

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
"Морской гидрофизический институт РАН"

Л.В.ЧЕРКЕСОВ, Т.Я.ШУЛЬГА

ВОЛНЫ, ТЕЧЕНИЯ,  
СГОННО-НАГОННЫЕ  
ПРОЦЕССЫ  
И ТРАНСФОРМАЦИЯ  
ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
В АЗОВСКОМ МОРЕ

Севастополь  
2017



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Морской гидрофизический институт РАН»

Л.В. ЧЕРКЕСОВ, Т.Я. ШУЛЬГА

**ВОЛНЫ, ТЕЧЕНИЯ,  
СГОННО-НАГОННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
И ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
В АЗОВСКОМ МОРЕ**

Севастополь

2017

**УДК 551.46 (262.54):551.465: 551.466**

**ББК 26.221**

**Ч 48**

**Ч 48 Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море / Л. В. Черкесов, Т. Я. Шульга; ФГБУН МГИ. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. – 228 с. : ил. 56; табл. 56; библи. 159 наим.**

**ISBN 978-5-9908460-1-2**

Методом численного моделирования изучается пространственно-временная изменчивость течений и сгонно-нагонных колебаний уровня в Азовском море, возникающих под действием атмосферных возмущений, характерных для этих районов. Анализируется влияние генерируемых при этом течений и волн на эволюцию полей пассивной примеси в Азовском море. Для исследования применяется трехмерная сигма-координатная модель *POM (Princeton Ocean Model)*, адаптированная к району Азовского моря. Обосновывается необходимость использования нелинейной системы уравнений, описывающей движение жидкости в мелководных бассейнах. Сравниваются результаты численных экспериментов с данными натурных наблюдений, что позволяет сделать обоснованный выбор коэффициента поверхностного трения, исходя из предложенных в нескольких литературных источниках. Исследовано влияние водообмена с Черным морем на динамические процессы, возникающие в Азовском море. Выполнено сравнение результатов моделирования колебаний уровня моря, вызываемых действием ветра, атмосферной модели *SKIRON* с данными натурных наблюдений на ряде гидрометеорологических станций. В результате сравнения подтверждена обоснованность полученных в работе выводов. Установлена зависимость сейшеобразных колебаний от параметров атмосферных воздействий на основе анализа результатов математического моделирования и теории свободных колебаний жидкости.

Для специалистов и студентов океанологических, экологических, гидродинамических и гидротехнических специальностей.

**Рецензенты:**

Председатель ЮНЦ РАН академик РАН **Г. Г. Матишов**

Заведующий отделом гидрофизики шельфа ФГБУН МГИ доктор физико-математических наук, академик РАН **В. А. Иванов**

Главный научный сотрудник ФГБУН МГИ доктор физико-математических наук, профессор **С. Ф. Доценко**

**УДК 551.46 (262.54):551.465: 551.466**

**ББК 26.221**

**ISBN 978-5-9908460-1-2**

© ФГБУН МГИ, 2017

© Черкесов Л. В., Шульга Т. Я., 2017

*Памяти  
Леонида Васильевича  
Черкесова*

Эта книга была задумана Черкесовым Леонидом Васильевичем – известным в научном мире специалистом по гидродинамике моря. Монография виделась ему как современное исследование, целью которого является анализ проблем Азовского моря, включающий гидрометеорологические, гидродинамические, гидротехнические и другие аспекты. В таком ключе она и была написана. К сожалению, ему не удалось увидеть воплощение своего замысла в окончательном виде. Эта книга – дань памяти Леониду Васильевичу Черкесову, замечательному ученому, учителю и человеку.

## Содержание

|                                                                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b>                                                                                                                                    | <b>6</b>  |
| <b>Глава 1. Общая характеристика района Азовского моря.</b>                                                                                              |           |
| <b>Уравнения математической модели и ее параметры .....</b>                                                                                              | <b>9</b>  |
| § 1.1. Натурные данные измерений волн, течений, сгонов и нагонов в Азовском море .....                                                                   | 11        |
| § 1.2. Современные исследования Азовского моря на основании анализа результатов математического моделирования .....                                      | 20        |
| § 1.3. Уравнения модели. Начальные и граничные условия .....                                                                                             | 24        |
| <b>Глава 2. Динамические процессы и трансформация поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений и переменного ветра .....</b>            | <b>38</b> |
| § 2.1. Сгоны и нагоны, возникающие под действием ветра и стационарных течений .....                                                                      | 39        |
| 2.1.1. Исследование динамических процессов, генерируемых действием переменного ветра при отсутствии стационарных течений .....                           | 39        |
| 2.1.2. Динамические процессы, возникающие под действием переменного ветра при наличии стационарных течений .....                                         | 50        |
| 2.1.3. Анализ влияния учета водообмена с Черным морем на стационарные движения в Азовском море .....                                                     | 52        |
| 2.1.4. Определение областей осушения и затопления береговых районов Азовского моря под действием постоянного ветра .....                                 | 63        |
| § 2.2. Линеаризация граничных условий и уравнений движения, изменение шагов интегрирования при моделировании стационарных движений в Азовском море ..... | 75        |
| § 2.3. Пространственно-временная эволюция загрязнений, вызываемая стационарными течениями и переменным ветром .....                                      | 80        |
| 2.3.1. Анализ трансформации полей примеси под действием переменного ветра при отсутствии стационарных течений .....                                      | 81        |
| 2.3.2. Исследование влияния фоновых стационарных течений на эволюцию загрязнений под действием переменного ветра .....                                   | 91        |
| § 2.4. Положения экстремумов отклонений уровня и скорости течений, возникающих под действием постоянного ветра в открытой части Азовского моря .....     | 100       |

|                                                                                                                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 3. Сгонно-нагонные явления, течения и трансформация загрязняющих веществ в Азовском море, вызванные движущимися циклонами .....</b>                                                    | <b>106</b> |
| § 3.1. Оценка влияния циклонических возмущений на динамические процессы при наличии фоновых стационарных течений.....                                                                           | 107        |
| § 3.2. Воздействие перемещающихся циклонов и стационарных течений на трансформацию загрязняющих веществ .....                                                                                   | 114        |
| § 3.3. Водообмен с Черным морем и его влияние на сгонно-нагонные явления и течения, вызываемые движущимися циклонами.....                                                                       | 124        |
| <b>Глава 4. Численный анализ течений, сгонно-нагонных процессов и распространения загрязнений при штормовых ситуациях в Азовском море с использованием атмосферной модели SKIRON .....</b>      | <b>137</b> |
| § 4.1. Течения и колебания уровня, генерируемые ветром, данные о котором приведены в прогностической модели SKIRON.....                                                                         | 137        |
| § 4.2. Изучение динамических процессов и их влияния на трансформацию пассивной примеси при наличии стационарных течений в Азовском море с использованием данных атмосферной модели SKIRON ..... | 149        |
| 4.2.1. Моделирование процесса распространения примеси в Азовском море в зависимости от интенсивности атмосферных полей модели SKIRON.....                                                       | 161        |
| 4.2.2. Анализ зависимости характеристик уровня, течений и процессов трансформации загрязняющих веществ различного начального объема от интенсивности атмосферных возмущений.....                | 172        |
| <b>Глава 5. Свободные колебания уровня Азовского моря .....</b>                                                                                                                                 | <b>186</b> |
| § 5.1. Исследование скорости течений и колебаний уровня моря после прекращения длительно действующего ветра .....                                                                               | 186        |
| § 5.2. Анализ влияния параметров барических образований на свободные и вынужденные колебания уровня и течения в Азовском море.....                                                              | 197        |
| <b>Заключение .....</b>                                                                                                                                                                         | <b>211</b> |
| <b>Список литературы.....</b>                                                                                                                                                                   | <b>215</b> |

## Введение

Азовское море относится к числу наиболее изученных бассейнов. Здесь имеется сеть морских береговых станций и постов, проводятся стандартные специализированные экспедиционные наблюдения. При этом комплексных работ, результаты которых дают обоснованное представление о гидрометеорологических процессах, очень мало. Исследования научного и прикладного характера требуют применения современных трехмерных численных моделей, которые позволяют учитывать реальные атмосферные воздействия, рельеф дна, конфигурацию береговой линии. Азовское море в последнее время все больше подвергается антропогенному воздействию, связанному с активным хозяйственным освоением его акватории. В этих условиях знание гидрологического режима моря и его изменений, в значительной степени определяющих экологическую обстановку, представляет большую ценность.

Обширные мелководья, малые уклоны дна и суши, конфигурация береговой черты (Таганрогский залив), активное воздействие ветра создают благоприятные условия для развития в Азовском море значительных сгонно-нагонных колебаний уровня, сопровождающихся интенсивными течениями. В случаях экстремальных штормов, приносящих значительные разрушения на побережье (например, штормовые события 1914, 1944 и 1969 гг., приведшие к катастрофическим последствиям), нагоны проникают далеко за береговую черту, затопляя огромные пространства суши. В прибрежной зоне из-за сгонно-нагонных явлений происходят существенные изменения гидролого-морфологических, гидрохимических и экологических процессов. В этих районах изменения уровня, являющиеся следствием сгонно-нагонных явлений, достигают 2–3 м и сопровождаются при сгонах обнажением дна и обмелением фарватеров, при нагонах – затоплением островов, берегов, разрушением портовых сооружений.

Методы математического моделирования динамики вод Азовского моря позволяют решать широкий круг задач, связанных с прогнозом штормовых и экологических ситуаций. В условиях недостатка данных наблюдений численный анализ изменений уровня моря позволяет без значительных материальных затрат проводить исследования динамических процессов с учетом антропогенного воздействия. Анализ колебаний уровня по натурным данным, сочетающийся

с результатами численных экспериментов, расширяет возможности достижения достоверного научного знания. В монографии авторы стремились обобщить и представить в систематизированном виде новые результаты исследований динамических явлений в Азовском море, показать их важность для решения практических задач, оценив степень их согласованности с данными натурных наблюдений.

Первая глава представляет общее описание акватории исследуемого морского бассейна. С использованием результатов гидрометеорологических наблюдений выполнен анализ явлений, происходящих в водоеме, показана их взаимосвязь с экологической ситуацией в рассматриваемом регионе. Приведены уравнения используемой в расчетах математической модели, дано обоснование ее параметров, выбранных с учетом различных физических факторов, объяснены особенности ее численной реализации.

Во второй главе монографии значительное внимание уделяется численному анализу волн и течений в Азовском море, вызываемых действием нестационарного и постоянного ветра, поля которого задаются аналитически. С использованием трехмерной нелинейной системы дифференциальных уравнений найдены количественные характеристики динамических процессов: нестационарных и стационарных течений, а также волновых движений, вызванных порывами ветра. Изучена эволюция примеси нейтральной плавучести и влияние на неё волн и течений. На приведенных картах показаны пункты акватории, в которых достигаются экстремальные значения отклонений уровня и наибольшие скорости поверхностных течений. Выполнен анализ влияния скорости постоянного ветра на время достижения максимальных значений подъемов и понижений уровня и скоростей течений.

Третья глава посвящена исследованию волн и течений, генерируемых неоднородными по времени и пространству полями ветра и атмосферного давления, вызываемыми перемещающимися циклонами. Изучаются динамические процессы, возникающие под действием циклонических возмущений в поле стационарного ветра в Азовском море, а также особенности трансформации примеси. На основании анализа результатов численных расчетов сделаны выводы о влиянии направления перемещения циклона на максимальную скорость генерируемых им течений. Определено влияние

стационарных течений на поле скоростей, вызванных прохождением циклона.

В четвертой главе анализ динамических процессов и их влияние на распространение загрязняющих веществ в Азовском море выполнен с использованием данных атмосферной модели *SKIRON*. Проведен прогностический расчет динамических процессов, возникающих в бассейне под действием полей ветра и атмосферного давления, в зависимости от изменения метеорологических данных и наличия стационарных течений. Сопоставлены результаты проведенных численных расчетов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия этого ветра на ряде гидрологических станций.

В заключительной пятой главе методом математического моделирования детально исследованы сейшеобразные колебания уровня Азовского моря, вызванные прекращением длительно действующего ветра и перемещающихся барических образований. Наряду с этим приводятся имеющиеся сведения из научных источников об указанных процессах, полученных аналитическими методами.

В целом монография посвящена численному исследованию методом математического моделирования сгонно-нагонных колебаний уровня и пространственно-временной изменчивости течений в Азовском море, вызываемых действием характерных для этого региона полей ветра. Выполнен анализ физических закономерностей распространения пассивной примеси в Азовском море с учетом ветровых воздействий. Приведены результаты численного моделирования влияния водообмена с Черным морем на течения и волны в Азовском море. Исследования проводились с использованием трехмерной нелинейной гидродинамической модели *POM (Princeton Ocean Model)*, адаптированной к району Азовского моря.

Авторы надеются на полезность приведенных в книге результатов исследований для океанологов, экологов, гидродинамиков и гидротехников, которые проводят природоохранные мероприятия и решают задачи хозяйственного использования водных ресурсов. Авторы приносят глубокую благодарность С. В. Станичному и В. В. Фомину за любезно предоставленные массивы данных атмосферной модели и гидрометеорологических служб.

Авторы будут признательны всем, кто после ознакомления с работой выскажет по ней свои замечания.

## Глава 1

### **Общая характеристика района Азовского моря. Уравнения математической модели и ее параметры**

Азовское море – мелководный бассейн, расположенный между  $45^{\circ}16'$  с. ш. и  $39^{\circ}21'$  в. д. Его площадь 38 тыс. км<sup>2</sup>, средняя глубина 8 м, максимальная – 14 м. Это самое мелководное море в мире, его объем составляет 320 км<sup>3</sup>.

Южный берег Азовского моря холмист, он простирается от Керченского пролива до Арабатской стрелки – низкой песчаной косы длиной 112 км, отделяющей на западе Азовское море от озера Сиваш, связанного с морем проливом Тонкий, расположенным в северной части косы. Восточнее этого пролива находился единственный большой в этом море остров Бирючий, который в 1929 г. превратился в полуостров, соединившись с берегом песчаной Федотовой косой. Тогда же образовался большой, почти изолированный от моря Утлюковский лиман.

Северо-западный берег составляет степная равнина, заканчивающаяся у моря низким склоном, перерезанным реками и ручьями. Здесь находятся три больших низких мыса: Обиточная коса, Бердянская коса и Белосарайская коса. В северо-восточной части моря расположен большой Таганрогский залив, вытянувшийся в направлении устья Дона. В заливе есть маленькие острова: Песчаный, Черепашка и Долгий.

Юго-восточный берег с песчаными пляжами и небольшими заливами продолжается до Бейсугского лимана. Здесь расположены озера Кубанской дельты. За самым западным Ахтанизовским лиманом берег становится выше, холмы, господствующие над ним, поросли лесом.

В восточный берег вдается длинный и сравнительно широкий Таманский залив. На западном берегу моря есть Керченский залив, над которым возвышается гора Митридат, и Камыш-Бурунская бухта с живописными, поросшими лесом берегами.

Керченский пролив длиной 40 км связывает Азовское море с Черным. Ширина пролива различна в разных его частях: азовский вход между мысами Хрони и Ахиллеон – 8 морских миль, между островом Тузла и Павловским мысом – 2 мили, между Керчью и восточной частью Таманского залива – 22,5 мили. Черноморское устье

пролива между мысами Такиль и Панагия составляет 8 миль. Формирование водной массы Азовского моря происходит в результате смешения черноморских вод, поступающих через Керченский пролив, с речными водами и осадками. Иногда в море поступают соленые воды озера Сиваш.

Дон – самая большая река, впадающая в Азовское море. Длина его 1970 км, водосборный бассейн 442,5 тыс. км<sup>2</sup>. Кубань – вторая по величине азовская река. Она берет начало на леднике Уллукам на высоте 2970 м. Ее водосборный бассейн 58 тыс. км<sup>2</sup>, длина 941 км. Остальные азовские реки: Лозоватка, Обиточная, Кальмиус, Грузовский Еланчик, Мокрый Еланчик, Миус, Кагальник – мелководны.

Через Керченский пролив водообмен между Азовским и Черным морями осуществляется иначе, чем через глубоководные проливы. В зависимости от сезона и ветра в Керченском проливе наблюдается только азовская или только черноморская вода. Особенности гидрологического режима Азовского моря обуславливаются в основном сравнительно большим притоком пресной воды и мелководностью бассейна.

Соленость воды увеличивается от устья Дона в юго-западном направлении. В Таганрогском заливе средняя годовая соленость составляет 9–11 ‰. В северной части Керченского пролива соленость в большинстве случаев составляет 11–13 ‰.

Температура воды в море минимальна в январе, максимальна в июле. Ее изменения в течение года очень велики. В большинстве случаев в прибрежных водах температура колеблется от –0,3 °С зимой до 30–31 °С в самые теплые летние дни. Ее колебания с глубиной обычно незначительны.

Уровень Азовского моря обычно выше на несколько сантиметров уровня Черного моря. Это объясняется различием в плотности воды Азовского и Черного моря, обусловленным непрерывным притоком речной воды. Значительно поднимается уровень моря из-за ветра в Таганрогском заливе вследствие его воронкообразной формы. Сгонно-нагонные колебания уровня в северо-западной части залива достигают значения 4,5 м.

Течения в Азовском море существенно зависят от действия ветра. С изменением скорости и направления ветра меняется и скорость течений. У северо-западного берега преобладают течения

юго-западного направления, у восточного берега – северного. Волнение в мелководном Азовском море имеет свои особенности. Максимальная высота волн (1,2–1,5 м) достигается при ветре 6–7 баллов продолжительностью не менее 6 ч.

### **§ 1.1. Натурные данные измерений волн, течений, сгонов и нагонов в Азовском море**

Первые работы по изучению Азовского моря, в которых проводился анализ состояния водной среды и биологических ресурсов, относятся к середине 19-го в. (например, книга Н. Я. Данилевского «Описание рыболовства в Черном и Азовском морях» (1871)). Развитие регулярного исследования гидрометеорологического режима Азовского моря шло по пути организации сети наблюдений на побережье. Информация о гидрологических условиях открытой части моря поступала с различных судов в основном как сопутствующая. В конце 19-го и начале 20-го столетия И. Б. Шпиндлером, Ф. Ф. Врангелем (в 1890–1891 гг.) и Л. В. Антоновым (в 1926 г.) были организованы экспедиционные работы в открытой части моря.

В 1922–1928 гг. под руководством Н. М. Книповича в рамках Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции было проведено изучение Азовского и Черного морей. В отчетах экспедиций, опубликованных Н. М. Книповичем в 1926, 1932, 1938 гг., представлены все первичные данные и описание методов измерений. В 1928–1932 гг. велись регулярные экспедиционные работы Керченской научной рыбохозяйственной станцией, преобразованной в 1928 г. в Азово-Черноморский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (АзЧерНИРО).

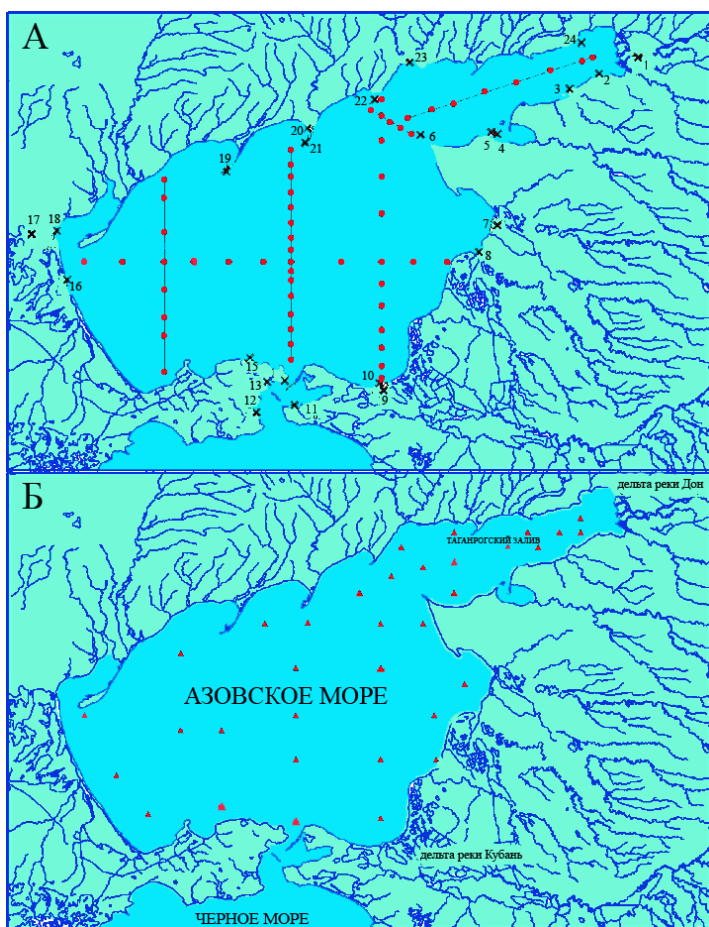
Начиная с 1946 г. АзЧерНИРО возобновил экспедиционные работы, в которых наряду с биологическими и гидрологическими стали проводиться и гидрохимические исследования, включающие измерения концентрации растворенных в морской воде фосфатов, азота, кремния, кислорода и др. Материалы экспедиций опубликованы в морских гидрометеорологических ежегодниках. Начиная с 1961 г. стали выпускаться ежемесячники Гидрометеорологической обсерватории Чёрного и Азовского морей, переименованной в 1965 г. в Бассейновую гидрометеорологическую обсерваторию Чёрного и Азовского морей, которая координировала все экспедиционные работы в Азовском море.

