

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та
аспірантської підготовки
Кафедра океанології та
морського природокористування

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: МОДЕЛЮВАННЯ ЗГІННО-НАГІННИХ КОЛИВАНЬ
РІВНЯ АЗОВСЬКОГО МОРЯ

Виконав студент 2 курсу групи МО-61
спеціальність 103 «Науки про Землю»
Шелякіна Марина Дмитрівна

Керівник: д.геогр.н., проф.
Тучковенко Юрій Степанович

Консультант

Рецензент к.ф.-м.н., с.н.с.
Матигін Олександр Сергійович

Одеса, 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Магістерської та аспірантської підготовки
Кафедра Океанології та морського природокористування
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 103 «Науки про Землю»
(шифр і назва)
Освітня програма Океанологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

“ 02 ” 11 20 17 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Шелякіной Марині Дмитрівні
1. Тема роботи Моделювання згінно-нагінних коливань рівня Азовського моря
Керівник роботи д.геогр.н., проф. Тучковенко Юрій Степанович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого освіти від “ 02 ” 11 20 17 року № 321С
2. Строк подання студентом роботи 1.06.2018
3. Вихідні дані до роботи: Дані спостережень в порту Мариупіль (таблиці ТГМ-1) за 2016 р., дані ре-аналізу вітру за моделлю GFS над Азовським морем в період жовтень-листопад 2016 р., батиметрична карта Азовського моря, програмний розрахунковий модуль чисельної математичної гідродинамічної моделі
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити).
Виконати: фізико-географічний опис Азовського моря та характеристик його гідрологічного режиму; аналіз основних чинників, які впливають на коливання рівня моря на різних просторово-часових масштабах; аналіз характеристик згінно-нагінних коливань рівня Азовського моря за даними літературних джерел; проведення числових експериментів з гідродинамічною моделлю для розрахунків згінно-нагінних коливань рівня моря; опис та аналіз результатів числового математичного моделювання згінно-нагінних коливань рівня в Азовському морі із застосуванням гідродинамічної моделі.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Батиметрична карта розрахункової області, поля векторів та ізотак баротропних течій, відхилень рівня моря від незбуреного стану розраховані за моделлю при сталих штормових вітрах 8 основних румбів; графіки

часової мінливості відхилень рівня моря від незбуреного стану в портах Мариупіль та Генічеськ за різних вітрових умов.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 2 листопада 2017 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Фізико-географічний опис Азовського моря та характеристик його гідрологічного режиму	26.03-03.04.2018	90	Відмінно
2	Аналіз основних чинників, які впливають на коливання рівня моря на різних просторово-часових масштабах	04.04.-11.04.2018	90	Відмінно
3	Аналіз характеристик згінно-нагінних коливань рівня Азовського моря за даними літературних джерел	12.04.-19.04.2018	85	Добре
4	Проведення числових експериментів з гідродинамічною моделлю для розрахунків згінно-нагінних коливань рівня моря	20.04.-30.04.2018	95	Відмінно
	Рубіжна атестація	30.04-6.05. 2018р	90	Відмінно
5	Опис та аналіз результатів числового математичного моделювання згінно-нагінних коливань рівня в Азовському морі із застосуванням гідродинамічної моделі	02.05-27.05.2018	90	Відмінно
	Попередній захист роботи	29.05.2018		
	Здача на кафедрі	1.06.2018		
	Перевірка на плагіат	6-7.06.2018		
	Рецензування	8-10.06.2018		

	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		90	Відмінно

Студент _____ Шелякіна М.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Тучковенко Ю.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерської кваліфікаційної роботи Шелякіної Марини Дмитрівни

Тема роботи: «Моделювання згінно-нагінних коливань рівня
Азовського моря»

Актуальність роботи полягає в тому, що інформація про згінно-нагінні коливання рівня моря при штормових вітрах необхідна для забезпечення сталого функціонування портів, рекреаційних та оздоровчих установ, в прибережній зоні моря, безпеки мореплавства, населення, будівництві гідростатичних споруд.

Метою роботи є аналіз характеристик згінно-нагінних коливань рівня моря в Азовському морі за даними літературних джерел, адаптація та випробування чисельної гідродинамічної моделі «мілкої води» для оцінки і прогнозування викликаних вітром згінно-нагінних коливань рівня в портах та на узбережжі Азовського моря.

Методи дослідження – чисельне математичне моделювання викликаних вітром коливань рівня моря.

В роботі наведені: фізико-географічний опис Азовського моря та характеристик його гідрологічного режиму; аналіз основних чинників, які впливають на коливання рівня моря на різних просторово-часових масштабах; аналіз характеристик згінно-нагінних коливань рівня Азовського моря за даними літературних джерел; опис математичної структури числової гідродинамічної моделі для розрахунків згінно-нагінних коливань рівня моря; опис та аналіз результатів числового математичного моделювання згінно-нагінних коливань рівня в Азовському морі.

Ключові слова: Азовське море, мінливість рівня, згони, нагони, вітер, чисельне математичне моделювання, гідродинамічна модель.

SUMMARY

Master's qualification work by Sheliakina Marina Dmitrievna

Theme of work: «Modeling ups and lows level of Azov Sea, caused by wind conditions»

The urgency of the work is that information on the increase and decrease of the sea level in storm winds is necessary for ensuring the sustainable functioning of ports, recreational and health facilities, in the coastal zone of the sea, safety of navigation, population, construction of hydrostatic structures.

The aim of the work is to analyze the characteristics of sea level variability in the Sea of Azov according to the data of literary sources, adaptation and testing of the numerical hydrodynamic model of shallow water for the estimation and forecasting of fluctuations caused by wind in ports and on the Azov Sea coast.

Methods of research - numerical mathematical modeling of sea-level fluctuations caused by wind.

The work includes: physico-geographical description of the Azov Sea and the characteristics of its hydrological regime; analysis of the main factors influencing sea level fluctuations on various spatial and temporal scales; analysis of the characteristics of fluctuations in the Azov Sea caused by wind, according to the literature sources; description of the mathematical structure of the numerical hydrodynamic model for calculating sea level rise and decrease; description and analysis of the results of numerical mathematical modeling of fluctuations in the Azov Sea.

Keywords: Azov Sea, variability of sea level, wind, numerical mathematical modeling, hydrodynamic model.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНИЙ ОПИС І ГІДРОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ АЗОВСЬКОГО МОРЯ	10
1.1 Водний баланс.....	13
1.2 Течії.....	16
1.3 Швидкість та напрямок вітру.....	17
1.4 Хвилювання.....	19
2 КЛАСИФІКАЦІЯ МІНЛИВОСТІ РІВНЯ МОРЯ ЗА ЧАСОВИМИ МАСШТАБАМИ. ОСНОВНІ ЧИННИКИ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА КОЛИВАННЯ РІВНЯ АЗОВСЬКОГО МОРЯ ЗА ЛІТЕРАТУРНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ.....	21
2.1 Багаторічні зміни.....	21
2.2 Сезонна мінливість	23
2.3 Мезомасштабна і синоптична мінливість рівня	24
2.4 Типи атмосферних процесів, що спричиняють аномальні згінно-нагінні коливання рівня Азовського моря	25
3 ОГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ.....	36
4 МАТЕМАТИЧНА СТРУКТУРА ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ	45
5 АДАПТАЦІЯ МОДЕЛІ ДО УМОВ АЗОВСЬКОГО МОРЯ	50
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	71

ВСТУП

Останні десятиріччя відзначаються більш інтенсивним включенням відкритих і прибережних районів морів і океанів в сферу господарської діяльності людини.

Серед природних явищ, які спостерігаються на Азовському морі, згінно-нагінні коливання рівня є визначальним показником для безпечного ведення морського господарства, включно з морським транспортом.

Особливе місце в дослідженнях згінно-нагінних рухів, які виникають в морських басейнах, займає визначення небезпечних штормових підйомів і опускань рівня. Ця проблема актуальна перш за все в прибережних областях морів, пов'язаних мілкими протоками. Як впливає з матеріалів багаторічних спостережень, в Азовському морі і на його узбережжі в зимовий і весняний періоди відбуваються шторми, активізовані циклонічної діяльністю, які викликають небезпечні для морегосподарчої діяльності згони і нагони.

Згінно-нагінні явища мають тривалість від декількох годин до декількох діб, що обумовлено атмосферними процесами, які відбуваються над акваторією моря. При певних синоптичних ситуаціях, які характеризуються сильними тривалими вітрами, можуть виникати значні підйоми або спади рівня в окремих районах моря. При аномальних спадах рівня відбувається обміління підхідних каналів в портах; значні підвищення рівня можуть викликати затоплення прибережних територій, складських приміщень в портах, зрив суден з причалів. Штормові вітри над морем спостерігаються досить часто, особливо в зимовий період. Середнє число днів зі штормовим вітром (швидкість 15 м / с і більше) становить 24-34 дні в році. Максимальне число таких днів (98) спостерігається в Маріуполі.

Актуальність роботи полягає в тому, що інформація про згінно-нагінні коливання рівня моря при штормових вітрах необхідна для забезпечення сталого функціонування портів, рекреаційних та оздоровчих установ, в прибережній зоні моря, безпеки мореплавства, населення, будівництві гідростатичних споруд.

Метою роботи є аналіз характеристик згінно-нагінних коливань рівня моря в Азовському морі за даними літературних джерел, адаптація та випробування чисельної гідродинамічної моделі «мілкої води» для оцінки і прогнозування викликаних вітром згінно-нагінних коливань рівня в портах та на узбережжі Азовського моря.

Методи дослідження – чисельне математичне моделювання викликаних вітром коливань рівня моря.

В роботі наведені: фізико-географічний опис Азовського моря та характеристик його гідрологічного режиму; аналіз основних чинників, які впливають на коливання рівня моря на різних просторово-часових масштабах; аналіз характеристик згінно-нагінних коливань рівня Азовського моря за даними літературних джерел; опис математичної структури числової гідродинамічної моделі для розрахунків згінно-нагінних коливань рівня моря; опис та аналіз результатів числового математичного моделювання згінно-нагінних коливань рівня в Азовському морі.

1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНИЙ ОПИС І ГІДРОЛОГІЧНИЙ РЕЖИМ АЗОВСЬКОГО МОРЯ

Азовське море належить до системи Середземного моря Атлантичного океану, в південній частині з'єднується з Чорним морем через неглибоку Керченську протоку (рис 1.1).

Географічна межа Азовського моря розташовується між $45^{\circ}16'$ і $47^{\circ}17'$ пн. ш. та $33^{\circ}36'$ і $39^{\circ}21'$ сх. д. Площа поверхні моря без затоки Сиваш і лиманів східного узбережжя за різними оцінками становить $37802 - 39000 \text{ км}^2$ [1-4], об'єм води 290 км^3 при середньомногорічному рівні. Середня глибина моря 7 м, область найбільших глибин знаходиться в центрі моря (максимальна глибина 14,4 м). Найбільша довжина Азовського моря по лінії коса Арабатська стрілка - дельта Дону складає 380 км, найбільша ширина по меридіану - між вершинами Темрюкського та Білосарайської заток – 200 км [4].



Рис.1.1 Географічна карта Азовського моря [5]

Загальна протяжність берегової лінії Азовського моря становить 2686км. Для узбережжя Азовського моря характерне чергування корінних ділянок берегових обривів, складених, переважно, пухкими, легко піддаються абразії, відкладеннями з висунутими в море акумулятивними формами (т.зв. «коси Азовського типу») (рис.1.2) [6].



Рис.1.2 Типи берегів Азовського моря

За морфологічними ознаками воно відноситься до плоских морів і є мілководним водоймищем з невисокими береговими схилами. Рельєф дна вирівняний, лише від кіс тягнуться обмілини. Ґрунт переважно м'який. Біля берегів широкою смугою залягають піщані ґрунти з домішками черепашки. Дно центральної частини моря покрите м'яким мулом. Склеястий ґрунт зустрічається лише біля південного берега моря. М'якість ґрунту сприяє інтенсивним наносам у каналах і на фарватерах (рис.1.3) [5]. Відмінною рисою літодинаміки Азовського моря є надходження великих обсягів наносів біогенного походження в берегову зону і їх відкладення при сприятливих умовах на акумулятивних формах (рис.1.4) [5].

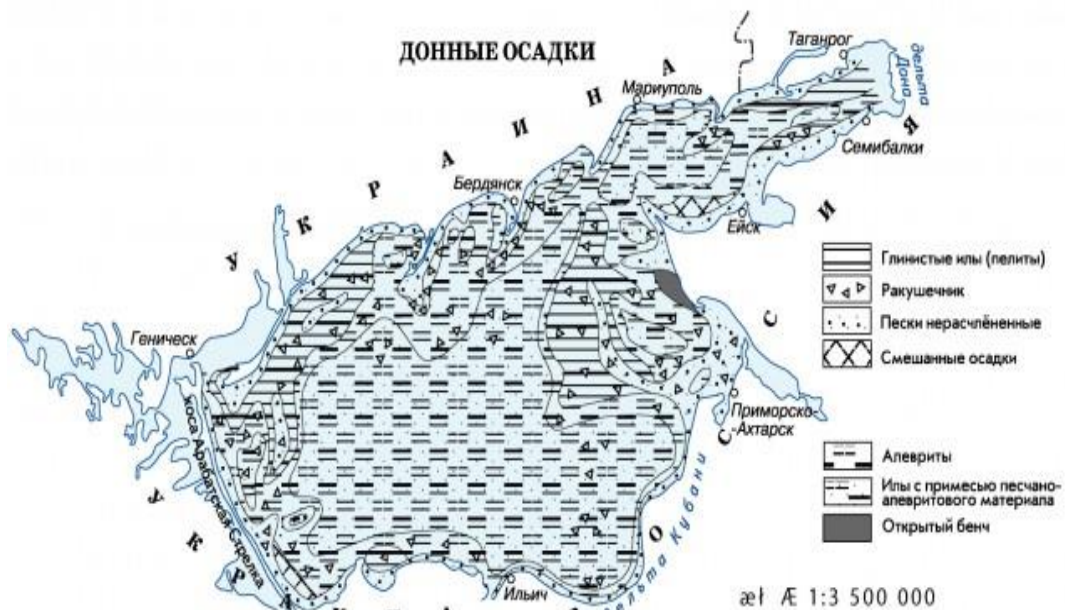


Рис.1.3. Типи донних відкладів Азовського моря

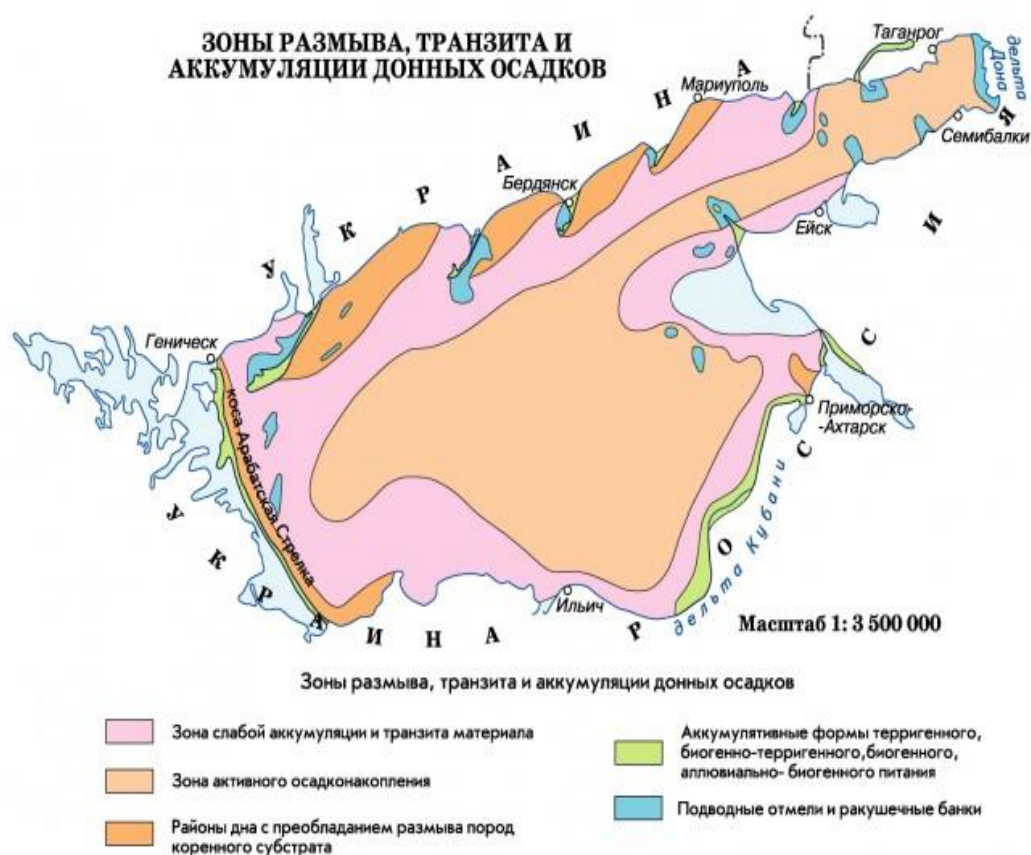


Рис.1.4 Зони розмиву, транзиту та акумуляції донних наносів в Азовському морі

За віддаленістю від океану Азовське море є найконтинентальнішим морем планети. Азовське море омиває береги України і Російської Федерації.

Азовське море розташоване в південній частині помірного кліматичного поясу і його клімат формується, в основному, під впливом великомасштабних синоптичних процесів, а також визначається географічним положенням басейну моря. В осінньо-зимовий час переважаючою синоптичною ситуацією є вплив відрога сибірського антициклону, що проявляється в переважанні вітрів східної чверті. Діяльність середземноморських циклонів характерна у весняний сезон, до літа вона слабшає і основний вплив в липні-серпні надає відріг Азорського антициклону, що забезпечує маловітряну, суху і теплу погоду.

Тепловий баланс Азовського моря в середньому за рік більше нуля в центральній частині моря і менше нуля в мілководній прибережній частині моря і в Таганрозькій затоці. Період позитивного теплового балансу для Таганрозької затоки становить близько 3 місяців, збільшуючись до центру моря до 5-5,5 місяців. Середньорічна температура повітря над Азовським морем зростає від 9,3-9,5°C на північному сході моря до 11,3°C – на півдні моря. Враховуючи незначну теплоємність моря і його внутриньоконтинентальне положення, вплив термічних умов Азовського моря на клімат навколишньої території незначно. Відмінність процесів нагрівання та охолодження вод помітно позначається тільки в перехідні сезони (квітень-травень, жовтень-листопад) [7].

Гідрологічний режим Азовського моря зумовлений його мілководністю, стоком річок, водообміном з Чорним морем і затокою Сиваш, а також метеорологічними умовами. Внаслідок мілководності моря нагрівання й охолодження водних мас відбувається швидко по всій товщі води, що призводить до вирівнювання температур. Доплив прісної води із суші опріснює води моря. Водообмін Азовського моря з Чорним морем і затокою Сиваш зумовлює розподіл солоності, щільності, прозорості й кольору води. З метеорологічних факторів, що впливають на гідрологічний режим, найбільше значення має вітер, який спричиняє хвилювання, течії, згони, нагони і перемішування водних мас.

1.1 Водний баланс

Водний баланс є одним з основних факторів, які визначають гідрологічну структуру вод Азовського моря. Нині його мінливість визначається природним і антропогенним впливом, таким як зміна

глобального і регіонального клімату, зарегулювання річкового стоку і водообміну через Керченську протоку. Статистичні характеристики компонент водного балансу за різні часові інтервали, отримані за методикою наведені в (табл. 1.1) [8].

В Азовське море впадають дві великі річки Дон і Кубань, які постачають в море 95% сумарного стоку, і 20 малих річок, в основному, в північній частині моря (Берда, Кальміус, Міус, Ея, Обіточна, Молочна та ін) (рис.1.5) [5]. Середній стік Дону в рік становить $24,4 \text{ км}^3$, Кубані - $11,6 \text{ км}^3$, малих річок північного Приазов'я - $2,1 \text{ км}^3$. За характером внутрішньорічного розподілу стоку Дон належить до річок з весняною повінню. Загальна площа водозбірного басейну Дону складає 422 тис. км^2 , Кубані - 58-59 тис. км^2 [6]. При впадінні в море Дон і Кубань утворюють обширні многорукавні дельти площею 540 км^2 і 4300 км^2 відповідно [7].

Річковий стік - одна з основних складових водного балансу, що характеризується найбільшою мінливістю: максимальний розмах коливань стоку становить $53,3 \text{ км}^3$, мінімальний стік ($9,7 \text{ км}^3$) річки Кубань спостерігався в період 1969-1977 рр., максимальний ($26,8 \text{ км}^3$) - в період 1929-1948 рр. річки Дон. Слід зазначити, що з 1952 року відбулося зарегулювання стоку р. Дон, а потім і р. Кубань. В цілому за період 1952-2000 рр. обсяг материкового стоку має значущий негативний тренд (табл. 1.2) [10].



Рис.1.5 Басейн Азовського моря

Табл.1.1 Осереднені по інтервалах років величини компонент водного балансу Азовського моря (км³): V_p - сумарний стік річок в Азовське море; V_{oc} і V_{ic} - атмосферні опади і випаровування з поверхні моря; Q_{as} і Q_{bc} - азовський і чорноморський потоки; ΔB – зміна обсягу моря

Компоненты Водного баланса (км ³)	Характеристика	Интервал осреднения, годы		
		1923-1951	1952-2000	1923-2000
V_p	Среднее	41,8	34,6	37,3
	Min	21,4	19,7	19,7
	Max	73,0	54,4	73,0
V_{oc}	Среднее	14,9	15,4	15,3
	Min	10,0	10,1	10,0
	Max	20,3	21,0	21,0
V_{ic}	Среднее	33,3	32,5	32,8
	Min	29,4	24,5	24,5
	Max	38,1	37,0	38,1
F	Среднее	23,1	17,5	19,7
	Min	-1,0	-0,9	-1,0
	Max	53,5	40,4	53,5
Q_{bs}	Среднее	32,9	33,6	33,3
	Min	24,7	25,6	24,7
	Max	49,2	44,1	49,2
Q_{as}	Среднее	53,8	47,7	50,1
	Min	34,4	34,7	34,4
	Max	72,5	63,9	72,5
ΔB	Среднее	0,5	2,4	1,7
	Min	-9,9	-5,4	-9,9
	Max	10,6	18,1	18,1

Табл.1.2 Стік рік, які впадають в Азовське море, км³/рік

Период	р.Дон	р.Кубань	Сумма
1929—1948	26,8	13,2	40,0
1949—2008	21,5	12,2	33,7
1929—1938	24,0	11,9	35,9
1939—1948	29,7	14,5	44,2
1949—1968	22,2	12,1	34,3
1969—1977	16,5	9,7	26,2
1939—1977	22,5	12,2	34,7
1978—1990	22,5	11,1	33,6
1991—2006	23,2	14,7	37,9
1929—2008	22,8	12,5	35,3

Водообмін між Азовським і Чорним морями, в основному, визначається морфометрією Керченської протоки і залежить від режиму течій і коливань рівної поверхні моря (Табл.1.3) [10]. На довгоперіодні (фонові) коливання рівня, обумовлені прісним балансом моря (головним чином річковим стоком), накладаються високочастотні коливання, викликані вітром, при цьому вітрова складова може значно перевершувати стокову. Основна роль у формуванні течій в Керченській протоці належить полю вітру над акваторією протоки і різницею рівнів моря на кінцях протоки, зумовлених, по-перше, згонами і нагонами і, по-друге, різницею в прісному балансі Чорного і Азовського морів.

Табл.1.3 Швидкості течій (см/с) і витрати води (м³/с) в Керченській протоці за 1980-2008 рр.

Характеристика	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Из Азовского моря												
Скорости течений (см/с)												
Средняя	10	27	15	13	15	14	12	12	13	12	12	15
Максимальная	20	47	34	38	47	49	40	33	50	28	46	43
с.к.о.	5,4	10,6	9,6	9,2	12,4	10,9	7,9	6,6	9,7	7,6	8,6	10,8
Повторяемость (%)	18	64	59	57	49	62	63	50	49	51	63	50
Расходы воды (м ³ /с)												
Средний	2983	4454	2480	3303	2667	2724	2504	1813	2093	2610	2288	2070
Максимальный	5120	9853	6558	10331	7504	10514	8823	8091	6571	8122	7015	7893
В Азовское море												
Скорости течений (см/с)												
Средняя	19	24	14	11	13	14	16	13	13	16	17	14
Максимальная	41	40	37	48	34	42	53	42	43	44	49	39
с.к.о.	11,7	10,1	8,7	10,2	7,5	10,3	10,2	8,5	8,0	10,6	12,6	10,4
Повторяемость (%)	82	36	41	43	51	38	37	50	51	49	37	50
Расходы воды (м ³ /с)												
Средний	3833	5182	2648	2051	1830	1964	2041	2309	2406	2416	2666	4055
Максимальный	8006	5629	9322	6443	5603	8187	7652	7367	8686	11165	9004	10416

1.2 Течії

Течії в Азовському морі формуються в основному під впливом вітру. Стічні течії виявляються лише в безпосередній близькості від гирла річок. Особливості режиму течій в окремих районах моря визначаються рельєфом дна, конфігурацією і напрямком берегової лінії. Аналіз модельних полів

течій для різних градацій швидкостей і напрямків вітру показує, що циркуляція вод Азовського моря характеризується досить вираженими вихровими утвореннями, зумовленими морфометричними особливостями басейну. Їхнє становище, конфігурація і кількість визначаються генеральним напрямом вітру. При цьому найбільш інтенсивні структури зосереджені в глибоководній частині моря. Уздовж кордонів, що розділяють основний кругообіг, відбувається посилення циркуляції, і тут формуються вузькі інтенсивні смуги, в яких потоки спрямовані проти вітру. Напрямок прибережної циркуляції залежить від орієнтації берегової лінії щодо напрямку вітру. На ділянках паралельних напрямку вітру циркуляція має таку ж спрямованість, що і сам вітер. На інших ділянках напрямок потоків залежить від локальних особливостей берегової лінії (наявності кіс, мисів і заток). Через мілководність і відносну ізолюваність Таганрозької затоки, тут формується своя специфічна система циркуляції, що складається з декількох вихрових осередків протилежного знака. Ці структури найбільш помітні в західній половині затоки і проявляються у вигляді вихрових диполів, орієнтованих перпендикулярно напрямку вітру.

За даними натурних вимірювань максимальні швидкості течій в Азовському морі зареєстровані в поверхневих шарах мілководних заток: Темрюкський (116-196 см / с) і Таганрозький (72-92 см / с), тобто в районах, де істотно вплив стоку річок Кубані й Дону. Інтенсифікація течій в цих затоках відбувається під час повені цих річок (квітень-липень). Порівняно великі швидкості течій відзначені в вузькості проток - Керченський (102-110 см / с), Тонкий (112 см / с) і Должанський (75-95 см / с). У Бердянській затоці, Утлюкському лимані і на більшій частині акумулятивної рівнини Панова спостерігаються швидкості течій не перевищували 29-34 см / с [10].

1.3 Швидкість та напрямок вітру

Швидкість вітру в прибережній зоні Азовського моря має виражений річний хід з максимумом вітрової активності, а саме в листопаді - березні, і мінімумом - в літні місяці. В даний час найбільші величини середньомісячної швидкості вітру відзначаються по всьому узбережжю Азовського моря в лютому (від 5,03 м / с в Бердянську до 6,91 м / с в Мисовому) і пов'язані переважно з баричними градієнтами між відрогами сибірського антициклону і циклонічної діяльністю на півдні Чорного моря. Зменшення баричних градієнтів в літній сезон призводить до ослаблення вітрової активності над акваторією Азовського моря.

Максимальні значення швидкості вітру (24 - 34 м / с) на більшості прибережних станцій відзначені, в основному, при східних і північно-східних штормах (рис.1.6) [7]. Вони вирізняються значною тривалістю, зазвичай охоплюють все море і часто супроводжуються морозами і заметілями. Влітку

17

вітри з такою швидкістю відмічаються при проходженні холодних фронтів. Найчастіше вони носять шквалистий характер і, як правило, супроводжуються грозами і зливами. Перед шквалами зазвичай спостерігається висока температура повітря. Взимку в описуваному районі відмічаються так звані «шторми Азовського моря» – сильні північно-східні вітри, небезпечні для суден. Вони спостерігаються 20 - 30 разів на рік, досягають великої швидкості і, як правило, супроводжуються сильними морозами. Найдовша тривалість таких штормів становить 9 діб. Ці вітри спричиняють сильне хвилювання у вершині Таганрозької затоки, а вздовж коси Арабатська Стрілка хвилі ламають лід і нагромаджують тороси.

