237,01	173,31	8,22
	10	0,08	235,34	173,00	9,44
\mathbf{W}_{st}^2 — 10	1	0,49	236,29	172,74	8,06
	3	0,44	236,60	173,32	8,55
	5	0,41	237,09	171,73	8,26
	10	0,29	236,86	171,98	9,34
\mathbf{W}_{st}^3 — 15	1	1,06	237,63	171,40	9,45
	3	0,97	237,99	172,28	10,47
	5	0,91	237,76	171,88	11,19
	10	0,64	238,46	171,50	12,45

1. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование характеристик сгонно-нагонных явлений Азовского моря // Мор. гидрофиз. журн. – 2008. – № 1. – С. 12–25.
2. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Моделирование колебаний уровня Азовского моря, вызываемых ветром // Там же. – 2008. – № 6. – С. 53–65.
3. *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.
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. 1–16.
5. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Mon. Weather Rev. – 1963. – 91. – P. 99–164.
6. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20. – P. 851–875.
7. *Hsu S. A.* A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // Ibid. – 1986. – 16. – P. 144–150.
8. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР.* – Т. 5. Азовское море. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. – 234 с.
9. *Лоция Азовского моря.* – <http://katamaran.ru/maps/azov/2.htm>.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 12.02.2010

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

Locations of level extrema and stationary currents caused by the wind action in the open area of the Sea of Azov

Locations of maxima and minima of velocities of sea surface currents in the open area of the Sea of Azov are obtained by using a three-dimensional nonlinear numerical model. Maps of the areas of maxima of sea level inclinations and stationary current velocities are presented. Estimations of the stationary wind effect on the achievement time of the greatest sea level elevating and lowering and current velocity maxima are given.