Создание в 1936 г. Государственным управлением гидрометеослужбы СССР сети гидрометеорологических станций и стандартных гидрологических разрезов на Азовском море послужило основой для систематического сбора данных о состоянии морской среды [6–8]. Эти работы выполнялись Государственным океанографическим институтом (ГОИН). К концу 1980-х годов действовало свыше 20 прибрежных станций для получения ежедневной гидрометеорологической информации (рис. 1.1). Для сбора сведений о режиме открытой части моря существовала система из шести гидрологических разрезов, которые обычно выполнялись один раз в сезон. Кроме этого, проводились целевые экспедиционные работы, направленные на решение конкретных задач.

Начиная с 1958 г. проводились регулярные экспедиции, посвященные изучению океанографических и биологических характеристик Азовского моря на станциях, представленных на рис. 1, Б. Наряду с наблюдениями за состоянием рыбных ресурсов, ежегодно велись сезонные исследования физических и биологических процессов в регионе.

Накопленные сведения о состоянии водной среды и биоресурсов Азовского моря послужили основой многочисленных публикаций справочной литературы о климате Азовского моря (Гидрометеорологический справочник Азовского моря, 1962 г. [18]; Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР, 1986 г. [17]; Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991 г. [19]). Все эти работы содержат результаты обобщения полученных данных, но не сами первичные данные. Основным источником цифровых данных для построения климатических карт Азовского моря стал Климатический атлас Азовского моря, включающий свыше 14 тыс. морских и береговых станций [148].

Для изучения современного состояния и пространственно-временных изменений гидрологического, гидрохимического и биологического режимов Черного и Азовского морей в 2000–2002 гг. было проведено несколько комплексных экспедиций «Черное море». Во время этих экспедиций на НИС «Акванавт» выполнено исследование гидрофизических, гидрохимических и биологических процессов северо-восточного сектора Черноморского бассейна [141].



**Рис. 1.1.** Схема гидрологических разрезов и пункты расположения станций береговых наблюдений Гидрометеослужбы СССР (А) 1 – Азов; 2 – Очаковская коса; 3 – Маргаритово; 4 – Ейск порт; 5 – Ейск; 6 – Должанская; 7 – Ясенская переправа; 8 – Приморско-Ахтарск; 9 – Темрюк; 10 – Темрюк; 11 – Тамань; 12 – Заветное; 13 – Керчь; 14 – Опасное; 15 – Мысовое; 16 – Стрелковое; 17 – Чонгарский мост; 18 – Геническ; 19 – Обиточная коса; 20 – Бердянск; 21 – Бердянская коса; 22 – Белосарайская коса; 23 – Мариуполь; 24 – Таганрог. Схема расположения станций АзЧерНИРО (Б) [148]

Значительный объем оперативной информации о состоянии морской и прибрежной экосистем был получен в ходе морских экспедиций на НИС «Профессор Панов» и «Денеб». ЮНЦ РАН за период 2003–2008 гг. провел 48 морских экспедиций, сделав более 3500 океанографических станций (гидрология, гидрохимия), осуществив тотальные планктонные, бентосные съемки на всей акватории Азовского моря и в российском секторе Черного моря [9]. Было проведено ландшафтное районирование Азовского моря: выявлены и классифицированы основные типы ландшафтов, построены ландшафтные карты и карты загрязнения водной среды и грунта, показано развитие и трансформация подводных ландшафтов под влиянием климатических факторов и деятельности человека, выявлены геоморфологические особенности строения и основные формы морского дна, впервые показаны факторы, определяющие развитие подводных оползневых и абразионных процессов в акватории и прибрежной части моря. На основе собственных многолетних исследований были построены карты батиметрии и донных отложений Азовского моря [84–86, 92, 98].

Характеристика экспедиционных исследований ЮНЦ РАН и ИАЗ ЮНЦ РАН в Черном, Азовском и Каспийском морях и полученные в ходе этих исследований научные результаты приводятся в работах Г. Г. Матишова, Ю. И. Инжебейкина, С. В. Бердникова [64–66, 89–96]. В работе [65] дано подробное описание выявленных на северо-восточном шельфе Черного моря береговых захваченных волн, которые могут внести существенный вклад в вариации поверхностной температуры и солености воды, а также течений.

В ходе работ по организации океанографической базы данных в ММБИ и ЮНЦ РАН совместно с Лабораторией климата океана Национального центра океанографических данных *NOAA* (США) был издан Климатический атлас Азовского моря 2006 (*Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006*) [148], который содержит данные по температуре и солености воды, собранные специалистами различных мореведческих организаций в Азовском море и прилегающей к нему части Черного в 1913–2004 гг.

Сейшевые колебания уровня в Азовском море выражены хорошо. Наибольшей величины (55 см) достигают в Таганрогском заливе. Период свободных колебаний, возникающих после действия сгонно-нагонного ветра, равен одним суткам. Летом, когда

над морем устанавливается хорошая антициклоническая погода, свободные колебания уровня моря поддерживаются бризовыми ветрами.

Приливные колебания в этом районе незначительны: значения их амплитуд не превышают нескольких сантиметров. Они полностью затушевываются сгонно-нагонными и сейшевыми колебаниями. Сгонные и нагонные изменения уровня Азовского моря происходят чаще всего осенью и весной при преобладающих здесь восточных, северо-восточных, западных и юго-западных ветрах, совпадающих с направлением наибольшей протяженности моря.

Над Азовским морем и его побережьем иногда носятся ураганы такой силы, что срывают крыши с домов, опрокидывают мелкие постройки, с корнями выворачивают деревья. При одном из ураганов в 1914 г. уровень Азовского моря и лиманов в районе Темрюка поднялся на 3 м выше ординара (от среднего многолетнего уровня). Огромные пространства Приазовской низменности, особенно между Темрюком и Ачуевской косой, подверглись наводнению [16–19]. Штормовые ветры северо-восточного и восточного направлений, наоборот, вызывают сильный сгон воды вдоль восточного побережья моря и нагон вод в Сиваш. Например, в районе Ейска наблюдались случаи, когда дно моря обнажалось на десятки метров от берега, а в 1946 г. зарегистрирован случай отступления моря на 1,5 км [130]. В районе Таганрога вода иногда уходила от берега более чем на 5 км. Разность между максимальными и минимальными уровнями весьма значительна: в Таганроге она достигает максимума (5,5 м) для всего моря. В центральной части моря колебания значительно меньше. Минимума (0,8–1 м) они достигают в районе Керченского пролива. Сгонно-нагонные колебания уровня способствуют также водообмену между Черным и Азовским морями.

Фактические величины сгонно-нагонных колебаний уровня бывают очень значительными, что приводит к возникновению опасных и даже катастрофических последствий [16–19]. Эти колебания могут вызывать изменения очертаний береговой линии: значительные пространства прибрежных районов в результате затопляются или, наоборот, вода отступает.

В табл. 1.1 приведены экстремальные характеристики колебаний уровня по данным береговой сети гидрометеорологических станций [18].

Т а б л и ц а 1.1

**Колебания (см) уровня Азовского моря**

| Пункт                             | Период наблюдений (гг.) | Максимальный уровень | Минимальный уровень | Величина колебаний уровня |
|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|
| Бердянск, порт                    | 1923–2001               | 84                   | –112                | 196                       |
| Геническ, портовый пункт          | 1878–2001               | 225                  | –187                | 412                       |
| Ейск, порт                        | 1915–1998               | 151                  | –287                | 438                       |
| Мариуполь, порт                   | 1923–2001               | 128                  | –121                | 249                       |
| Приморско-Ахтарск, портовый пункт | 1916–1998               | 188                  | –175                | 363                       |
| Таганрог, порт                    | 1882–1998               | 251                  | –358                | 609                       |
| Темрюк, порт                      | 1910–1998               | 316                  | –84                 | 400                       |

Как видно, подъемы уровня более чем на 2 м относительно нулевых отметок возможны на ст. Геническ, Таганрог и Темрюк. В свою очередь падения уровня более чем на 2,5 м имеют место на ст. Таганрог и Ейск. Максимальный размах колебаний на большинстве станций превышает 3 м, на ст. Таганрог – более 6 м. Поскольку сгонно-нагонные изменения уровня имеют вид сейши с одной узловой линией, проходящей примерно через центр моря, то наименьшие амплитуды колебаний наблюдаются вблизи узловой линии на ст. Бердянск, наибольшие – в отдаленных пунктах на ст. Геническ, Ейск, Таганрог.

Течения в Азовском море в основном зависят от ветра. Большая изменчивость течений является следствием неустойчивости ветрового режима, мелководности моря и его сравнительно небольшой площади. Преобладающими ветрами в холодный период года являются ветры северо-восточного и восточного направлений, а в теплый – юго-западного и западного направлений. Если этот ветер продолжается довольно долго и у косы Арабатская Стрелка возникает

нагон воды, в акватории моря формируются две различные системы течений (рис. 1.2).

При слабых и переменных ветрах циркуляция вод нарушается и течения становятся хаотическими. В Керченском проливе течение обычно направлено из Азовского моря в Черное и реже – наоборот. Преобладающая скорость течений в Азовском море (табл. 1.2) 0,1–0,2 м/с, максимальная 0,5–0,8 м/с. В период действия сильных и продолжительных ветров скорость течений достигает 0,9 м/с.

Т а б л и ц а 1.2

**Скорость (м/с) поверхностных течений в центральной части Азовского моря при различных направлениях ветра**

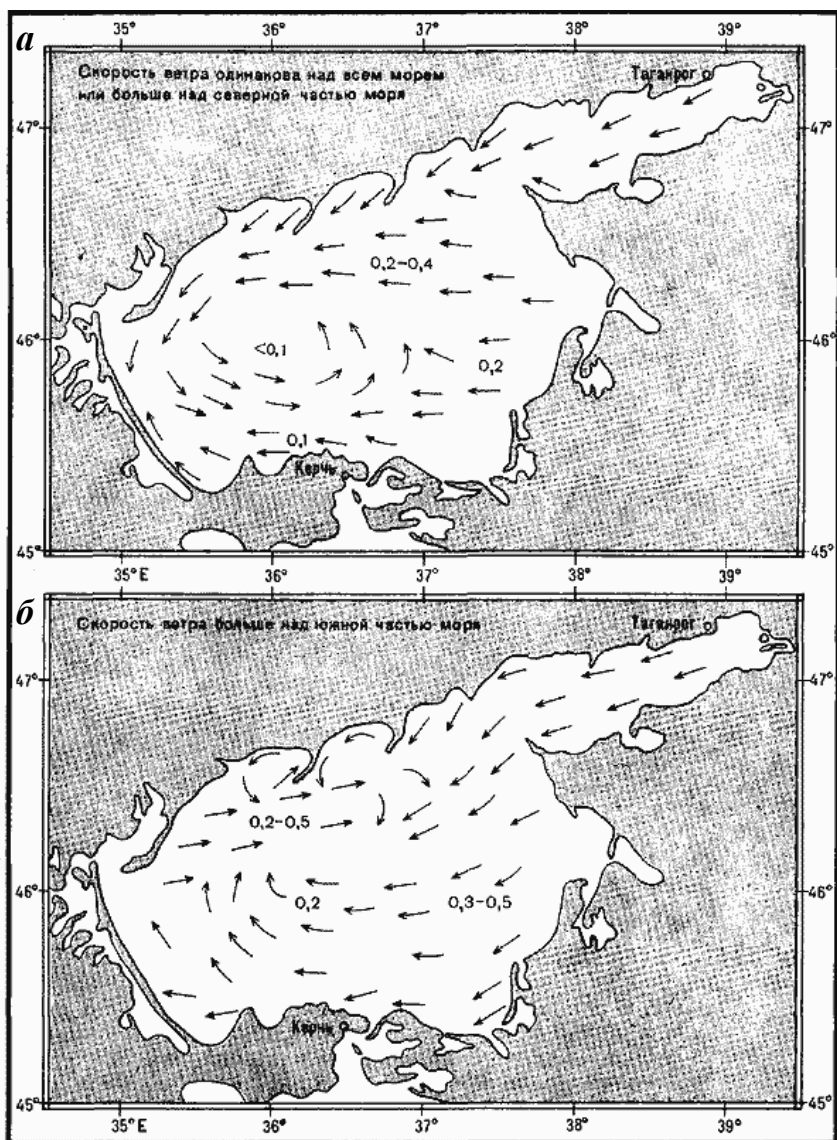
| Скорость ветра, м/с | Скорость течений (м/с) при направлении ветра |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                     | С                                            | С-В | В   | Ю-В | Ю   | Ю-З | З   | С-З | С   | С-В |
| 5–10                | 0,1                                          | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| 10–15               | 0,3                                          | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,5 |
| 15–20               | 0,7                                          | 0,9 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,9 |

В узких местах Керченского пролива при штормовых нагонных ветрах (табл. 1.3) скорость течений увеличивается до 1,4 м/с. При этом повторяемость Азовского и Черноморского течений составляет 62 % и 38 % соответственно [6, 35, 18, 81].

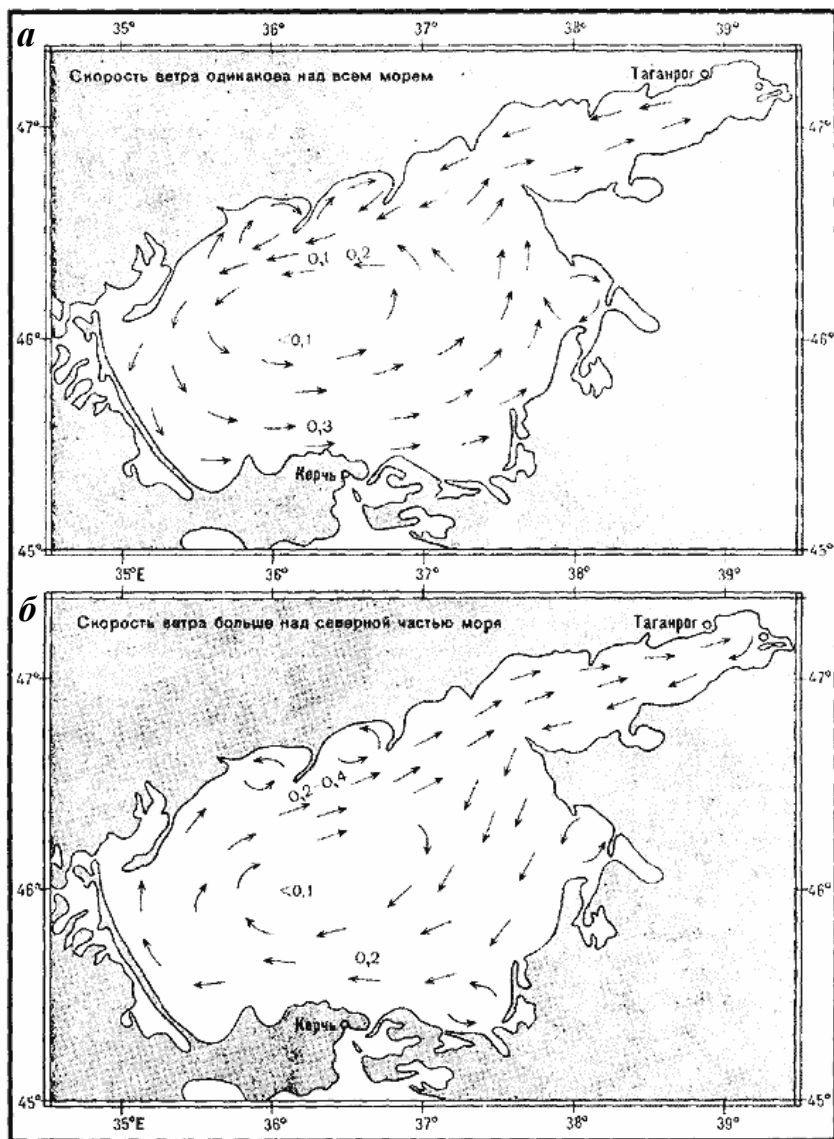
Т а б л и ц а 1.3

**Наибольшая наблюдаемая скорость (м/с) течений на различных участках Керченского пролива**

| Участок            | Скорость (м/с) течений |               |
|--------------------|------------------------|---------------|
|                    | Азовского              | Черноморского |
| Еникальское колено | 1,2                    | 1,4           |
| Павловское колено  | 1,2                    | 1,0           |



**Рис. 1.2.** Схема поверхностных течений (м/с) в Азовском море по данным наблюдений при умеренных северо-восточных (а) и восточных (б) ветрах [81]



**Рис. 1.3.** Схема поверхностных течений (м/с) в Азовском море по данным наблюдений при умеренных юго-западных (а) и западных (б) ветрах [81]

Когда над всем морем скорость северо-восточного ветра одинакова или в северной части моря она больше, чем в южной, то в западной части моря наблюдается циркуляция против часовой стрелки. Если скорость северо-восточного ветра в южной области моря больше, чем в северной, то в северной части циркуляция направлена по часовой стрелке. В начальный период действия умеренного северо-восточного ветра направление течений совпадает с направлением ветра на всей акватории моря.

В центральной части моря наблюдается циркуляция вод против часовой стрелки. Если скорость юго-западного ветра в северной части моря больше, чем в южной, то в его центральной части циркуляция вод происходит по часовой стрелке.

### **§ 1.2. Современные исследования Азовского моря на основании анализа результатов математического моделирования**

На юго-западе территории России находятся два крупных морских бассейна – Черное и Азовское моря. Изучением динамики вод Азово-Черноморского бассейна занимались многие исследователи. Прежде всего на основании данных экспедиционных наблюдений начиная с 1914 г. был накоплен богатый практический материал о Черном и Азовском морях, обобщенный в ряде пособий и атласов, изданных СО ФГБУ «ГОИН» в последние годы.

Значительный объем оперативной информации о состоянии морской и прибрежной экосистем был получен в ходе морских экспедиций ЮНЦ РАН на научно-исследовательских судах «Профессор Панов» и «Денеб». ЮНЦ РАН в 2006–2007 гг. провел 10 морских экспедиций, сделав более 1500 океанографических станций (гидрология, гидрохимия), осуществив тотальные планктонные, бентосные съемки на всей акватории Азовского моря и в российском секторе Черного моря [84–86, 92, 141, 148]. Визуализация результатов проводилась как классическими методами литогеоморфологической интерполяции данных (карта донных отложений), так и с использованием методов геоинформационных технологий (ГИС) (лицензионный пакет программ ArcGis 9.2): карты температуры, солености, распределения планктонных и бентических сообществ, полей загрязнения воды и донных отложений. Интегральные показатели

экологических индексов рассчитывались по работе [98] и визуализировались с помощью ArcGis 9.2.

Необходимость получения оперативных прогнозов экстремальных повышений уровня в связи с ограниченным числом прибрежных гидрометеостанций и наблюдений на них обусловила применение численного моделирования как основного инструмента исследований. В настоящее время в численных расчетах применяются трехмерные нелинейные численные модели, которые более точно воспроизводят циркуляцию вод в морских бассейнах. В основном, эти исследования относятся к бассейну Черного моря (С. Г. Демышев, Г. К. Коротаев, Е. В. Станев, Т. Огуз, К. А. Коротенко, В.Б. Залесный и др. [24–27, 155, 151, 72, 39]). Менее изучена динамическая структура лиманов, бухт и озер, расположенных вдоль побережья Черного и Азовского морей, в частности самого большого залива Сиваш.

Наиболее важной и сложной проблемой гидрологического режима Азовского моря является прогнозирование сгонно-нагонных явлений, возникающих здесь и приводящих нередко к разрушению прибрежной инфраструктуры, затоплению побережья, осушению акваторий портов и судоходных каналов, гибели людей. Особую опасность для прибрежных сооружений, мостовых переходов и ниток трубопроводов штормовые нагоны представляют в зимний сезон, когда нередко сопровождаются дрейфом и навалом льда на берег. Серьезные трудности возникают и при исследовании течений, их изменчивости во времени и пространстве при тех или иных синоптических ситуациях.

Большее количество работ посвящено экспериментальным и теоретическим исследованиям физических процессов в Азовском море. Сгонно-нагонные колебания уровня моря по данным многолетних наблюдений рассматриваются в работах Э. Н. Альтмана, С. Н. Овсиенко, Н. А. Скриптуновой [1, 2, 107, 108, 117]. Прогностическое направление, основанное на установлении эмпирических зависимостей между колебаниями уровня моря и метеорологическими факторами, получило развитие в работах А. А. Аксенова, А. И. Каракаш, О. И. Орадовского, О. И. Шереметевской [3, 68, 109, 140]. В этих работах на основании материалов экспедиций выявлены особенности гидрометеорологического режима Азовского моря и антропогенной нагрузки на него. Исследования в области статистических

методов краткосрочных прогнозов неперiodических колебаний уровня Азовского моря выполнены в работах В. Х. Германа [14, 15]. В этих исследованиях, основанных на результатах как наблюдений, так и эмпирических методов расчета, особое внимание уделяется проблеме водообмена между Черным и Азовским морями.

К немногим опубликованным до настоящего времени работам, рассматривающим вопросы циркуляции вод и течений Азовского моря, относятся справочники, в которых приводятся схемы результирующей циркуляции, характеристики режима течений в отдельных районах. В работах А. М. Бронфмана [8] на основе эмпирических материалов рассматриваются особенности циркуляции вод в Таганрогском заливе при нагонах и сгонах.