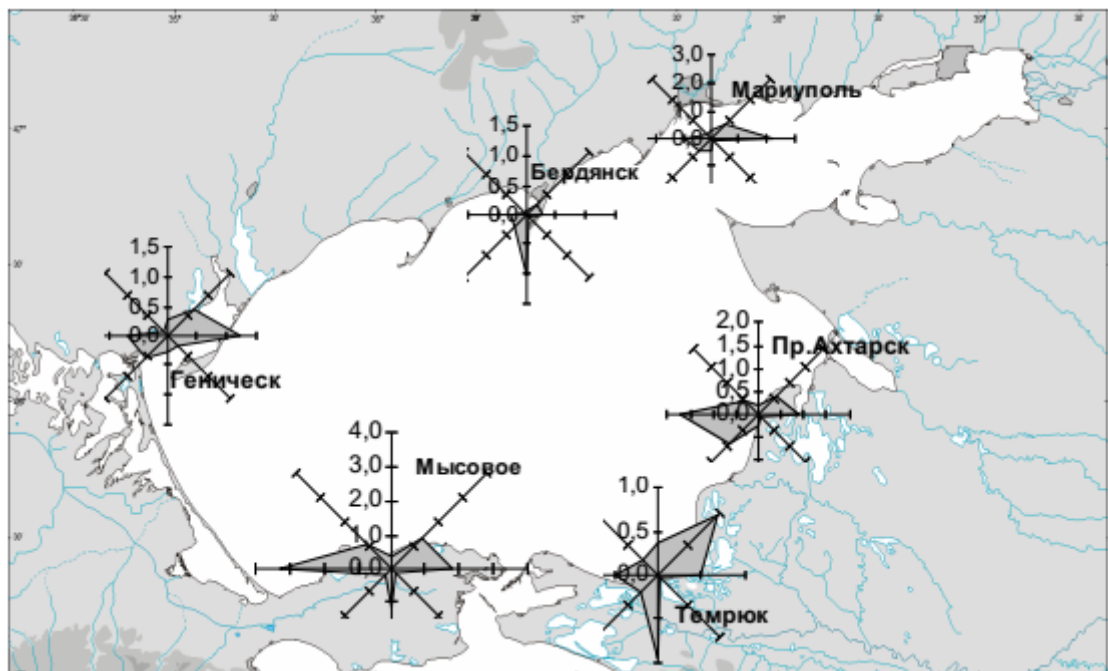


Рис.1.6 Річні рози повторюваності (%) штормового вітру (> 10 м / с) на узбережжі Азовського моря

Повторюваність штильових умов змінюється від сезону до сезону незначно і в середньому за рік на узбережжі становить 3,5-5,1% від загального числа спостережень, в Маріуполі штилів суттєво більше - 8,7%. Максимум штильових умов доводиться на серпень-вересень (рис.1.7) [7].

Середньомісячна швидкість вітру протягом року становить 3 - 7 м/с, холодної пори року вона більша, ніж теплої Штилі бувають рідко, повторюваність їх зазвичай не перевищує 7 %, і тільки в окремих пунктах вона збільшується до 14 % [11].

Бризи теплої пори року спостерігаються майже на всьому узбережжі Азовського моря. Морський бриз установлюється близько полудня і досягає

18

максимального розвитку до 16 години. На 19 годину він слабшає і після заходу сонця припиняється. Береговий бриз починається опівночі і триває приблизно до 8 - 10 години. Середня швидкість морського бризу становить 3 - 4 м/с, берегового – 1 - 3 м/с. Найбільша швидкість бризів досягає 8 м/с. Дія морського бризу поширюється на 11 - 14 миль вглиб суші, берегового – на 16-19 миль у море. Середньомісячна кількість днів із бризом становить влітку 18, восени – 8 - 9.

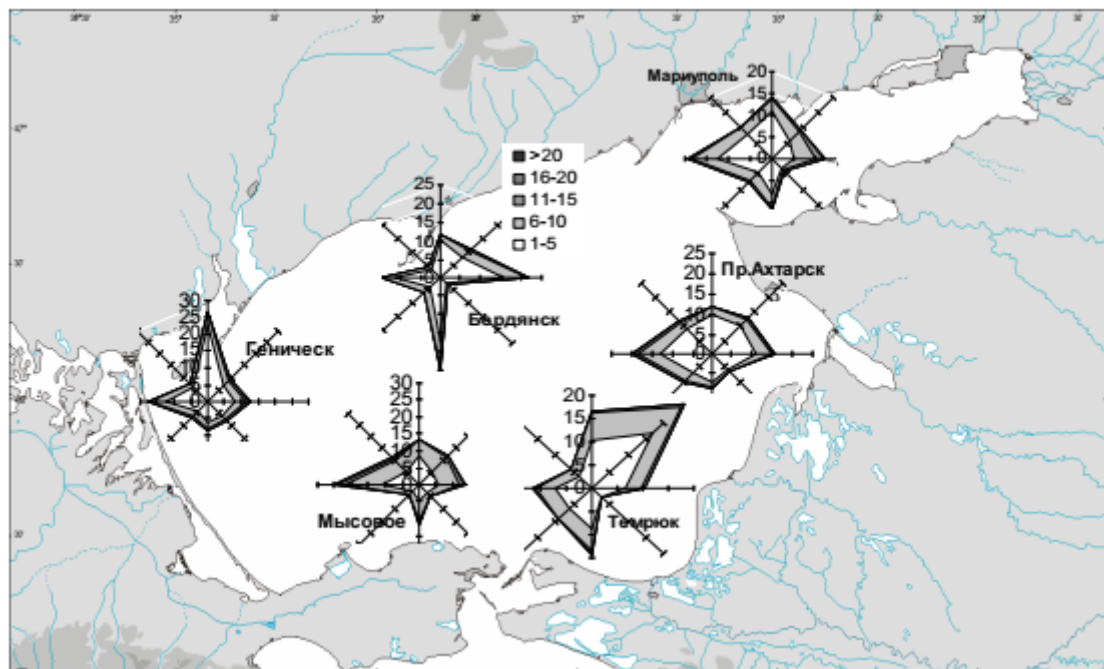


Рис.1.7 Річні рози повторюваності (%) вітру по градаціях швидкостей на узбережжі Азовського моря

1.4 Хвилювання

Режим хвилювання Азовського моря зумовлюється невеликою площею моря, малими глибинами і значною порізаністю берегів. Згідно з даними візуальних спостережень, в прибережній зоні Азовського моря в 89-95%

випадків висоти хвиль не перевищують 0,7 м. При цьому, в усі сезони тут переважає хвилювання східного, північно-східного, західного і південно-західного напрямків, що, загалом, відповідає вітровому режиму моря і добре узгоджується з повторюваністю штормових вітрів (табл.1.4) [12]. Винятком є район у МГС Небезпечне, де найбільшу повторюваність має хвилювання північних і південних румбів.

У центральній, найглибоководнішій частині моря, висота хвиль не перевищує 3,5 м і тільки дуже рідко вона досягає 4 м. У найбільш штормові

19

місяці (грудень-березень) розвиток хвилювання в описуваному районі обмежує наявність криги.

В Азовському морі переважним чином спостерігаються хвилі завдовжки 15 - 25 м і тільки іноді – 80 м. Період хвилі, як правило, менше 5 сек., дуже рідко – 7 - 8 сек. В описуваному районі відмічаються короткі і надто круті хвилі, які є небезпечними для малих суден.

Табл.1.4 Повторюваність висоти хвиль

Повторюваність висоти хвиль, %				
Висота хвиль, м	Грудень-лютий	Березень-травень	Червень-серпень	Вересень-листопад
<1	36	45	75	47
1 – 2	46	41	21	39
2 – 3	13	11	3	10
≥3	5	3	1	4

Вітрове хвилювання в Азовському морі розвивається швидко і вже через 4 - 6 годин після посилення вітру досягає залежно від швидкості вітру найбільшого розвитку: при швидкості вітру 5 - 10 м/с ступінь хвилювання дорівнює II - III балам, при швидкості вітру 10 - 15 і 15 - 20 м/с його ступінь, відповідно, III - IV і IV - V балів, а при швидкості вітру 20 - 25 м/с і більше 25 м/с дорівнює, відповідно, V і VI балам [12]. Вітрові хвилі малої довжини, дуже круті і становлять небезпеку для малих суден.

2 КЛАСИФІКАЦІЯ МІНЛИВОСТІ РІВНЯ МОРЯ ЗА ЧАСОВИМИ МАСШТАБАМИ. ОСНОВНІ ЧИННИКИ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА КОЛИВАННЯ РІВНЯ АЗОВСЬКОГО МОРЯ ЗА ЛІТЕРАТУРНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Зміни рівня Азовського моря є наслідком дії багатьох фізичних процесів різних просторових і часових масштабів. Якщо розглядати коливання рівня Азовського моря за часовими масштабами в класифікації, то за періодами можна виділити:

- а) багаторічні коливання (з періодами більше року) пов'язані переважно зі зміною обсягу вод моря;
- б) сезонні (внутрішньорічні) коливання з періодами від півроку до року;
- в) коливання синоптичного діапазону частот з періодами від 2-3 доби до півроку, обумовлені переважно атмосферними процесами [13];
- г) мезомасштабні коливання з періодом менше 2 діб (для Азовського моря це в основному сейшеві коливання).

2.1 Багаторічні зміни

На більшості берегових пунктів Азовського моря виявлені позитивні тенденції підвищення рівня моря (рис.2.1) [7]. До основних з чинників, що впливають на даний час на багаторічні коливання рівня в Азовському морі, відносяться: евстатичний (зміни компонент водного балансу моря і твердий стік), геодинамічний (сучасні тектонічні рухи), кліматичний (міжрічна мінливість вітрових умов). Впливом інших гідрометеорологічних факторів, таких як багаторічні зміни атмосферного тиску або стеричний ефект, пов'язаний із змінами щільності води, можна знехтувати.

В багаторічні коливання рівня основний внесок вносить мінливість складових водного балансу моря – стоку річок Азово-Чорноморського басейну, водообміну з Чорним морем, опадів і випаровування з поверхні моря.

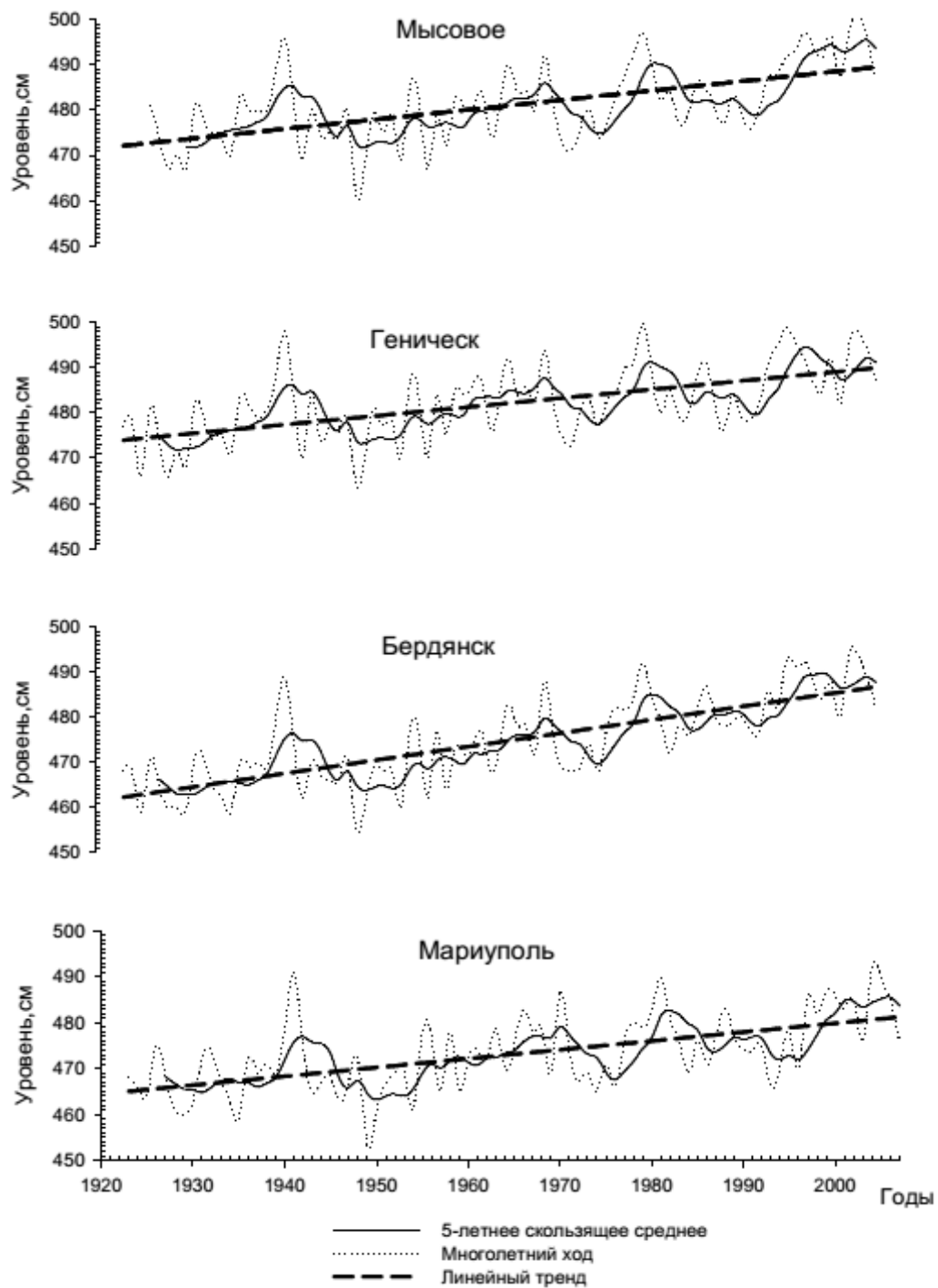


Рис.2.1 Багаторічний хід рівня моря (см) на берегових пунктах Азовського моря

2.2 Сезонна мінливість

Сезонний хід рівня Азовського моря визначається, переважно, внутрішньорічною мінливістю складових водного балансу і вітровими умовами [14].

Виділяють два періоди в річному ході рівня моря: з позитивними і негативними приростами рівня. За аналізом сезонної мінливості рівня за даними спостережень на МГС Азовського моря видно, що Підйом рівня починається в листопаді - грудні і триває до травня - червня. Найбільш інтенсивно рівень підвищується з березня по травень. В травні - червні, після закінчення паводку, стік поступово зменшується, і рівень починає знижуватися. Стояння рівня на позначках вище середнього спостерігається з березня по серпень, на відмітках нижче середнього - з вересня по лютий. Найбільші розмахи коливань рівня Азовського моря відзначаються в жовтні - листопаді, січні та березні. Мінімальні відхилення характерні для травня-липня (рис.2.2-2.3) [10].

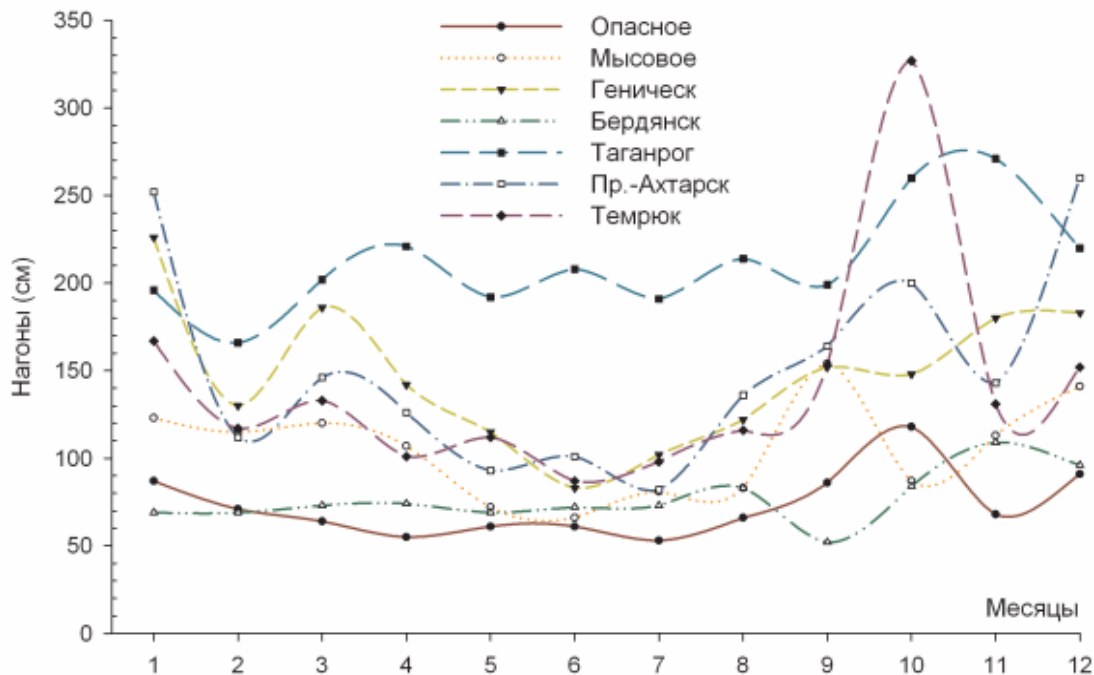


Рис.2.2 Сезонний хід максимальних підйомів рівня (см) за даними спостережень на МГС Азовського моря

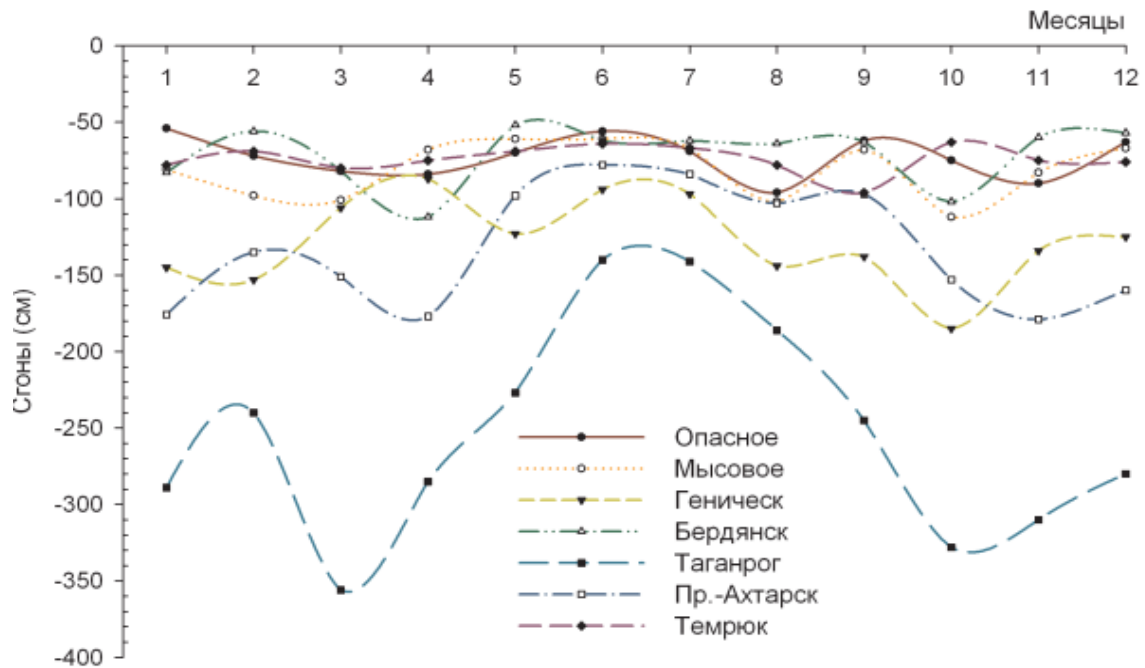


Рис.2.3 Сезонний хід максимальних знижень рівня (см) за даними спостережень на МГС Азовського моря

Вплив викликаних вітром згінно-нагінних коливань на середньомісячні значення рівня зменшується від березня до червня. Різниця в 19 см між значеннями рівня в Таганрозькій затоці і західній частині моря (МГС Генічеськ, Мисове) до червня знижується до величин, що не перевищують 3см.

Дослідження повторюваності згонів і нагонів по районах Азовського моря показує, що найбільш часто небезпечним нагонам (48% всіх випадків) і згонам (60% всіх випадків) схильні східне узбережжя моря і Таганрозька затока. При цьому сильні згони ніколи не виникають в прибережній зоні півдня моря і в північному районі Керченської протоки.

2.3 Мезомасштабна і синоптична мінливість рівня

Мезомасштабна і синоптична мінливість рівня Азовського моря досить добре вивчена. Інтерес до цієї теми викликано, насамперед, значними амплітудами згінно-нагінних коливань рівня, що досягають 3-6 м. На основі оглядів досліджень, виконаних у цій області, їх можна умовно розділити на дві групи:

1) роботи прогностичного напрямку, що включають статистичні методи аналізу короткострокових неперіодичних коливань рівня та їх зв'язків;

2) чисельне моделювання.

Найбільший внесок в діапазоні синоптичної мінливості вносять згінно-нагінні коливання рівня, пов'язані з атмосферними процесами тривалістю від 2-3 до 15 діб [15].

Особливе місце в дослідженнях згінних і нагінних рухів, що виникають в морських басейнах, займає визначення катастрофічних підйомів і опускань рівня. Ця проблема актуальна перш за все в прибережних областях морів, пов'язаних дрібними протоками. Як впливає з матеріалів багаторічних спостережень, в Азовському морі і на його узбережжі в зимовий і весняний періоди відзначаються урагани, активізовані циклонічної діяльністю і викликають штормові згони і нагони.

Розвитку згінно-нагінних коливань рівня Азовського моря сприяють фізико-географічні умови Азовського басейну – досить велика площа моря при незначній середній глибині (близько 7 м), а також істотна штормова активність (середнє число днів зі штормовим вітром швидкістю 15 м/с і більше становить 24-34 дня). Як показує аналіз спостережень, амплітуди згінно-нагінних коливань рівня в Азовському морі бувають дуже значними (Табл.2.1) [10].

Табл.2.1 Відхилення рівня (см) на МГС Азовського моря, можливі 1 раз в 25, 50 і 100 років за даними спостережень

МГС	Период повторюваності, роки					
	25		50		100	
	Підйом	Пониження	Підйом	Пониження	Підйом	Пониження
Опасное	92	87	100	95	108	102
Мысовое	127	112	136	123	144	135
Геничеськ	177	143	191	153	204	163
Бердянськ	81	82	87	88	93	93
Маріуполь	105	130	113	139	121	147
Таганрог	229	312	249	344	270	377
Пр.-Ахтарськ	201	185	224	205	247	225
Темрюк	209	79	236	85	263	91

В (табл. 2.2) наведено екстремальні характеристики значень рівня Азовського моря за даними берегової мережі станцій за різними напрямками

вітру [10]. Активна штормова активність в районі Азовського моря призводить к затопленню портів та прибережних територій, а наслідком аномальних спадів рівня є омління підхідних каналів в портах.

Таблиця 2.2 Екстремальні відхилення рівня Азовського моря (см) за даними МГС для різних напрямках вітру

Пункт	СВ	В		Ю, ЮВ	ЮЗ	З	СЗ	
	15—20	15—20	>20	15—20	15—20	15—20	15—20	>20
	м/с	м/с	м/с	м/с	м/с	м/с	м/с	м/с
Опасное	51	41	44	-54	-97	-75	70	118
Мысовое	98	112	154	-46	-113	-57	-48	-61
Геническ	137	133	226	-102	-93	-116	-137	-185
Бердянск	-59	-51	-60	109	68	65	53	-113
Мариуполь	-92	-98	-129	72	131	73	42	69
Таганрог	-291	-273	-356	188	271	190	144	160
Ейск	-163	-178	-281	124	122	147	119	122
Пр.-Ахтарск	-152	-170	-179	171	84	171	171	260
Темрюк	-38	-37	-57	79	-96	84	195	327

Аналіз даних рівневих спостережень в Азовському морі показав, що при вітрах східного і північно-східного напрямів найбільші підйоми рівня виникають на МГС Мисове (154 см) і Генічеськ (226 см), а найбільші зниження рівня - в районі МГС Маріуполь (129 см), МГС Приморсько-Ахтарськ (179 см), МГС Єйськ (281 см) і МГС Таганрог (356 см). При дії штормових вітрів північно-західного і західного напрямків найбільші величини підйомів рівня відзначаються на МГС Небезпечне (118 см), МДР Єйськ (147 см), МГР Приморсько-Ахтарськ (260 см), МГС Темрюк (327 см), а найбільші спади рівня - в районі МГС Бердянськ (113 см) і МГС Генічеськ (185 см). Південно-західні вітри призводять до підйомів рівня на МГС Маріуполь (131 см), МГС Таганрог (271 см) і зниженнях рівня на МГС Небезпечне (97 см), МГС Темрюк (96 см) і МГС Мисове (113 см). В районі МГС Бердянськ найбільш небезпечні нагони (109 см) спостерігаються при південному і південно-східному вітрах.

Оскільки згінно-нагінні коливання рівня Азовського моря мають вигляд одноузлової сейші з переважаючою вузловий лінією, що проходить приблизно, як можна припускати по рисунку 2.4 [16], по лінії Приморсько-Ахтарськ - Бердянськ, то незалежно від швидкості і напрямку вітру коливання в центрі моря незначні. У кожному з районів моря на згінно-нагінні коливання впливає розташування берегової лінії щодо вітру. Тобто в пунктах

Бердянськ і Небезпечне (розмах коливань 202-203см), а найбільші - у віддалених від вузлової лінії пунктах Генічеськ (412см), Єйськ (438см) і Таганрог . У Таганрозі, де істотний вплив має стік річки Дон, амплітуда згінно-нагінних коливань максимальна і становить 609 см. Аналіз зв'язку коливань рівня Азовського моря з атмосферними впливами, проведений в [16], виявив незначну роль варіацій атмосферного тиску і максимуми функції когерентності між рівнем моря і компонентами вітру на періодах синоптичних (100 годин) і сейшевих коливань (24 години).

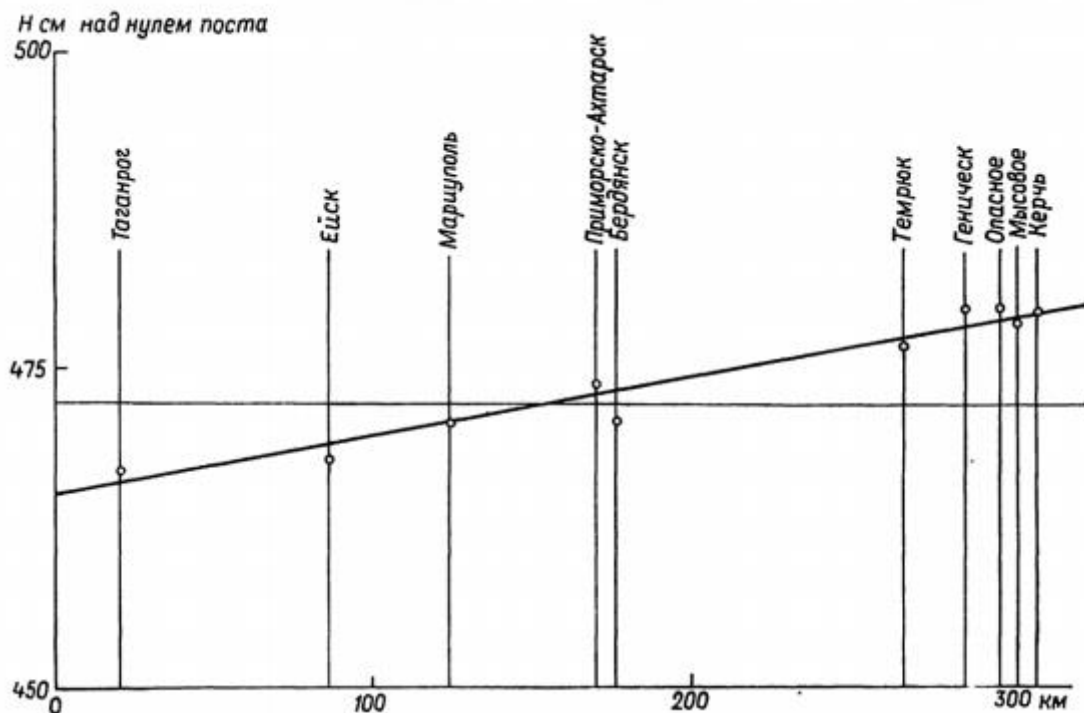


Рис.2.4 Нахил рівня Азовського моря вздовж осі симетрії

2.4 Типи атмосферних процесів, що спричиняють аномальні згінно-нагінні коливання рівня Азовського моря

Для періоду 1950-2007рр. вибиралися випадки змін рівня моря, які виходять за межі критичних позначок небезпечного явища (НЯ) і особливо небезпечного явища (ОНЯ). За обраних дат (70 випадків) створений масив синхронних вимірювань рівня моря, атмосферного тиску і швидкості вітру. Всі синоптичні процеси були зведені до 5 типів, визначаючих характер вітрового потоку над Азовським морем. Додатково кожен тип може мати до 5 підтипів по градаціям швидкості вітру. З матеріалів спостережень випливає, що тільки поля вітру над морем зі значними величинами градієнта тиску і швидкості вітру (10-15 м/с і більше) можуть викликати небезпечні підйоми

рівня. Тому з аналізу були виключені атмосферні процеси, які такий сильний вітер не викликають - наприклад, малоградієнтні баричні поля, незначні циклонічні обурення і т. д., описувані Типом V.