Исследования, основанные на результатах численного моделирования динамической структуры Азовского моря, также относительно немногочисленны. Геометрические характеристики мелководных бассейнов обусловили требования к гидродинамическим моделям, в которых используется криволинейная система координат. Большинство существующих моделей, на основании которых анализировались динамические процессы в Азовском море, можно разделить на два класса: двумерные линейные и трехмерные нелинейные модели, основанные на уравнениях мелкой воды [11, 12].

Численному моделированию динамики вод Азовского моря посвящен достаточно давний цикл работ В. П. Белова, Ю. Г. Филиппова и С. Н. Овсиенко [5–7, 118, 119], где впервые на основе линейных двумерных моделей были изучены основные характеристики ветровых течений, сгонно-нагонных процессов для типовых стационарных полей ветра. Моделирование циркуляции нестационарных движений на основе двумерных линейных уравнений теории длинных волн для однородной жидкости проведено в работах С. Н. Овсиенко.

Из недавних публикаций по моделированию циркуляции можно отметить работы, в которых применялись также двумерные линейные модели мелкой воды. В работе А. В. Коновалова [71] с использованием двумерных уравнений мелкой воды анализируется генерация длинноволновых возмущений, вызванных прохождением циклонов над Азовским морем. В рамках теории длинных волн на основании результатов двумерного моделирования в работах Г. Г. Матишова, Ю. И. Инжебейкина [84–97] исследуются

свободные колебания уровня Азовского моря. На основе математического моделирования и данных наблюдений анализируется механизм формирования кратковременных наводнений и экстремальных течений, часто наблюдаемых в отдельных районах побережья Азовского моря, приводящих иногда к человеческим жертвам и материальному ущербу. в работе Ю. И. Инжебейкина [64] выделены районы побережья, в которых может действовать подобный механизм формирования наводнений экстремальных течений. На основании метода конечных элементов в работе А. Е. Букатова в линейном приближении решена задача о сгонно-нагонных колебаниях в Азовском море при воздействии постоянного ветра [9].

Ряд работ В. В. Фомина [121–127] посвящен изучению стационарных течений в Азовском море с использованием трехмерной нелинейной модели динамики течений. В этих работах исследование волн и течений в Азовском море под действием стационарного и однородного по пространству ветра проведено с использованием трехмерной нелинейной сигма-координатной модели.

Из современных публикаций по моделированию циркуляции выделяются численные исследования, проведенные А. Л. Чикиным [131–136], в которых применялись трехмерные нелинейные модели мелкой воды для изучения стационарных движений и переноса примесей [137]. В этих исследованиях получена схема поверхностных и придонных течений и выявлены наиболее характерные особенности циркуляции в зависимости от направления и скорости ветра. С помощью двухслойной математической модели и по материалам ежедневных гидрометеорологических наблюдений на береговой базе Южного научного центра РАН в период с 20 по 26 марта 2013 г. проведено восстановление картины аномального затопления дельты Дона [23].

Экологическое состояние морских бассейнов и их биологическая продуктивность непосредственно связаны с поступлением в морскую среду загрязняющих органических и неорганических веществ. Имеется ряд работ по исследованию эволюции примеси в Азовском море (О. И. Орадовский, А. Л. Чикин). Генератором движения водной среды в них принимается либо постоянный, либо усредненный на определенных промежутках времени ветер.

Новейшие результаты исследований океанологических процессов в Азовском море представлены в цикле работ академика

Г. Г. Матишова [84–99, 148]. В работе представлены закономерности многолетних изменений океанологического режима, обусловленные климатическими воздействиями и антропогенными факторами. Изучены изменения биопродуктивности Азовского моря, дана гидроэкологическая оценка предельно допустимых преобразований стока рек.

Подводя итог, можно говорить о том, что с каждым годом интерес к проблеме прогноза экологического состояния Азовского моря растет. Большинство существующих подходов к обработке данных измерений позволяют выполнять анализ состояния акватории Азовского моря лишь по однонаправленным данным, характеризующим текущее состояние морской среды. Для получения прогнозов и имитации процессов, которые нельзя непосредственно наблюдать, целесообразно проводить численные эксперименты.

### § 1.3. Уравнения модели. Начальные и граничные условия

Введем систему координат, в которой ось  $x$  направлена на восток,  $y$  - на север,  $z$  - вертикально вверх. Для расчета используем нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [129, 142, 143]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1.1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (1.4)$$

Здесь  $u, v, w$  - проекции скорости по осям  $x, y, z$  соответственно;  $t$  - время;  $P(x, y, z, t)$  - давление на глубине  $z$  на основании интегриро-

вания (1.3) по вертикали;  $P(x, y, z, t) = P_{\text{атм}} + g\rho_0(\zeta - z)$ ,  $P_{\text{атм}} = 1013,25$  гПа – стандартное атмосферное давление при температуре  $0^\circ\text{C}$  на широте  $45^\circ$ ;  $\rho$  – плотность воды;  $\rho_0 = \frac{1}{\zeta + H} \int_{-H}^{\zeta} \rho dz$  – средняя плотность воды по глубине;  $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$  – полная производная;  $K_M$  – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости, при параметризации которого применялась дифференциальная модель Меллора – Ямады [149];  $A_M$  – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, вычисляемый по формуле Смагоринского [154].

Соотношения для расчета коэффициентов вертикальной вязкости  $K_M$  и турбулентной диффузии  $K_H$  в соответствии с полуэмпирической моделью [149] имеют вид

$$K_M = qlS_M, \quad K_H = qlS_H. \quad (1.5)$$

Данная параметризация основана на решении двух дополнительных уравнений в частных производных для определения кинетической энергии турбулентности  $q^2/2$  и макромасштаба турбулентности  $l$ :

$$\frac{dq^2}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2 \left[ P_s - \frac{q^3}{B_l l} \right], \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dq^2 l}{dt} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z} \right) + \\ & + lE_1 P_s + lE_1 E_3 \frac{g}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{q^3}{B_1} \left( 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Здесь  $k = 0,4$  – постоянная Кармана;  $L = (\zeta - z)^{-1} + (H - z)^{-1}$ ;  $P_s = qlS_z((u'_z)^2 + (v'_z)^2)$  – скорость генерации турбулентности за счет вертикального сдвига скорости течения;  $S_z = A_2(1 - 6A_1/A_2)/(1 - (3A_2B_2 + 18A_1A_2)G_H)$ ;  $A_1 = 0,92$ ;  $A_2 = 0,74$ ;

$B_1 = 16,6$ ;  $B_2 = 10,1$ ;  $E_1 = 1,33$ ;  $E_2 = 0,025$ ;  $E_3 = 0,08$ ;  $\varepsilon_q = 0,2$  – эмпирические постоянные;  $G_H = -gl^2\rho_0^{-2}q^{-2}\partial\rho/\partial z$ .

Граничные условия для решения уравнений (1.3), (1.4), (1.6), (1.7) имеют вид

$$q^2\Big|_{z=\zeta} = B_1^{2/3}u_0^2, \quad l\Big|_{z=\zeta} = 0, \quad q^2\Big|_{z=-H} = B_1^{2/3}u_b^2, \quad l\Big|_{z=-H} = 0, \quad (1.8)$$

$$w\Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial\zeta}{\partial t} + u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y}, \quad K_M\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right)\Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (1.9)$$

где  $u_0$ ,  $u_b$  – скорости в поверхностном и придонном слоях соответственно;  $\tau_{0x} = C_a^1 W_x |\mathbf{W}|$  и  $\tau_{0y} = C_a^1 W_y |\mathbf{W}|$  – проекции касательных напряжений ветра [8];  $\mathbf{W} = (W_x, W_y)$  – вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря;  $C_a^1$  – эмпирический коэффициент поверхностного трения, рассчитываемый согласно соотношению [147]

$$C_a^1 = \begin{cases} 1,14 \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| \leq 10 \text{ м/с} \\ (0,49 + 0,065W_1)10^{-3}, & |\mathbf{W}| > 10 \text{ м/с} \end{cases}. \quad (1.10)$$

На дне ( $z = -H(x, y)$ ) нормальная составляющая скорости равна нулю, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [8]

$$\left(w + u\frac{\partial H}{\partial x} + v\frac{\partial H}{\partial y}\right)\Big|_{z=-H} = 0, \quad K_M\left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}\right)\Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (1.11)$$

где  $\tau_{1x} = c_b u \sqrt{u^2 + v^2}$ ;  $\tau_{1y} = c_b v \sqrt{u^2 + v^2}$ ;  $c_b$  – коэффициент донного трения, который находится по формуле  $c_b = \max\left[k^2\left(\ln\frac{H+z_b}{z_0}\right)^{-2}; 0,0025\right]$ ;  $z_b$  – первая ближайшая ко дну точка сетки;  $z_0 = 0,003$  м – параметр шероховатости, характеризующий

гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. Значения  $z_0$  в (1.11) определяются с помощью теории Гранта – Мадсена [145], описывающей механизм влияния волн на течения в придонном пограничном слое.

На твердых боковых границах выполняются условия прилипания [129, 142]. В начальный момент времени  $t = 0$  движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$u(x, y, z, t) = v(x, y, z, t) = w(x, y, z, t) = \zeta(x, y, z, t). \quad (1.12)$$

Численная реализация модели и выбор параметров.

В исходных уравнениях (1.1), (1.2), (1.4) в граничных условиях (1.8), (1.9), (1.11) и начальных условиях (1.12) осуществляется переход от координаты  $z$  к  $\sigma$ -координате [119, 128]:

$$x^* = x, y^* = y, t^* = t, \sigma = [z - \zeta]/[H + \zeta], \quad (1.13)$$

где  $\sigma \in [-1; 0]$ .

Проинтегрируем уравнение (1.3) по вертикальной координате и получим формулу для давления  $p = p_a + g\rho(\zeta - z)$ . Обозначим через  $\tilde{H} = H + \zeta$  – динамическую глубину моря в точке  $(x, y)$ , тогда

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{z - \zeta}{H + \zeta} \right) = \frac{1}{H + \zeta} = \frac{1}{\tilde{H}}, \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{z - \zeta}{\tilde{H}} \right) = \frac{1}{\tilde{H}^2} \left( -\tilde{H} \frac{d\zeta}{dx} - (z - \zeta) \frac{d\tilde{H}}{dx} \right) = -\frac{1}{\tilde{H}} \frac{d\zeta}{dx} - \frac{\sigma}{\tilde{H}} \frac{d\tilde{H}}{dx}.$$

Введем функцию  $B(x, y, \sigma, t) = \zeta(x, y, t) + \sigma \tilde{H}(x, y, t)$ , тогда

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = -\frac{1}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} \right) = -\frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial B}{\partial x}, \quad (1.15)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = -\frac{1}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial B}{\partial y}, \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\frac{1}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial t} \right) = -\frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (1.17)$$

Для перехода от декартовой к  $\sigma$ -координатной системе найдем выражение частных производных по новым переменным с учетом (1.14) – (1.17) (звездочки для простоты записи опускаются).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial x}, \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial y}, \quad (1.19)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma}, \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (1.21)$$

Перейдем к новым переменным в уравнении неразрывности (1.4) исходя из (1.18) – (1.21):

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0. \quad (1.22)$$

Найдем выражение вертикальной составляющей скорости в  $\sigma$ -координатах, используя (1.15) – (1.17):

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \sigma}{\partial \tilde{H}} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial t} = \\ &= \frac{1}{\tilde{H}} w - \frac{1}{\tilde{H}} \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right] - \frac{z - \zeta}{\tilde{H}^2} \left[ \frac{\partial \tilde{H}}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right], \end{aligned}$$

откуда

$$w = \tilde{H} \omega + \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right] + \sigma \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial dx} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] \quad (1.23)$$

или

$$w = \tilde{H}\omega + u \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right) + \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sigma \frac{\partial \zeta}{\partial t},$$

$$W = w - \left( u \frac{\partial B}{\partial x} + v \frac{\partial B}{\partial y} \right) - (1 + \sigma) \frac{\partial \zeta}{\partial t}. \quad (1.24)$$

Продифференцируем теперь (1.23) по  $\sigma$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial \sigma} &= \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( W + \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right] + \sigma \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] \right) = \\ &= \frac{\partial W}{\partial \sigma} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] + \\ &+ \sigma \left[ \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] = \frac{\partial W}{\partial \sigma} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial v}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right) + \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] = \frac{\partial W}{\partial \sigma} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial y} + \\ &+ \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right]. \end{aligned}$$

Подставим полученное в выражение (1.22), умноженное на  $\tilde{H} \neq 0$ :

$$\begin{aligned} \tilde{H} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial x} + \tilde{H} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial y} + \\ + \frac{\partial W}{\partial \sigma} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial B}{\partial y} + \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] = 0, \end{aligned}$$

после приведения подобных:

$$\tilde{H} \frac{\partial u}{\partial x} + \tilde{H} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} = 0.$$

Объединяя два первых и два последних слагаемых по формуле производной произведения, окончательно получаем уравнение неразрывности в  $\sigma$ -координатах:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{H}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\tilde{H}v)}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} = 0. \quad (1.25)$$

Прежде чем перейти к новым координатам, в уравнениях движения (1.1), (1.2) преобразуем полные производные. Для этого прибавим к ним ноль, записанный как произведение соответствующих составляющих скорости на уравнение неразрывности (1.4):

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + u \underbrace{\left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)}_0 = \\ &= \frac{du}{dt} + 2u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + w \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial w}{\partial z} = \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + 2u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z},$$

аналогично для уравнения (1.2):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial z}. \quad (1.26)$$

Перейдем теперь в (1.25), (1.26) к новым координатам с учетом (1.18) – (1.21). Упростим вначале последнее слагаемое с использованием соотношения (1.23):

$$\begin{aligned}
uw &= u \left( \tilde{H}\omega + \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right] + \sigma \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] \right) = \\
&= uW + u \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + uv \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sigma u \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right].
\end{aligned}$$

Теперь продифференцируем последнее по  $z$  на основании (1.20):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial uw}{\partial z} &= \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial uw}{\partial \sigma} = \frac{1}{\tilde{H}} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( uW + u \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u^2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + uv \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sigma u \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \right. \right. \\
&+ u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \left. \left. \right] \right) = \frac{1}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial(uW)}{\partial \sigma} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \right. \\
&+ u \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] + \sigma \left[ \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] \left. \right).
\end{aligned}$$

Умножим полученное на  $\tilde{H}$  и подставим в выражение (1.25), также помноженное на  $\tilde{H}$ :

$$\begin{aligned}
\tilde{H} \frac{du}{dt} &= \tilde{H} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) + \tilde{H} \frac{\partial u^2}{\partial x} - \\
&- \frac{\partial u^2}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \tilde{H} \frac{\partial uv}{\partial y} - \frac{\partial uv}{\partial \sigma} \left( \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) + \frac{\partial(Wu)}{\partial \sigma} + \\
&+ \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + u \left[ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] + \\
&+ \sigma \left[ \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right] = \tilde{H} \frac{\partial u}{\partial t} - \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial t} - \\
&- \underline{\underline{\frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \zeta}{\partial t}}} + \tilde{H} \frac{\partial u^2}{\partial x} - \underbrace{\sigma \frac{\partial u^2}{\partial \sigma} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x}}_{\underline{\underline{\frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial(u^2)}{\partial \sigma}}}} + \tilde{H} \frac{\partial(uv)}{\partial y} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{-\sigma \frac{\partial(uv)}{\partial\sigma} \frac{\partial\tilde{H}}{\partial y}}_{\text{}} - \underbrace{\frac{\partial(uv)}{\partial\sigma} \frac{\partial\zeta}{\partial y}}_{\text{}} + \frac{\partial(Wu)}{\partial\sigma} + \underbrace{\frac{\partial u}{\partial\sigma} \frac{\partial\zeta}{\partial t}}_{\text{}} + \underbrace{\frac{\partial(u^2)}{\partial\sigma} \frac{\partial\zeta}{\partial x}}_{\text{}} + \\
& \underbrace{+ \frac{\partial(uv)}{\partial\sigma} \frac{\partial\zeta}{\partial y}}_{\text{}} + \underbrace{u \frac{\partial\zeta}{\partial t}}_{\text{}} + \underbrace{u^2 \frac{\partial\tilde{H}}{\partial x}}_{\text{}} + \underbrace{uv \frac{\partial\tilde{H}}{\partial y}}_{\text{}} + \underbrace{\sigma \frac{\partial u}{\partial\sigma} \frac{\partial\zeta}{\partial t}}_{\text{}} + \underbrace{\sigma \frac{\partial u^2}{\partial\sigma} \frac{\partial\tilde{H}}{\partial x}}_{\text{}} + \\
& + \sigma \frac{\partial(uv)}{\partial\sigma} \frac{\partial\tilde{H}}{\partial y} = \underbrace{\tilde{H} \frac{\partial u}{\partial t}}_{\text{}} + \underbrace{\tilde{H} \frac{\partial(u^2)}{\partial x}}_{\text{}} + \underbrace{\tilde{H} \frac{\partial(uv)}{\partial y}}_{\text{}} + \frac{\partial(Wu)}{\partial\sigma} + \underbrace{u \frac{\partial\zeta}{\partial t}}_{\text{}} + \\
& + \underbrace{u^2 \frac{\partial\tilde{H}}{\partial x}}_{\text{}} + \underbrace{uv \frac{\partial\tilde{H}}{\partial y}}_{\text{}} = \frac{\partial(u\tilde{H})}{\partial t} + \frac{\partial(u^2\tilde{H})}{\partial x} + \frac{\partial(uv\tilde{H})}{\partial y} + \frac{\partial(Wu)}{\partial\sigma}.
\end{aligned}$$

Аналогично для (1.26):  $\tilde{H} \frac{dv}{dt} = \frac{\partial(v\tilde{H})}{\partial t} + \frac{\partial(v^2\tilde{H})}{\partial y} + \frac{\partial(uv\tilde{H})}{\partial x} + \frac{\partial(Wuv)}{\partial\sigma}.$

Перейдем к новым координатам в левой части уравнений движения. Для компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса имеем:

$$\begin{aligned}
\tau_{11} &= 2A_M \frac{\partial u}{\partial x} = 2A_M \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial\zeta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial\tilde{H}}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial\sigma} \right) = \\
&= \frac{2A_M}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial(u\tilde{H})}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial\sigma} \left[ u \left( \frac{\partial\zeta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial\tilde{H}}{\partial x} \right) \right] \right), \\
\tau_{22} &= \frac{2A_M}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial(v\tilde{H})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial\sigma} \left[ v \left( \frac{\partial\zeta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial\tilde{H}}{\partial y} \right) \right] \right),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{12} = \tau_{21} = A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{A_M}{\tilde{H}} \left( \frac{\partial(u\tilde{H})}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ u \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial y} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{\partial(v\tilde{H})}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ v \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x} \right) \right] \right).\end{aligned}$$

Тогда вид уравнений (1.1), (1.2) в новых координатах [8] на основании (1.18) – (1.26) следующий:

$$\frac{\partial u \tilde{H}}{\partial t} + Au - fv \tilde{H} + g \tilde{H} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tilde{H}}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M}{\tilde{H}} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \tilde{H} F_x, \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial v \tilde{H}}{\partial t} + Av + fu \tilde{H} + g \tilde{H} \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tilde{H}}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M}{\tilde{H}} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \tilde{H} F_y, \quad (1.28)$$

Здесь  $u, v, W$  – компоненты скорости по осям  $x, y, \sigma$  соответственно;  $\tilde{H} F_x, \tilde{H} F_y$  – слагаемые, параметризующие горизонтальную турбулентную вязкость;  $A\Phi$  – оператор переноса, который раскрывается так:  $A\Phi = \frac{\partial(u\tilde{H}\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tilde{H}\Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(W\Phi)}{\partial \sigma}$ . Слагаемые  $F_x,$

$F_y$ , параметризующие горизонтальную турбулентную вязкость и диффузию, имеют вид [8]

$$\tilde{H} F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M \tilde{H} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \tilde{H} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \quad (1.29)$$

$$\tilde{H} F_y = \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \tilde{H} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M \tilde{H} \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (1.30)$$

Предполагается, что  $A_M$  зависит от горизонтальных градиентов скорости [84]:

$$A_M = \frac{\delta}{2} C_M A^{1/2}, \quad A = \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2, \quad (1.31)$$

где  $C_M$  и  $\delta$  – некоторые константы.

Система уравнений (1.25) - (1.27) решается при следующих граничных условиях по вертикальной координате:

$$\omega|_{\sigma=0} = 0, \quad \frac{K_M}{H} \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{1}{\rho} (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (1.32)$$

$$\omega|_{\sigma=-1} = 0, \quad \frac{K_M}{H} \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{1}{\rho} (\tau_{1x}, \tau_{1y}). \quad (1.33)$$

Для повышения эффективности численных расчетов преобразованные уравнения (1.25), (1.27), (1.28) представляются в виде двух систем. Первая система уравнений описывает баротропную компоненту решения (осредненные по глубине горизонтальные компоненты скорости течений  $(\bar{u}, \bar{v})$  и уровень  $\zeta$ ), вторая – отклонения горизонтальных компонент скорости  $(u', v')$  от соответствующих осредненных компонент и вертикальную скорость  $w$ .

Следовательно, горизонтальная скорость  $U = (u, v)$  представляется в виде суммы, не зависящей от глубины компоненты  $\bar{U}$  (баротропной составляющей) и  $U'$  (бароклинной составляющей):

$$U = \tilde{U}(x, y, t) + U'(x, y, \sigma, t). \quad (1.34)$$

Здесь и ниже черта над функцией обозначает интегрирование по  $\sigma$  в пределах от  $-1$  до  $0$ . Интегрирование (1.25), (1.27), (1.28) по вертикали с использованием граничных условий (1.32), (1.33) дает задачу теории мелкой воды для определения баротропных компонент скорости и уровня моря:

$$\frac{\partial \bar{u}\tilde{H}}{\partial t} + \overline{Au} - \bar{f}\tilde{v}\tilde{H} + g\tilde{H}\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tilde{H}}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial x} = \frac{1}{\rho}(\tau_{0x} - \tau_{1x}) + \tilde{H}\bar{F}_x, \quad (1.35)$$

$$\frac{\partial \bar{v}\tilde{H}}{\partial t} + \overline{Av} + \bar{f}\tilde{u}\tilde{H} + g\tilde{H}\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tilde{H}}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial y} = \frac{1}{\rho}(\tau_{0y} - \tau_{1y}) + \tilde{H}\bar{F}_y, \quad (1.36)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\tilde{H}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\tilde{H}}{\partial y} = 0, \quad (1.37)$$

где  $\overline{A\Phi} = \frac{\partial(\bar{u}\Phi\tilde{H})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\Phi\tilde{H})}{\partial y}$ ;

$$\tilde{H}\bar{F}_x = \frac{\partial}{\partial x}\left(2\bar{A}_m\tilde{H}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\bar{A}_m\tilde{H}\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right)\right];$$

$$\tilde{H}\bar{F}_y = \frac{\partial}{\partial x}\left(2\bar{A}_m\tilde{H}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\bar{A}_m\tilde{H}\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right)\right].$$

Уравнения для бароклинических компонент скорости находятся вычитанием (1.35) из (1.27) и (1.36) из (1.28):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u'\tilde{H}}{\partial t} + Au' - A\bar{u} - \bar{f}v'\tilde{H} = \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_M}{\tilde{H}}\frac{\partial u'}{\partial \sigma}\right) - \frac{1}{\rho}(\tau_{0x} - \tau_{1x}) + \tilde{H}(F_x - \bar{F}_x), \end{aligned} \quad (1.38)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v'\tilde{H}}{\partial t} + Av' - A\bar{v} + \bar{f}u'\tilde{H} = \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_M}{\tilde{H}}\frac{\partial v'}{\partial \sigma}\right) - \frac{1}{\rho}(\tau_{0y} - \tau_{1y}) + \tilde{H}(F_y - \bar{F}_y), \end{aligned} \quad (1.39)$$

$$\frac{\partial u'\tilde{H}}{\partial x} + \frac{\partial v'\tilde{H}}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} = 0, \quad (1.40)$$

с граничными условиями

$$\omega|_{\sigma=0} = 0$$

$$\frac{K_M}{H} \left( \frac{\partial u'}{\partial \sigma}, \frac{\partial v'}{\partial \sigma} \right) \Big|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho} (\tau_{0x}, \tau_{0y}) - \frac{K_M}{H} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma}, \frac{\partial \bar{v}}{\partial \sigma} \right) \Big|_{\sigma=0}, \quad (1.41)$$

$$\omega|_{\sigma=-1} = 0,$$

$$\frac{K_M}{H} \left( \frac{\partial u'}{\partial \sigma}, \frac{\partial v'}{\partial \sigma} \right) \Big|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho} (\tau_{1x}, \tau_{1y}) - \frac{K_M}{H} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma}, \frac{\partial \bar{v}}{\partial \sigma} \right) \Big|_{\sigma=-1}. \quad (1.42)$$

Задачи (1.35) – (1.37) и (1.38) – (1.40) аппроксимируются явными схемами. Причем в баротропной задаче используется малый шаг  $\Delta t_A = \Delta t/n$ , где целое число  $n$  выбирается в соответствии с критерием устойчивости Куранта для поверхностных волн.

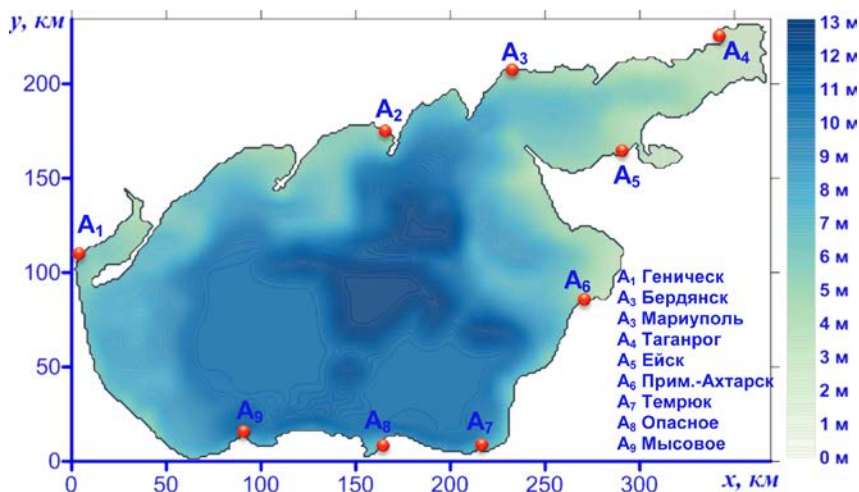
Вначале на интервале времени  $\Delta t_A$  решается система (1.35) – (1.37). Далее на том же интервале времени с шагом  $\Delta t$  решаются уравнения (1.38) – (1.39). Правые их части считаются известными, они аппроксимируются по времени неявной схемой и решаются методом прогонки. После их решения вычисляется вертикальная скорость из (1.40) и компоненты горизонтальной скорости по соотношению (1.34).

Операторы переноса  $A$  аппроксимируются с помощью TVD-схемы (*Total Variation Diminishing*) [85, 86] (линейная комбинация схемы направленных разностей и схемы Лакса – Вендроффа), пространственная дискретизация уравнений выполняется на  $C$ -сетке [82, 83]. Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и по  $\sigma$ -координате.

Характеристики расчетной области. Пространственное разрешение модели по широте и долготе составило  $(1/59)^\circ \times (1/84)^\circ$ , при котором линейные размеры ячейки сетки не превышают  $\Delta x = \Delta y = 1,4$  км. При этом количество узлов горизонтальной сетки  $276 \times 176$ . Количество расчетных уровней  $\sigma_m$  по вертикали равно 11. Уравнения интегрировались с шагом  $\Delta t = 18$  с для определения осредненных двумерных компонент

скорости и уровня моря и  $\Delta t_A = 10\Delta t = 3$  мин – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости.

Модельный рельеф дна Азовского моря представлен на рис. 1.4. Глубина моря в узлах расчетной сетки получена в результате интерполяции данных, снятых с навигационных карт. Отклонения свободной поверхности отмечаются на береговых станциях Азовского моря, расположенных в крупных населенных пунктах (рис. 1.4):  $A_1$  – Геническ,  $A_2$  – Бердянск,  $A_3$  – Мариуполь,  $A_4$  – Таганрог,  $A_5$  – Ейск,  $A_6$  – Приморско-Ахтарск,  $A_7$  – Темрюк,  $A_8$  – Опасное,  $A_9$  – Мысовое.



**Рис. 1.4.** Рельеф дна (м) Азовского моря и положение прибрежных станций

## Глава 2

### **Динамические процессы и трансформация поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений и переменного ветра**

Азовское море отличается сравнительно небольшими размерами и малыми глубинами. Площадь его акватории 38 000 км<sup>2</sup>, наибольшая глубина 14 м, средняя – 8,5 м. Вследствие мелководности Азовского моря его динамика в значительной степени определяется синоптическими ситуациями, приводящими к сильным устойчивым ветрам, которые в свою очередь вызывают значительные подъемы и спады уровня моря. При этом влияние градиентов плотности морской воды заметно лишь в непосредственной близости устьевых областей Дона и Кубани в периоды паводков [6, 17, 18, 98, 148]. Преобладающим типом волнения является ветровое, причем оно быстро развивается и также быстро прекращается после уменьшения скорости ветра [5, 17, 107]. Основные течения в море также развиваются в прямой зависимости от действующего ветра, а течения, обусловленные поступлением речных вод, малы по сравнению с ветровыми [6, 17 – 19].

Азовское море относится к числу наиболее изученных. Здесь имеется сеть морских береговых станций и постов, проводятся стандартные и специализированные экспедиционные исследования. Численный анализ ветровых течений в Керченском проливе с помощью уравнений мелкой воды для верхнего слоя и трехмерных уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости в нижнем слое, с использованием математической модели и по натурным данным проведен в [135].

Исследования научного и прикладного характера требуют применения современных трехмерных численных моделей. Они учитывают атмосферные воздействия, рельеф дна, конфигурацию береговой линии. Для численного моделирования динамических процессов в Азовском море применяется трехмерная нелинейная  $\sigma$ -координатная модель [121, 142], которая основывается на нелинейных уравнениях движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики. В ней при построении

численного алгоритма используется криволинейная система координат [20, 121, 142].

В данной главе исследованы течения и сгонно-нагонные процессы в Азовском море, вызываемые действием нестационарного и постоянного ветра. Выполнен анализ рассчитанных полей скорости и уровня Азовского моря с учетом и без учета нелинейных слагаемых в уравнениях движения. С использованием трехмерной нелинейной численной модели изучены экстремальные отклонения уровня, поверхностные и глубинные течения в зависимости от направления и скорости ветра, дана оценка учета водообмена с Черным морем.

## **§ 2.1. Сгоны и нагоны, возникающие под действием ветра и стационарных течений**

Сгонно-нагонные процессы и ветровые течения в Азовском море являются одним из основных факторов, влияющих на безопасность и эффективность эксплуатации морского транспорта и прибрежной инфраструктуры. Анализ влияния гидрометеорологических ситуаций на динамику вод в этом районе требует специальных комплексных исследований. Прогноз отклонений уровня на береговых станциях, вызываемых действием ветра, имеет важное прикладное значение для оценки экологических последствий в районах, расположенных на побережье Азовского моря.

### **2.1.1. Исследование динамических процессов, генерируемых действием переменного ветра при отсутствии стационарных течений**

При расчете полей пространственного распределения уровня моря и скорости течений использовались типовые поля ветра с параметрами, выбранными на основе анализа синоптических карт [17, 18, 105]. На периферии проходящих над Азовским морем циклонов над акваторией моря возникают переменные неоднородные по пространству штормовые ветры, действующие с запада на восток [62, 65, 114]. Как известно [98, 148], продолжительность таких стабильных ветровых ситуаций в Азовском море в зависимости от сезона обычно составляет 12–28 ч.

Численные эксперименты проводились для переменного по времени и однородного по пространству западного ветра,

скорость которого изменялась по следующему сценарию. В начальный момент времени  $t = 0$  вода находится в состоянии покоя, уровень горизонтален, а скорость ветра нулевая. При  $t > 0$  на водную поверхность начинает действовать ветер заданного направления, который со временем усиливается по линейному закону. Через 3 ч скорость ветра в каждой точке акватории достигает своего наибольшего значения и в течение  $T_{1,2,3}$  (ч) не изменяется со временем. В следующие 3 ч она убывает до нуля и далее не меняется.

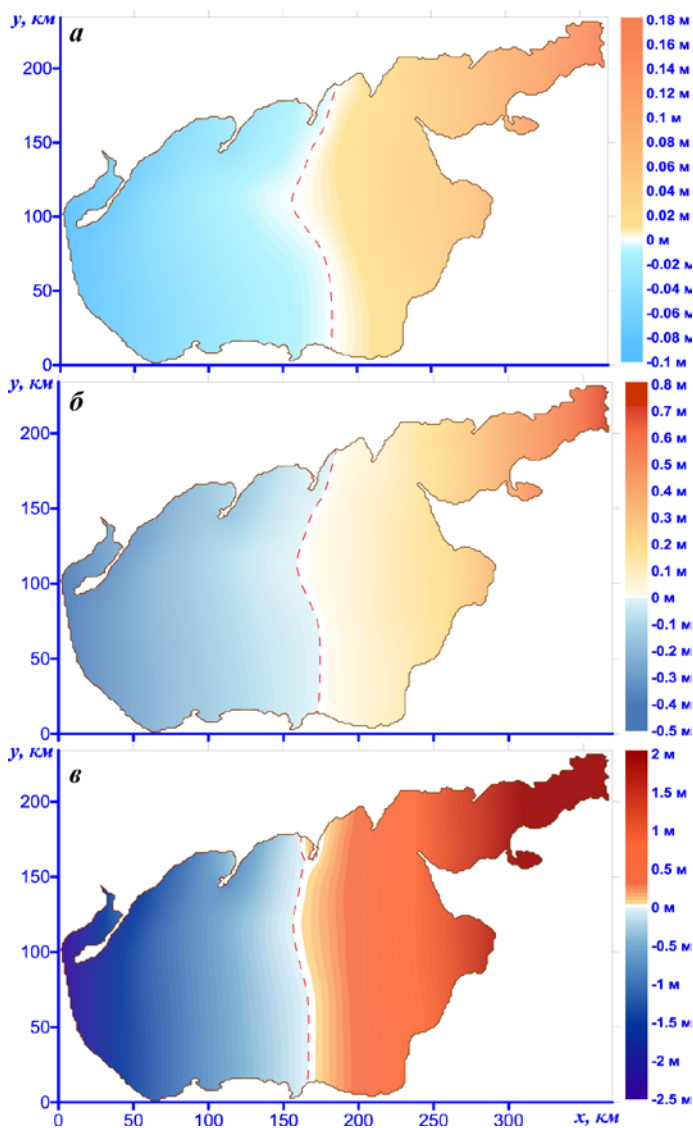
Западный ветер направлен вдоль оси  $x$ . Вдоль оси  $y$  его нет, поэтому составляющая скорости  $W_y$  равна нулю. Изменение по времени составляющей скорости ветра  $W_x = W_{\text{var}}$  задается следующим соотношением:

$$W_{\text{var}}(t)_j = \begin{cases} at, & 0 \leq t < t_1 \\ at_1, & t_1 \leq t < t_{2j} \\ at_1 - a(t - t_{2j}), & t_{2j} \leq t < t_{3j} \\ 0, & t_{3j} \leq t < t_{4j} \end{cases}, \quad (2.1)$$

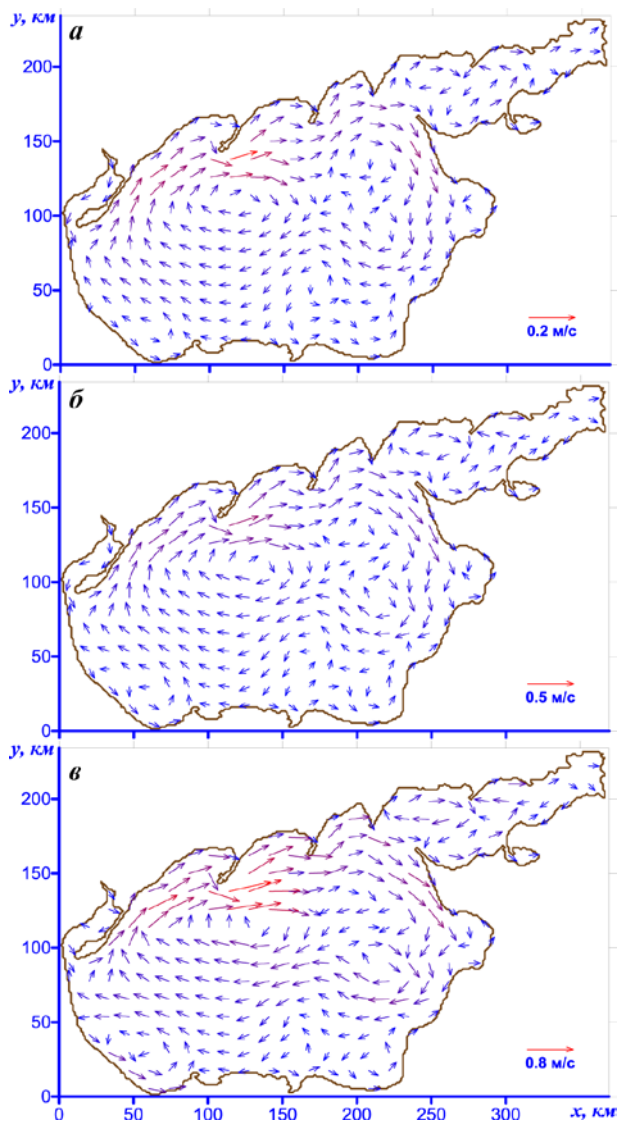
где  $at_1 = \mathbf{W}$  – соответствует наибольшему значению скорости ветра в течение всего времени его действия;  $t_1 = 3$  ч;  $t_{2j} = t_1 + T_j$ ;  $t_{3j} = t_1 + t_{2j}$ ;  $t_{4j} = t_{3j} + 36$  ч;  $j = 1, 2, 3$ . Численные эксперименты проведены при различных значениях скорости ветра  $\mathbf{W}$ , равных 5; 10; 15 м/с, и для различных промежутков времени его действия  $T_1 = 6$  ч,  $T_2 = 12$  ч,  $T_3 = 18$  ч.

Анализ результатов моделирования. В серии численных экспериментов оценим влияние скорости переменного по времени ветра на сгоны и нагоны, формируемые на береговых станциях Азовского моря. Пусть период постоянного действия ветра 12 ч, а значения его скорости в различных экспериментах составляют 5; 10; 15 и 20 м/с.

Поля уровня моря и скорости течений, полученные в результате расчетов для указанных скоростей ветра, приведены на рис. 2.1 и 2.2.



**Рис. 2.1.** Уровень Азовского моря (м) при западном ветре постоянного действия в течение 12 ч при различных значениях скорости: 5 м/с (*a*), 10 м/с (*б*), 20 м/с (*в*)



**Рис. 2.2.** Поля скорости течений в поверхностном слое Азовского моря, вызванных постоянным западным полусуточным ветром при различных значениях его скорости: 5 м/с (*а*), 10 м/с (*б*), 20 м/с (*в*)

Рисунки соответствуют моменту времени 15 ч, который состоит из времени нарастания скорости до максимума (3 ч) и периода постоянного действия ветра (12 ч). Как показывает анализ приведенных полей при различных максимумах скорости, понижения уровня, обусловленные западным ветром, возникают вдоль западного побережья (сгоны). У восточного берега происходит постепенное повышение уровня (нагоны). Узловая линия показана штриховой. Она пересекает центральную часть моря и ориентирована почти перпендикулярно направлению ветра. С увеличением максимального значения скорости ветра величина сгонов и нагонов возрастает на всем побережье Азовского моря.

Проанализируем особенности пространственного распределения полей скорости (рис. 2.2). Через 15 ч после начала действия ветра при различных значениях его максимальной скорости и одинаковом периоде общий характер течений, генерируемых ветром, одинаков. Видно, что при западном ветре вдоль северного берега моря формируются два круговорота одного знака. Южнее этих круговоротов – относительно широкая полоса переноса водных масс, ориентированная противоположно ветру.

В табл. 2.1 приведены расчетные значения максимумов нагонов  $\zeta_i$  ( $i = 1 \div 9$ ) и время их достижения ( $t = t_{\max}$ ) на девяти береговых станциях Азовского моря для трех значений наибольшей скорости ветра и периода его постоянного действия 12 ч. Из анализа данных, приведенных в табл. 2.1, следует, что ветер западного направления генерирует на станциях  $A_1 - A_9$  нагоны, величина которых зависит от его скорости. Наибольшие нагоны для ветра со скоростью 5; 10 и 15 м/с отмечаются на одной и той же ст.  $A_4$  (Таганрог) и составляют 0,17; 0,6 и 1,41 м соответственно. При увеличении скорости в два и три раза максимум нагонов возрастает в 3,5 и 8,3 раза.

На ст.  $A_4$  максимальный нагон при  $\mathbf{W}^1 = 5$  м/с имеет место в 17,5 ч, при  $\mathbf{W}^2 = 10$  м/с – в 17,2 ч, при  $\mathbf{W}^3 = 15$  м/с – в 16,8 ч. Характерно, что появление экстремальных значений нагонов отмечается в сравнительно близкие моменты времени, которые с увеличением скорости уменьшаются на 14 %. Наименьшие нагоны при указанных значениях скорости ветра имеют место на ст.  $A_9$ : 0,02 м ( $t_{\max} = 26,7$  ч); 0,08 м ( $t_{\max} = 26,8$  ч) и 0,17 м ( $t_{\max} = 26,9$  ч). Отсюда следует, что с ростом скорости в два и три раза наименьшие

значения нагонов увеличиваются в 4 и 8,5 раза, при этом время их достижения существенно не меняется (0,3 %).