Тип I зумовлений розташуванням антициклону над центральними районами Європи. У південно-східній частині Чорного моря, що знаходиться під впливом депресії, розвивається циклонічна діяльність. Такий атмосферний процес сприяє виникненню над Азовським морем полів вітру східного, північно-східного та північного напрямків. Шторми з швидкістю вітру 10-15 м/с можуть спостерігатися в будь-який місяць року, а зі швидкістю 15-20 м/с - тільки у зимовий сезон. Час дії цього типу значно і нерідко досягає двох тижнів, причому градації швидкості вітру при цьому можуть змінюватися кілька разів. Східні і північно-східні вітри виникають на Азовському морі при широтному розташуванні ізобар і збільшення баричних градієнтів до 2-3 мб на 1000 км. Шторму вітер набуває чинності, якщо різниця атмосферного тиску між Маріуполем і Мисовим перевищує 3-4 мб [17].

За період 1950-2007рр. атмосферні процеси типу I привели в зимовий сезон до 10 випадків небезпечних згінно-нагінних коливань рівня. Три випадки (25-30/04/1964, 02-08/01/1969, 07-10/03/1970) супроводжувалися значним збитком (рис. 2.5-2.6) [7].

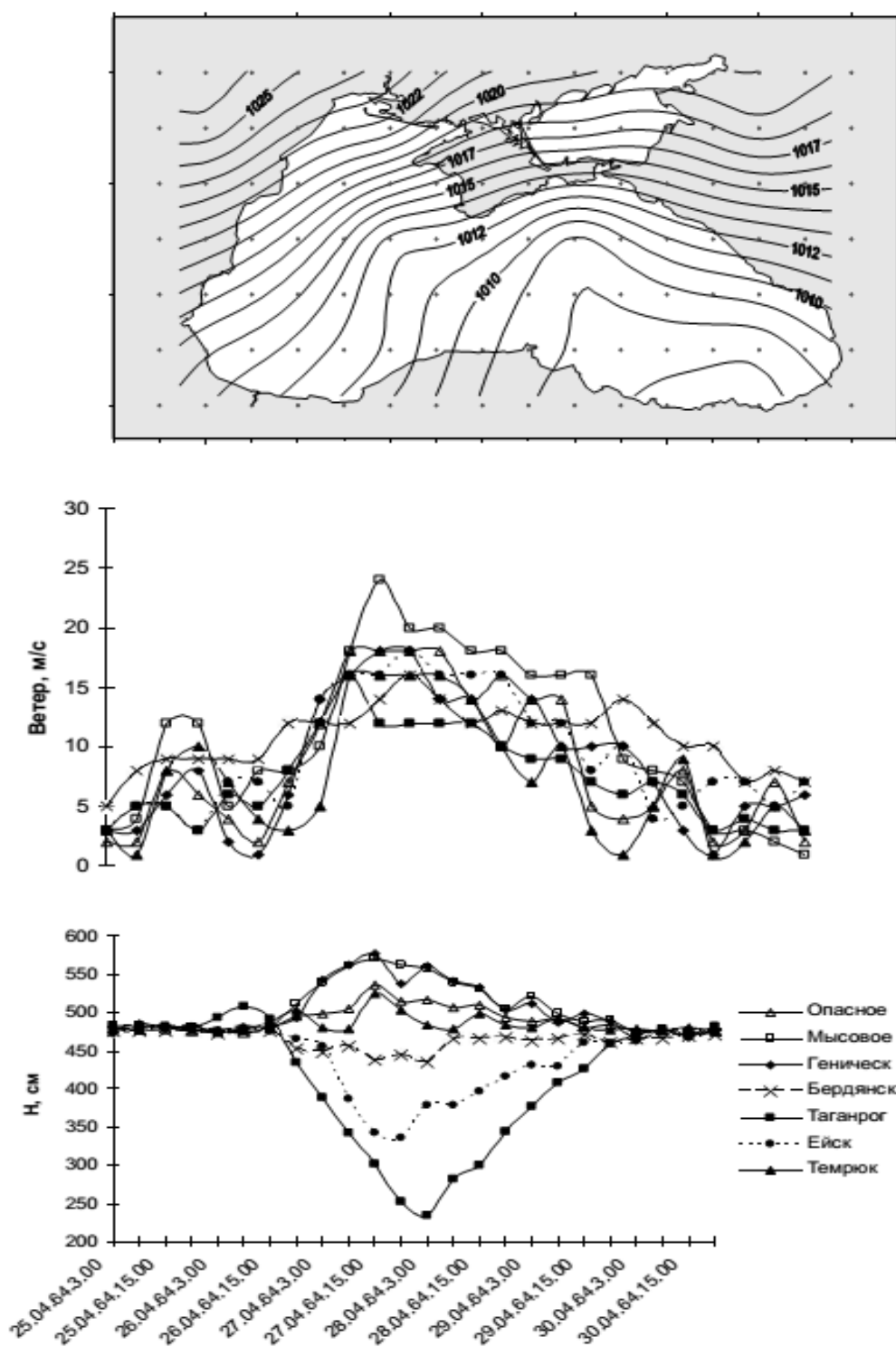


Рис.2.5 Поле тиску, зміни швидкості вітру (м/с) і рівня на узбережжі моря, викликані синоптичною ситуацією 25-30.04.1964 р.

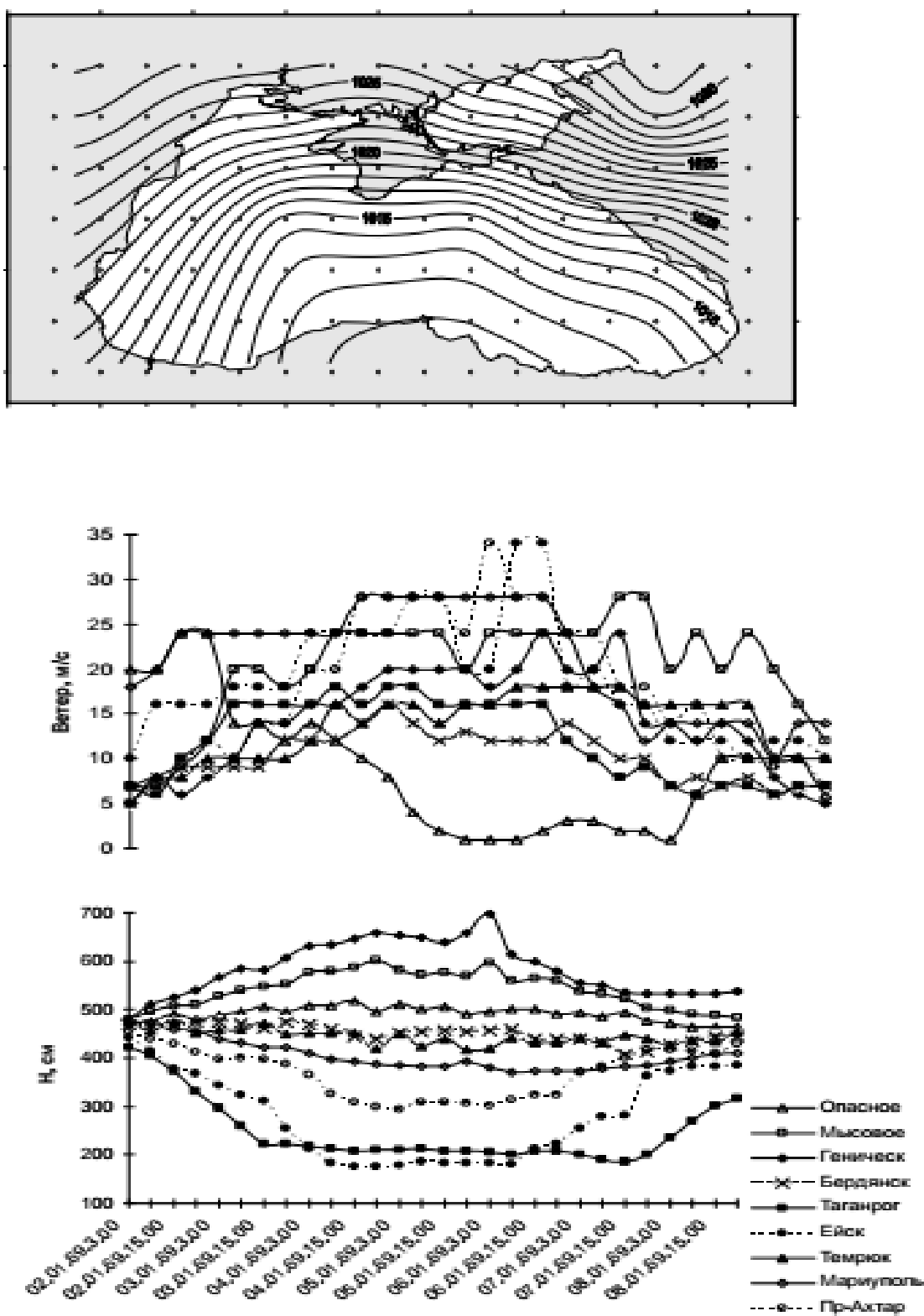


Рис.2.6 Поле тиску, зміни швидкості вітру (м/с) і рівня на узбережжі моря, викликані синоптичною ситуацією 02-08/01/1969

При синоптичних процесах I типу, що породжують поле північно-східного вітру зі швидкістю 10-15 м/с, небезпечні зниження рівня спостерігаються в Приморсько-Ахтарську (спад на 60-90 см) та Маріуполі (50-60см). У Таганрозі значні спади рівня спостерігаються при швидкостях вітру 15 м/с і вище. Крім того, якщо північно-східний вітер у Таганрозькій затоці відхиляється з плином часу на схід, то навіть помірний вітровий вплив (середня швидкість вітру 10-12 м/с) викличе у Таганрозі значний спад рівня (до 2-3 м). При цьому підйом рівня у західній частині моря (Генічеськ) може досягати 120 див. Якщо антициклон поширюється і на північний Кавказ, над Азовським морем переважає поле східного вітру. Такі ситуації зазвичай більш тривалі за часом, ніж попередні.

Виявлено 11 випадків небезпечних згінно-нагінних коливань рівня, викликаних такими атмосферними процесами. Характерний випадок з досить однорідним над морем полем вітру східного напрямку ураганної сили спостерігався 3-8 січня 1969 р. Градієнт тиску над Азовським морем досягав 7 мб на 1° широти. Середня швидкість вітру на більшості пунктів узбережжя спостерігалася в діапазоні 20-28 м/с, у східного узбережжя моря (Єйськ, Приморсько-Ахтарськ) вона досягала 34 м/с (рис. 2.6).

Згінно-нагінні коливання екстремальних амплітуд захопили весь Азовський басейн і були викликані значною швидкістю вітру, так і тривалістю його дії. Як правило, в результаті такого вітрового впливу відбувається затоплення західного узбережжя моря (р-н Генічеська, північна частина Арабатської стрілки) і осушення мілководь на сході моря (Ясенська затока, Бейсугський і Ахтарський лимани).

Слід зазначити, що в Темрюку і Небезпечному при такому атмосферному процесі, сильних згінно-нагінних коливань практично ніколи не відбувається при будь-якій швидкості вітру. В Приморсько-Ахтарського і Маріуполі спади рівня, а в Генічеську нагони (120см), будуть спостерігатися майже завжди, якщо середня швидкість вітру змінюється в межах 10-15 м/с (табл. 2.3) [7]. При посиленні східного вітру до 20 м/с і вище, коливання рівня охоплюють майже весь басейн моря. При цьому на східному узбережжі спостерігаються небезпечні спади рівня (найбільш екстремальні в Приморсько-Ахтарську і Таганрозі), а на західному узбережжі значний підйом і затоплення узбережжя (Генічеськ). Тривалість стояння рівня на екстремальних відмітках при таких процесах на берегових пунктах західного і східного узбережжя моря може сягати 2-5 діб.

Таблиця 2.3 Відхилення рівня (см) від середньобагаторічних значень, спостережені на узбережжі Азовського моря при вітрових потоках східної чверті

Пункт	Тип I, северо-восточный ветер		Тип I, восточный ветер			Тип IV, ЮВ ветер
	10-15 м/с	15-20 м/с	10-15 м/с	15-20 м/с	>20 м/с	15-20 м/с
Опасное	27÷-38	28÷51	0 ÷41	7÷41	38÷44	-54
Мысовое	64÷98	78÷98	24÷69	91÷112	123	-46
Геническ	59÷133	90÷137	47÷86	123÷133	179÷221	-102
Бердянск	-3 ÷25	-59÷-24	-51÷-21	-51÷-37	-60÷-48	52
Мариуполь	-58÷-49	-92÷-70	-88÷-41	-98÷-44	-117÷-82	72
Таганрог	-203÷-65	-291÷-146	-242÷-70	-327÷-273	-327÷-273	188
Ейск	-101÷-66	-163÷-96	-130÷-41	-178÷-170	-285÷-181	124
Ясенская Переправа	-62÷-46	-149÷-77	-111÷-54	-113÷-79	-190÷-122	77
Приморско-Ахтарск	-89÷-62	-152÷-62	-101÷-19	-150÷-136	-193÷-113	171
Темрюк		- 38÷0	-44÷-1	-37÷ 33	-57÷-33	79

Тип II характеризується тим, що циклонічна діяльність розвивається над районом Балтійського моря, улоговина циклону спрямована на Балканський півострів або на північний захід Чорного моря. Кавказ і Мала Азія зайняті областю високого тиску, під впливом якої знаходиться південний схід Чорного моря. Для цього типу характерні південно-західні вітри над усім Азовським морем. Якщо в улоговині над півднем України або над Кримом розвивається циклон, тоді переважає південний (у 80 % випадків), рідше південно-східний вітровий потік над морем. Час дії сильних вітрів цього типу не перевищує 1 добу. Всього виділено 5 випадків поля вітру південних і південно-західних напрямків, у одному з цих випадків швидкість досягала 15-20 м/с. Як показав аналіз, при швидкостях вітру понад 15 м/с, відбуваються згони в Небезпечному (60-70 см), і нагінні підвищення рівня в Маріуполі (60-100 см). При цьому на східному узбережжі моря спад рівня в Темрюку і підйом в Єйську і Ясенської переправі незначні (табл.2.4) [7].

Таблиця 2.4 Відхилення рівня (см) від середньобагаторічних значень, спостережені на узбережжі Азовського моря при вітрових потоках західної чверті

Пункт	Тип II, юго-западный ветер		Тип III, северо-западный ветер			Тип III, западный ветер	
	10-15 м/с	15-20 м/с	10-15 м/с	15-20 м/с	>20 м/с	10-15 м/с	15-20 м/с
Опасное	-75÷-32	-76÷-69	1÷41	32÷70	106	-75÷-12	-75÷-57
Мысовое	-56÷-22	-69÷-60	-32÷-10	-61÷-32	-61÷-48	-57÷-9	-57÷-28
Геническ	-86÷-29	-93÷-49	-137÷-69	-137÷-69	-184	-116÷-58	-116÷-97
Бердянск	0÷68	0÷68	0÷53	0÷53	-94	0÷65	26÷65
Марнуполь	28÷102	81÷104	0÷42	0÷42	-69	24÷73	56÷73
Таганрог	65÷168	158÷265	54÷160	144÷160	144÷160	122÷190	180÷190
Ейск	44÷113	99÷122	53÷102	106÷122	119÷122	76÷121	124÷134
Ясенская Переправа	19÷60	33÷94	34÷68	61÷141	61÷141	40÷131	40÷131
Приморско-Ахтарск	11÷55	27÷84	56÷147	56÷197	56÷197	52÷153	119÷171
Темрюк	-72÷-4	-72÷-54	30÷195	87÷195	250÷300	4÷84	54÷84

Тип III. Північно-західний і західний потік над Азовським морем викликаний циклонічною діяльністю над Європейською частиною СНД, а над Західною Європою розташований антициклон з відрогом на Балканський півострів і Чорне море. Західний Казахстан і Західна Сибір знаходяться під впливом малопотужних антициклонів.

Якщо циклони переміщуються із заходу і північного заходу, то в цьому випадку над морем формується поле північно-західного вітру. Слід зазначити, що стійкий сильний північно-західний вітровий потік спостерігався відносно рідко, і значні швидкості вітру, що перевищують 20 м/с, як правило, були пов'язані з проходженням через центральну частину моря глибоких циклонів. Зазвичай, у 81 % випадків, циклонічна діяльність розвивалася над центральними районами Європи, і циклони проходили над півднем України, генеруючи західні вітри з відхиленнями на північний захід і північний захід.

Якщо циклони переміщуються із заходу і північного заходу, то в цьому випадку над морем формується поле північно-західного вітру. Слід зазначити, що стійкий сильний північно-західний вітровий потік спостерігався відносно рідко, і значні швидкості вітру, що перевищують 20 м/с, як правило, були пов'язані з проходженням через центральну частину

моря глибоких циклонів. Зазвичай, у 81 % випадків, циклонічна діяльність розвивалася над центральними районами Європи, і циклони проходили над півднем України, генеруючи західні вітри з відхиленнями на північний захід і північний захід.

Глибокі циклони зі значними градієнтами тиску, що породжують західний вітровий потік зі швидкістю вітру 15-20 м/с, відзначаються в зимовий період (грудень-січень). Час дії сильних вітрів західного напрямку обмежено і рідко перевищує одну добу. В результаті їх дії виникають явища зганянь на західному узбережжі моря, найбільш сильно виражені в Генічеську. Тут амплітуди падіння рівня зазвичай лежать в межах 80-110 див. В той же час, згони в Мисовому і Небезпечному менш помітні. Падіння рівня тут рідко перевищують 50 див. На східному узбережжі нагінні явища будуть спостерігатися завжди на всіх пунктах узбережжя. Максимальні нагони (1,5-2 м) при сильних західних вітрах відзначаються в Приморсько-Ахтарського, Ясенської переправі і Таганрозі. У Маріуполі та Бердянську підйом рівня незначний (20-75 см). Слід зазначити, що в результаті відносно короткочасного вітрового впливу рівень знаходиться на екстремальних відмітках нетривалий час, зазвичай не більше 1 доби. Синоптичні ситуації, що викликають північні і північно-західні шторми спостерігаються порівняно рідко. Найбільші швидкості вітру північно-західного напрямку, як правило, виникають при зміщенні глибоких середземноморських циклонів з Чорного моря через центр Азовського моря. У такому разі напрямок вітру швидко змінюється, в основному східні і північно-східні вітри змінюються північними, а потім північно-західними і західними, і які переміщують масу води, що накопичилася на південно-заході і заході моря, на південний схід. Значні нагони можливі на в Темрюку, і особливо в Приморсько-Ахтарську, де висота нагонів перевищує середньомісячний багаторічний рівень на 56-197 см.

Для всього південно-східного узбережжя Азовського моря, особливо поблизу Темрюка, катастрофічні наслідки може викликати проходження через центральну частину моря глибоких «пірнаючих» циклонів, що викликають сильний західний чи північно-західний вітер. Такі ситуації зі швидкістю вітру, яка перевищує 20-25 м/с виникають, ймовірно, не частіше, ніж раз у 50 років. Достовірно відомо 3 випадки: 1877, 28/02-01/03/1914 і 28-29/10/1969 [7]. Сильні південні і південно-західні вітри викликають згони в Небезпечному і Мисовому (до 50см). Швидкий поворот вітру на північні і північно-західні румби призводить до того, що основна маса води мине західне узбережжя моря і переганяється до південно-схід. В силу цього,

значні нагінні явища від південних вітрів на північно-західному узбережжі моря (Генічеськ) не спостерігаються. Північно-західний і північний вітри значної сили переміщують водні маси в південно-східному напрямку. Висота нагону в Темрюку може перевищувати 3 метри. Зниження рівня на північно-західному узбережжі моря будуть також істотні, біля Генічеська амплітуда падіння рівня лежить в інтервалі 70-180 см.

Тип IV. Для цього типу характерно розташування антициклону над Західним Казахстаном і східними районами Європейської частини Росії (відріг антициклону поширюється на західні райони), а Середземне море і південь Балканського півострова зайняті депресією, під впливом якої перебуває і західна половина Чорного моря. Посилення південно-східного вітру виникає при зсуві середземноморського циклону на західну частину Чорного моря. Синоптичні процеси цього типу малостійкі і мають рідкісну повторюваність у порівнянні з іншими типами (приблизно 6% в середньому за рік від загальної кількості ситуацій).

Досить сильні вітри південно-східного та південного напрямків можуть спостерігатися тільки у зимовий сезон не частіше ніж 2 рази на рік. Відомий випадок штормового вітру (15-20 м/с), що викликав значні коливання рівня в січні 1968 року. Так як сильний південно-східний вітер над морем тривав незначний час (6-12 годин), а потім змінив напрям на західний, то схема коливань рівня на морі приблизно відповідає типу III.

Сильний південно-східний вітер викликав згін (54 см) в Небезпечному і наганяння (72см) в Маріуполі. Потім поворот вітру на західні румби, викликав нагінні явища на східному узбережжі моря[7].

3 ОГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

В роботі [10] для моделювання вітрових течій і рівня моря використовувався баротропний варіант моделі циркуляції вод POM (Princeton Ocean Model) [18], заснований на системі нелінійних рівнянь мілкої води.

Атлас [10], створений на основі результатів моделювання, містить поля статистичних характеристик вітрових течій і рівня моря за даними ретроспективних розрахунків.

Під типовим полем вітру розуміється ситуація, що характеризується постійним за часом і однорідним по простору вітром із заданими напрямком і швидкістю. Для отримання гідродинамічних характеристик, відповідних ситуаціям, виконувалася серія чисельних експериментів для 8-ми напрямків вітру і декількох значень швидкості вітру 5, 10, 15 м / с.

У ретроспективних розрахунках використовувався масив полів приводного вітру Японського ретроспективного аналізу (далі - масив JRA) [19], що охоплює період часу з 1979 по 2011 рр. включно. Масив JRA отриманий на основі глобальної атмосферної моделі з варіаційної асиміляцією даних вимірювань. Він має крок за простором $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ і дискретність за часом - 6 годин.

Поля відхилень рівня моря від незбурених станів при вітрах 8 основних румбів швидкістю 15 м / с, розраховані з використанням моделі POM (рис.3.1-3-8).

Просторові розподіли підйомів і знижень рівня Азовського моря, можливі 1 раз в 5, 10 і 25 років за даними POM-JRA (рис. 3.9-3.14).

Згідно з даними масиву POM-JRA, найменші відхилення рівня (0,1-0,3м) в усі місяці року спостерігаються у відкритих районах моря. Зонами максимальних знижень (від 1,2 до 1,5 м) і підвищень від 0,8 до 0,9 м рівня є Таганрозька затока і південно-західна частина Арабатської затоки (рис.3.15-3.16). Ці зони проявляються в холодний період року (жовтень-березень), коли штормові вітри північно-східного і східного напрямів мають найбільшу повторюваність. Вітри південно-західного напрямку в 1979-2010 рр. відзначалися в березні, квітні, червні і викликали підвищення рівня в Таганрозькій затоці до 0,7-0,9 м. За весь розрахунковий період найменші згінно-нагінні коливання рівня (з амплітудою, що не перевищує 0,2-0,4 м в Азовському морі і 0,3-0,6 м в Таганрозькій затоці) були отримані в теплий період року, з травня по вересень.