Т а б л и ц а 2.1

**Максимальные значения нагонов ( $\zeta_i$ , м) ( $i = 1 \div 9$ ) и соответствующие им моменты времени ( $t_{\max}$ , ч) для постоянно-го западного полусуточного ветра в зависимости от его скорости**

| Скорость<br>ветра,<br>(м/с) | $\zeta_1$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_2$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_3$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_4$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_5$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_6$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_7$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_8$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_9$ ;<br>$t_{\max}$ |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 5                           | 0,03;<br>26,2             | 0,02;<br>20,3             | 0,08;<br>14,8             | 0,17;<br>17,5             | 0,11;<br>16,0             | 0,09;<br>10,5             | 0,05;<br>7,2              | 0,03;<br>6,4              | 0,02;<br>26,7             |
| 10                          | 0,10;<br>26,4             | 0,10;<br>20,4             | 0,29;<br>15,1             | 0,60;<br>17,2             | 0,38;<br>16,2             | 0,34;<br>10,6             | 0,21;<br>7,3              | 0,12;<br>6,5              | 0,08;<br>26,8             |
| 15                          | 0,22;<br>26,6             | 0,26;<br>20,5             | 0,70;<br>15,4             | 1,41;<br>16,8             | 0,91;<br>16,3             | 0,91;<br>10,7             | 0,56;<br>7,4              | 0,3;<br>26,6              | 0,17;<br>26,9             |

В табл. 2.2 приведены расчетные значения максимумов сгонов  $\zeta_i$  ( $i = 1 \div 9$ ) и время их достижения ( $t = t_{\max}$ ) на береговых станциях Азовского моря для трех значений наибольшей скорости ветра и периода его постоянного действия 12 ч. Отсюда видно, что наибольшие сгоны формируются для всех рассматриваемых значений скорости ветра на ст. А<sub>1</sub> и составляют для скоростей 5; 10 и 15 м/с: 0,1 м ( $t_{\max} = 12,9$  ч); 0,39 м ( $t_{\max} = 13,2$  ч) и 1,04 м ( $t_{\max} = 13,9$  ч), т. е. возрастают в 3,9 и 10 раз соответственно. Периоды времени достижения наибольших сгонов от  $t = 0$  до  $t = t_{\max}$  становятся дольше для бóльших скоростей ветра в 2,3 и 7,5 раза.

Наименьший сгон 0,04 м при максимальной скорости ветра 5 м/с формируется на станциях А<sub>3</sub> ( $t_{\max} = 28,9$  ч), А<sub>7</sub> ( $t_{\max} = 20,6$  ч) и А<sub>8</sub> ( $t_{\max} = 19,8$  ч). При  $W^2 = 10$  м/с минимальный сгон (0,1 м) имеет место в А<sub>3</sub> ( $t_{\max} = 29,1$  ч), при  $U_0 = 15$  м/с наименьший сгон (0,12 м) отмечается в А<sub>5</sub> ( $t_{\max} = 31,4$  ч). Следовательно, величина минимальных сгонов увеличивается в 2,5 и 3 раза с ростом скорости ветра в два и три раза. Период времени достижения этих сгонов увеличивается незначительно (до 8 %). Таким образом, ветер,

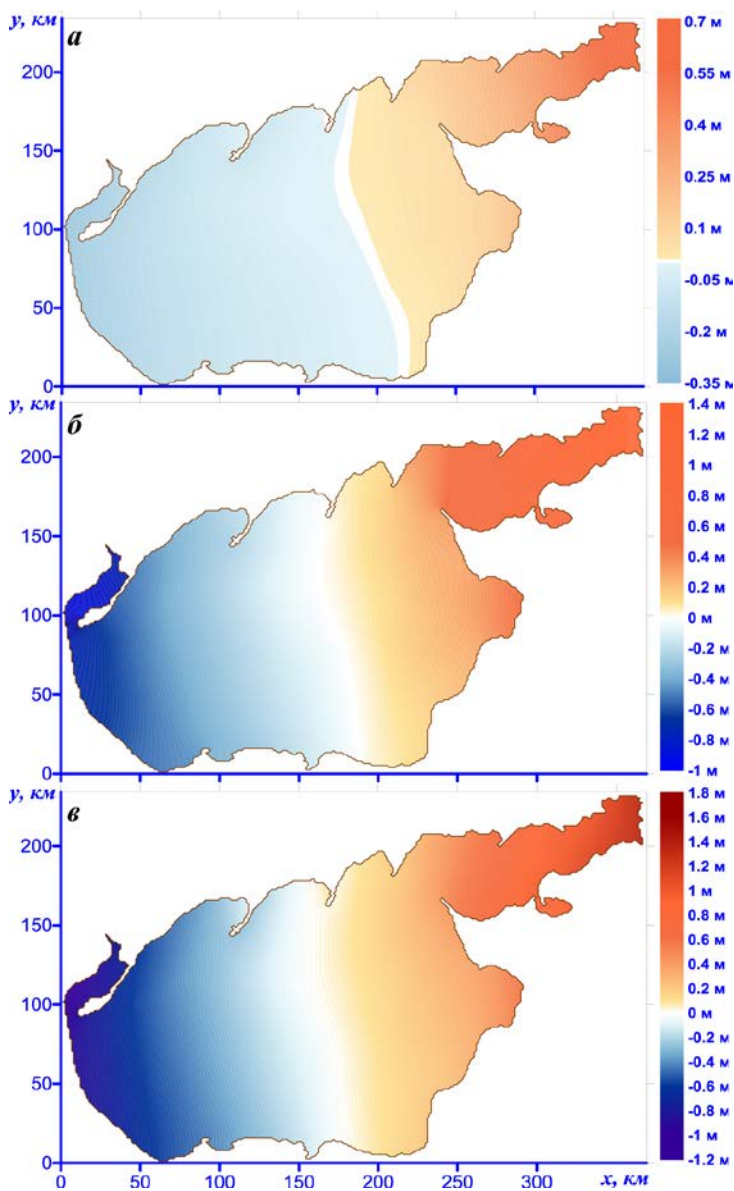
действующий постоянно в течение 12 ч с большей скоростью, формирует большие нагоны и сгоны на всех береговых станциях. Период времени, за который происходит формирование экстремальных значений уровня, существенно не меняется с увеличением скорости ветра.

Т а б л и ц а 2.2

**Максимальные значения сгонов ( $\zeta_i$ , м) ( $i = 1 \div 9$ ) и соответствующие им моменты времени ( $t_{\max}$ , ч) для постоянно-го западного полусуточного ветра в зависимости от его скорости**

| Скорость<br>ветра,<br>(м/с) | $\zeta_1$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_2$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_3$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_4$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_5$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_6$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_7$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_8$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_9$ ;<br>$t_{\max}$ |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 5                           | 0,10;<br>12,9             | 0,03;<br>6,9              | 0,04;<br>28,9             | 0,09;<br>32,4             | 0,05;<br>29,9             | 0,05;<br>21,9             | 0,04;<br>20,6             | 0,04;<br>19,8             | 0,05;<br>12,7             |
| 10                          | 0,39;<br>13,2             | 0,13;<br>7,0              | 0,10;<br>29,1             | 0,20;<br>33,7             | 0,11;<br>30,4             | 0,16;<br>22,3             | 0,17;<br>20,8             | 0,15;<br>20,0             | 0,20;<br>12,8             |
| 15                          | 1,04;<br>13,9             | 0,36;<br>7,1              | 0,13;<br>29,7             | 0,25;<br>35,2             | 0,12;<br>31,4             | 0,40;<br>23,6             | 0,45;<br>20,9             | 0,41;<br>20,1             | 0,52;<br>13,0             |

Серию численных экспериментов проведем для ветров, дующих над Азовским морем с запада на восток и имеющих одинаковые скорости, но различное время постоянного действия. Пусть  $W^2 = 10$  м/с, а периоды  $T_{1,2,3}$  составляют 6, 12 и 18 ч. Поля уровня свободной поверхности с интервалом 0,1 м приведены на рис. 2.3. Анализ результатов расчетов показывает, что при усилении ветра происходит постепенное повышение уровня у восточных берегов (нагон) и понижение – у западных (сгон). Вначале волны распространяются по направлению ветра (рис. 2.3, а). В Таганрогском заливе при западном ветре происходит наибольшее по всей акватории повышение уровня до 0,4 м (рис. 2.3, б, в).



**Рис. 2.3.** Уровень Азовского моря (м) при западном ветре скоростью 10 м/с и длительностью: 6 ч (*a*), 12 ч (*б*), 18 ч (*в*)

Кривая нулевых амплитуд (показана на рисунках штриховой линией) пересекает центральную часть моря и ориентирована почти перпендикулярно направлению ветра.

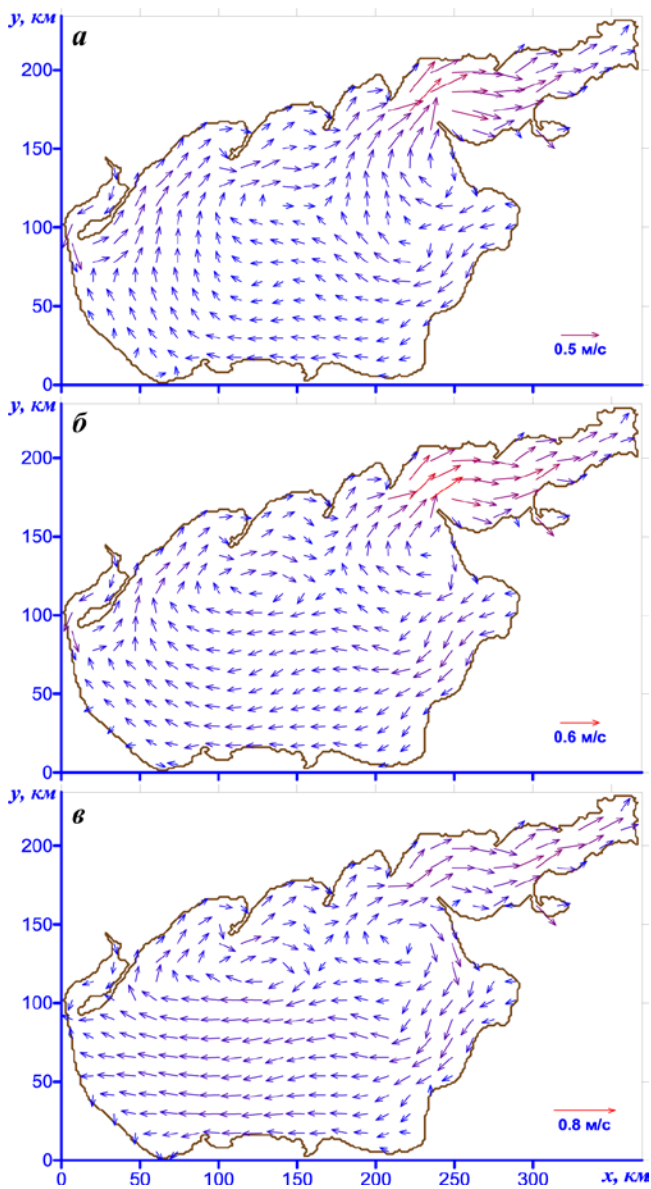
На рис. 2.4 представлены пространственные распределения величины и направления скорости течений, вызванных на поверхности моря западным ветром наибольшей скоростью 10 м/с в моменты времени  $t = t_1 + T_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ). Видно (рис. 2.4, а), что через 9 ч после начала действия ветра небольшие отклонения от его направления имеют место в районах мысов и заливов. Спустя 15 ч (рис. 2.5, б) у северного побережья возникает пара вихрей одинакового знака. Вдоль противоположных границ моря течения направлены против ветра. Через 21 ч (рис. 2.5, в) циркуляция характеризуется наличием трех круговоротов: антициклонического (в северной части моря) и двух циклонических (у южного берега). Вдоль границ, разделяющих основные круговороты, формируются полосы, в которых течения направлены против ветра.

Максимальные значения нагонов  $\zeta_i$  ( $i = 1 \div 9$ ) и соответствующие им моменты времени, в зависимости от периода постоянного действия ветра на станциях  $A_1 - A_9$ , приведены в табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2.3

**Максимальные значения сгонов ( $\zeta_i$ , м) ( $i = 1 \div 9$ )  
и соответствующие им моменты времени ( $t_{\max}$ , ч)  
для западного ветра, действующего со скоростью 10 м/с,  
в зависимости от его длительности**

| $T_j$ , ч | $\zeta_1$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_2$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_3$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_4$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_5$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_6$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_7$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_8$ ;<br>$t_{\max}$ | $\zeta_9$ ;<br>$t_{\max}$ |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 6         | 0,31;<br>10,1             | 0,13;<br>7,0              | 0,09;<br>24,3             | 0,21;<br>29,1             | 0,10;<br>25,8             | 0,19;<br>18,4             | 0,2;<br>15,7              | 0,18;<br>14,6             | 0,24;<br>12,5             |
| 12        | 0,39;<br>13,2             | 0,13;<br>7,1              | 0,10;<br>29,1             | 0,20;<br>33,7             | 0,11;<br>30,4             | 0,16;<br>22,3             | 0,17;<br>20,8             | 0,15;<br>20,0             | 0,20;<br>12,8             |
| 18        | 0,41;<br>13,4             | 0,13;<br>7,2              | 0,11;<br>35,2             | 0,19;<br>39,9             | 0,11;<br>36,4             | 0,16;<br>30,8             | 0,17;<br>27,1             | 0,15;<br>26,3             | 0,19;<br>13,0             |



**Рис. 2.4.** Поля скорости поверхностных течений в Азовском море при западном ветре скоростью 10 м/с длительностью: 6 ч (а), 12 ч (б), 18 ч (в)

Наибольшие нагоны для периодов 6, 12 и 18 ч, отмеченные на одной и той же береговой ст. А<sub>4</sub>, составляют 0,39 м ( $t_{\max} = 11$  ч); 0,6 м ( $t_{\max} = 17,2$  ч) и 0,62 м ( $t_{\max} = 18,7$  ч) соответственно.

Следовательно, при увеличении периода в два раза ветер одной и той же скорости формирует нагоны, бóльшие в 1,5 раза. При еще большем увеличении периода постоянного действия ветра (в три раза) максимум нагона на ст. А<sub>4</sub> мало изменяется.

С увеличением отношения  $T_j/T_1$  ( $j = 1, 2, 3$ ) в два и три раза становятся бóльшими периоды времени достижения наибольших нагонов. Эти изменения составляют 56 и 70 % соответственно. Наименьшие нагоны для рассматриваемых типов ветра формируются на одной и той же ст. А<sub>9</sub>. Их значения составляют 0,1 м ( $t_{\max} = 20,9$  ч); 0,08 м ( $t_{\max} = 26,7$  ч) и 0,09 м ( $t_{\max} = 32,7$  ч) при периодах постоянного действия ветра 6, 12 и 18 ч соответственно. Видно, что с ростом  $T_j/T_1$  в два раза минимальные нагоны становятся меньше на 20 %, а увеличение  $T_j/T_1$  в три раза приводит к уменьшению нагонов только на 10 %. Период времени, за который происходит формирование наименьших нагонов, тем больше, чем больше значение  $T_j/T_1$  (в 1,2 и 1,6 раза).

Анализируя данные, приведенные в табл. 2.3, отметим, что наибольшие сгоны имеют место в А<sub>1</sub> и составляют для  $T_{1,2,3}$  (6, 12, 18 ч) 0,31; 0,39; 0,41 м в моменты времени 10,1; 13,2; 13,4 ч. Отсюда следует, что максимальные значения сгонов и время их достижения при  $T_2 = 12$  ч и  $T_3 = 18$  ч отличаются сравнительно мало. При одинаковой максимальной скорости ветра увеличение периода его постоянного действия в два раза ( $T_2 = 2T_1$ ) приводит к увеличению максимальных сгонов на 25 %, а времени их достижения – на 30 %.

Наименьшие сгоны отмечаются на ст. А<sub>3</sub>: при  $T_1 = 6$  ч в 24,3 ч (0,09 м), при  $T_2 = 12$  ч в 29,1 ч (0,1 м), при  $T_3 = 18$  ч в 35,2 ч (0,11 м). Следовательно, минимальные сгоны с ростом  $T_j/T_1$  в два и три раза увеличиваются в 1,1 и 1,2 раза, а время их достижения – в 1,2 и 1,4 раза. Как видно, увеличение периода действия постоянного ветра над акваторией моря в два раза ( $T_2 = 2T_1$ ) приводит к росту сгонов и нагонов (от 1,1 до 1,6 раза) на всех станциях. Период времени, за который происходит формирование экстремальных значений уровня, увеличивается с ростом периода постоянного действия ветра.

### 2.1.2. Динамические процессы, возникающие под действием переменного ветра при наличии стационарных течений

Установившиеся движения вызываются действием постоянного однородного ветра. Исследование основных закономерностей этих движений позволяет установить характер циркуляции вод в бассейне. При этом стационарное решение можно использовать в качестве начальных данных в нестационарной задаче. На основании ряда численных экспериментов с использованием трехмерной нелинейной  $\sigma$ -координатной модели исследованы динамические процессы в Азовском море при наличии стационарных течений. На основании анализа результатов моделирования установлены зависимости экстремальных отклонений уровня моря и скорости стационарных течений от скорости и направления ветра. Проведено сравнение результатов вычислений, полученных с учетом и без учета нелинейных слагаемых в уравнениях движения, а также при различных разрешениях пространственных и временных координат.

Моделирование сгонно-нагонных явлений в Азовском море при наличии стационарных течений. Исходными уравнениями являются нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды (1.1) – (1.4). Граничные и начальные условия имеют вид (1.6), (1.7), (1.9), (1.10), (1.12).

Движение жидкости возникает под действием стационарного однородного по пространству ветра, скорость которого изменяется по следующему закону. В начальный момент времени ( $t = 0$ ) вода находится в состоянии покоя, уровень горизонтален, а скорость ветра нулевая. При  $t > 0$  на водную поверхность начинает действовать ветер заданного (постоянного) направления, скорость которого нарастает со временем ( $0 < t \leq 3$  ч) по линейному закону и далее не меняется. Таким образом, изменение по времени скорости ветра задается следующим соотношением:

$$\mathbf{W}_{\text{ст}}(t)_i = \begin{cases} a_i t, & 0 < t \leq 3 \text{ ч} \\ a_i t_1, & t > 3 \text{ ч} \end{cases} . \quad (2.2)$$

Через  $\mathbf{W}_{st}^k$  ( $k = \overline{1, 4}$ ) обозначим скорость ветра спустя 3 ч после начала его действия. Моделирование установившихся движений проведено для четырех значений скорости постоянного ветра:  $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$ ;  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ ;  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  и  $\mathbf{W}_{st}^4 = 20$  м/с. Отклонения свободной поверхности отмечаются на береговых станциях Азовского моря  $A_1 - A_9$ , расположенных по его периметру (см. рис. 2.1).

В серии численных экспериментов определяем время выхода течений на установившийся режим. Приближение к установившемуся режиму оценивается по относительным изменениям полной энергии  $E_T(t)$ , которая находится как сумма осредненных по пространству кинетической  $E_K(t)$  и потенциальной  $E_P(t)$  энергий. Итак, изменение  $E_T$  находим по формуле

$$\delta E_T^n = \left| E_T^{n+1} - E_T^n \right| / E_T^n, \quad (2.3)$$

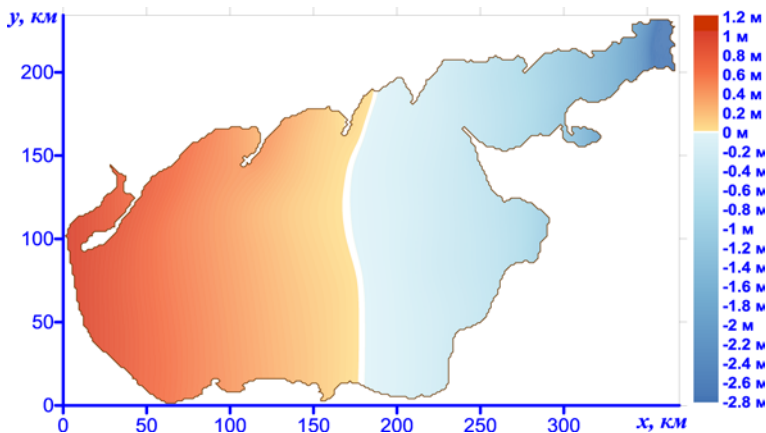
где  $E_T = E_K + E_P$ ;  $n$  – номер шага по времени. Считаем, что стационарный режим достигается, когда  $\delta E_T^n \leq 10^{-2}$ . Условие выхода на стационарный режим определяется также и тем, что между двумя соседними значениями времени не происходит заметных изменений отклонения уровня и скорости течений (не более 5 %). Исходя из этого, определили время установления движения жидкости  $t = t_1$ .

Наибольшую повторяемость в осенний период имеют ветры северо-восточного и восточного направлений со скоростью 515 м/с [19]. В летний период наибольшую непрерывную продолжительность (до 2,5 сут) имеют ветры юго-восточного направления. Таким образом, в численных расчетах выход течений на установившийся режим осуществляется постоянным восточным ветром, скорость которого варьируется от 5 до 20 м/с ( $\mathbf{W}_{st}^1 \div \mathbf{W}_{st}^4$ ).

На основании анализа результатов расчетов установлено, что период времени выхода поля течений и уровня на установившийся режим ( $t_1$ ) зависит от скорости ветра. Для больших значений скорости действующего ветра  $\mathbf{W}_{st}^k$  ( $k = \overline{1, \dots, 4}$ ) время установления увеличивается: 37 ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ); 42 ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ); 45 ( $\mathbf{W}_{st}^3$ ) и 48 ч ( $\mathbf{W}_{st}^4$ ).

Анализ результатов моделирования свидетельствует о том, что под действием квазипостоянного ветра (2.2) происходит постепенное

повышение уровня у наветренных берегов (нагон) и понижение у подветренных (сгон) (рис. 2.5).



**Рис. 2.5.** Поля уровня Азовского моря при восточном ветре, действующем со скоростью 15 м/с

В установившемся движении ( $t \geq t_1$ ) поле уровня соответствует одноузловой сейше. Кривая нулевых амплитуд (штриховая линия) пересекает центральную часть моря и ориентирована почти перпендикулярно направлению ветра. Характерной особенностью хода уровня на береговых станциях является подъем уровня на станциях  $A_3 - A_8$  и понижение в пунктах  $A_1, A_2$  и  $A_9$ , наблюдаемое в установившемся режиме ( $t \geq t_1$ ).

### 2.1.3. Анализ влияния учета водообмена с Черным морем на стационарные движения в Азовском море

Азовское море сообщается с Черным через Керченский пролив посредством движения воды, возникающего из-за разности уровней в северной (азовской) и южной (черноморской) частях пролива и под действием ветра, влияние которого на уровень воды в проливе в 5–6, а при штормах – в 10–15 раз сильнее, чем воздействие речного стока [64, 65, 85, 87, 97, 98]. Керченский пролив достаточно мелководен, глубина при входе в пролив из Азовского моря 10,5 м, при выходе в Чёрное – 18 м. На большей части акватории значения глубины не превышают 5,5 м, а в Керчь-Еникальском канале,

прорытом Россией в 1874 г., они составляют 9–10 м. Длина Керченского пролива 43 км по прямой и 48 км по фарватеру. Максимальная ширина 42 км, минимальная – 3,7 км (в районе порт Крым – порт Кавказ). Представляет интерес провести исследование влияния учета водообмена на течения и отклонения уровня в Азовском море.

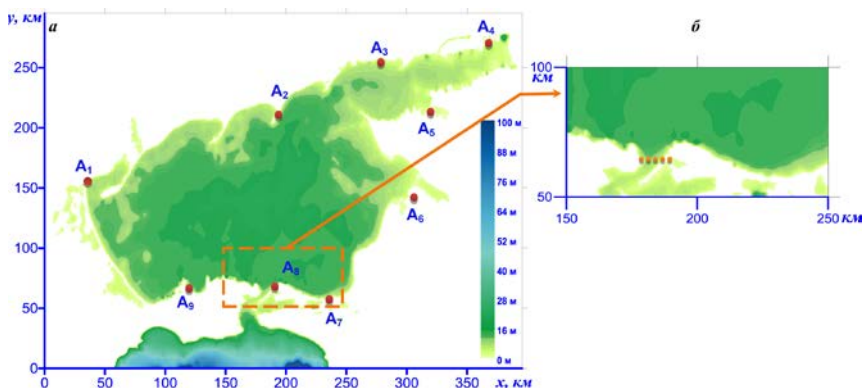
Определим особенности формирования стационарных течений и полей уровня Азовского моря с учетом водообмена с Черным морем. За всю историю инструментальных наблюдений (с 1936 г.) было выявлено, что в проливе преобладает волнение высотой 0,7–1 м и меньше [90, 94, 95, 148]. При северных ветрах в Керченском проливе имеет место поток из Азовского моря с максимальными скоростями течений до 70 см/с. При южных ветрах в проливе наблюдается черноморский поток с максимальными скоростями до 80 см/с.

Повторяемость азовских течений в среднем за год составляет 58 %, а черноморских – 42 % случаев. За последние 50 лет волны максимальной высоты (2 м) в северной части Керченского пролива наблюдались при ветрах северной четверти. Повторяемость ветров южной четверти в северо-восточной части моря составляет 12 %, их скорость не превышает 15–17 м/с.

Расчетная область, представленная на рис. 2.6. включает в себя Азовское море, Керченский пролив и примыкающую к нему часть Черного моря. Открытая зональная граница ( $\Gamma$ ) соответствует вертикальному разрезу бассейна Черного моря по  $44,81^\circ$  с. ш (рис. 2.6, а). Во всех точках, расположенных на этой границе ( $60 \leq x \leq 240$  км,  $y = 0$ ), выполняется условие

$$\left. \frac{\partial v}{\partial y} \right|_{\Gamma} = 0, \quad (2.4)$$

где ось  $y$  нормальна к жидкой границе. При решении задачи без учета пролива рассматривается замкнутый бассейн, в котором вдоль  $39,33^\circ$  с. ш. ( $177 \leq x \leq 192$  км,  $y = 62$  км) имеется вертикальная боковая стенка (пунктирная линия на рис. 2.6, б). Для расчета водообмена через Керченский пролив на каждом шаге по времени рассчитывается суммарный расход воды, проходящей через сечение, расположенное на разрезе  $177 \leq x \leq 192$  км,  $y = 62$  км (рис. 2.6, б).



**Рис. 2.6.** Положение станций вдоль побережья Азовского моря и сечение, через которое рассчитывается расход воды

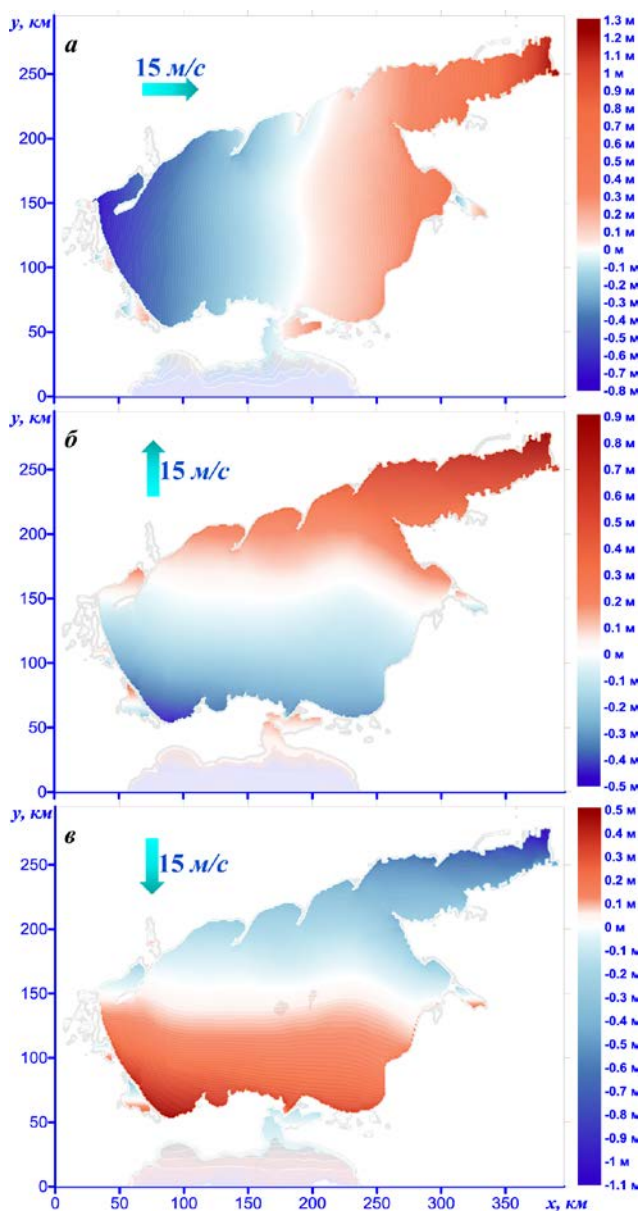
При этом объем протекшей жидкости за время  $0 \leq t \leq t_n$  определяется выражением

$$G(t_n) = S \sum_{i=1}^n \overline{U(t_i)} t_i, \quad (2.5)$$

где  $\overline{U(t_i)}$  – средняя скорость течений в сечении пролива на  $i$ -м временном шаге;  $S$  – площадь сечения.

В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна. Начиная с момента времени  $t = 0$  на водную поверхность действует однородный ветер, скорость которого задается соотношением (2.2). Численные эксперименты реализованы для стационарных ветров с различной скоростью южного, западного и восточного направлений:  $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$ ;  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$  и  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  м/с. Полученные результаты сравниваются с расчетами, проведенными при моделировании установившихся движений в Азовском море без учета водообмена через Керченский пролив.

На рис. 2.7 приведены поля уровня, генерируемые постоянным ветром, действующим со скоростью 15 м/с в трех рассматриваемых направлениях.



**Рис. 2.7.** Поля уровня Азовского моря (м) в установившемся режиме при западном (а), южном (б) и северном (в) направлениях ветра

Отсюда видно, что в этом случае в стационарном режиме имеет место понижение уровня у подветренных берегов (сгон) и повышение у наветренных (нагон). Узловая линия (штриховая на рисунке) ориентирована перпендикулярно направлению действующего ветра и пересекает центральную часть моря в зональном (рис. 2.7, б, в) и меридиональном (рис. 2.7, а) направлениях. При ветрах рассматриваемых направлений наиболее сильному воздействию сгонно-нагонных процессов подвержен Таганрогский залив. Здесь максимальные отклонения уровня моря (до 1 м) возникают при ветрах различных направлений.

В табл. 2.4 приведены максимальные отклонения уровня на береговых станциях Азовского моря в зависимости от направления и скорости ветра с учетом и без учета водообмена через пролив.

Т а б л и ц а 2.4

**Максимальные отклонения уровня моря (см) под действием ветра трех скоростей и направлений без учета (1) и с учетом пролива (2)**

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

Из анализа приведенных данных следует, что на каждой станции наиболее значимые сгонно-нагонные процессы отмечаются в большинстве случаев при ветре бо́льших скоростей и при учете водообмена с Черным морем.

Действие стационарного ветра одного направления, но бо́льшей скорости (10 и 15 м/с) приводит к возрастанию отклонений уровня до 60 %. Сравнение значений  $|\zeta_{\max}|$ , полученных для ветров одного направления и скорости при решении задачи с учетом и без учета пролива, показывает, что учет водообмена приводит к увеличению экстремальных значений уровня.

При скорости ветра 10 м/с наибольшие различия абсолютных максимумов на станциях составляют: 43 % (западный ветер), 45 % (южный), 46 % (северный); при скорости ветра 15 м/с – 44 % (западный ветер), 43 % (южный), 45 % (северный). Существенно влияет на наибольшие отклонения уровня и направление стационарного ветра. Отметим, что на рассматриваемых станциях самые большие подъемы и понижения уровня имеют место при определенном направлении ветра одной и той же скорости.

Так, при западном ветре максимальные нагоны отмечаются на ст. Таганрог (138 см), Ейск (96 см), Приморско-Ахтарск (73 см), а максимальные сгоны – на ст. Геническ (112 см). При южном ветре наибольшие подъемы уровня имеют место на ст. Бердянск (46 см) и Мариуполь (79 см), максимальные понижения уровня – на ст. Темрюк (59 см), Опасное (56 см), Мысовое (58 см). Северный ветер вызывает наибольшие нагоны на ст. Темрюк (55 см), Опасное (53 см), Мысовое (53 см), наибольшие сгоны – на ст. Бердянск (47 см), Мариуполь (82 см) и Таганрог (140 см).

Таким образом, для станции Геническ максимальные нагоны будут развиваться при южном ветре, а наибольшие сгоны – при западном и северном направлениях ветра. В районе Бердянска наибольшие подъемы уровня наблюдаются при южном ветре, максимальные понижения уровня – при ветре северного направления. Наиболее опасным с точки зрения сгонов для ст. Мариуполь, Таганрог и Ейск является северный ветер, максимальные нагоны здесь вызываются ветрами южного и западного направлений.

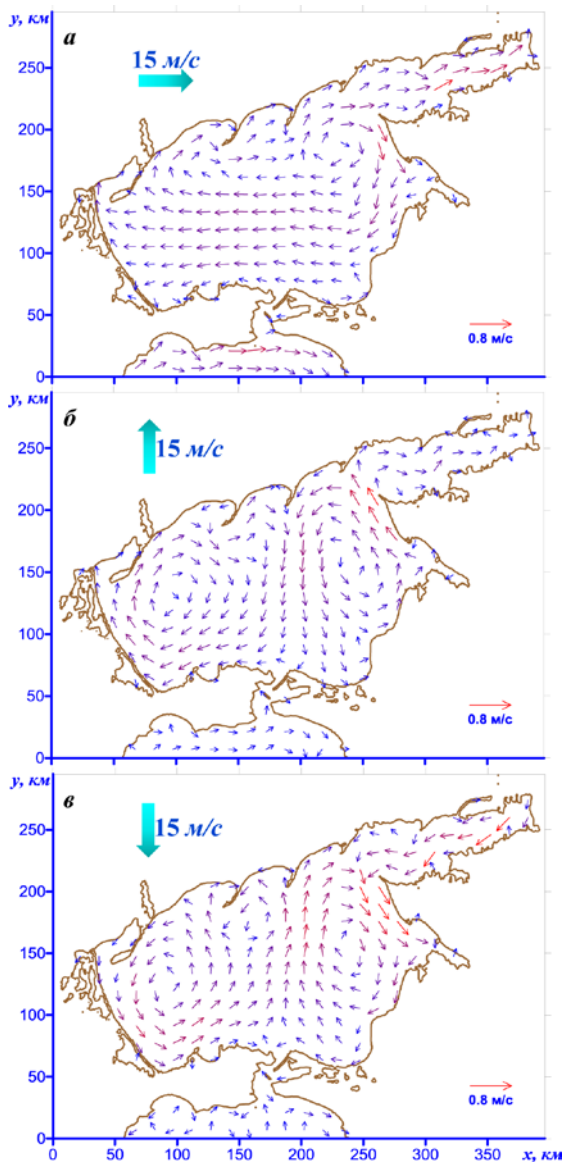
На станции Приморск-Ахтарск самые большие сгоны возникают при северном ветре, ветер западного направления обуславливает

максимальные подъемы уровня. На ст. Темрюк максимальные нагоны развиваются при северном ветре, а наибольшие сгоны – при южном. В районе ст. Опасное максимальные подъемы уровня наблюдаются при северном ветре, самые большие понижения уровня здесь отмечаются при ветрах южного и западного направлений. На ст. Мысовое возникновение наибольших нагонов имеет место при северном ветре и сгонов – при южном и западном ветрах.

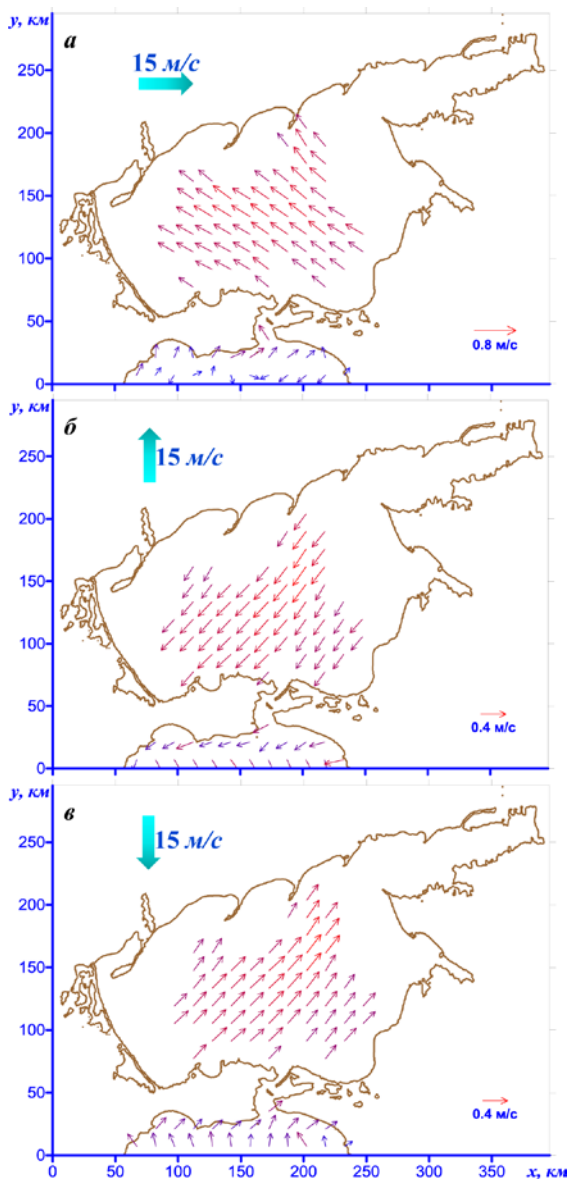
Сравнение двух значений  $|\zeta_{\max}|$ , найденных при разных условиях в проливе и одинаковом ветровом воздействии, свидетельствует о близких результатах расчетов. При этом отклонения полученных величин для трех исследуемых направлений постоянного ветра скоростью 5, 10 и 15 м/с составляют 13, 19, 24 % (западный ветер); 17, 6, 25 % (южный); 18, 19, 23 % (северный).

Отметим, что направление ветра также влияет на максимумы отклонений  $\zeta$ . Так, под действием стационарного ветра со скоростью 15 м/с наибольшие значения  $|\zeta_{\max}|$ , которые достигаются при западном ветре (162 см), превышают наименьшие (115 см), вызванные южным ветром, на 29 %.

На рис. 2.8 и 2.9 представлена скорость течений, вызванных действием постоянного ветра различных направлений со скоростью 15 м/с, на горизонтах 1 и 10 м в момент времени  $t = t_1$ . Распределения получены с помощью линейной интерполяции результатов численного моделирования с  $\sigma$ -координатных поверхностей на плоскости  $z = \text{const}$ . Как показывает анализ приведенных полей, течения в установившемся режиме характеризуются выраженными вихревыми образованиями. Их положения и конфигурации определяются направлением ветра. При этом наиболее интенсивные течения имеют место в глубоководной части моря. При западном (рис. 2.8, а) ветре в Азовском море возникают две системы круговоротов, которые ориентированы в зональном направлении. На границе между круговоротами направление потока жидкости ориентировано противоположно действующему ветру. В Таганрогском заливе образуется пара вихрей противоположных знаков. При северном ветре в центральной части моря генерируются два круговорота противоположных знаков (рис. 2.8, в).



**Рис. 2.8.** Поля скорости стационарных поверхностных течений (м/с) в Азовском море при западном (а), южном (б) и северном (в) ветре



**Рис. 2.9.** Поля скорости стационарных течений (м/с) в Азовском море на глубине 10 м при западном (*a*), южном (*б*) и северном (*в*) ветре

Бóльший по площади (циклонический) примыкает к западному берегу и содержит в себе малое вихревое образование. Меньший по площади, но более мощный круговорот (антициклонический) находится в восточной части моря.

Между этими двумя круговоротами располагается узкая полоса переноса водных масс, ориентированная противоположно ветру. Южный ветер вызывает течения, поля которых являются зеркальным отражением полей течений, возникающих при северном ветре (прослеживается та же конфигурация вихревых образований, но они имеют противоположный знак) (рис. 2.8, б).

На глубине 10 м (рис. 2.9) в центральной части акватории наблюдаются течения, которые отклоняются на  $135^\circ$  и более от направления действующего ветра. Как следует из рис. 2.9, 2.10, течения в проливе в поверхностном и придонном слоях направлены противоположно. Отметим, что в Керченском проливе под действием западного и северного ветров (рис. 2.9, а, в) в придонном слое течения направлены из Черного моря в Азовское, в поверхностном (рис. 2.8, а, в) – в противоположную сторону. При южном ветре (рис. 2.8, 2.9, б) течения на глубине 10 м направлены из Азовского моря в Черное.

В табл. 2.5 приведены данные о максимумах скоростей стационарных течений на различных горизонтах в зависимости от скорости и направления ветра при учете и без учета водообмена через пролив. Из анализа этих данных следует, что величины скоростей установившихся течений, найденные при моделировании с учетом пролива, для одинаковых скоростей и направлений ветра больше, чем без его учета. При этом на рассматриваемых горизонтах учет водообмена приводит к относительной разнице значений модулей скоростей течений, не превышающей 45 %.

Наибольшая скорость течений, вызванных действием ветра одной и той же скорости, отмечается при южном направлении ветра, наименьшая – при северном. Итак, максимальные значения скорости поверхностных течений, вычисленные с учетом пролива при скорости ветра 15 м/с, составляют 0,87 (З); 1,22 (Ю) и 0,99 м/с (С). Относительная разница между наибольшими и наименьшими значениями представленных скоростей составляет 30 %. Аналогичное соотношение величин скоростей течений прослеживается и на других горизонтах при действии постоянного

ветра со скоростью 5 и 10 м/с. Таким образом, ветер южного направления, действующий вдоль Керченского пролива, вызывает течения, скорости которых превышают (на 12–30 %) скорости течений, вызванных западным или северным ветром.

Т а б л и ц а 2.5

**Максимальные значения скорости стационарных течений (см/с) на различных горизонтах Азовского моря, вызываемых постоянным ветром трех скоростей и направлений без учета (1) и с учетом (2) водообмена с Черным морем**

| Горизонт,<br>м |   | $W_{st}^1$ |    |    | $W_{st}^2$ |    |    | $W_{st}^3$ |    |    |
|----------------|---|------------|----|----|------------|----|----|------------|----|----|
|                |   | З          | Ю  | С  | З          | Ю  | С  | З          | Ю  | С  |
| 1              | 1 | 11         | 11 | 11 | 40         | 39 | 41 | 62         | 69 | 58 |
|                | 2 | 14         | 17 | 14 | 44         | 46 | 42 | 87         | 99 | 85 |
| 3              | 1 | 6          | 8  | 8  | 23         | 28 | 28 | 48         | 57 | 47 |
|                | 2 | 11         | 14 | 12 | 28         | 38 | 35 | 52         | 59 | 58 |
| 5              | 1 | 4          | 7  | 7  | 14         | 21 | 22 | 28         | 44 | 43 |
|                | 2 | 9          | 12 | 11 | 24         | 35 | 31 | 46         | 52 | 46 |
| 10             | 1 | 4          | 6  | 6  | 13         | 16 | 16 | 23         | 27 | 27 |
|                | 2 | 6          | 8  | 7  | 17         | 24 | 21 | 32         | 42 | 35 |

Рассмотрим теперь влияние Керченского пролива на интегральный водообмен ( $G(t)$ ) в установившемся режиме. В численных экспериментах на каждом шаге по времени рассчитаны значения функции  $G(t)$ . При этом положительные значения  $G(t)$  соответствуют поступлению воды в Азовское море, отрицательные – свидетельствуют о том, что поток через пролив меняет направление на противоположное.