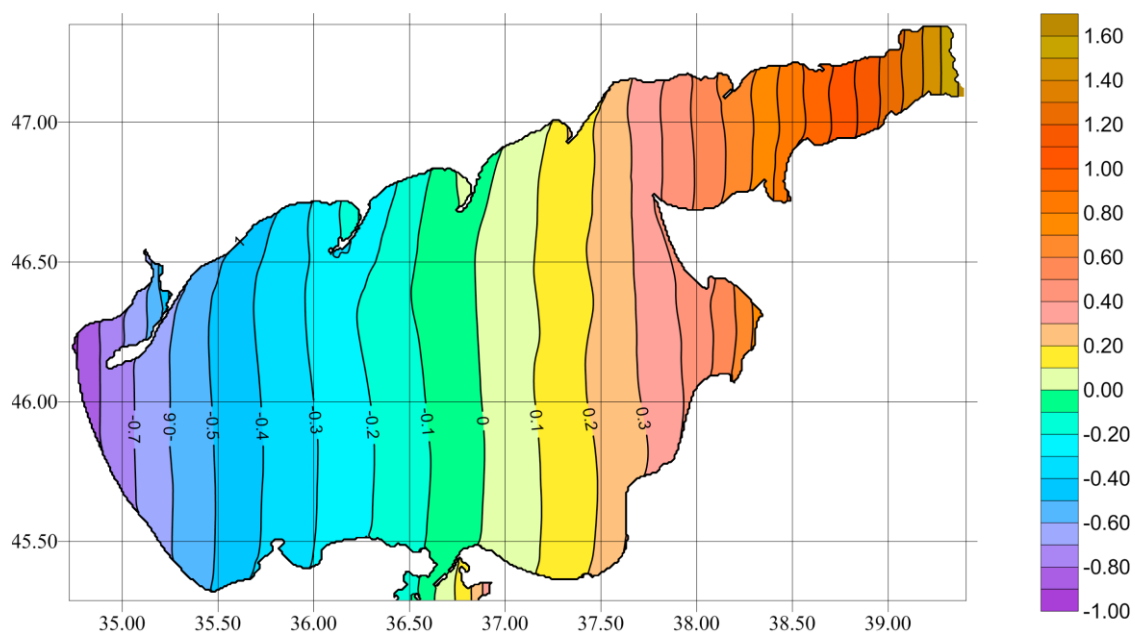


Рис.3.1 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при західному вітрі 15 м / с

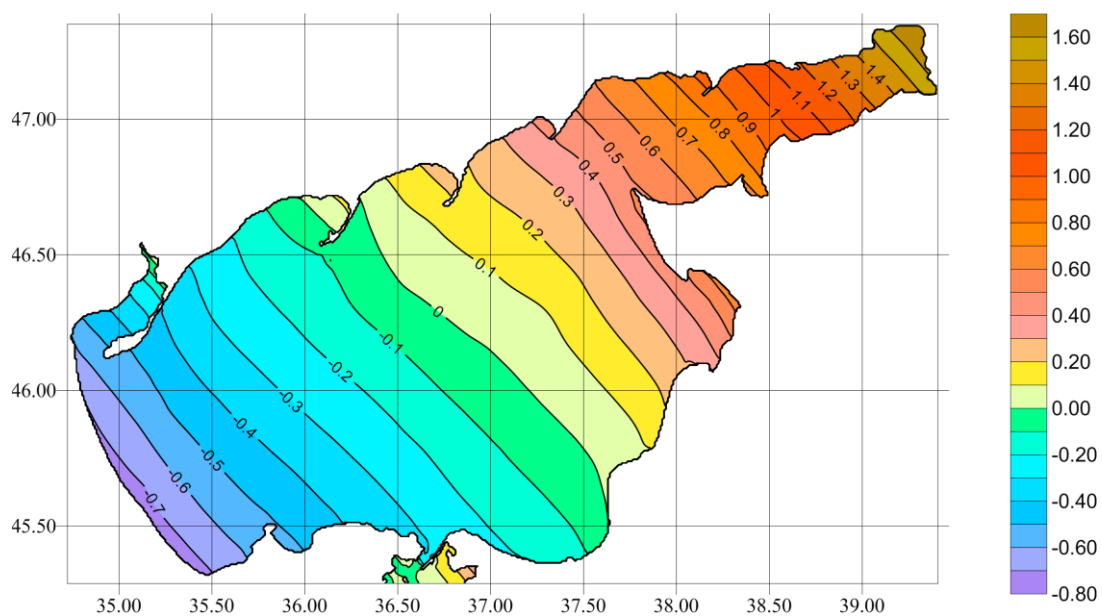


Рис.3.2 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при південно-західному вітрі 15 м / с

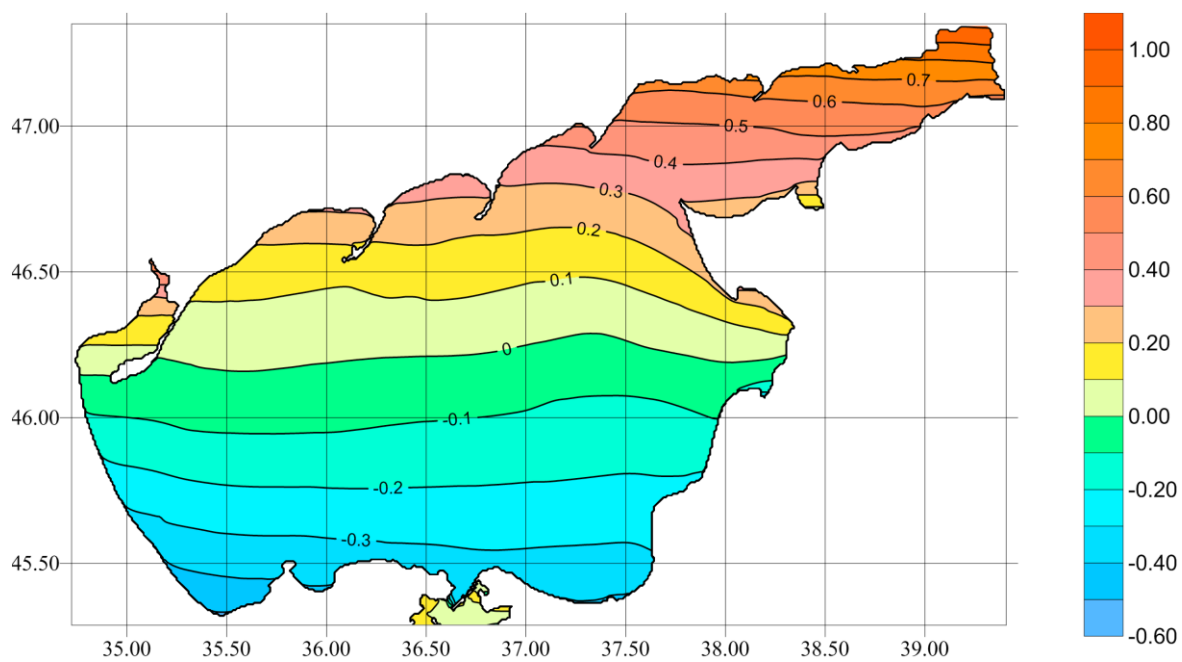


Рис.3.3 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при південному вітрі 15 м / с

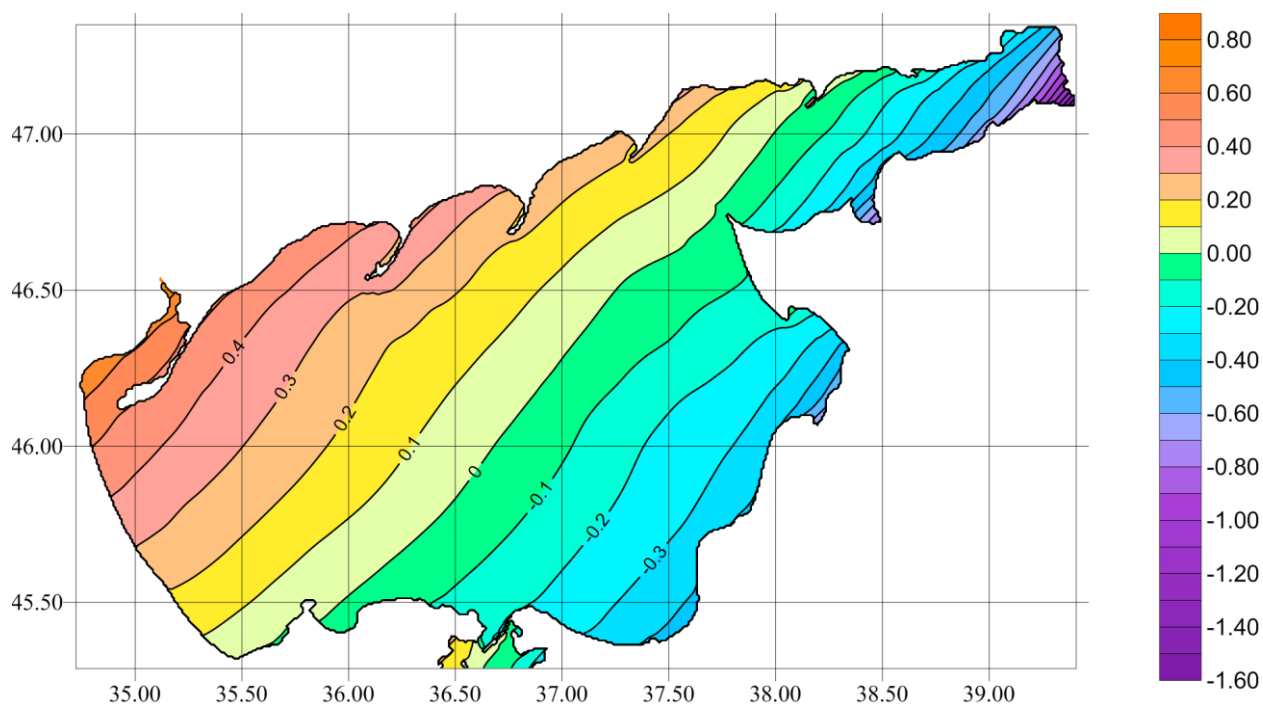


Рис.3.4 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при південно-східному вітрі 15 м / с

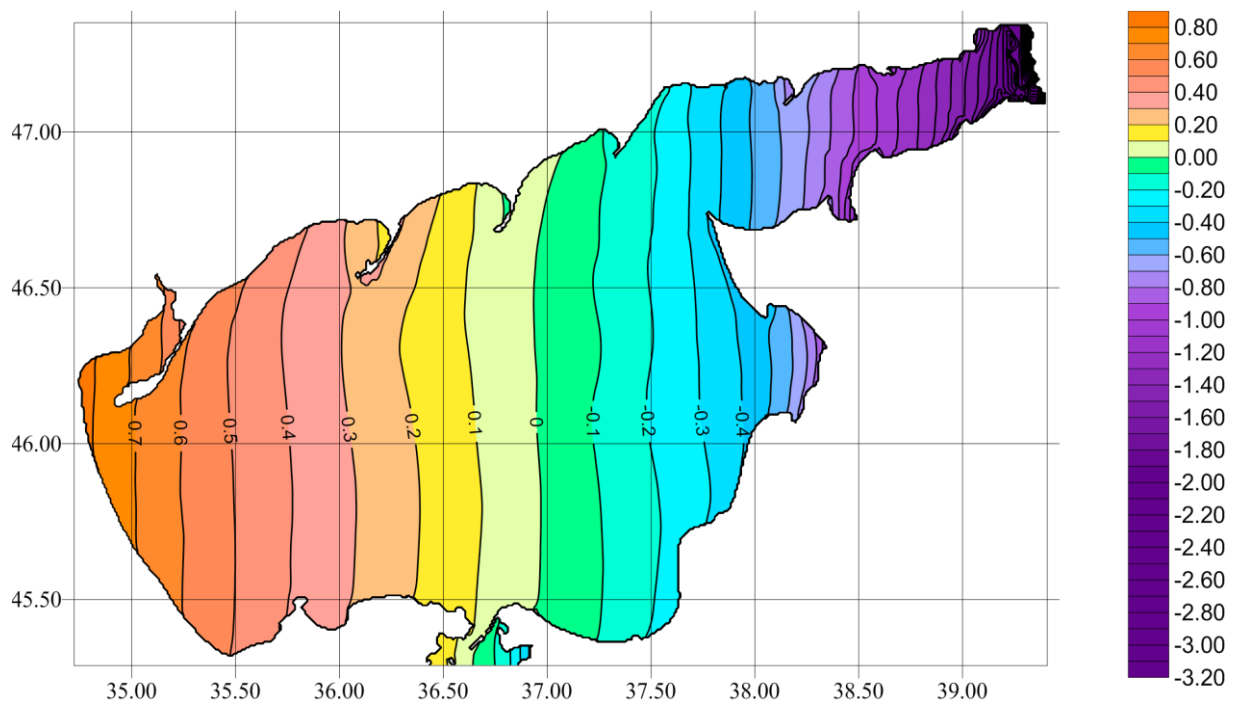


Рис.3.5 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при східному вітрі 15 м / с

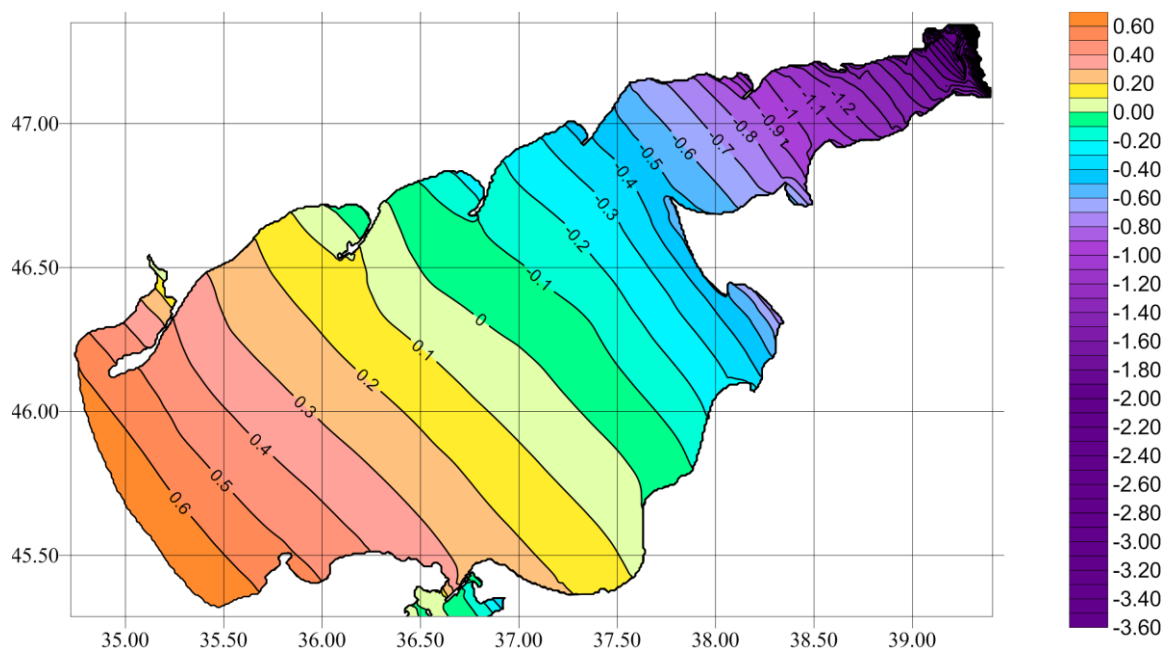


Рис.3.6 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при північно-східному вітрі 15 м / с

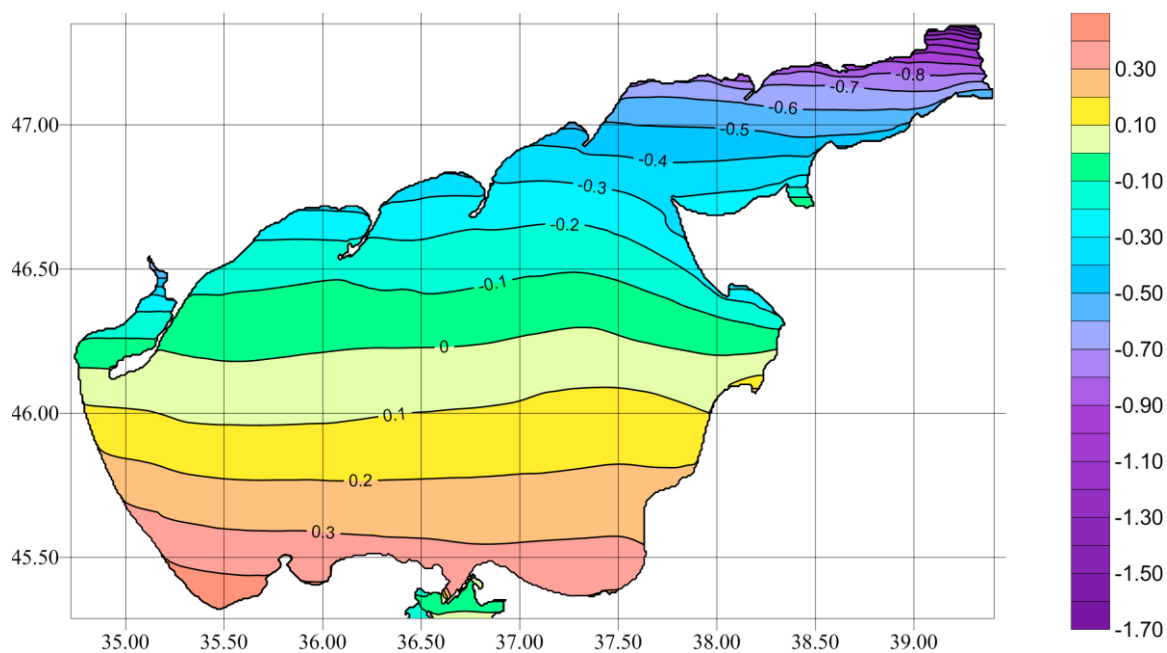


Рис.3.7 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при північному вітрі 15 м / с

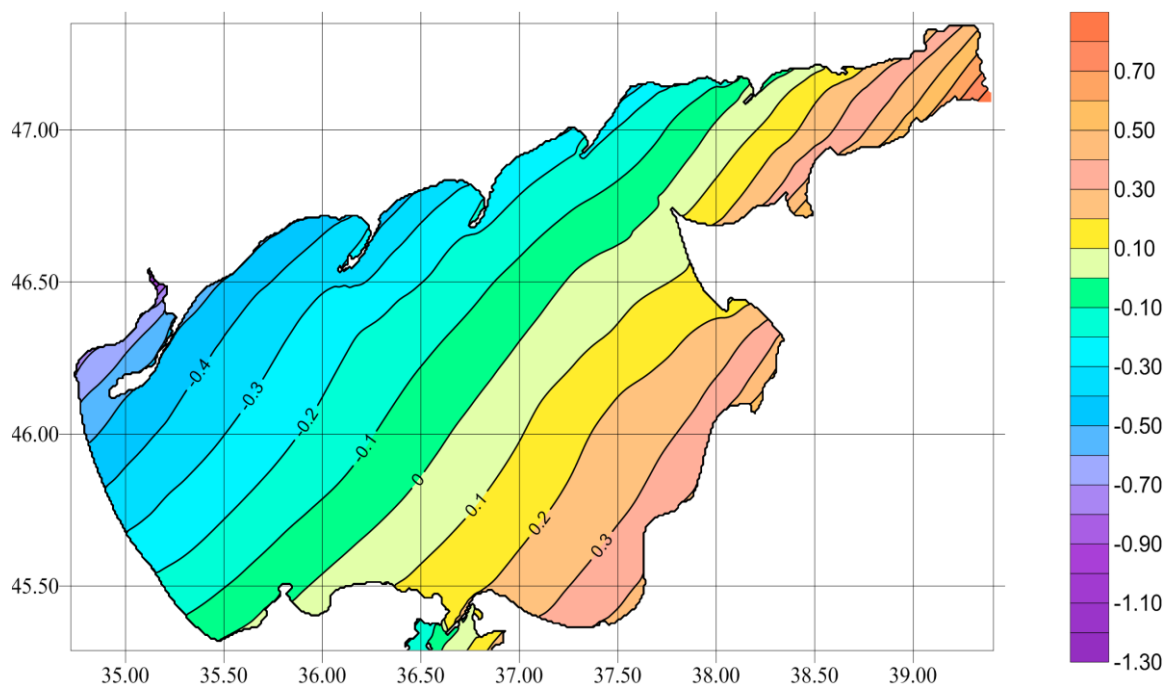


Рис.3.8 Поле рівня Азовського моря (м) за даними моделі РОМ при північно-західному вітрі 15 м / с

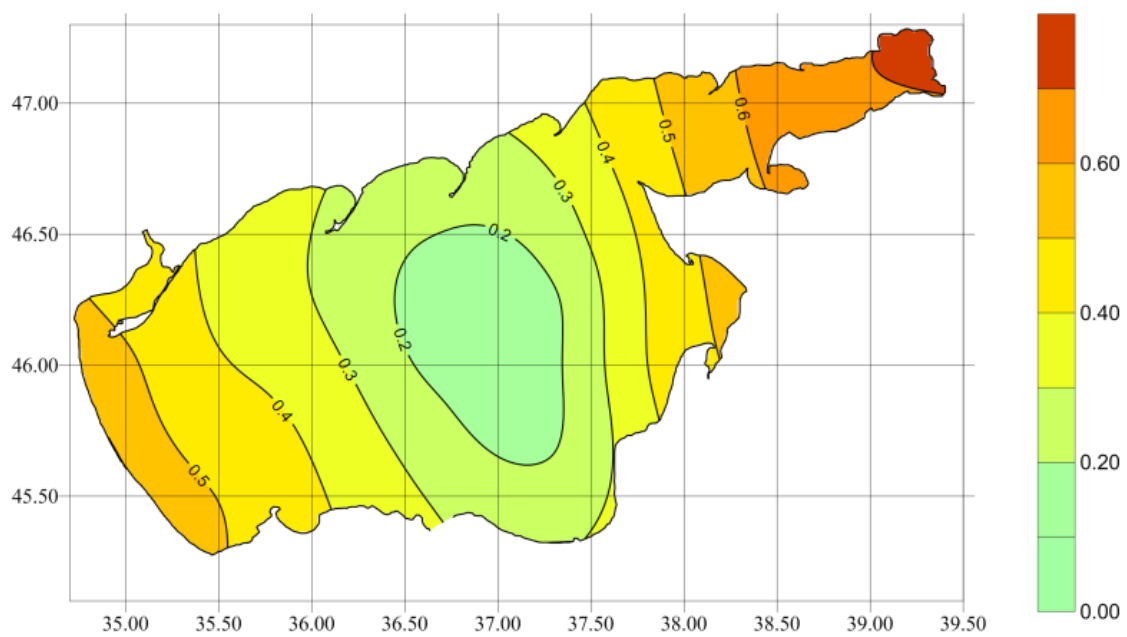


Рис.3.9 Величина нагінного підвищення рівня Азовського моря (м), можлива 1 раз в 5 років за даними POM-JRA

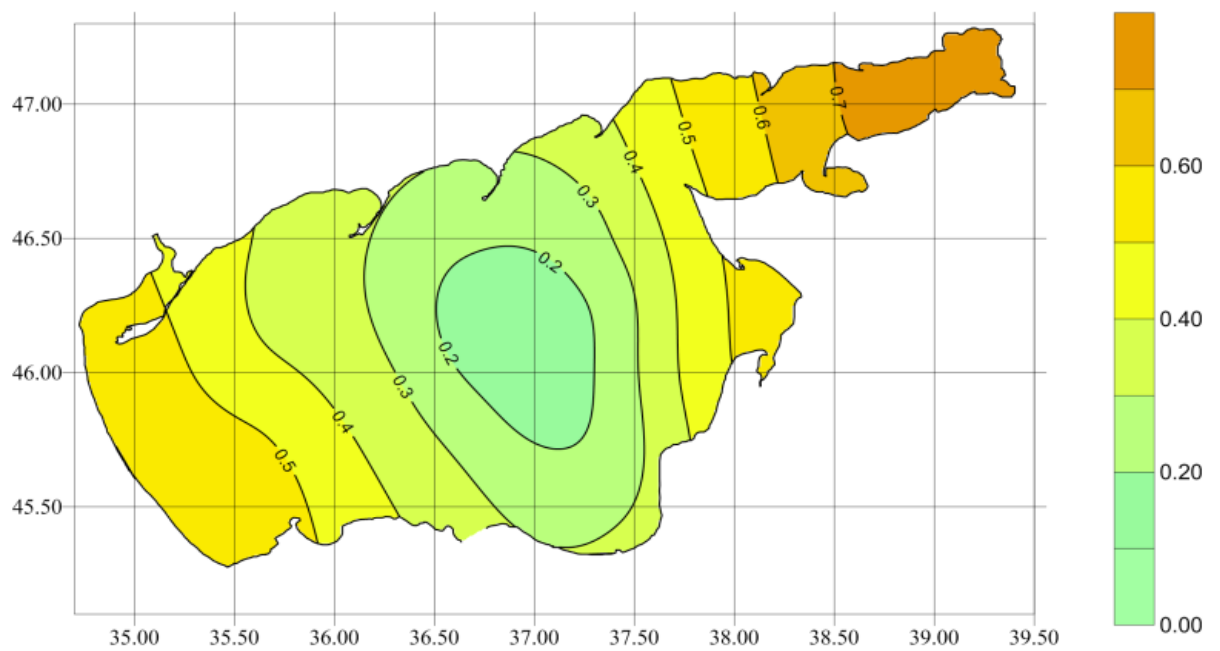


Рис.3.10 Величина нагінного підвищення рівня Азовського моря (м),можлива 1 раз в 10 років за даними POM-JRA

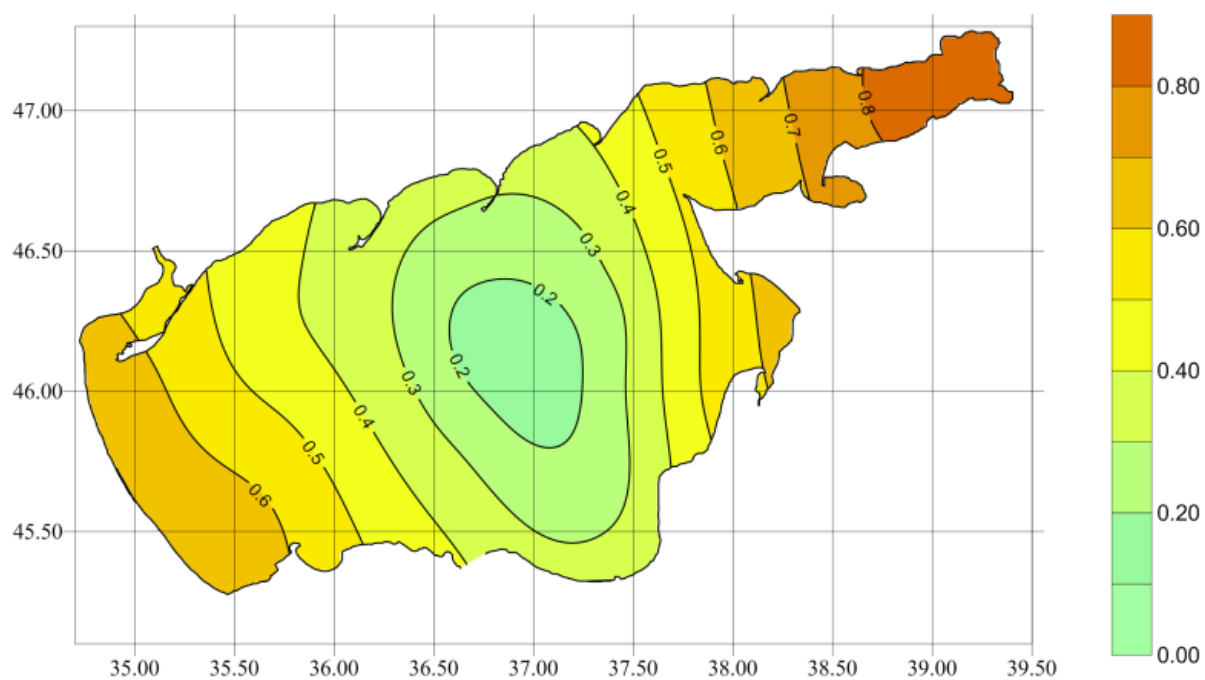


Рис.3.11 Величина нагінного підвищення рівня Азовського моря (м), можлива 1 раз в 25 років за даними POM-JRA

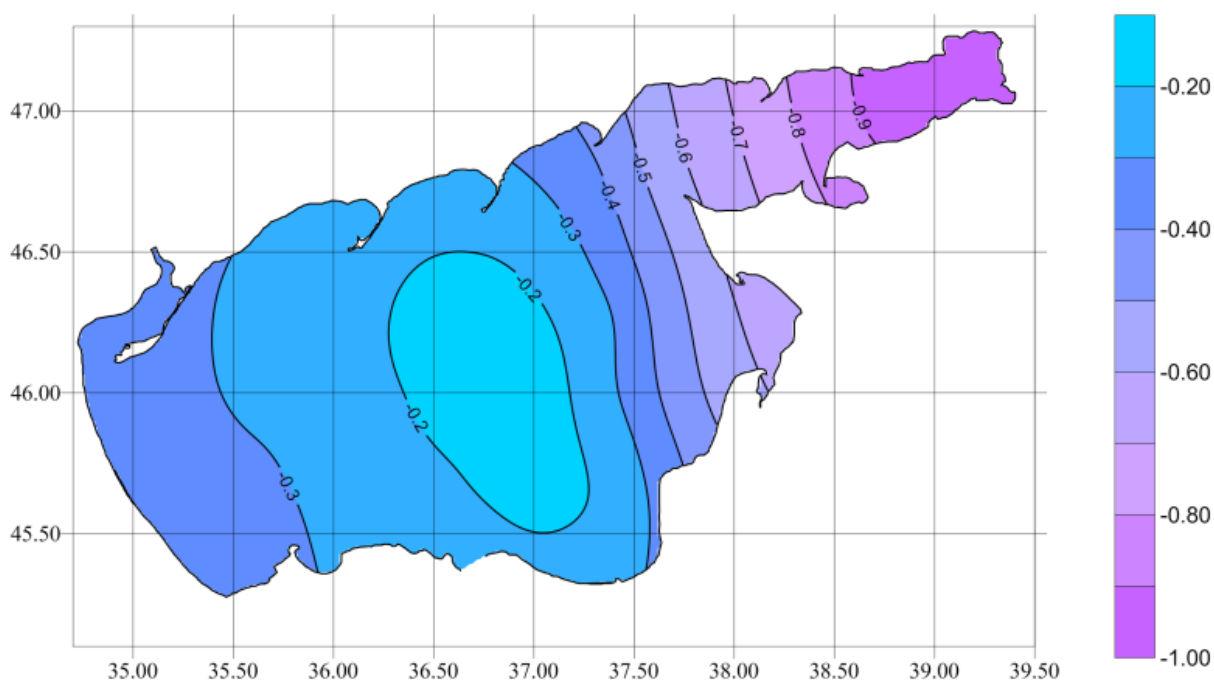


Рис.3.12 Величина згінного зниження рівня Азовського моря (м), можлива 1 раз в 5 років за даними POM-JRA