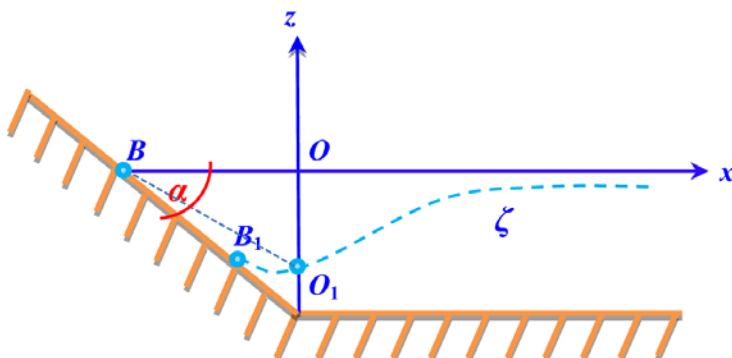
Из анализа зависимостей от времени интегральных расходов ( $m^3$ ) воды через пролив в течение расчетного периода (200 ч) следует, что наибольший расход воды через пролив имеет место при южном ветре, наименьший – при северном. Нарастание расхода до максимума происходит от начального момента времени до  $t = 20$  ч. Установлено, что учет водообмена с Черным морем приводит к увеличению максимальных отклонений уровня и скоростей установившихся течений. В частности, показано, что при скорости

ветра 10 м/с максимальные значения нагонов и скорости течений при учете пролива на 36 и 42 % соответственно больше, чем без его учета. При этом наибольшие скорости течений вызываются ветром южного направления.

#### 2.1.4. Определение областей осушения и затопления береговых районов Азовского моря под действием постоянного ветра

Проблема прогноза затопления территории в результате возникновения аварийных ситуаций является важной и решается на основе различных технологий. Эффективным направлением представляются методы компьютерного моделирования, основанные на прямых гидродинамических расчетах динамики поверхностных вод. Особый интерес связан с моделированием динамики затоплений пойменных участков на большой территории со сложным рельефом.

На рис. 2.10 схематически представлена область осушения в прибрежном районе моря. Здесь ось  $x$  с невозмущенной морской поверхностью,  $OO_1$  – уровень моря в момент максимального сгона,  $\alpha$  – угол наклона берегового склона, который в рассматриваемом случае предполагается плоским.



**Рис. 2.10.** Геометрия рельефа дна и схема области осушения

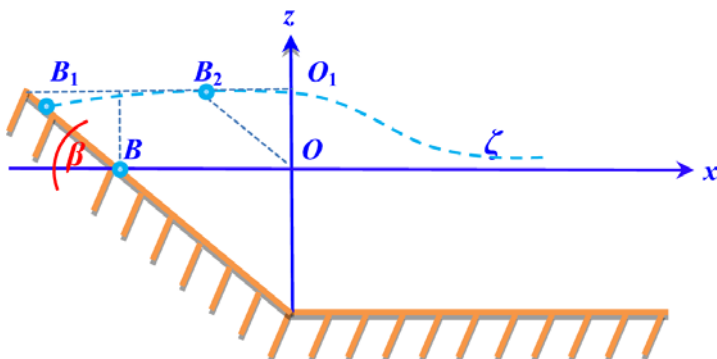
Для нахождения размеров области осушения  $BB_1 \sim BO_1$  воспользуемся известным соотношением

геометрии  $BO_1 = \sqrt{OO_1^2 + OO_1^2 (tg \alpha)^{-2}}$  :

$$BO_1 = OO_1 (\sin \alpha)^{-1}. \quad (2.6)$$

По известным значениям максимального сгона  $OO_1$  и углу наклона берегового склона ( $\alpha$ ) определяем размер возможной области осушения ( $BB_1$ ) в данном районе на основании (2.6).

На рис. 2.11 схематически приведена область затопления. Здесь ось  $x$  совпадает с невозмущенной морской поверхностью,  $OO_1$  – уровень моря в момент максимального нагона,  $\beta$  – угол подъема береговой поверхности, которая предполагается плоской.



**Рис. 2.11.** Геометрия рельефа дна и схема области затопления

Аналогично уравнению (2.6) запишем соотношения, позволяющие найти протяженность района затопления  $BB_1 \sim OB_2$ :

при  $OB_1 = \sqrt{OO_1^2 + OO_1^2 (tg \beta)^{-2}}$

$$OB_2 = OO_1 (\sin \beta)^{-1}. \quad (2.7)$$

По известному значению величины нагона  $OO_1$  и углу подъема береговой поверхности ( $\beta$ ) определяем по формуле (2.7) размер возможной области затопления ( $BB_1$ ) в данном береговом районе. Отметим, что для Азовского моря характерными являются величины

углов наклона и подъема побережья от 1 до 4°. Придавая  $\alpha$  и  $\beta$  указанные значения, выполним прогноз размеров областей затопления и осушения в зависимости от действия однородного зонального ветра со скоростями 5 ( $W_{st}^1$ ), 10 ( $W_{st}^2$ ), 15 ( $W_{st}^3$ ) и 20 ( $W_{st}^4$ ) м/с.

В табл. 2.6 приведены значения максимальных сгонов и областей осушения в районах ст. Геническ, Бердянск и Мысовое.

Т а б л и ц а 2.6

**Размеры областей осушения в зависимости от угла наклона берегового склона ( $\alpha$ ) и величины сгона, вызываемого западным ветром со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые станции | Скорость ветра, (м/с) | Сгон, (м) | Размеры области осушения (м) |                      |                      |                      |
|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                   |                       |           | $\alpha_1 = 1^\circ$         | $\alpha_2 = 2^\circ$ | $\alpha_3 = 3^\circ$ | $\alpha_4 = 4^\circ$ |
| Геническ          | 5                     | 0,11      | 5,73                         | 2,87                 | 1,91                 | 1,43                 |
|                   | 10                    | 0,39      | 22,35                        | 11,17                | 7,45                 | 5,59                 |
|                   | 15                    | 1,04      | 59,59                        | 29,80                | 19,87                | 14,91                |
|                   | 20                    | 2,10      | 120,33                       | 60,17                | 40,13                | 30,10                |
| Бердянск          | 5                     | 0,13      | 7,45                         | 3,72                 | 2,48                 | 1,86                 |
|                   | 10                    | 0,34      | 19,48                        | 9,74                 | 6,50                 | 4,87                 |
|                   | 15                    | 0,46      | 20,63                        | 10,32                | 6,88                 | 5,16                 |
|                   | 20                    | 0,68      | 38,96                        | 19,48                | 12,99                | 9,75                 |
| Мысовое           | 5                     | 0,05      | 2,86                         | 1,43                 | 0,96                 | 0,72                 |
|                   | 10                    | 0,22      | 12,61                        | 6,30                 | 4,20                 | 3,15                 |
|                   | 15                    | 0,52      | 29,80                        | 14,90                | 9,94                 | 7,45                 |
|                   | 20                    | 0,96      | 55,01                        | 27,51                | 18,34                | 13,76                |

В табл. 2.7 даны величины максимальных нагонов и размеры участков затопления в районах ст. Мариуполь, Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк и Опасное.

Т а б л и ц а 2.7

**Размеры областей затопления в зависимости от угла подъема  
берегового склона ( $\beta$ ) и величины нагона, вызываемого  
западным ветром со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые станции | Скорость ветра, (м/с) | Нагон, (м) | Размеры, (м)        |                     |                     |                     |
|-------------------|-----------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                   |                       |            | $\beta_1 = 1^\circ$ | $\beta_2 = 2^\circ$ | $\beta_3 = 3^\circ$ | $\beta_4 = 4^\circ$ |
| Мариуполь         | 5                     | 0,08       | 4,58                | 2,29                | 1,53                | 1,15                |
|                   | 10                    | 0,29       | 16,62               | 8,31                | 5,54                | 4,16                |
|                   | 15                    | 0,70       | 40,11               | 20,06               | 13,38               | 10,03               |
|                   | 20                    | 1,28       | 73,34               | 36,68               | 24,46               | 18,35               |
| Таганрог          | 5                     | 0,17       | 9,74                | 4,87                | 3,25                | 2,44                |
|                   | 10                    | 0,60       | 34,38               | 17,19               | 11,46               | 8,60                |
|                   | 15                    | 1,42       | 81,36               | 40,69               | 27,13               | 20,36               |
|                   | 20                    | 2,54       | 145,54              | 72,78               | 48,53               | 36,41               |
| Ейск              | 5                     | 0,10       | 5,73                | 2,87                | 1,91                | 1,43                |
|                   | 10                    | 0,38       | 21,77               | 10,89               | 7,26                | 5,45                |
|                   | 15                    | 0,92       | 52,71               | 26,36               | 17,58               | 13,19               |
|                   | 20                    | 1,70       | 97,41               | 48,71               | 32,48               | 24,37               |
| Приморско-Ахтарск | 5                     | 0,09       | 5,16                | 2,58                | 1,72                | 1,29                |
|                   | 10                    | 0,34       | 19,48               | 9,74                | 6,50                | 4,87                |
|                   | 15                    | 0,91       | 52,14               | 26,07               | 17,39               | 13,05               |
|                   | 20                    | 1,79       | 102,56              | 51,29               | 34,2                | 25,66               |
| Темрюк            | 5                     | 0,05       | 2,86                | 1,43                | 0,96                | 0,72                |
|                   | 10                    | 0,21       | 12,03               | 6,02                | 4,01                | 3,01                |
|                   | 15                    | 0,56       | 32,09               | 16,05               | 10,7                | 8,03                |
|                   | 20                    | 1,09       | 62,46               | 31,23               | 20,83               | 15,63               |
| Опасное           | 5                     | 0,03       | 1,72                | 0,86                | 0,57                | 0,43                |
|                   | 10                    | 0,12       | 6,88                | 3,44                | 2,29                | 1,72                |
|                   | 15                    | 0,32       | 18,34               | 9,17                | 6,11                | 4,59                |
|                   | 20                    | 0,60       | 34,38               | 17,19               | 11,46               | 8,60                |

В табл. 2.8 представлены максимальные сгоны и размеры областей осушения на береговых станциях Азовского моря (Мариуполь, Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк и Опасное).

Т а б л и ц а 2.8

**Размеры областей осушения в зависимости от угла наклона берегового склона ( $\alpha$ ) и величины сгона, вызываемого восточным ветром скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые станции | Скорость ветра, м/с | Сгон, м | Размеры, м           |                      |                      |                      |
|-------------------|---------------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                   |                     |         | $\alpha_1 = 1^\circ$ | $\alpha_2 = 2^\circ$ | $\alpha_3 = 3^\circ$ | $\alpha_4 = 4^\circ$ |
| Мариуполь         | 5                   | 0,08    | 4,58                 | 2,29                 | 1,53                 | 1,15                 |
|                   | 10                  | 0,18    | 10,31                | 5,16                 | 3,44                 | 2,58                 |
|                   | 15                  | 0,86    | 49,28                | 24,64                | 16,43                | 12,33                |
|                   | 20                  | 1,35    | 77,35                | 38,68                | 25,79                | 19,35                |
| Таганрог          | 5                   | 0,16    | 9,17                 | 4,58                 | 3,06                 | 2,29                 |
|                   | 10                  | 0,69    | 39,54                | 19,77                | 13,18                | 9,89                 |
|                   | 15                  | 1,73    | 99,13                | 49,57                | 33,06                | 24,8                 |
|                   | 20                  | 2,3     | 131,79               | 65,9                 | 43,95                | 32,97                |
| Ейск              | 5                   | 0,11    | 6,30                 | 3,15                 | 2,10                 | 1,58                 |
|                   | 10                  | 0,49    | 28,08                | 14,04                | 9,36                 | 7,02                 |
|                   | 15                  | 1,22    | 69,9                 | 34,96                | 23,31                | 17,49                |
|                   | 20                  | 1,54    | 88,24                | 44,13                | 29,43                | 22,08                |
| Приморско-Ахтарск | 5                   | 0,13    | 7,45                 | 3,72                 | 2,48                 | 1,86                 |
|                   | 10                  | 0,57    | 32,66                | 16,33                | 10,89                | 8,17                 |
|                   | 15                  | 1,42    | 81,36                | 40,69                | 27,13                | 20,36                |
|                   | 20                  | 1,81    | 103,71               | 51,86                | 34,58                | 25,95                |
| Темрюк            | 5                   | 0,07    | 4,01                 | 2,01                 | 1,34                 | 1,00                 |
|                   | 10                  | 0,3     | 17,19                | 8,6                  | 5,73                 | 4,3                  |
|                   | 15                  | 0,74    | 42,4                 | 21,2                 | 14,14                | 10,61                |
|                   | 20                  | 1,24    | 71,05                | 35,53                | 23,69                | 17,78                |
| Опасное           | 5                   | 0,04    | 2,29                 | 1,15                 | 0,76                 | 0,57                 |
|                   | 10                  | 0,22    | 12,61                | 6,30                 | 4,20                 | 3,15                 |
|                   | 15                  | 0,43    | 24,64                | 12,32                | 8,22                 | 6,16                 |
|                   | 20                  | 0,64    | 36,67                | 18,34                | 12,23                | 9,17                 |

В табл. 2.9 даны величины максимальных нагонов и размеры участков затопления в районах станций Геническ, Бердянск и Мысовое, вызванные действием восточного ветра со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с.

Прогнозирование размеров территории возможного осушения и затопления выполним на основе серии численных экспериментов, в которых в качестве возмущающего фактора выбран однородный по времени и пространству ветер. Этот ветер направлен с юга на север и действует со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с. Численные эксперименты проведены для тех же значений углов наклона прибрежных областей и величин углов подъемов береговых районов.

Т а б л и ц а 2.9

**Размеры областей затопления в зависимости от угла подъема берегового склона ( $\beta$ ) и величины нагона, вызываемого восточным ветром скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые станции | Скорость ветра, м/с | Нагон, м | Размеры, м          |                     |                     |                     |
|-------------------|---------------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                   |                     |          | $\beta_1 = 1^\circ$ | $\beta_2 = 2^\circ$ | $\beta_3 = 3^\circ$ | $\beta_4 = 4^\circ$ |
| Геническ          | 5                   | 0,12     | 6,88                | 3,44                | 2,29                | 1,72                |
|                   | 10                  | 0,53     | 30,37               | 15,19               | 10,13               | 7,60                |
|                   | 15                  | 1,32     | 75,63               | 37,82               | 25,22               | 18,92               |
|                   | 20                  | 1,87     | 107,15              | 53,58               | 35,73               | 26,81               |
| Бердянск          | 5                   | 0,04     | 2,29                | 1,15                | 0,76                | 0,57                |
|                   | 10                  | 0,18     | 10,31               | 5,16                | 3,44                | 2,58                |
|                   | 15                  | 0,45     | 25,78               | 12,89               | 8,60                | 6,45                |
|                   | 20                  | 0,52     | 29,80               | 14,90               | 9,94                | 7,45                |
| Мысовое           | 5                   | 0,01     | 0,57                | 0,29                | 0,19                | 0,14                |
|                   | 10                  | 0,05     | 2,86                | 1,43                | 0,96                | 0,72                |
|                   | 15                  | 0,12     | 6,88                | 3,44                | 2,29                | 1,72                |
|                   | 20                  | 0,18     | 8,96                | 5,48                | 3,99                | 2,50                |

Южный ветер вызывает течения, поля которых являются зеркальным отражением полей течений, возникающих при северном ветре. Действие этого ветра приводит к возникновению сгонов на ст. Геническ, Бердянск, Мариуполь, Таганрог и Ейск. При этом на ст. Приморско-Ахтарск, Темрюк, Опасное и Мысовое имеют место нагонные процессы. В табл. 2.10 приведены величины областей осушения в районах указанных станций в зависимости

от скорости ветра, угла наклона прибрежной области и величины максимального сгона.

Т а б л и ц а 2.10

**Размеры областей осушения в зависимости от угла подъема  
берегового склона ( $\alpha$ ) и величины сгона, вызываемого  
южным ветром скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые станции | Скорость ветра, м/с | Сгон, м | Размеры, (м)         |                      |                      |                      |
|-------------------|---------------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                   |                     |         | $\alpha_1 = 1^\circ$ | $\alpha_2 = 2^\circ$ | $\alpha_3 = 3^\circ$ | $\alpha_4 = 4^\circ$ |
| Геническ          | 5                   | 0,01    | 0,57                 | 0,29                 | 0,19                 | 0,14                 |
|                   | 10                  | 0,03    | 1,72                 | 0,86                 | 0,57                 | 0,43                 |
|                   | 15                  | 0,08    | 4,58                 | 2,29                 | 1,53                 | 1,15                 |
|                   | 20                  | 0,25    | 14,32                | 7,16                 | 4,78                 | 3,58                 |
| Бердянск          | 5                   | 0,06    | 3,44                 | 1,72                 | 1,15                 | 0,86                 |
|                   | 10                  | 0,24    | 13,75                | 6,88                 | 4,59                 | 3,44                 |
|                   | 15                  | 0,63    | 36,10                | 18,05                | 12,04                | 9,03                 |
|                   | 20                  | 0,91    | 52,14                | 26,07                | 17,39                | 13,05                |
| Мариуполь         | 5                   | 0,11    | 6,30                 | 3,15                 | 2,10                 | 1,58                 |
|                   | 10                  | 0,41    | 23,49                | 11,75                | 7,83                 | 5,88                 |
|                   | 15                  | 0,92    | 52,71                | 26,36                | 17,58                | 13,19                |
|                   | 20                  | 1,14    | 65,32                | 32,67                | 21,78                | 16,34                |
| Таганрог          | 5                   | 0,21    | 12,03                | 6,02                 | 4,01                 | 3,01                 |
|                   | 10                  | 0,76    | 43,55                | 21,78                | 14,52                | 10,90                |
|                   | 15                  | 1,67    | 95,69                | 47,85                | 31,91                | 23,94                |
|                   | 20                  | 2,06    | 118,04               | 59,03                | 39,36                | 29,53                |
| Ейск              | 5                   | 0,05    | 2,86                 | 1,43                 | 0,96                 | 0,72                 |
|                   | 10                  | 0,18    | 10,31                | 5,16                 | 3,44                 | 2,58                 |
|                   | 15                  | 0,4     | 22,92                | 11,46                | 7,64                 | 5,73                 |

В табл. 2.11 представлены размеры участков затопления в районах ст. Приморско-Ахтарска, Темрюк, Опасное и Мысовое, вызванные действием южного ветра со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с.

Т а б л и ц а 2.11

**Размеры областей затопления в зависимости от угла подъема  
берегового склона ( $\beta$ ) и величины нагона, вызываемого южным  
ветром со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые<br>станции  | Скорость<br>ветра,<br>м/с | Нагон,<br>м | Размеры, м          |                     |                     |                     |
|-----------------------|---------------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                       |                           |             | $\beta_1 = 1^\circ$ | $\beta_2 = 2^\circ$ | $\beta_3 = 3^\circ$ | $\beta_4 = 4^\circ$ |
| Приморско-<br>Ахтарск | 5                         | 0,03        | 1,72                | 0,86                | 0,57                | 0,43                |
|                       | 10                        | 0,12        | 6,88                | 3,44                | 2,29                | 1,72                |
|                       | 15                        | 0,33        | 18,91               | 9,46                | 6,31                | 4,73                |
|                       | 20                        | 0,5         | 28,65               | 14,33               | 9,55                | 7,17                |
| Темрюк                | 5                         | 0,06        | 3,44                | 1,72                | 1,15                | 0,86                |
|                       | 10                        | 0,28        | 16,04               | 8,02                | 5,35                | 4,01                |
|                       | 15                        | 0,72        | 41,26               | 20,63               | 13,76               | 10,32               |
|                       | 20                        | 1,1         | 63,03               | 31,52               | 21,02               | 15,77               |
| Опасное               | 5                         | 0,07        | 4,01                | 2,01                | 1,34                | 4,01                |
|                       | 10                        | 0,25        | 14,32               | 7,16                | 4,78                | 14,32               |
|                       | 15                        | 0,66        | 37,82               | 18,91               | 12,61               | 37,82               |
|                       | 20                        | 0,83        | 47,56               | 23,78               | 15,86               | 47,56               |
| Мысовое               | 5                         | 0,06        | 3,44                | 1,72                | 1,15                | 0,86                |
|                       | 10                        | 0,27        | 15,47               | 7,74                | 5,16                | 3,87                |
|                       | 15                        | 0,66        | 37,82               | 18,91               | 12,61               | 9,46                |
|                       | 20                        | 0,87        | 49,85               | 24,93               | 16,62               | 12,47               |

Выполним анализ протяженности территорий возможных осушений и затоплений, возникающих под действием однородного ветра, дующего в меридиональном направлении с севера на юг для тех же значений углов наклона прибрежных областей. Действие этого ветра приводит к возникновению сгонов на ст. Приморско-Ахтарск, Темрюк, Опасное, Мысовое и нагонов на ст. Геническ, Бердянск, Мариуполь, Таганрог и Ейск. При северном ветре в центральной части моря генерируются два круговорота противоположных знаков. Бóльший по площади (циклонический) примыкает к западному берегу и содержит в себе малое вихревое образование. Меньший по площади, но более мощный (антициклонический) находится в восточной части моря.