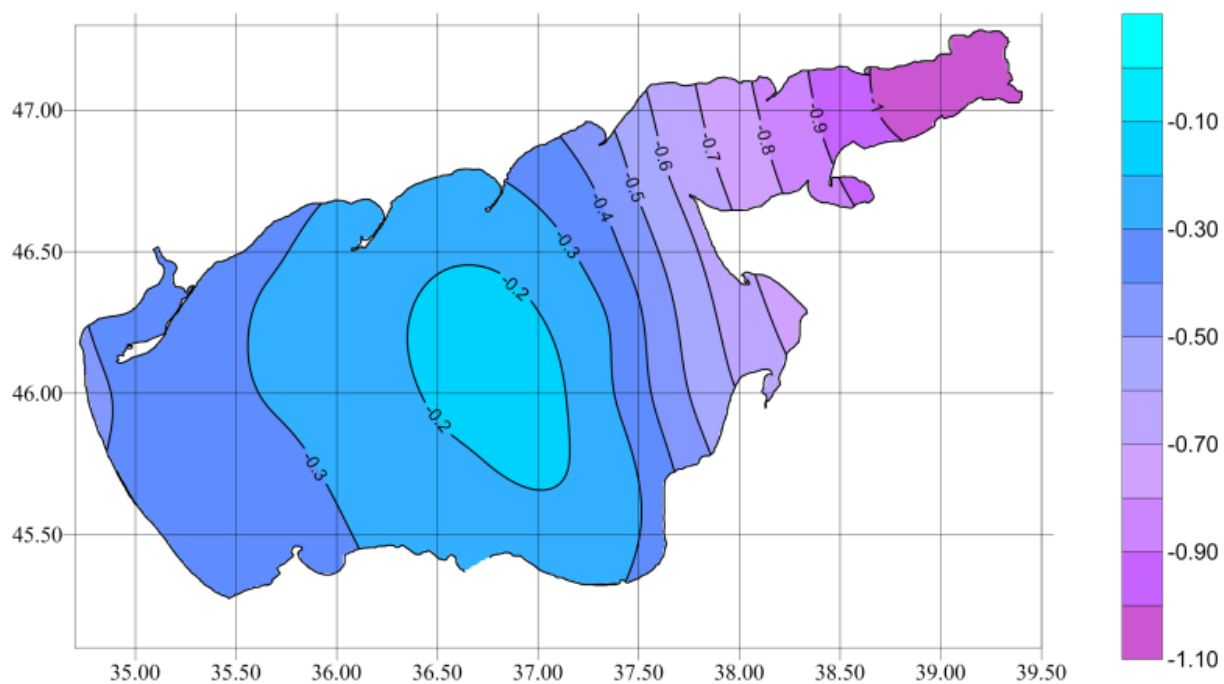


Рис.3.13 Величина згінного зниження рівня Азовського моря (м), можлива 1 раз в 10 років за даними POM-JRA

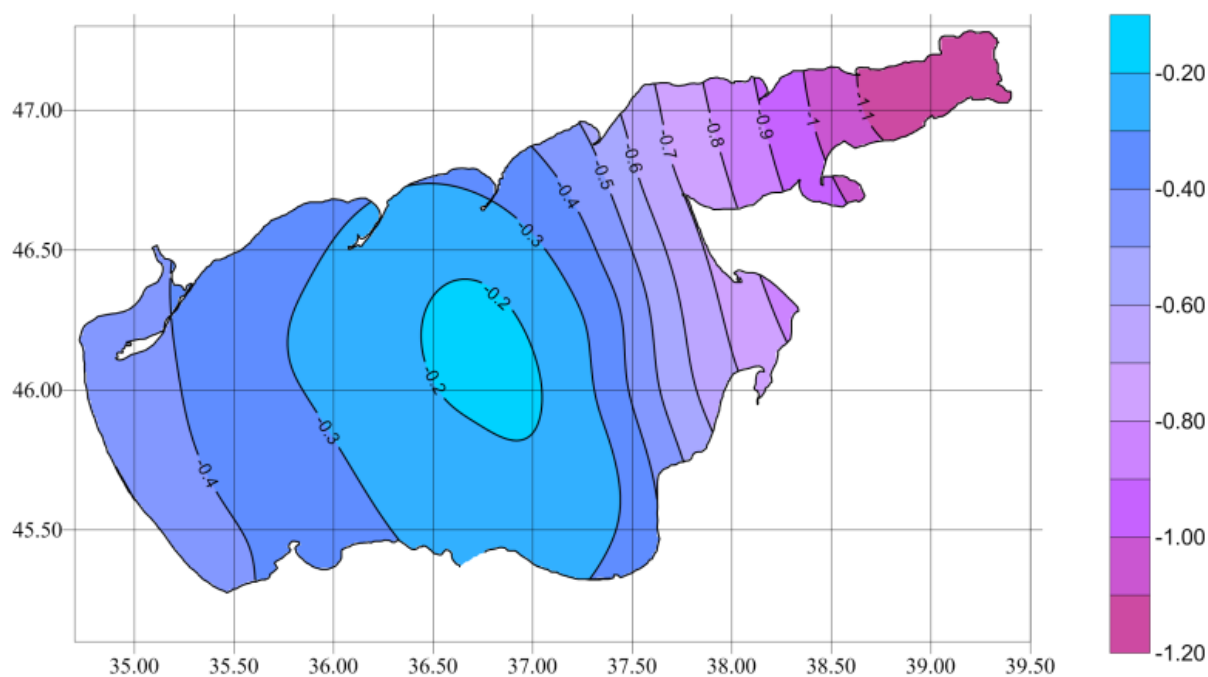


Рис.3.14 Величина згінного зниження рівня Азовського моря (м), можлива 1 раз в 25 років за даними POM-JRA

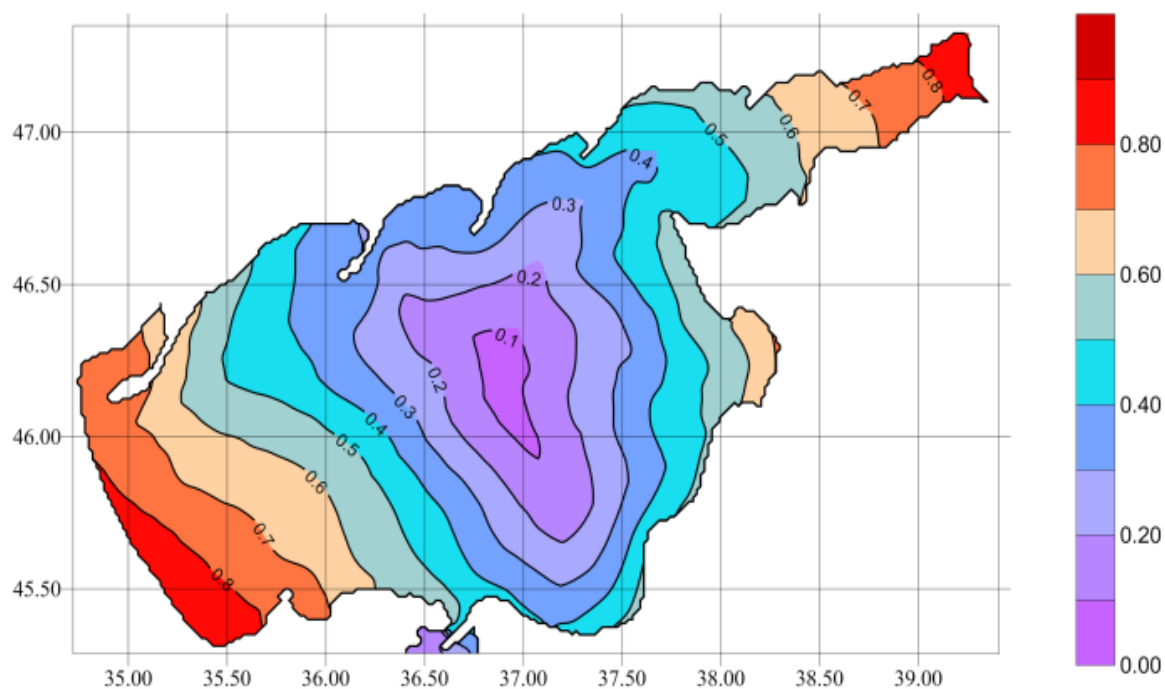


Рис.3.15 Максимальні підвищення рівня Азовського моря (м) за даними POM-JRA за 1979-2010 рр.

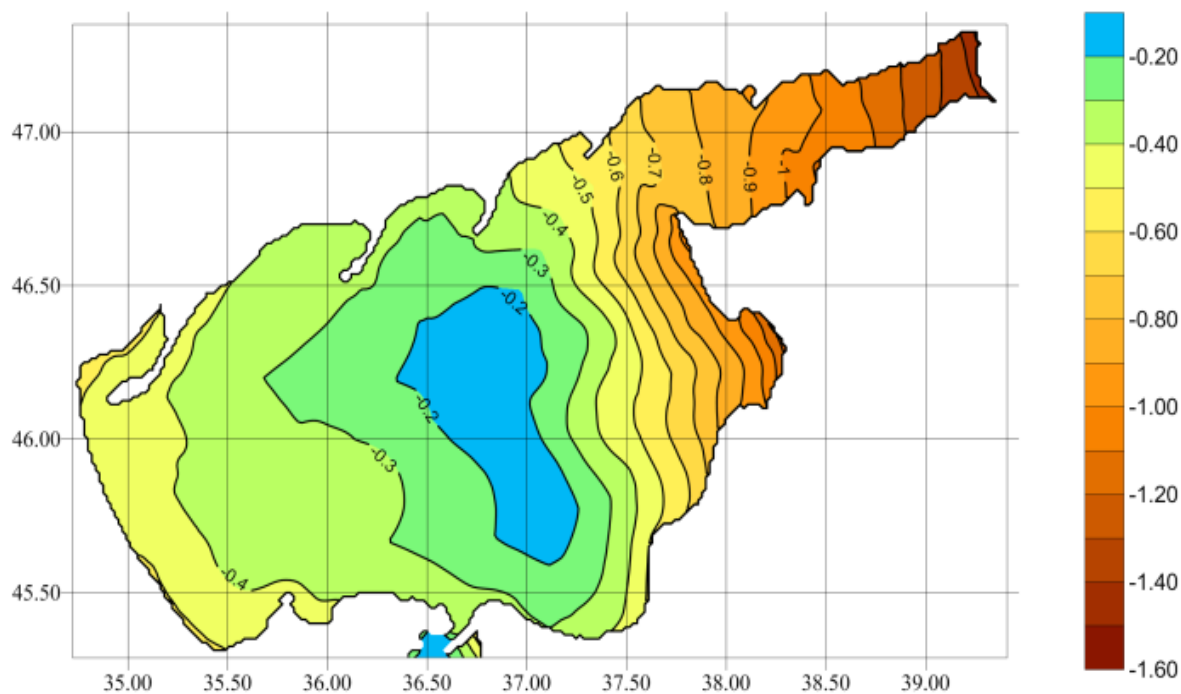


Рис.3.16 Максимальні зниження рівня Азовського моря (м) за даними POM-JRA за 1979-2010 рр.

4 МАТЕМАТИЧНА СТРУКТУРА ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

Розрахунок інтегральної за глибиною циркуляції вод і зумовлених нею коливань рівня моря в Азовському морі виконувався на основі рівнянь теорії мілкої води у двовимірному наближенні [20-24]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sx} - \tau_{bx}), \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sy} - \tau_{by}), \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0, \quad (4.3)$$

де U, V – компоненти вектору $\vec{V}$ середньої за глибиною швидкості течій по осях x та y , відповідно;

$H = h + \zeta$ – повна глибина;

h – глибина на незбуреній воді;

ζ – відхилення рівневої поверхні від незбуреного стану;

ρ_w – густина води;

$\tau_s(\tau_{sx}, \tau_{sy})$; $\tau_b(\tau_{bx}, \tau_{by})$ – вектори дотичних напружень поверхневого і придонного тертя, відповідно;

$f = 2\omega \sin \varphi$ – параметр Коріолісу;

ω – вертикальна складова вектору кутового обертання Землі; φ – широта місця;

g – прискорення вільного падіння;

t – час.

Рівняння (4.1) – (4.3) вважаються заданими в деякій області просторових змінних з достатньо гладкою границею, яка співпадає з природними границями морської акваторії, яка моделюється.

Оскільки, як було показано в розділі 2, на згінно-нагінні коливання рівня Азовського моря впливає водообмін з Чорним морем через Керченську

протоку, то при їх моделюванні в розрахункову область необхідно включати як саму протоку, так і прилеглу до неї акваторію Чорного моря.

В якості граничних умов на твердих границях $\Gamma_{\text{тв}}$ для системи (4.1)-(4.3) ставиться умова непротікання:

$$V_n = 0,$$

а на рідкій границі $\Gamma_{\text{рд}}$ – умова випромінювання:

$$V_n = \zeta \sqrt{g/H}; \quad \partial V_\tau / \partial n = 0,$$

де V_n і V_τ – нормальна та тангенціальна до границі складові вектора швидкості течії;

n – одинична зовнішня нормаль до граничного контуру Γ .

Компоненти вектора дотичного напруження тертя вітру на верхній межі (повітря-вода) розрахункової області визначаються такими залежностями:

$$\tau_{sx} = C_a W_{10} W_x, \quad (4.4)$$

$$\tau_{sy} = C_a W_{10} W_y, \quad (4.5)$$

де ρ_s – щільність повітря ($\rho_s = 1,25 \text{ кг/м}^3$);

W_x й W_y – складові вектора швидкості вітру на висоті 10 м над рівнем моря по осях x і y , відповідно;

W_{10} – модуль швидкості вітру на висоті 10 м;

C_a – коефіцієнт поверхневого тертя:

$$C_a = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-3}, & W_{10} \leq 7,5 \text{ м/с} \\ (0,8 + 0,065 W_{10}) \cdot 10^{-3} & W_{10} > 7,5 \text{ м/с}. \end{cases}$$

Компоненти вектора дотичного напруження донного тертя на нижній границі (вода-дно) розрахункової області:

$$\tau_{bx} = \Phi U \quad \tau_{by} = \Phi V, \quad \text{де} \quad \Phi = \rho_w C_b (U^2 + V^2)^{1/2}, \quad (4.6)$$

Тут ρ_w – густина морської води ($\rho_w = 1015 \text{ кг/м}^3$);

$C_b = 2,6 \cdot 10^{-3}$ – коефіцієнт донного тертя.

За початкові умови приймається стан спокою:

$$\vec{V}(x, y) = 0, \quad \zeta(x, y) = 0 \quad \text{якщо } t = 0.$$

Рівняння моделі (4.1)-(4.3) з відповідними граничними умовами апроксимуються на просторовій сітці (рис. 4.1), що переміщується за допомогою числового кінцево-різницевого методу, запропонованого в [24]. Наведемо його короткий опис.

Розташування точки з координатами (x, y, t) задається на дискретній просторово-часовій сітці як $(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t)$, де $i, j, n = 0 \pm \frac{1}{2}, \pm 1, \pm \frac{3}{2}, \dots; \Delta x, \Delta y, \Delta t$ – кроки у просторі і часі відповідно.

Подання в просторовій області похідних і середніх значень величин, які моделюються, продемонструємо на прикладі змінної x :

$$F^x = \frac{1}{2} \left\{ F \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \Delta x, j\Delta y, n\Delta t \right] + F \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta x, j\Delta y, n\Delta t \right] \right\}, \quad (4.7)$$

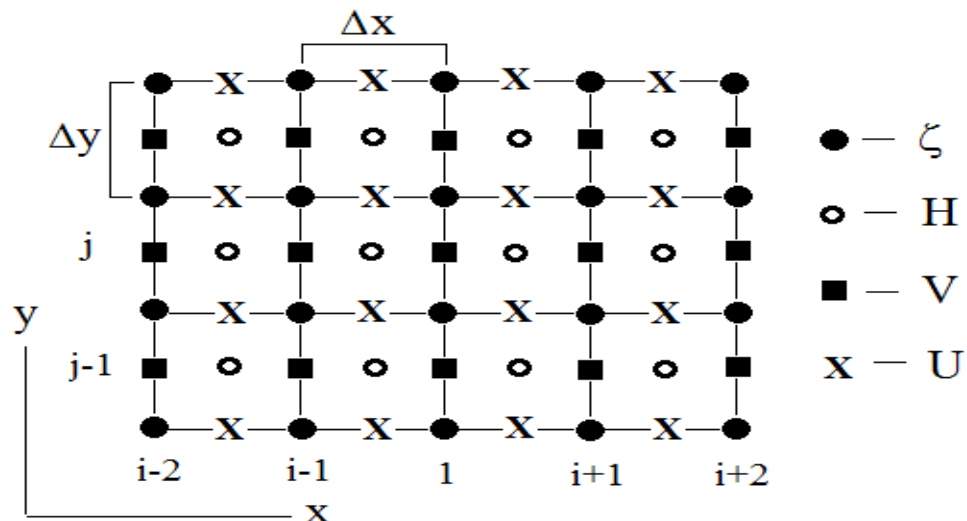


Рисунок 4.1 Структура різницевої розрахункової сітки та розташування розрахункових вузлів для кінцево-розрахункової схеми, яка використовується в моделі

$$\delta_x F = \frac{1}{\Delta x} \left\{ F \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \Delta x, j \Delta y, n \Delta t \right] - F \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta x, j \Delta y, n \Delta t \right] \right\}, \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \bar{F} = \frac{1}{4} & \left\{ F \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \Delta x, \left(j + \frac{1}{2} \right) \Delta y, n \Delta t \right] + F \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \Delta x, \left(j - \frac{1}{2} \right) \Delta y, n \Delta t \right] + \right. \\ & \left. + F \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta x, \left(j + \frac{1}{2} \right) \Delta y, n \Delta t \right] + F \left[\left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta x, \left(j - \frac{1}{2} \right) \Delta y, n \Delta t \right] \right\}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Для y і t використовуються аналогічні апроксимації, за виключенням величин, які відповідають проміжним часовим рівням:

$$\delta_{+1/2} F = \frac{2}{\Delta t} \left\{ F \left[i \Delta x, j \Delta y, \left(n + \frac{1}{2} \right) \Delta t \right] - F \left[i \Delta x, j \Delta y, n \Delta t \right] \right\}, \quad (4.10)$$

$$F_+ = F \left[i \Delta x, j \Delta y, \left(n + \frac{1}{2} \right) \Delta t \right], \quad (4.11)$$

$$F_- = F \left[i \Delta x, j \Delta y, \left(n - \frac{1}{2} \right) \Delta t \right], \quad (4.12)$$

$$F^{t/2} = \frac{1}{2} \left\{ F \left[i \Delta x, j \Delta y, \left(n + \frac{1}{2} \right) \Delta t \right] + F \left[i \Delta x, j \Delta y, n \Delta t \right] \right\}. \quad (4.13)$$

На кожному часовому інтервалі Δt рішення шукають на двох часових підрівнях, які відповідають відріzkам часу $\left[0, n + \frac{1}{2} \right]$ та $\left[n + \frac{3}{2}, n + 1 \right]$ тривалістю $\frac{\Delta t}{2}$ кожний.

Вузлам ζ присвоюються цілі індекси i, j (рис. 4.1); вузли U нумеруються як напівцілі i та цілі j ; V – як цілі i та напівцілі j ; H вузлам відповідають напівцілі індекси i, j .

В момент часу n шукають рішення:

$$\begin{aligned} & \text{в } U\text{-вузлах } i + \frac{1}{2}, j \\ & \delta_t U - f\bar{V} + U_+ \delta_x U_-^x + \bar{V} \cdot \overline{\delta_y U_-^y} + g \overline{\delta_x \zeta^t} + \frac{\tau_{bx} - \tau_{sx}}{\rho(\overline{h^x} + \overline{\zeta^x})} = 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

в ζ -вузлах i, j

$$\delta_{+1/2^t} \zeta + \delta_x \left[(\overline{h^y} + \overline{\zeta^x}) U_+ \right] + \delta_y \left[(\overline{h^x} + \overline{\zeta^y}) V \right] = 0 \quad (4.15)$$

На наступному часовому підрівні $n + \frac{1}{2}$:

для V -вузлів $i, j + \frac{1}{2}$

$$\delta_t V - f\bar{U} + \bar{U} \delta_x U_-^x + V_+ \overline{\delta_y U_-^y} + g \overline{\delta_y \zeta^t} + \frac{\tau_{by} - \tau_{sy}}{\rho(\overline{h^x} + \overline{\zeta^y})} = 0 \quad (4.16)$$

для ζ -вузла i, j

$$\delta_{+1/2^t} \zeta + \delta_x \left[(\overline{h^y} + \overline{\zeta^x}) U \right] + \delta_y \left[(\overline{h^x} + \overline{\zeta^y}) V_+ \right] = 0$$

5 АДАПТАЦІЯ МОДЕЛІ ДО УМОВ АЗОВСЬКОГО МОРЯ

З метою адаптації та перевірки роботоздатності описаної вище гідродинамічної моделі з точки зору можливості її використання для прогнозування викликаних вітром згінно-нагінних коливань рівня води в портах Азовського моря, було проведено ряд чисельних експериментів.

При розрахунках акваторія Азовського моря, Керченської протоки та прилеглої до неї акваторії моря (рис. 5.1) апроксимувалась рівномірною горизонтальною розрахунковою сіткою 169×145 вузлів з просторовим кроком 2000 м. Просторовий розподіл глибин та берегова лінія задавались на основі інформації наданої ФДУ «Одеський район Держгідрографії». Задавався стік р. Дон в Таганрозьку затоку з витратою $700 \text{ м}^3/\text{с}$.

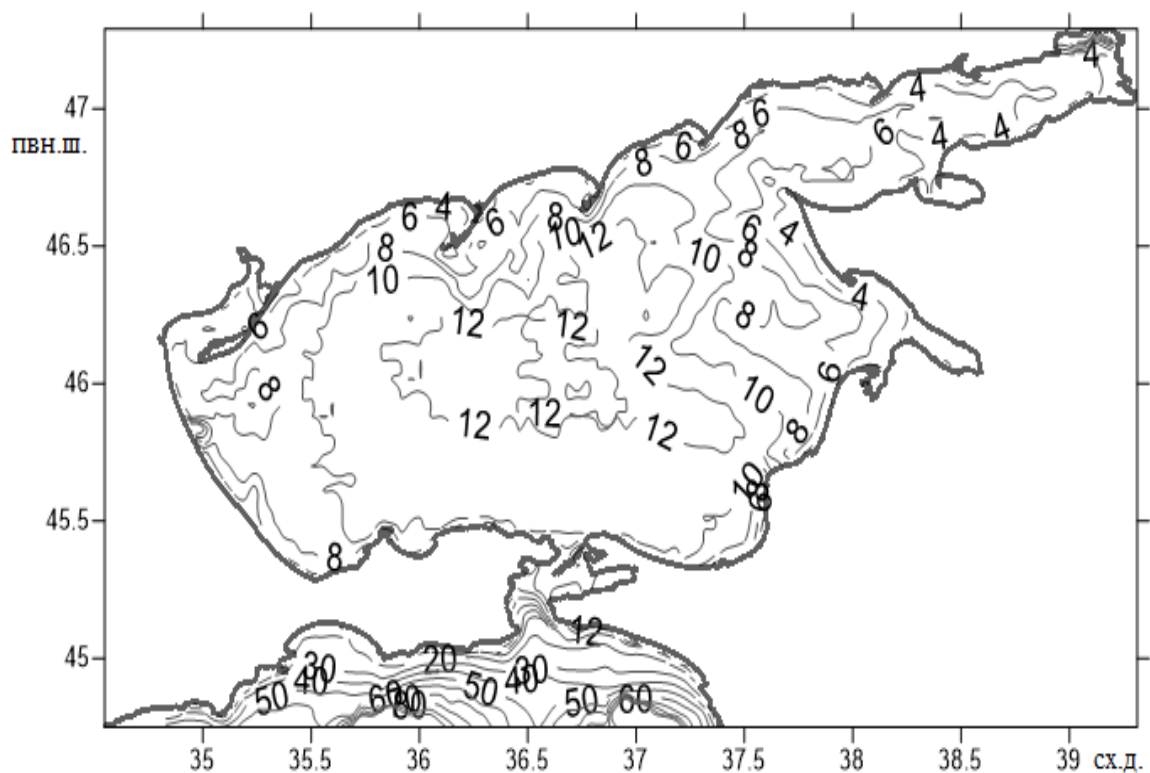


Рис. 5.1 Розподіл глибин в розрахунковій області Азовського моря та прилеглої частини Чорного моря

В першій серії чисельних експериментів з моделлю розраховувались баротропні течії та відхилення рівня моря від незбуреного стану при сталих штормових вітрах 8 основних румбів швидкістю 15 м/с.

З рис. 5.2 видно, що модельний час протягом якого відбувається встановлення системи баротропних течій при сталих штормових вітрах

швидкістю 15 м/с становить близько 15 годин. Тому моделювання у подальшому моделювання баротропної циркуляції вод та згінно-нагінних коливань рівня моря здійснювалось протягом 24 годин модельного часу.

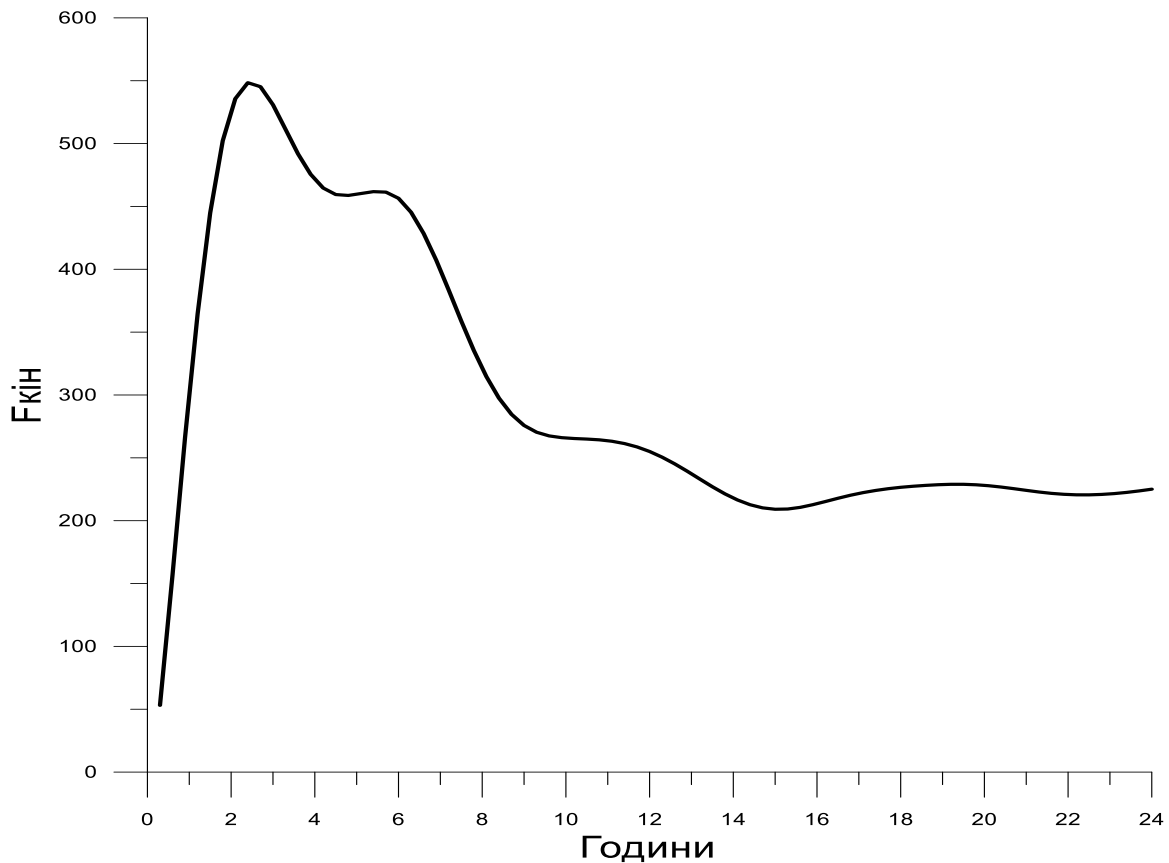


Рис. 5.2 Розрахована за моделлю часова мінливість кінетичної енергії баротропної циркуляції вод в розрахунковій області за умов сталого західного вітру швидкістю 15 м/с

На рис. 5.3 – 5.10 наведені розраховані за моделлю поля векторів та ізотак баротропних течій за умов сталих вітрів швидкістю 15 м/с 8 основних румбів. Видно, що найбільш сильні течії, швидкість яких перевищує 20 м/с і може досягати 30 м/с, розвиваються на протяжних ділянках прибережного мілководдя, орієнтація яких співпадає з напрямком вітру. Інтенсикація течій також відбувається біля меж Обіточної, Бердянської, Білосарайської та Довгої кіс. Стабільно великі швидкості течій розвиваються в Керченській протоці. Отримані в результаті розрахунків загальні схеми баротропної циркуляції вод та значення швидкості течій на різних ділянках акваторії Азовського моря добре узгоджуються з результатами наведеними в [25].

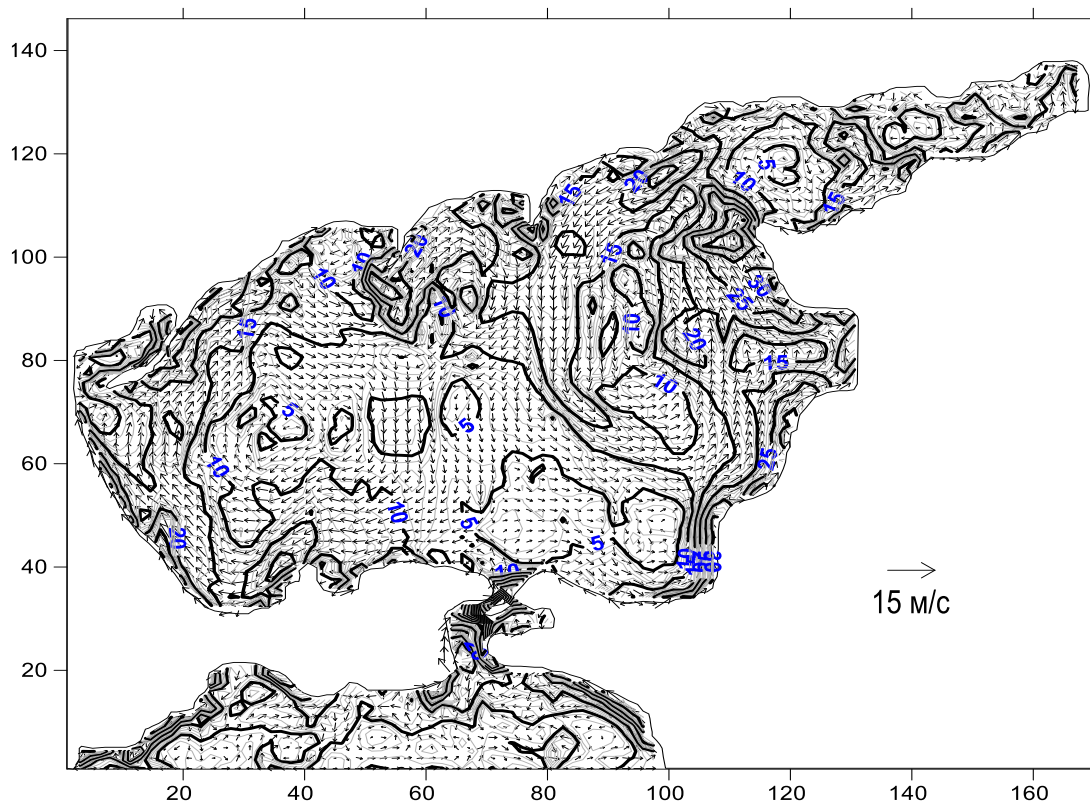


Рис. 5.3 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого південного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

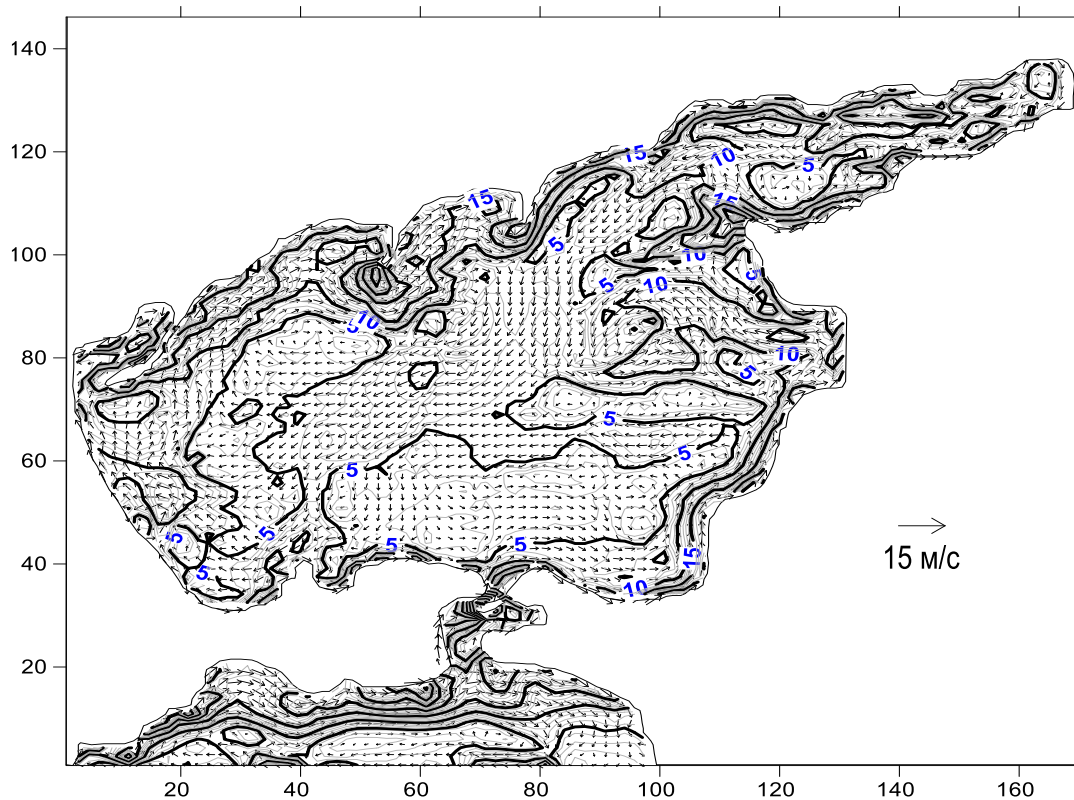


Рис. 5.4 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого північно-західного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

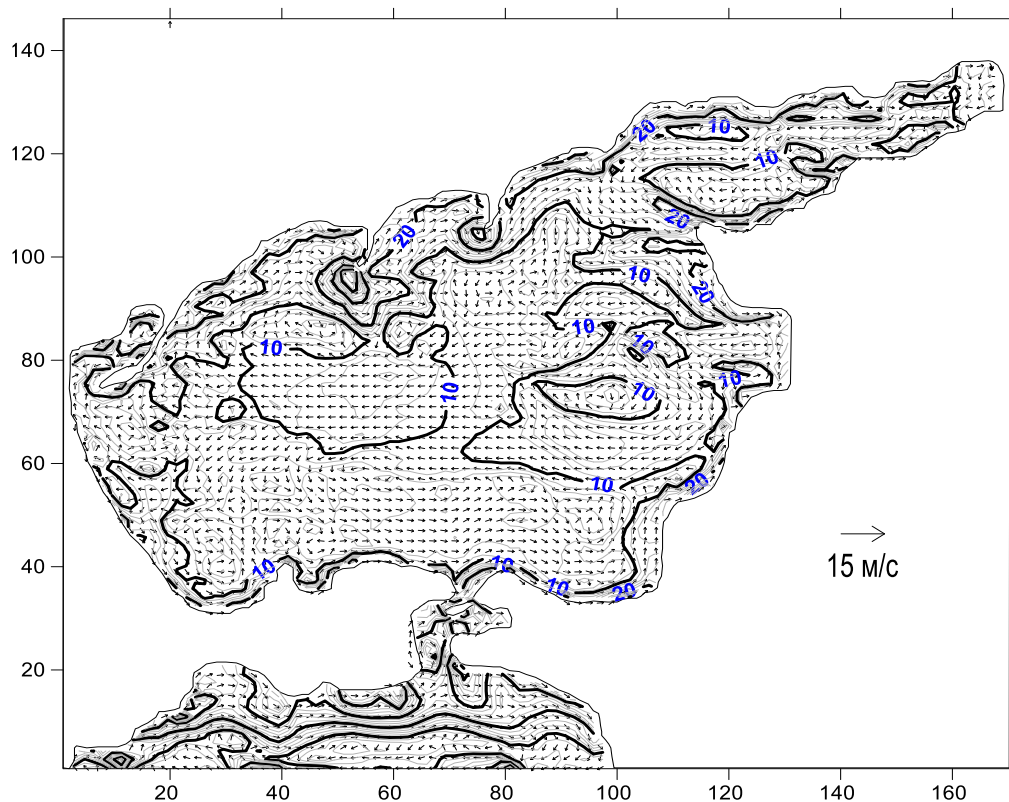


Рис. 5.5 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого західного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

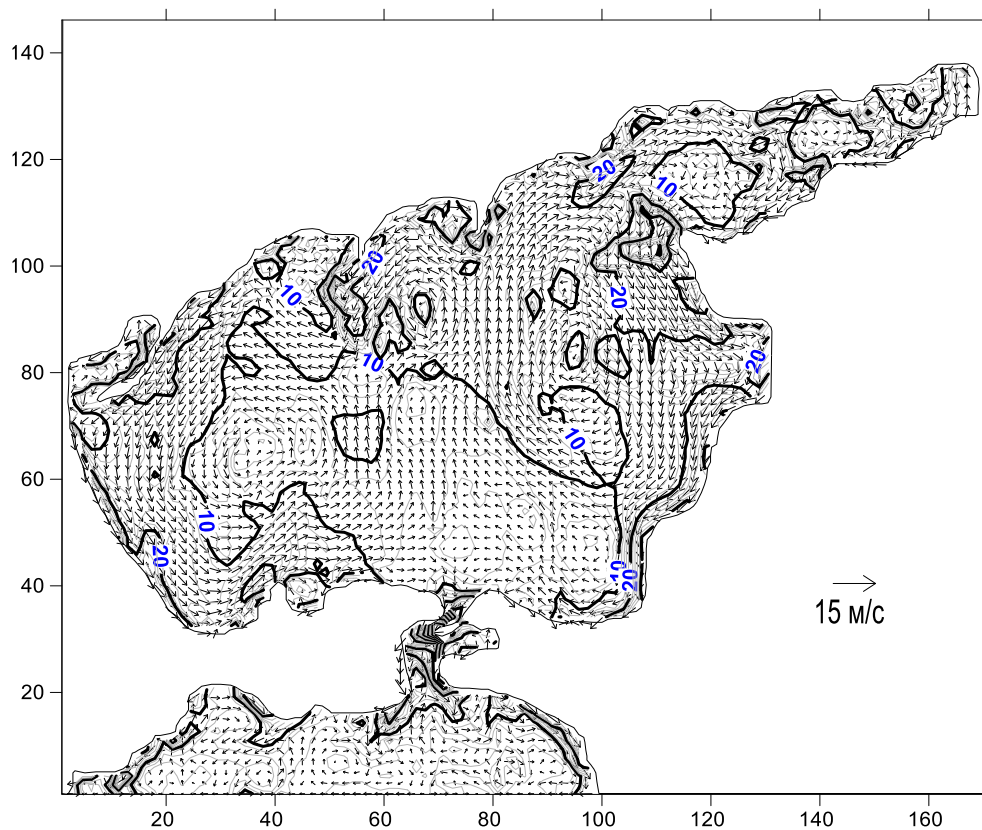


Рис. 5.6 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого північного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

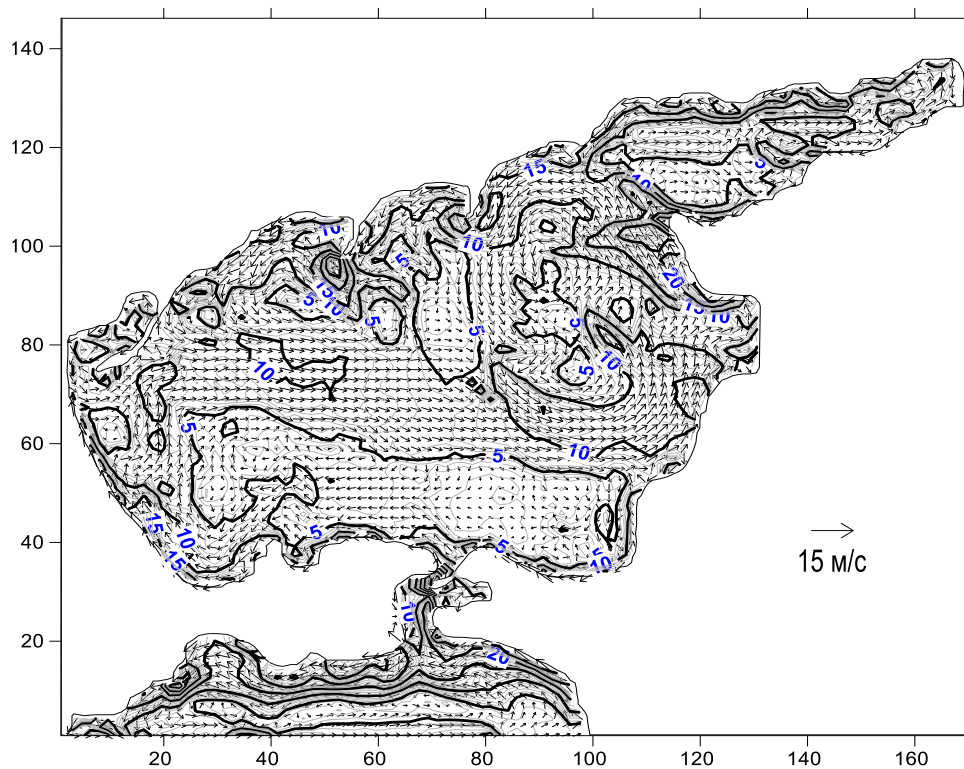


Рис. 5.7 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого південно-східного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

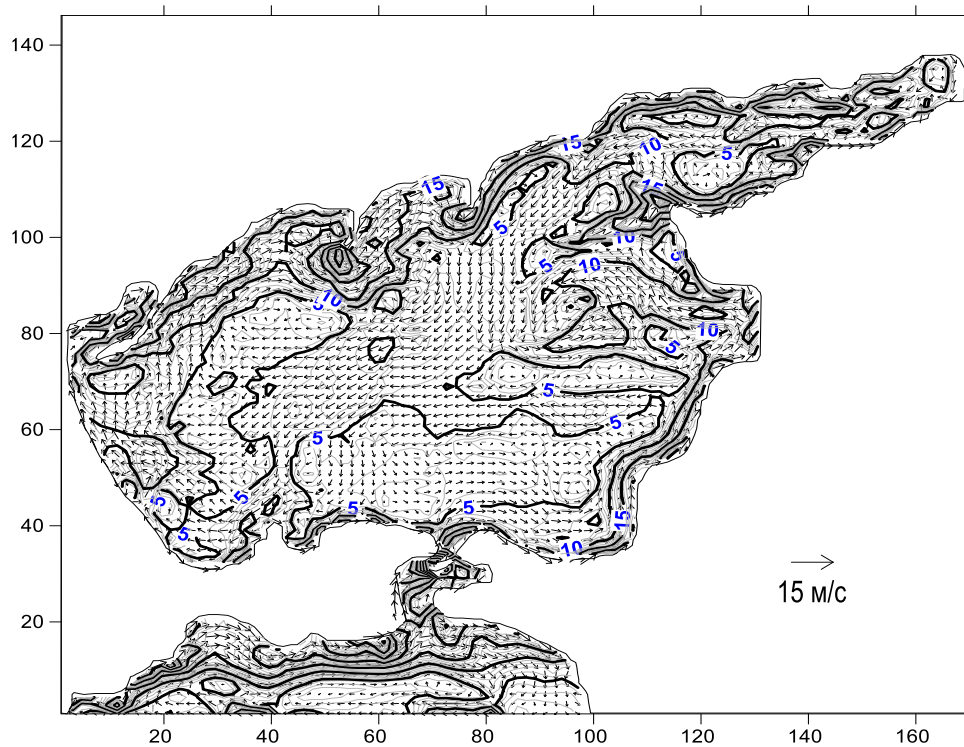


Рис.5.8 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого південно-західного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

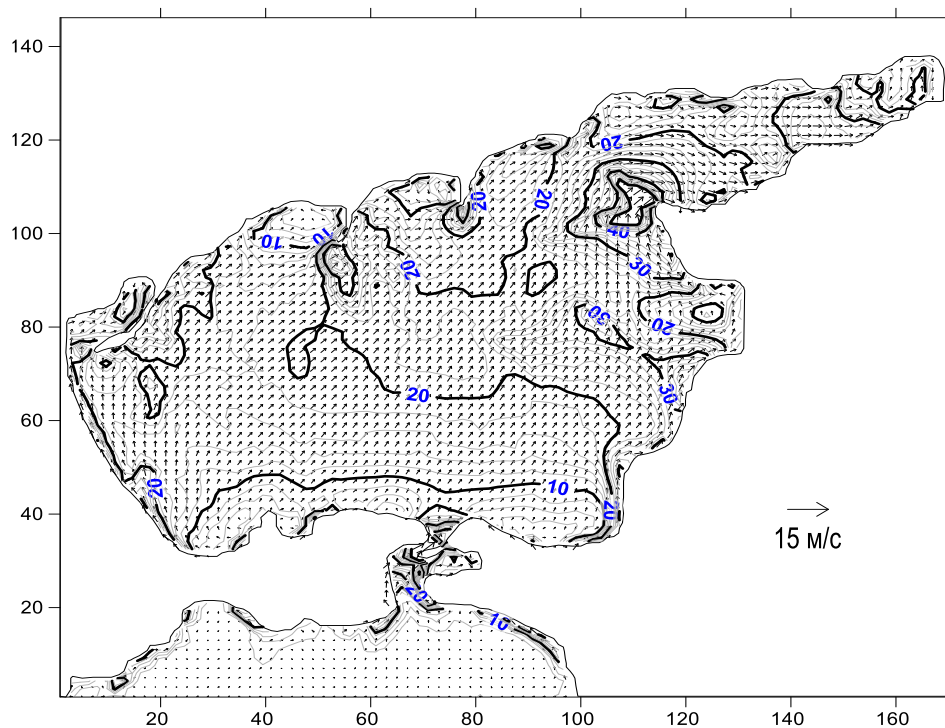


Рис.5.9 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого північно-східного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

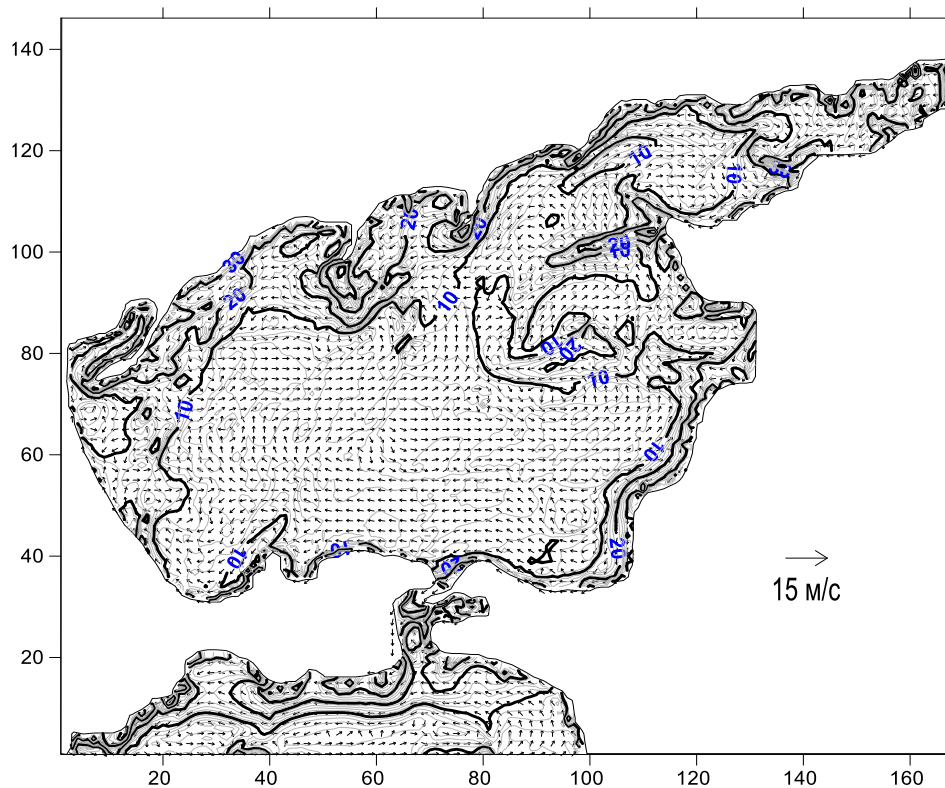


Рис. 5.10 Розрахована за моделлю баротропна циркуляція вод за умов сталого східного вітру швидкістю 15 м/с: вектори та ізотахи (м/с) течій

На рис. 5.11 – 5.18 наведена динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану в портах Маріуполь та Генічеськ у разі дії сталих штормових вітрів швидкістю 15 м/с. Видно, що в порту Маріуполь підвищення рівня моря в результаті дії вітрів із західною складовою становить +35 – +40 см. Максимальний нагін, який досягає +65 см має місце у разі південного штормового вітру. Падіння рівня моря в результаті згонів має місце при північному, північно-східному та східному вітрах. Максимальний згін, який досягає -75 см, має місце при північному та північно-східному вітрах.

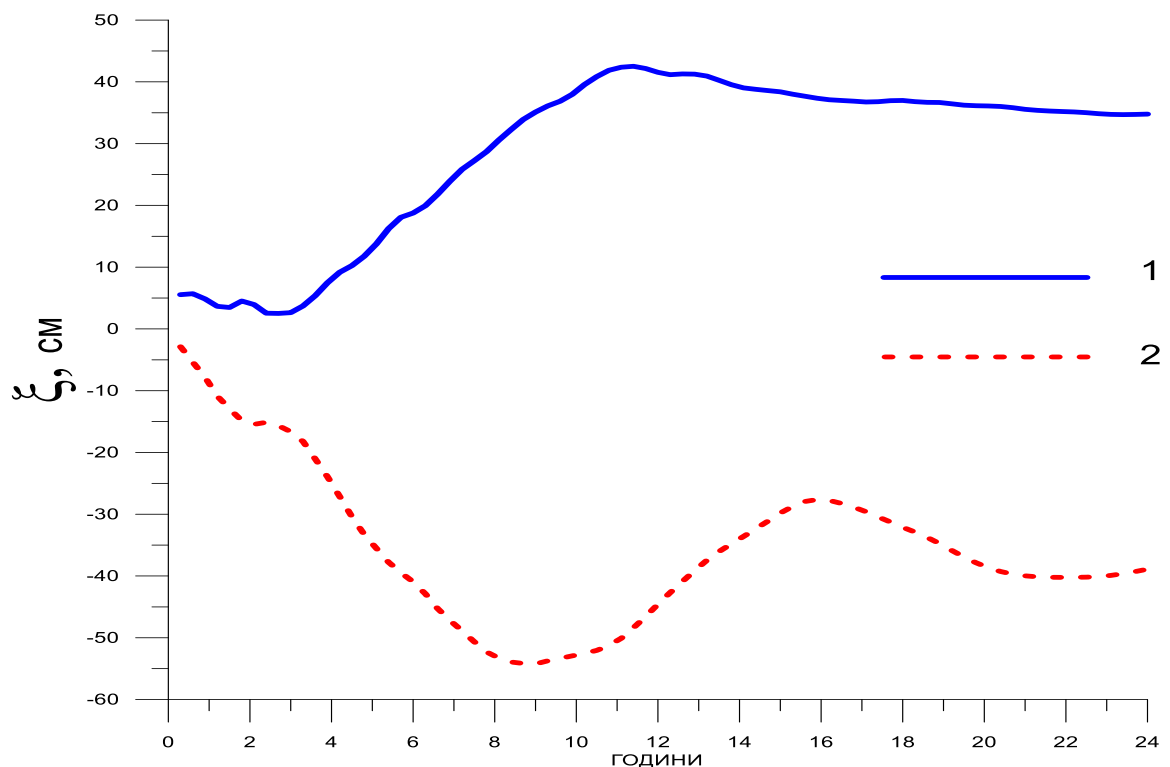


Рис. 5.11 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого північно-західного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ (2)

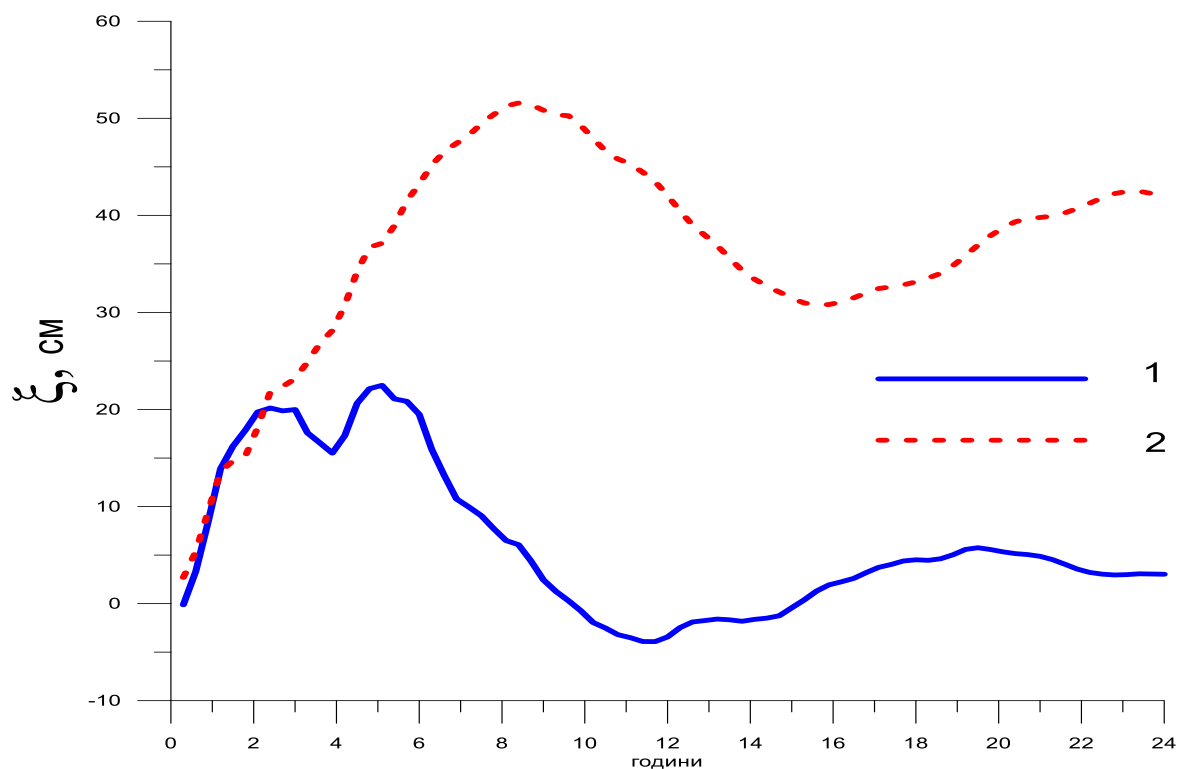


Рис. 5.12 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого південно-східного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ (2)

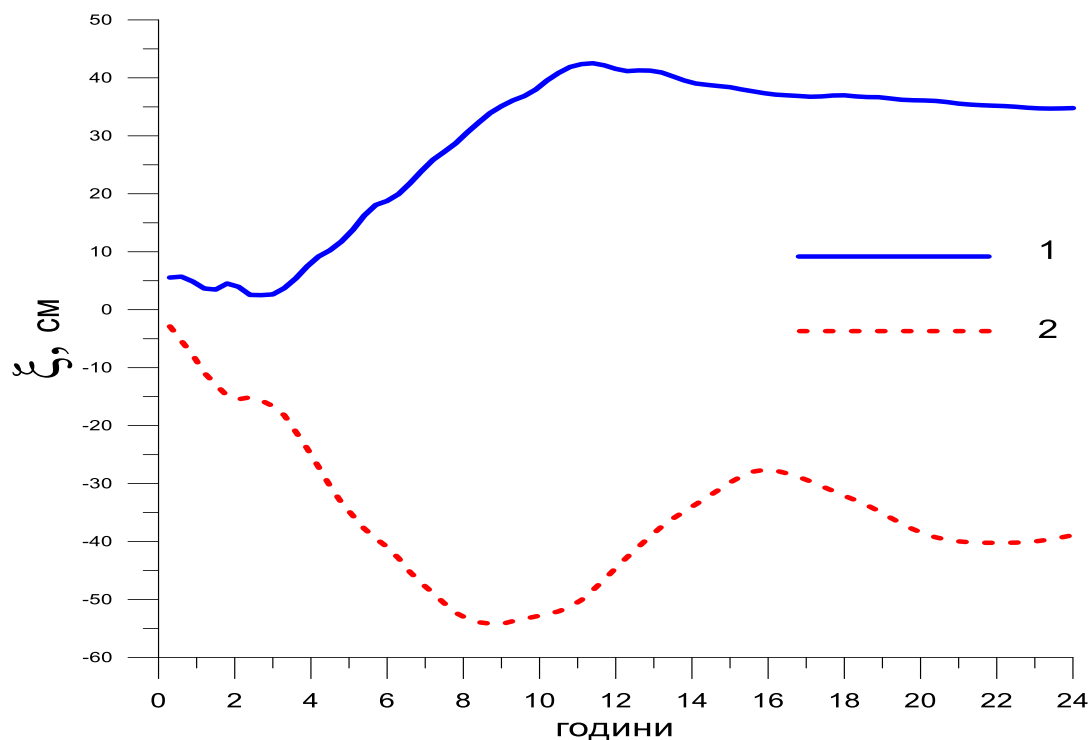


Рис.5.13 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого південно-західного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ (2)

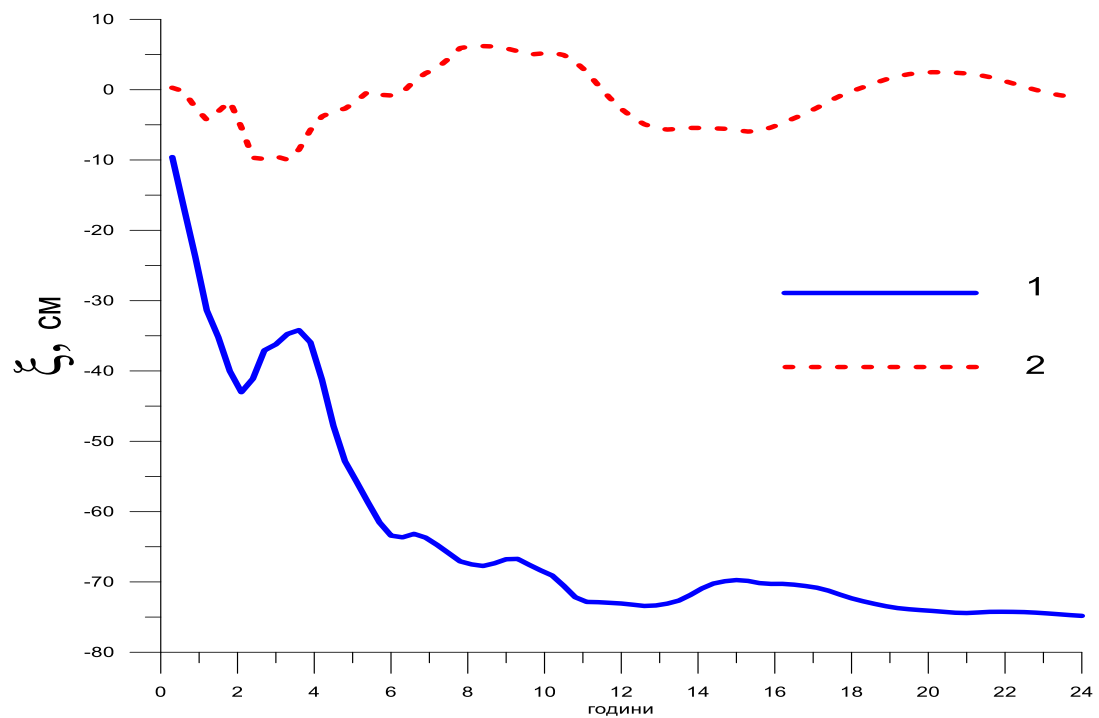


Рис.5.14 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого північного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ (2)

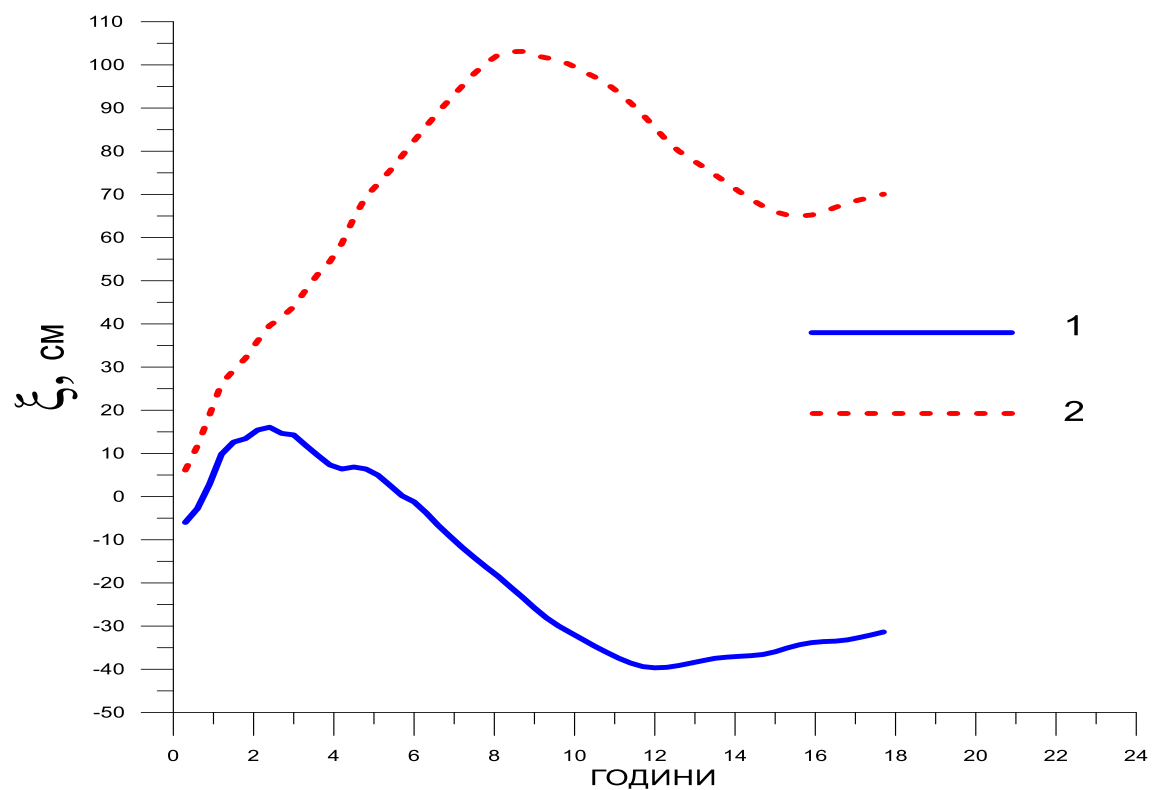


Рис.5.15 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого східного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ(2)

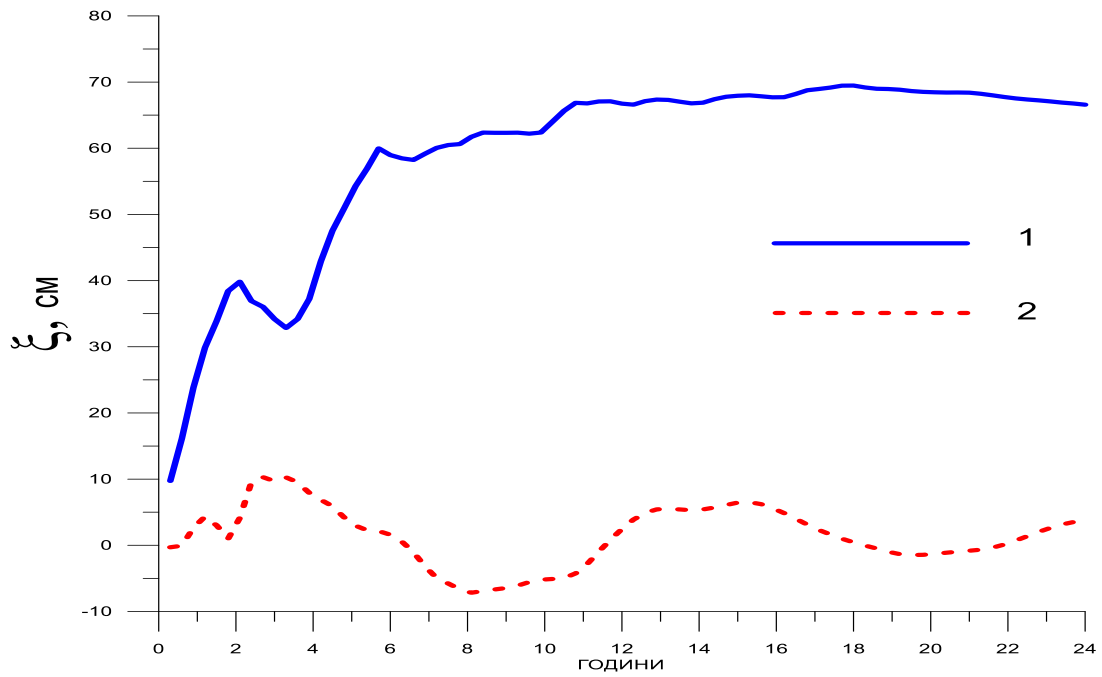


Рис. 5.16 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого південного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ(

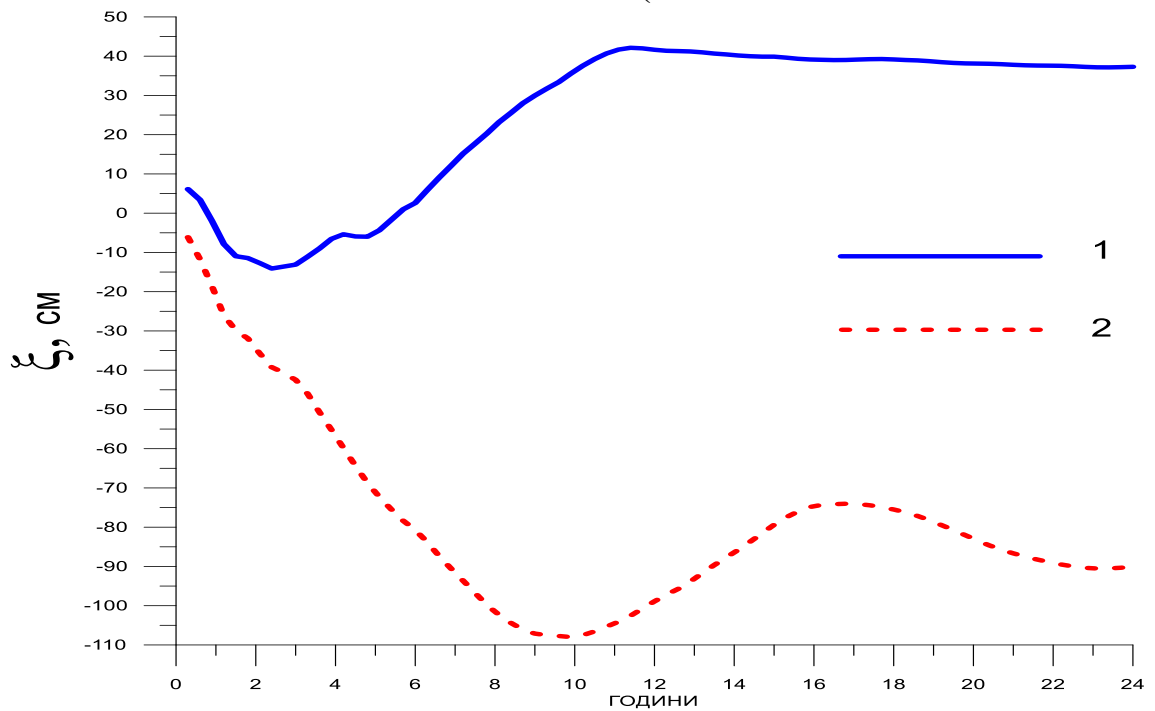


Рис. 5.17 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого західного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ (2)

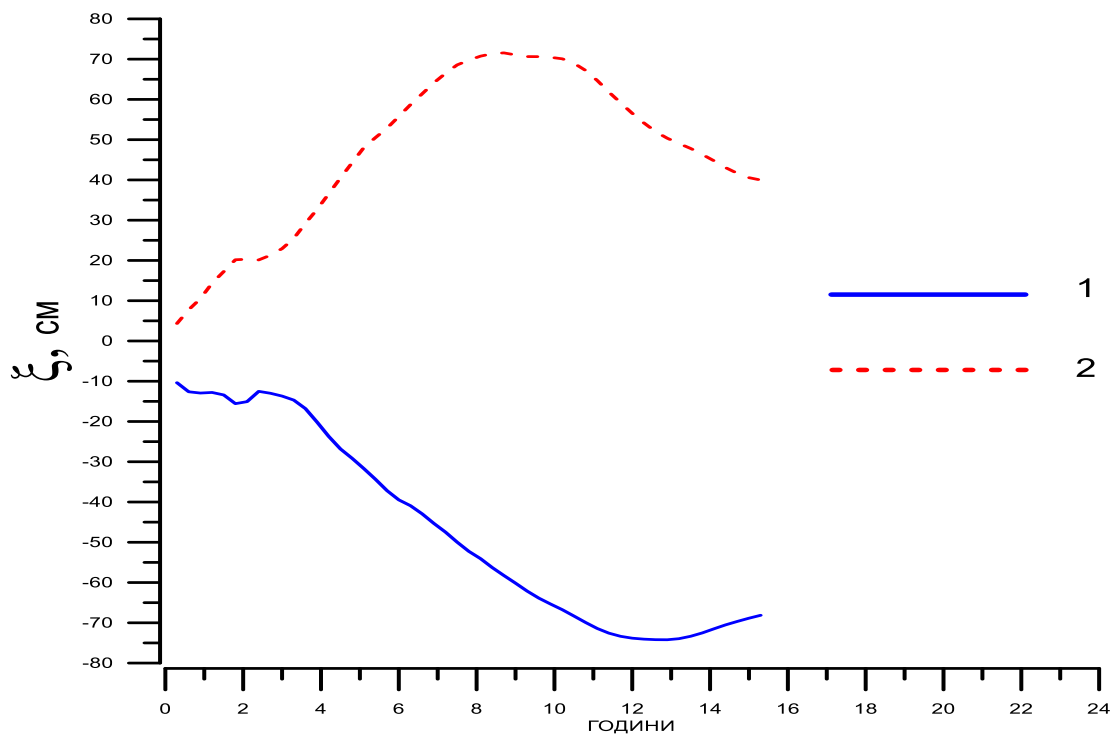


Рис.5.18 Динаміка відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, у разі дії сталого північно-східного вітру швидкістю 15 м/с в портах Маріуполь (1) та Генічеськ(2)

В порту Генічеськ максимальний нагін, який при швидкості вітру 15 м/с досягає +70 – +100 см, викликає східний вітер. При цьому відбувається підтоплення прибережних територій, як це було, наприклад, у травні 2018 р. При північно-східному та південно-східному вітрах підвищення рівня моря складає +40 – +50 см. Падіння рівня моря в результаті дії північно-західного та південно-західного вітрів також складає 40-50 см. Максимальне падіння рівня моря має місце у разі вітру західного напрямку і досягає при швидкості вітру 15 м/с -90 – -110 см.

На рис. 5.19 – 5.26 представлені усталені просторові розподіли відхилень рівня Азовського моря від стану спокою, отримані в результаті розрахунків протягом 1 доби модельного часу, при стаціонарних штормових вітрах швидкістю 15 м/с різних напрямків. Отримані поля відхилень рівня моря, в цілому узгоджуються з наведеними в [10], але є деякі розбіжності в абсолютних значеннях відхилень, які зумовлені тим що в рівняннях гідродинамічної моделі РОМ, на відміну від моделі, яка використовується в даній роботі, застосовується коефіцієнт горизонтальної турбулентної в'язкості, та розрахунки виконувались на криволінійній у горизонтальному просторі сітці.

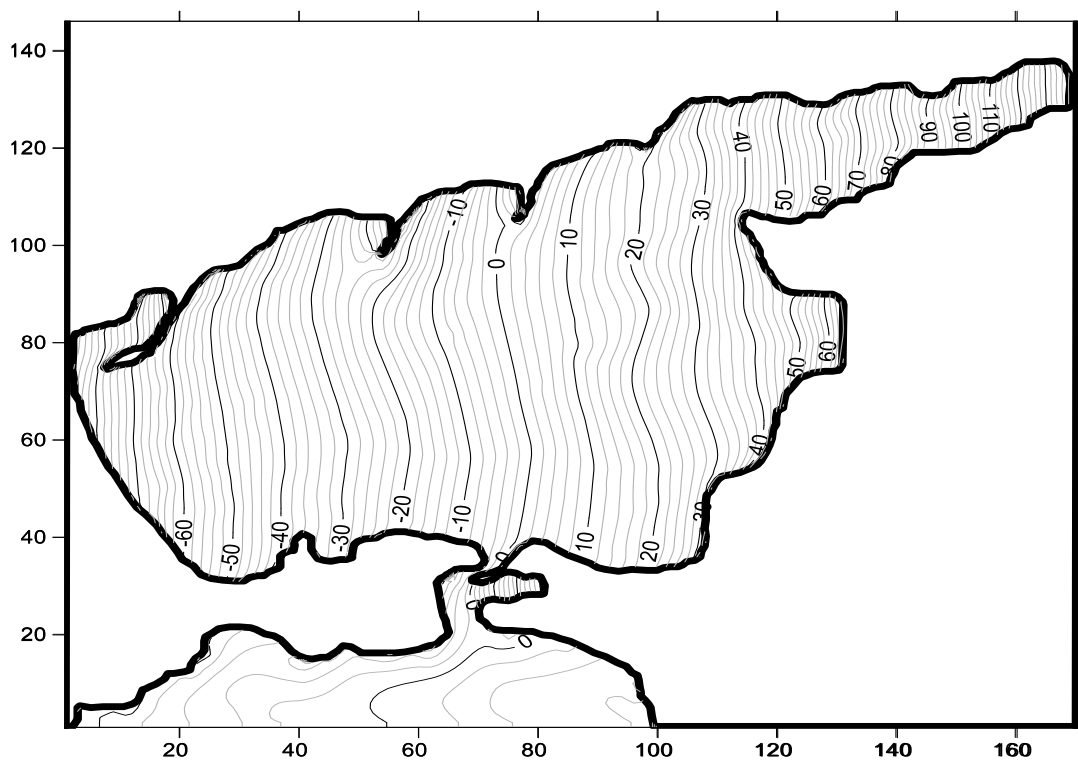


Рис. 5.19 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому західному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000 м

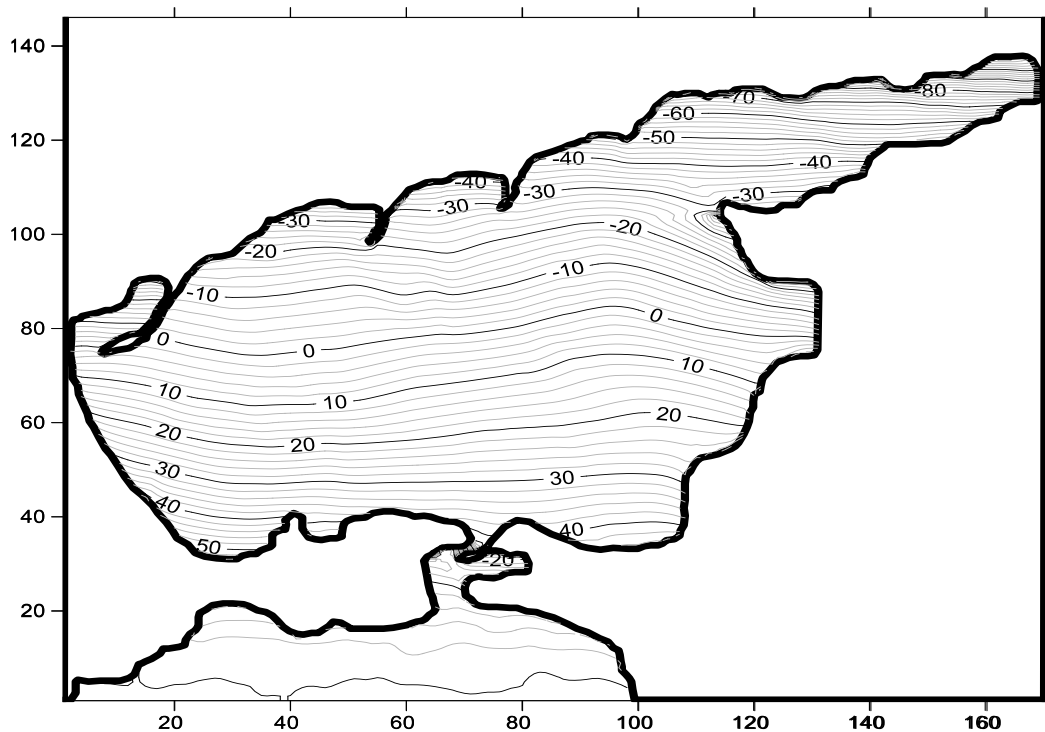


Рис. 5.20 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому північному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000 м

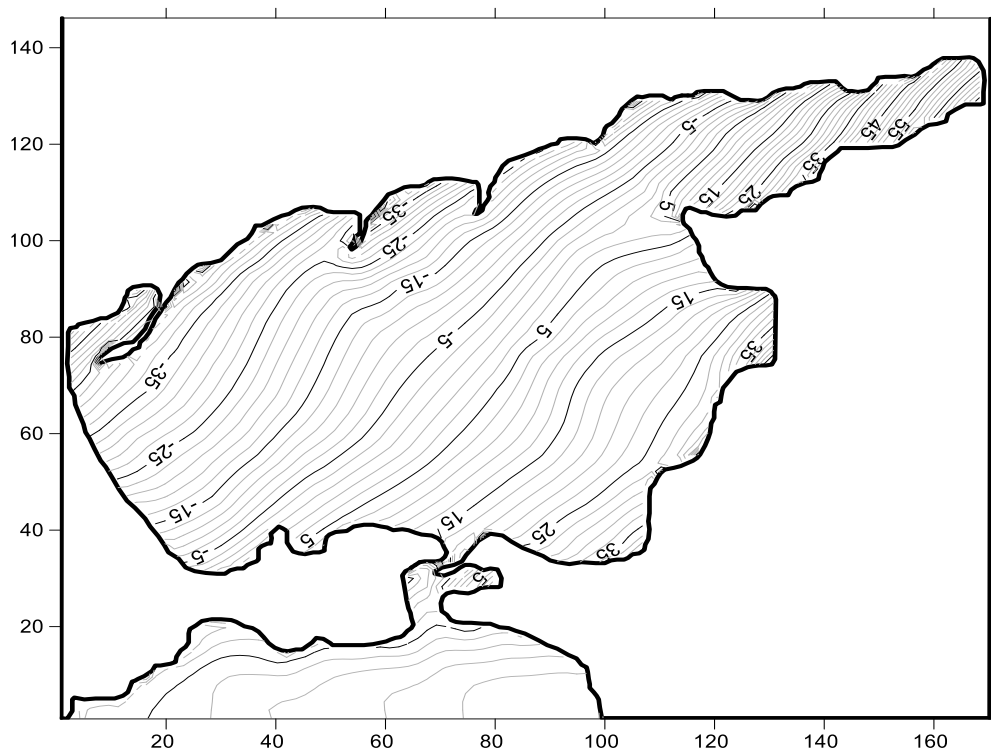


Рис. 5.21 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому північно-західному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000м

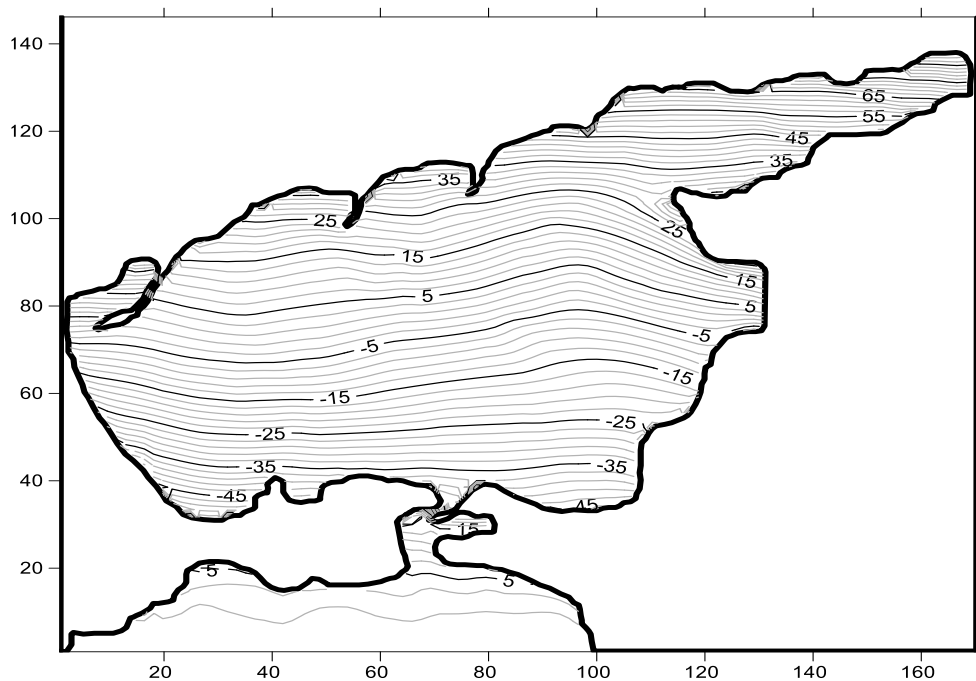


Рис. 5.22 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому південному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000м

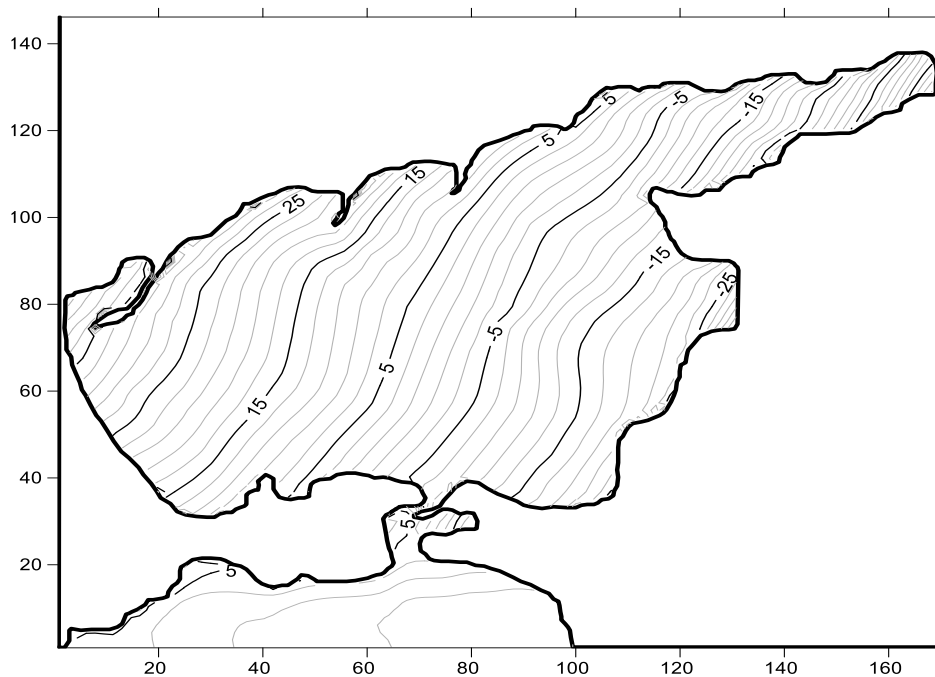


Рис. 5.23 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому південно-східному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000м

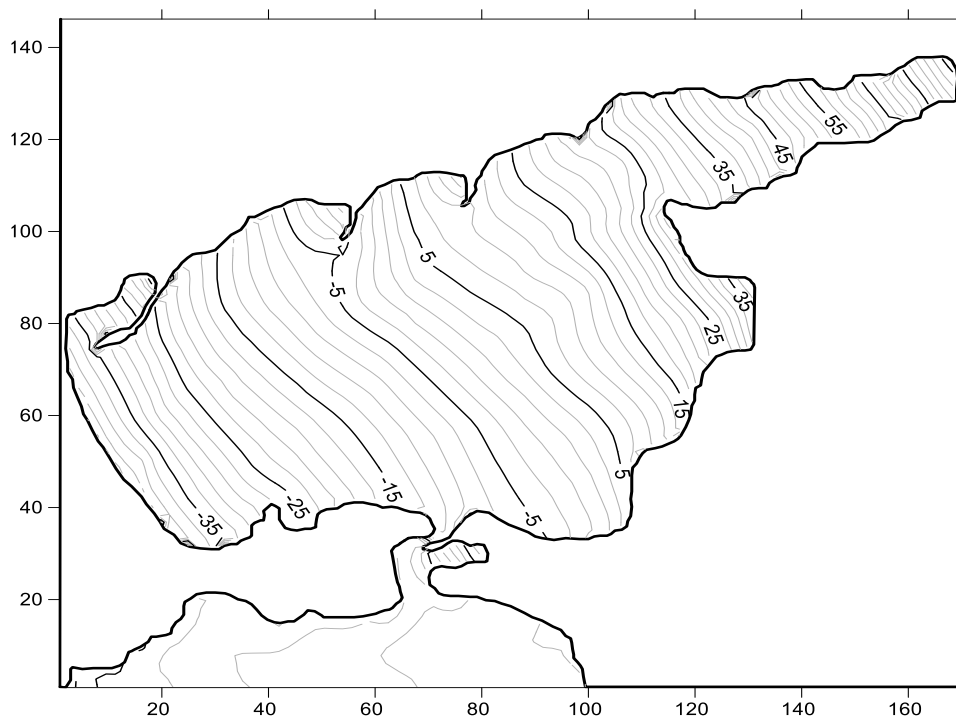


Рис. 5.24 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому південно-західному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000м

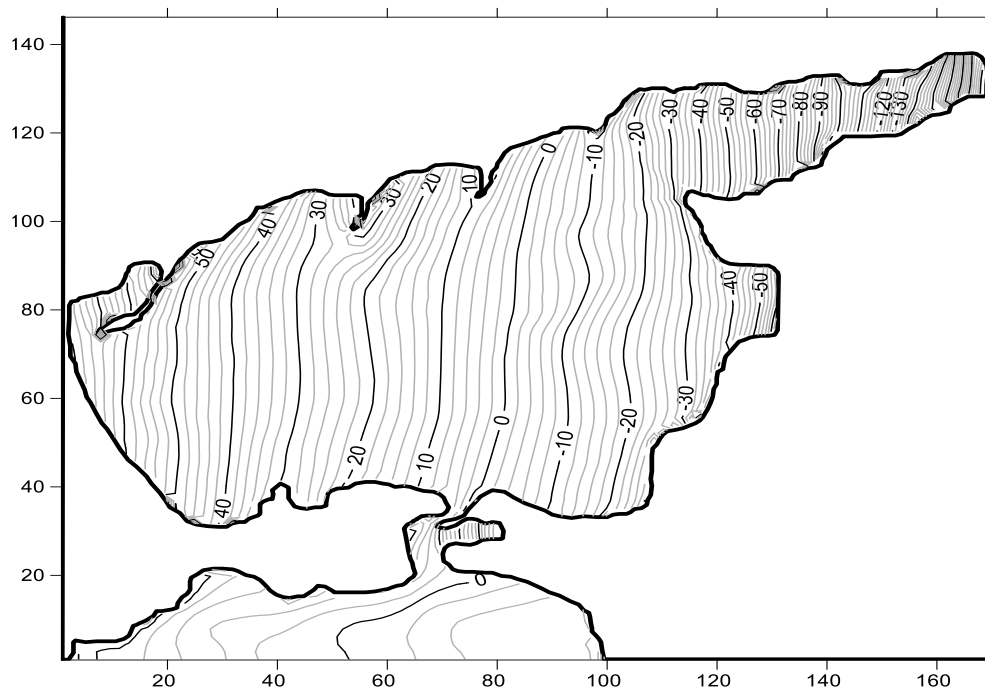


Рис. 5.25 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому східному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000м

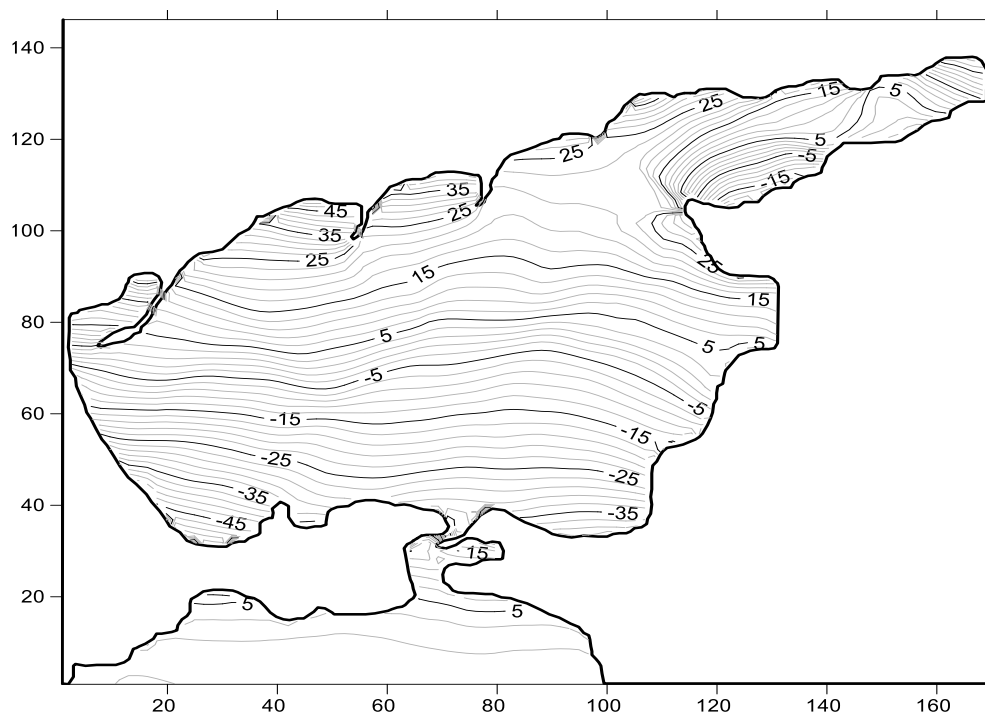


Рис. 5.26 Просторовий розподіл відхилень рівня моря від незбуреного стану, см, при сталому північно-східному вітрі швидкістю 15 м/с. Цифри на осях координат - номери вузлів розрахункової сітки з просторовим кроком 2000м

З метою попередньої верифікації моделі у варіанті із засвоєнням даних ре-аналізу вітру за моделлю GFS, на другому етапі робіт були виконані чисельні експерименти з розрахунку згінно-нагінних коливань рівня на акваторії Азовського моря при часовій мінливості вітрових умов з дискретністю 3 години протягом періоду з 03.10.2016 р. до 30.12.2016 р. у вузлах сітки GFS-аналізу з координатами 47° пн.ш., $37,5^{\circ}$ сх.д. та 47° пн.ш., $38,^{\circ}$ сх.д.

GFS (Global Forecast System) є глобальною спектральною моделлю Національних центрів з прогнозування навколишнього середовища NCEP (National Centers for Environmental Predictions) у США. Данні реаналізу та прогнозу за моделлю GFS можуть бути отримані шляхом автоматичного завантаження із використанням доступу через Інтернет до спеціалізованих веб-ресурсів та FTP-серверів метеорологічного призначення. Просторове розділення прогностичних даних моделі GFS у горизонтальній площині становить $0,25^{\circ}$ за широтою та довготою, а даних реаналізу – $0,5^{\circ}$ за широтою та довготою.

Порівняння часової мінливості компонент швидкості вітру у вказаному вузлі сітки GFS-аналізу із спостереженою на МГС «порт-Маріуполь» показало, вони добре узгоджуються між собою за характером мінливості (рис. 5.27-5.28). В той же час дані ре-аналізу дають більші швидкості вітру, ніж спостережені на прибережній станції, що зрозуміло, оскільки обрана точка сітки GFS-аналізу знаходиться на відкритій частині морської акваторії.

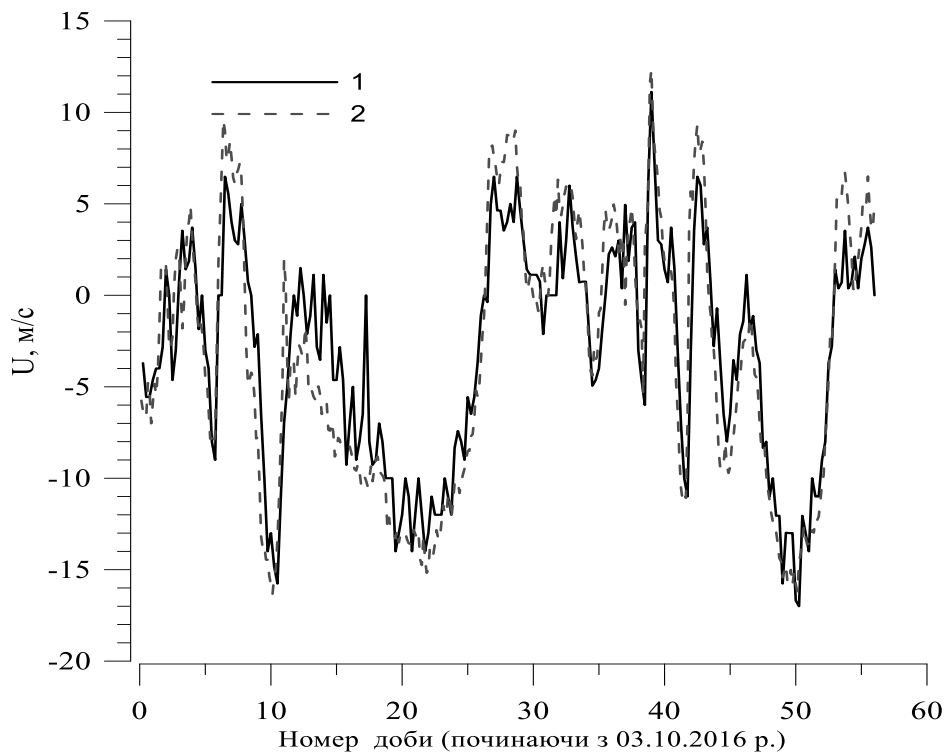


Рис. 5.27 – Часова мінливість меридіональної компоненти швидкості вітру, м/с: 1– за даними спостережень на МГС «порт-Маріуполь », 2– за даними GFS-аналізу

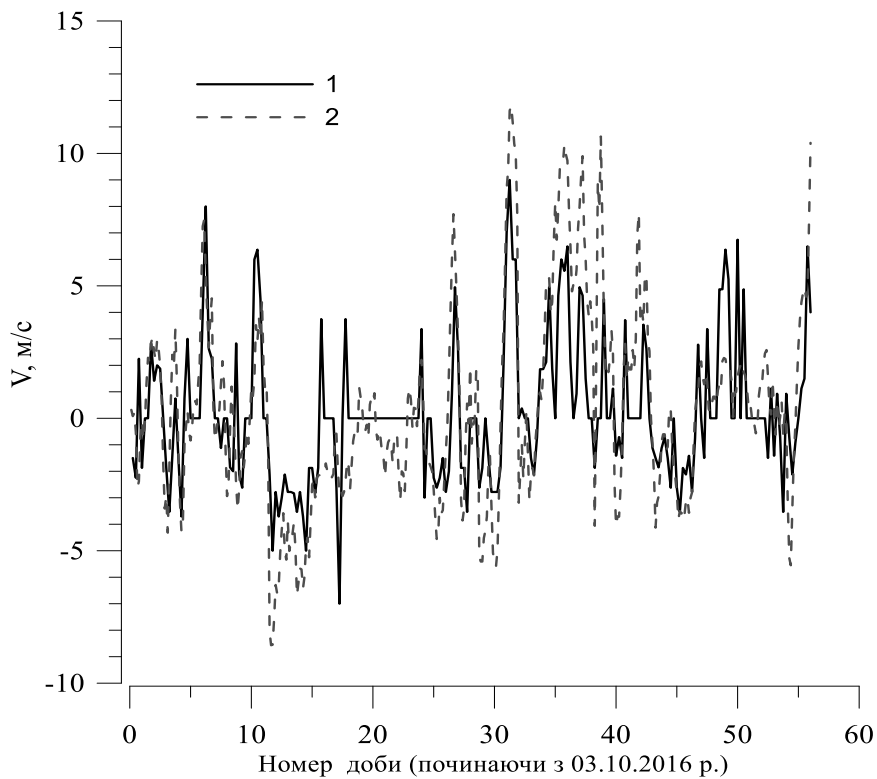


Рис. 5.28 Часова мінливість зональної компоненти швидкості вітру, м/с: 1– за даними спостережень на МГС «порт-Маріуполь», 2– за даними GFS-аналізу

Порівняння результатів розрахунків мінливості відхилень рівня моря від стану покою в порту Маріуполь з даними спостережень за вказаний період наведені рис. 5.29. В цілому розрахунки показали, що використана гідродинамічна модель здатна правильно описувати мінливість рівня моря в результаті вітрової дії. Отримано задовільну відповідність модельних і спостережуваних кривих часового ходу рівня моря для порту Маріуполь, хоча і мають місце деякі кількісні розбіжності у розрахованих і спостережених величинах відхилень рівня моря при сильних вітрах. Ці розбіжності можуть бути обумовлені такими причинами:

- вітрові умови задавалися незмінними у просторі;
- досить великим кроком розрахункової сітки, що не дозволяє врахувати морфометричні особливості прибережної зони моря в районі розташування порту;
- модельні розрахунки велись протягом тривалого періоду часу без врахування мінливості обсягів стоку р. Дон на коливання рівня моря в розрахунковій області.

Можна очікувати, що у разі усунення вищевказаних причин виникнення похибок, точність розрахунків згінно-нагінних коливань рівня моря значно зросте.

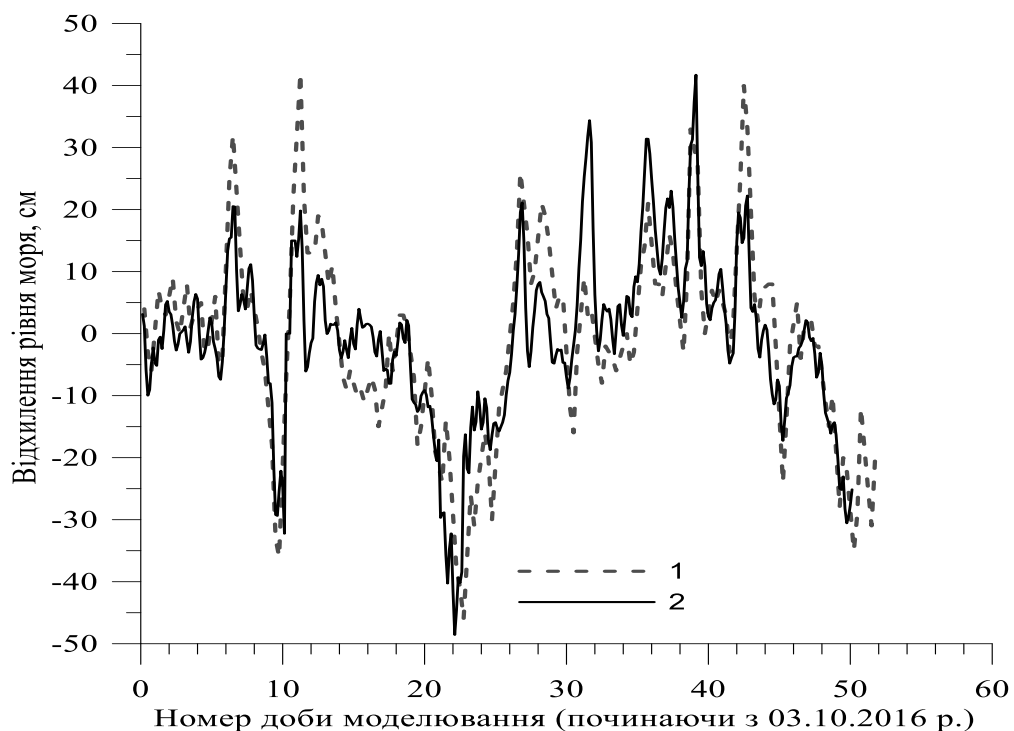


Рис. 5.29 Часова мінливість розрахованих за моделлю (1) та спостережених на МГС «порт-Маріуполь» (2) відхилень рівня моря, в см, від незбуреного вітром стану спокою

На рис. 5.30 приведені розраховані за моделлю згінно-нагінні коливання рівня моря в портах Геніченськ і Маріуполь протягом жовтня листопада 2016 р. Як і слід було очікувати, при сильних вітрах коливання рівня моря в районах розташування вказаних портів знаходяться в протифазі. При вітровому нагоні в порту Геніченськ відбувається згін в порту Маріуполь і навпаки. За період моделювання максимальний згін в порту Маріуполь склад -50 см, а порту Геніченськ -40 см. Максимальний нагін в порту Геніченськ досягав $+70 - +85$ см, а в порту Маріуполь $+40$ см.

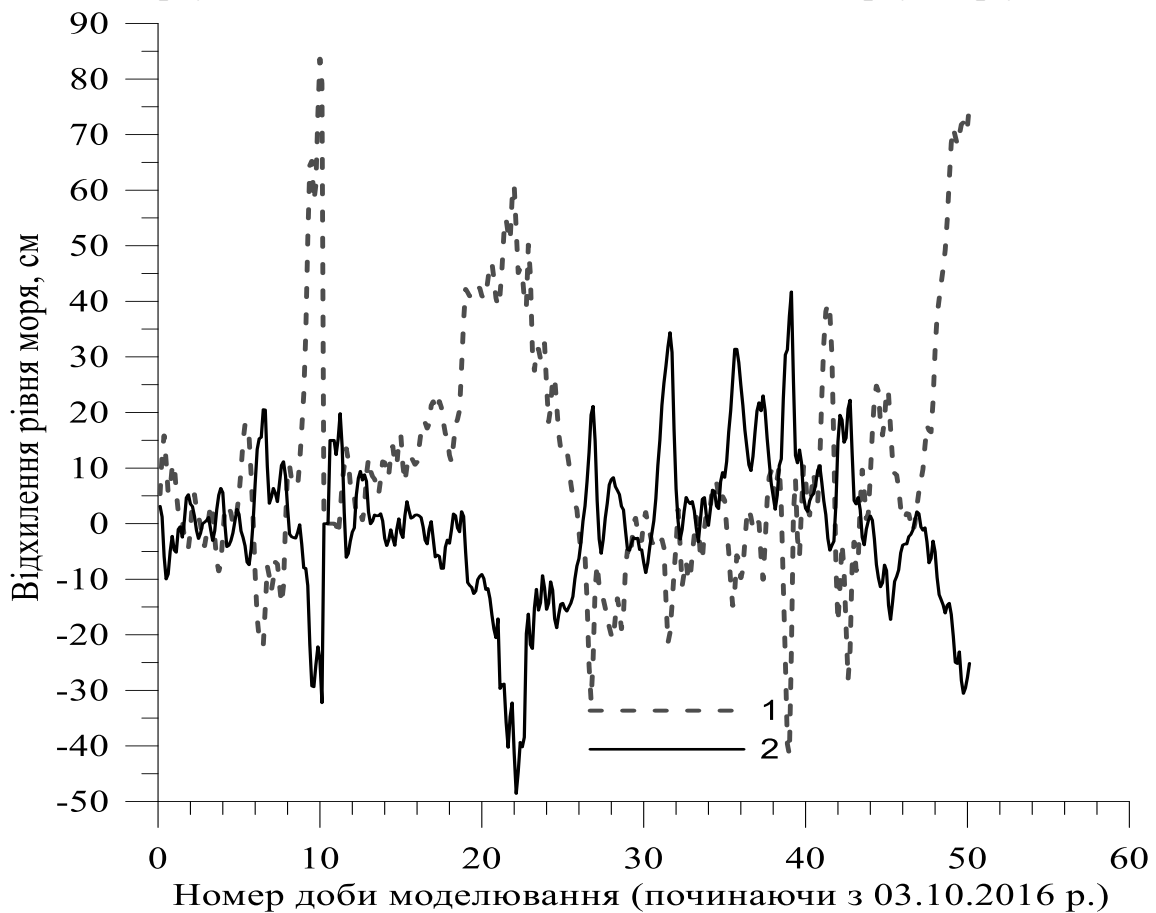


Рис. 5.30 Розрахована за моделлю часова мінливість викликаних вітром відхилень рівня моря від незбуреного стану спокою протягом жовтня-листопада 2016 р. в портах Геніченськ (1) і Маріуполь (2)

ВИСНОВКИ

Особливе місце в дослідженнях згінних і нагінних рухів, що виникають в морських басейнах, займає визначення катастрофічних підйомів і опускань рівня. Ця проблема актуальна перш за все в прибережних областях морів, пов'язаних дрібними протоками. Як впливає з матеріалів багаторічних спостережень, в Азовському морі і на його узбережжі в зимовий і весняний періоди відзначаються урагани, активізовані циклонічної діяльністю і викликають штормові згони і нагони.

Дослідження повторюваності згонів і нагонів по районах Азовського моря показує, що найбільш часто небезпечним нагонам (48% всіх випадків) і згонам (60% всіх випадків) схильні східне узбережжя моря і Таганрозька затока. При цьому сильні згони ніколи не виникають в прибережній зоні півдня моря і в північному районі Керченської протоки.

Аналіз даних рівневих спостережень в Азовському морі показав, що у кожному з районів моря на згінно-нагінні коливання впливає розташування берегової лінії щодо вітру. Тобто в пунктах Бердянськ і Небезпечне (розмах коливань 202-203см), а найбільші - у віддалених від вузлової лінії пунктах Генічеськ (412см), Єйськ (438см) і Таганрог. У Таганрозі, де істотний вплив має стік річки Дон, амплітуда згінно-нагінних коливань максимальна і становить 609 см.

Згідно з даними масиву POM-JRA, найменші відхилення рівня (0,1-0,3м) в усі місяці року спостерігаються у відкритих районах моря. Зонами максимальних знижень (від 1,2 до 1,5 м) і підвищень від 0,8 до 0,9 м рівня є Таганрозька затока і південно-західна частина Арабатської затоки. Ці зони проявляються в холодний період року (жовтень-березень), коли штормові вітри північно-східного і східного напрямів мають найбільшу повторюваність. Вітри південно-західного напрямку в 1979-2010 рр. відзначалися в березні, квітні, червні і викликали підвищення рівня в Таганрозькій затоці до 0,7-0,9 м. За весь розрахунковий період найменші згінно-нагінні коливання рівня (з амплітудою, що не перевищує 0,2-0,4 м в Азовському морі і 0,3-0,6 м в Таганрозькій затоці) були отримані в теплий період року, з травня по вересень.

Застосування численної математичної моделі ОДЕКУ, заснованої на вирішенні рівнянь динаміки вод в наближеннях теорії «мілкої води», для моделювання згінно-нагінних коливань рівня води в портах Азовського моря викликаних вітром 8 основних румбів швидкістю 15 м/с показало, що:

- модельний час, протягом якого відбувається встановлення системи баротропних течій при сталих штормових вітрах становить 15 годин;
- найбільш сильні течії, швидкість яких перевищує 20 м/с і може досягати 30 м/с, розвиваються на протяжних ділянках прибережного мілководдя, орієнтація яких співпадає з напрямком вітру; інтенсифікація течій також відбувається біля меж Обіточної, Бердянської, Білосарайської та Довгої кіс; стабільно великі швидкості течій розвиваються в Керченській протоці;
- в порту Маріуполь: підвищення рівня моря в результаті дії вітрів із західною складовою становить +35 – +40 см; максимальний нагін, який досягає +65 см має місце у разі південного штормового вітру; падіння рівня моря в результаті згонів має місце при північному, північно-східному та східному вітрах. Максимальний згін, який досягає -75 см, має місце при північному та північно-східному вітрах;
- в порту Генічеськ: максимальний нагін, який досягає +70 – +100 см, викликає східний вітер; при північно-східному та південно-східному вітрах підвищення рівня моря складає +40 – +50 см; падіння рівня моря в результаті дії північно-західного та південно-західного вітрів також складає -40 – -50 см; максимальне падіння рівня має місце у разі вітру західного напрямку і досягає -90 – -110 см;
- отримані в результаті розрахунків загальні схеми баротропної циркуляції вод, значення швидкості течій на різних ділянках акваторії Азовського моря та поля відхилень рівня моря від незбуреного стану в цілому узгоджуються з результатами моделювання із використанням гідродинамічної моделі POM.

Чисельні експерименти з розрахунку згінно-нагінних коливань рівня на акваторії Азовського моря при часовій мінливості вітрових умов з дискретністю 3 години протягом періоду з 03.10.2016 р. до 30.12.2016 р. за даними GFS ре-аналізу вітру показали, що використана гідродинамічна модель здатна правильно описувати мінливість рівня моря в результаті вітрової дії. Отримано задовільну відповідність модельних і спостережуваних кривих часового ходу рівня моря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 853 с.
2. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 3. Азовское море. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 220 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море. – СПб Гидрометеиздат, 1991.
4. Геология Азовского моря. – К.: Наукова думка, 1974. – 246 с.
5. <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-azovskoe-more/>
6. Бронфман А.М., Хлебников Е.П. Азовское море. Основы реконструкции. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 270 с.
7. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1: Азовское море / Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б.; МЧС и НАН Украины, Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. – Севастополь, 2009. – с. 400, ил. 149, табл. 56 библиогр. 217.
8. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море. – СПб Гидрометеиздат, 1991. – 236 с.
9. Мамыкина В.А., Хрусталева Ю.П. Береговая зона Азовского моря. – Ростов-на-Дону, 1980. – 176 с.
10. Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря / Под ред. д-ра физ.-мат. наук В.В. Фомина; Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. — Киев, 2012. — с. 238, ил. 351, табл. 33, библиогр. 37.
11. Гідрометеорологічні умови морів України. Том 1: Азовське море / Ю.П., Фомін В.В., Дьяков М.М., Горбач С.Б.; МНС і НАН України, Морське відділення Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. - Севастополь, 2009. - 30-32с.
12. Лоція Азовського моря (№ 1243), ГУНіО МО РФ, 1995 р.
13. Герман В.Х., Левилов С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 229 с.
14. Белов В.П. Режим ветра и ветрового волнения на Азовском море // Труды ГОИН. – 1978. – Вып. 134. – С. 48–56.
15. Белокопытов В.Н. Сезонная изменчивость термохалинной и гидролого-акустической структуры вод Черного моря // В сб. Экологическая

безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. –Севастополь, 2003. –Вып. 8. –С. 12-22.

16. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 853 с.

17. Кропачев Л.Н. Методы предвычисления опасных подъемов уровня Азовского моря // Тр. Океаногр. Комиссии. –1960. –Т.7. –С. 136-147.

18. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coast Ocean Models. 1987. Vol. 4. P. 116.

19. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіді Національної Академії наук України. 2011. №8. С. 108-112.

20. Лонин С.А., Тучковенко Ю.С. Имитация стонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: НАН Украины, МГИ. 1999. С. 58-66.

21. Боуден К.Ф. Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 326 с.

22. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 229 с.

23. Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование уровня моря. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 229 с.

24. Lui S.K., Leendertse J.J. Multidimensional numerical modeling of estuaries and coastal seas. Adv. Hydrosci. 1978. No 11. P.95-164.

25. Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря /Под ред. д-ра физ.-мат. наук В.В. Фомина; Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. Киев, 2012. 238с.

Висновок керівника магістерської роботи

Шелякіной М.Д. самостійно виконаний фізико-географічний опис Азовського моря та характеристик його гідрологічного режиму, аналіз основних чинників, які впливають на коливання рівня моря на різних просторово-часових масштабах, аналіз характеристик згінно-нагінних коливань рівня Азовського моря за даними літературних джерел. За допомогою керівника проведені числові експерименти з гідродинамічною моделлю для розрахунків згінно-нагінних коливань рівня моря, виконано опис та аналіз результатів числового математичного моделювання згінно-нагінних коливань рівня в Азовському морі із застосуванням гідродинамічної моделі.

При виконанні роботи Шелякіна М.Д. засвоїла та використала графічні пакети Surfer і Grafer для побудови полів векторів та ізотих баротропних течій, відхилень рівня моря від незбуреного стану, графіків часової мінливості згінно-нагінних коливань рівня моря в портах Мариупіль та Геніченськ, розрахованих за моделлю для різних вітрових умов.

Керівник магістерської роботи _____ проф. Тучковенко Ю.С.
(підпис)

“ ____ ” _____ 20 ____ року

Висновок кафедри, циклової комісії про магістерську роботу

Магістерська робота розглянута. Студент (ка) _____ Шелякіна М.Д.

(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даного (ї) проекту (роботи) в Атестаційній комісії.

Завідувач кафедри, голова циклової комісії *океанології та морського природокористування*

(назва)

_____ Берлінський М.А. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

“ ____ ” _____ 20 ____ року