В табл. 2.12 даны размеры областей осушения в районах указанных станций в зависимости от значения максимального сгона и величины угла наклона прибрежной области.

Т а б л и ц а 2.12

**Размеры областей осушения в зависимости от угла подъема берегового склона ( $\alpha$ ) и величины сгона, вызываемого северным ветром со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые станции | Скорость ветра, м/с | Сгон, м | Размеры, м           |                      |                      |                      |
|-------------------|---------------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                   |                     |         | $\alpha_1 = 1^\circ$ | $\alpha_2 = 2^\circ$ | $\alpha_3 = 3^\circ$ | $\alpha_4 = 4^\circ$ |
| Приморско-Ахтарск | 5                   | 0,03    | 0,57                 | 0,29                 | 0,19                 | 0,14                 |
|                   | 10                  | 0,12    | 1,72                 | 0,86                 | 0,57                 | 0,43                 |
|                   | 15                  | 0,33    | 4,58                 | 2,29                 | 1,53                 | 1,15                 |
|                   | 20                  | 0,50    | 14,32                | 7,16                 | 4,78                 | 3,58                 |
| Темрюк            | 5                   | 0,07    | 4,01                 | 2,01                 | 1,34                 | 1                    |
|                   | 10                  | 0,30    | 17,19                | 8,60                 | 5,73                 | 4,3                  |
|                   | 15                  | 0,76    | 43,55                | 21,78                | 14,52                | 10,90                |
|                   | 20                  | 1,15    | 65,89                | 32,95                | 21,97                | 16,49                |
| Опасное           | 5                   | 0,07    | 4,01                 | 2,01                 | 1,34                 | 1                    |
|                   | 10                  | 0,28    | 16,04                | 8,02                 | 5,35                 | 4,01                 |
|                   | 15                  | 0,71    | 40,68                | 20,34                | 13,57                | 10,18                |
|                   | 20                  | 1       | 57,30                | 28,65                | 19,11                | 14,34                |
| Мысовое           | 5                   | 0,06    | 3,44                 | 1,72                 | 1,15                 | 0,86                 |
|                   | 10                  | 0,28    | 16,04                | 8,02                 | 5,35                 | 4,01                 |
|                   | 15                  | 0,70    | 40,11                | 20,06                | 13,38                | 10,03                |
|                   | 20                  | 0,94    | 53,86                | 26,93                | 17,96                | 13,48                |

В табл. 2.13 приведены размеры участков затопления в районах ст. Геническ, Бердянск, Мариуполь, Таганрог и Ейск, вызванного действием северного ветра со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с. Данные о величине участков затопления рассчитаны для тех же значений углов подъемов береговых участков. Отметим, что сильному воздействию сгонно-нагонных процессов подвержен также Таганрогский залив, максимальные отклонения уровня моря возникают здесь при ветрах различных направлений.

Т а б л и ц а 2.13

**Размеры областей затопления в зависимости от угла подъема  
берегового склона ( $\beta$ ) и величины нагона, вызываемого  
северным ветром со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с**

| Береговые станции | Скорость ветра, м/с | Нагон, м | Размеры, м          |                     |                     |                     |
|-------------------|---------------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                   |                     |          | $\beta_1 = 1^\circ$ | $\beta_2 = 2^\circ$ | $\beta_3 = 3^\circ$ | $\beta_4 = 4^\circ$ |
| Геническ          | 5                   | 0,01     | 0,57                | 0,29                | 0,19                | 0,14                |
|                   | 10                  | 0,04     | 2,29                | 1,15                | 0,76                | 0,57                |
|                   | 15                  | 0,09     | 5,16                | 2,58                | 1,72                | 1,29                |
|                   | 20                  | 0,28     | 16,04               | 8,02                | 5,35                | 4,01                |
| Бердянск          | 5                   | 0,05     | 2,86                | 1,43                | 0,96                | 0,72                |
|                   | 10                  | 0,23     | 13,18               | 6,59                | 4,39                | 3,3                 |
|                   | 15                  | 0,58     | 33,23               | 16,62               | 11,08               | 8,31                |
|                   | 20                  | 0,77     | 44,12               | 22,06               | 14,71               | 11,04               |
| Мариуполь         | 5                   | 0,08     | 4,58                | 2,29                | 1,53                | 1,15                |
|                   | 10                  | 0,35     | 20,05               | 10,03               | 6,69                | 5,02                |
|                   | 15                  | 0,88     | 50,42               | 25,22               | 16,81               | 12,62               |
|                   | 20                  | 1,02     | 58,44               | 29,23               | 19,49               | 14,62               |
| Таганрог          | 5                   | 0,12     | 6,88                | 3,44                | 2,29                | 1,72                |
|                   | 10                  | 0,51     | 29,22               | 14,61               | 9,74                | 7,31                |
|                   | 15                  | 1,28     | 73,34               | 36,68               | 24,46               | 18,35               |
|                   | 20                  | 1,75     | 100,27              | 50,14               | 33,44               | 25,09               |
| Ейск              | 5                   | 0,02     | 1,15                | 0,57                | 0,38                | 0,29                |
|                   | 10                  | 0,07     | 4,01                | 2,01                | 1,34                | 1                   |
|                   | 15                  | 0,17     | 9,74                | 4,87                | 3,25                | 2,44                |
|                   | 20                  | 0,41     | 23,49               | 11,75               | 7,83                | 5,88                |

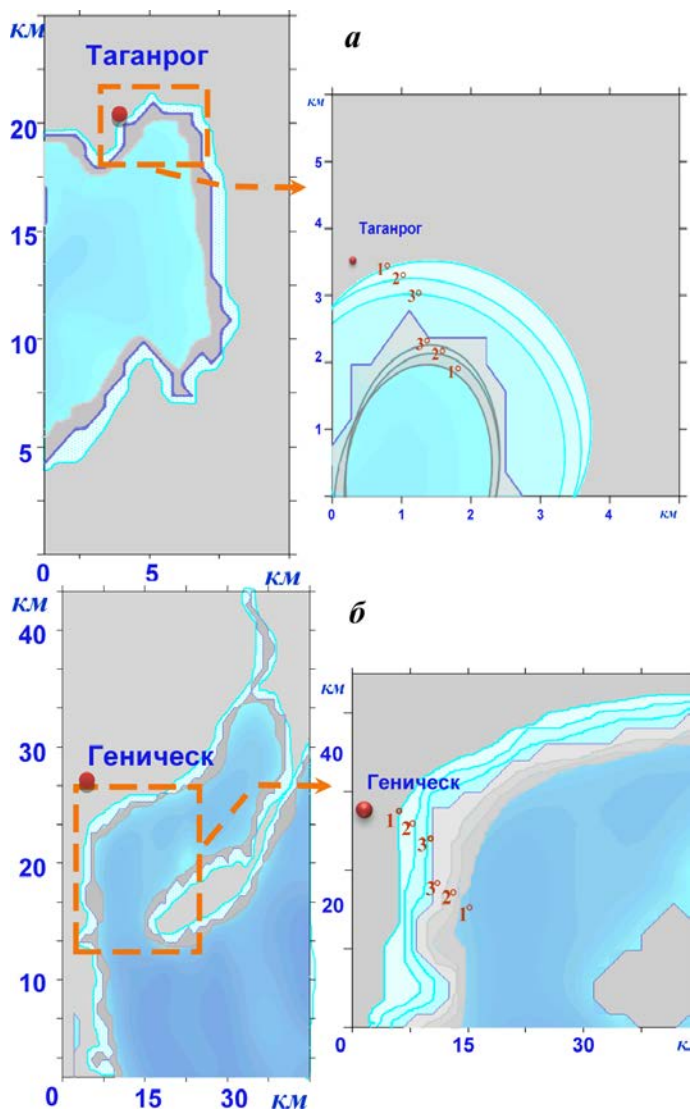
Наибольшему воздействию сгонно-нагонных процессов подвержен Таганрогский залив, максимальные отклонения уровня моря возникают здесь при ветрах различных направлений. Это, в свою очередь, может приводить к затоплению или осушке береговых районов. Области возможных затоплений и осушений, вызываемых однородным ветром, действующим в зональном направлении с востока на запад со скоростью 20 м/с в зависимости от угла подъема побережья, приведены на рис. 2.12.



**Рис. 2.12.** Области возможных затоплений побережья Азовского моря

Области возможных затоплений в районе Таганрога, вызываемых однородным ветром, действующим в зональном направлении с запада на восток со скоростью 20 м/с в зависимости от угла подъема побережья, и осушений под действием восточного ветра той же скорости в зависимости от угла наклона придонной области представлены на рис. 2.13, *а*.

На рис. 2.13, *б* показаны области возможных затоплений и осушений в районе Геническа, генерируемых однородным ветром, действующим в зональном направлении с востока на запад со скоростью 20 м/с в зависимости от угла подъема прибрежной области: линия 1 – при  $\beta_1 = 1^\circ$ , линия 2 – при  $\beta_2 = 2^\circ$ , линия 3 – при  $\beta_3 = 3^\circ$ , а также от угла наклона придонной области: линия 1 – при  $\alpha_1 = 1^\circ$ , линия 2 – при  $\alpha_2 = 2^\circ$ , линия 3 – при  $\alpha_3 = 3^\circ$ .



**Рис. 2.13.** Области возможных затоплений (осушений) в районе Таганрога (а) и Геническа (б), вызываемых однородным западным (восточным) ветром со скоростью 20 м/с, в зависимости от угла наклона берегового склона

## § 2.2. Линеаризация граничных условий и уравнений движения, изменение шагов интегрирования при моделировании стационарных движений в Азовском море

Линеаризация граничных условий и уравнений движения. При решении ряда задач динамики моря, связанных с изучением крупномасштабных динамических процессов, используются некоторые упрощения, допускающие применение более простых моделей для численных расчетов [9, 31, 34]. Одним из вариантов таких упрощений является отбрасывание нелинейных слагаемых в выражениях ускорения и использование системы уравнений движения в квазилинейном приближении в качестве исходной.

В серии численных экспериментов проведена оценка влияния учета нелинейных членов в уравнениях движения (1.1) – (1.4) на результаты расчетов. Для этого сравниваются варианты решений, полученные в результате моделирования с учетом (НЛ) и без учета нелинейности (Л). Для численного моделирования выражения (1.14) – (1.23) упрощаются. В них динамическая глубина заменяется значением глубины ( $\tilde{H} = H$ ), и адвективный оператор ( $A\Phi = 0$ ) полагается равным нулю. Таким образом, уравнения движения и уравнение неразрывности (1.15) – (1.17) имеют вид

$$\frac{\partial uH}{\partial t} - fvH + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + HF_x, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial vH}{\partial t} + fuH + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + HF_y, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0. \quad (2.10)$$

Граничные условия также упрощаются заменой динамической глубины на невозмущенную глубину бассейна ( $\tilde{H} = H$ ), но при этом остается нелинейность в выражениях, задающих напряжение трения на дне и свободной поверхности. Поэтому полученное решение будет квазилинейным. В дальнейшем для него будем употреблять

термин «линейное решение» (Л). Значение относительного отклонения решений для рассчитываемых параметров ( $\delta\Lambda$ ) будем находить по формуле

$$\delta\Lambda = 100 \cdot |\Lambda^{\text{Л}} - \Lambda^{\text{НЛ}}| / |\Lambda^{\text{НЛ}}|. \quad (2.11)$$

В табл. 2.14 приведены расчетные значения максимумов нагонов и сгонов в зависимости от наибольшей скорости ветра и относительная разница решений, полученных для нелинейной (НЛ) и линейной (Л) задач. Результаты моделирования для рассматриваемых случаев при  $W_{\text{ст}}^1 = 5$  м/с отличаются менее чем на 0,5 %, и поэтому в табл. 2.14 результаты (Л) решения не приводятся.

Т а б л и ц а 2.14

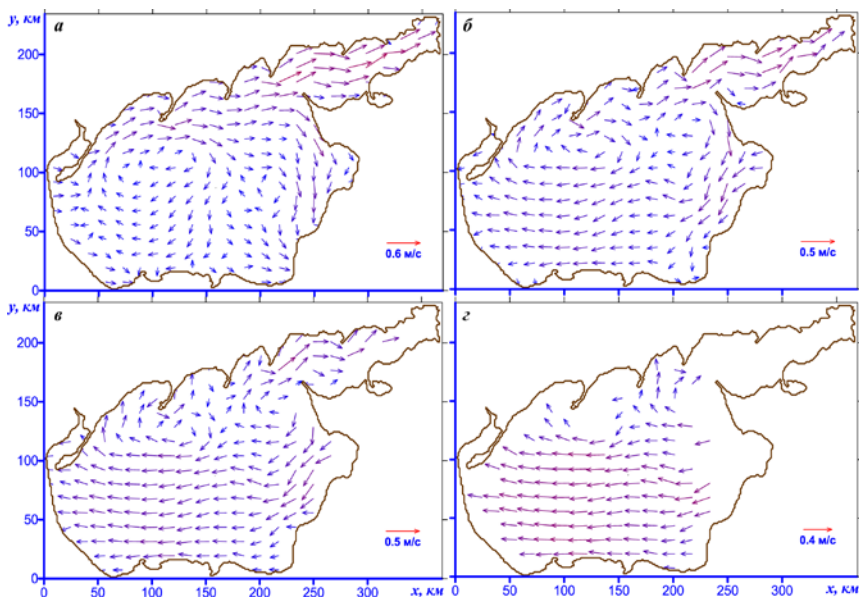
**Наибольшие отклонения уровня (см) на береговых станциях для четырех значений скорости постоянного ветра и отклонение результатов моделирования ( $\delta$ , %) при учете нелинейных слагаемых (НЛ) от результатов без их учета (Л)**

| Береговые станции | $W_{\text{ст}}^1$ |     | $W_{\text{ст}}^2$ |          | $W_{\text{ст}}^3$ |      |          | $W_{\text{ст}}^4$ |      |          |
|-------------------|-------------------|-----|-------------------|----------|-------------------|------|----------|-------------------|------|----------|
|                   | НЛ                | Л   | НЛ                | $\delta$ | Л                 | НЛ   | $\delta$ | Л                 | НЛ   | $\delta$ |
| Геническ          | –10               | –40 | –39               | 4,4      | –120              | –104 | 14,5     | –266              | –210 | 26,5     |
| Бердянск          | –34               | –14 | –13               | 4,9      | –42               | –36  | 18,3     | –95               | –68  | 39,9     |
| Мариуполь         | 8                 | 30  | 29                | 2,3      | 83                | 70   | 18,0     | 177               | 128  | 38,4     |
| Таганрог          | 17                | 63  | 60                | 5,1      | 174               | 142  | 22,9     | 374               | 254  | 47,0     |
| Ейск              | 10                | 39  | 38                | 3,9      | 109               | 92   | 20,5     | 239               | 170  | 40,6     |
| Прим.-А.          | 9                 | 36  | 34                | 6,8      | 110               | 91   | 19,8     | 248               | 179  | 38,5     |
| Темрюк            | 5                 | 22  | 21                | 7,0      | 68                | 56   | 20,7     | 154               | 109  | 42,0     |
| Опасное           | 3                 | 13  | 12                | 5,9      | 39                | 32   | 21,3     | 89                | 60   | 48,0     |
| Мысовое           | –5                | –20 | –22               | 3,4      | –55               | –52  | 5,8      | –19               | –96  | 23,3     |

Из анализа данных, приведенных в табл. 2.14, следует, что ветер западного направления генерирует нагоны и сгоны, величина которых зависит от его максимальной скорости. Наибольшие нагоны для ветра со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с отмечаются в одном и том же

пункте  $A_4$  (Таганрог) и составляют для линейного решения 17 см ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ); 63 см ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ); 174 см ( $\mathbf{W}_{st}^3$ ) и 374 см ( $\mathbf{W}_{st}^4$ ), для нелинейного – 17 см ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ); 60 см ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ); 142 см ( $\mathbf{W}_{st}^3$ ) и 254 см ( $\mathbf{W}_{st}^4$ ). Отметим, что наибольшие значения  $\delta\zeta$  (3,50) равняются 1,89 ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ); 7,0 ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ); 22,9 ( $\mathbf{W}_{st}^3$ ) и 48 % ( $\mathbf{W}_{st}^4$ ). Отсюда следует, что изменения решений становятся большими при больших максимальных скоростях ветра. Таким образом, отклонения решений задачи о максимальных сгонах и нагонах, полученные в Л и НЛ случаях, не превышают 7 % только при  $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$  м/с и  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$  м/с.

Перейдем теперь к рассмотрению особенностей трехмерной структуры течений в Азовском море в зависимости от способов моделирования. На рис. 2.14 представлены векторы скоростей течений на горизонтах 1, 3, 5 и 10 м в установившемся режиме, полученные при нелинейном моделировании.



**Рис. 2.14.** Поля скорости течений (м/с) в установившемся режиме на глубине 1 м (а), 3 м (б), 5 м (в) и 8 м (г) при западном ветре скоростью 15 м/с

Как показывает анализ приведенных полей, главной особенностью циркуляции вод Азовского моря является существование компенсационных противотечений в нижних слоях. Так, в поверхностном слое (0–1 м) течения направлены в основном по ветру (рис. 2.14, *а*), а небольшие отклонения от направления ветра в пределах 30–45° имеют место в районах мысов и заливов. Начиная с глубины 3 м (рис. 2.14, *б*) течения отклоняются на 90° и более от направления ветра. В слое 5–10 м (рис. 2.14, *в* и *г*) в центральной части акватории наблюдается хорошо выраженное компенсационное течение, направленное против ветра. Как показал анализ расчетов, время формирования противотечений в бассейне составляет 10–12 ч.

В табл. 2.15 приведены максимумы скоростей ветровых течений для различных значений максимальной скорости ветра и отклонения результатов, полученные по соотношению (2.15). Из приведенных данных следует, что при больших максимальных скоростях ветра становятся большими отклонения решений. Получено, что наибольшие значения относительных отклонений максимумов скоростей течений составляют: 6,25 ( $W_{st}^1$ ); 32,7 ( $W_{st}^2$ ); 72,8 ( $W_{st}^3$ ) и 122 % ( $W_{st}^4$ ).

Т а б л и ц а 2.15

**Максимумы скорости течений (см/с) на различной глубине моря для четырех значений скорости постоянного ветра и отклонение результатов моделирования ( $\delta$ , %) при учете нелинейных слагаемых (НЛ) от результатов без их учета (Л)**

| Глубина,<br>м | $W_{st}^1$ |    |          | $W_{st}^2$ |    |          | $W_{st}^3$ |     |          | $W_{st}^4$ |     |          |
|---------------|------------|----|----------|------------|----|----------|------------|-----|----------|------------|-----|----------|
|               | Л          | НЛ | $\delta$ | Л          | НЛ | $\delta$ | Л          | НЛ  | $\delta$ | Л          | НЛ  | $\delta$ |
| 0             | 17         | 16 | 6,3      | 65         | 49 | 32,7     | 183        | 106 | 72,8     | 394        | 177 | 122      |
| 3             | 14         | 13 | 7,7      | 51         | 44 | 15,9     | 144        | 97  | 48,3     | 308        | 164 | 88       |
| 5             | 12         | 12 | 0,8      | 42         | 41 | 2,4      | 114        | 91  | 25,6     | 240        | 154 | 56       |
| 10            | 9          | 9  | 0,3      | 22         | 29 | 24,1     | 42         | 64  | 34,6     | 65         | 109 | 40       |

Следовательно, решение, полученное без учета нелинейных членов в уравнениях движения для максимальной скорости ветра,

превышающей 10 м/с, отличается от решения с их учетом более чем на 33 %. При исследовании стационарных движений в бассейне установлено, что под действием постоянного ветра в четыре раза большей скорости (5 и 20 м/с) максимальные нагоны увеличиваются в 15 раз (0,17 и 2,54 м), максимальные сгоны возрастают в 20 раз (0,1 и 2,1 м), максимальные скорости установившихся течений увеличиваются в 12 раз (0,16 и 1,17 м/с).

Следующий ряд численных экспериментов с использованием нелинейной модели (НЛ) проведен с целью получения оценки чувствительности модели к изменению размеров шагов по пространственным и временным координатам. Для этого сравним результаты моделирования с шагами интегрирования  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta t$  (I) и  $2\Delta x$ ,  $2\Delta y$ ,  $2\Delta t$  (II) при решении задачи о сгонно-нагонных явлениях для тех же четырех значений скорости ветра (табл. 2.16).

Т а б л и ц а 2.16

**Наибольшие отклонения уровня (см) для четырех значений скорости постоянного ветра и отклонения результатов ( $\delta$ , %) в зависимости от  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta t$**

| Береговые станции | $\mathbf{W}_{st}^1$ |     |          | $\mathbf{W}_{st}^2$ |     |          | $\mathbf{W}_{st}^3$ |     |          | $\mathbf{W}_{st}^4$ |      |          |
|-------------------|---------------------|-----|----------|---------------------|-----|----------|---------------------|-----|----------|---------------------|------|----------|
|                   | I                   | II  | $\delta$ | I                   | II  | $\delta$ | I                   | II  | $\delta$ | I                   | II   | $\delta$ |
| Геническ          | -10                 | -9  | 5        | -39                 | -37 | 5        | -104                | -93 | 11       | -210                | -186 | 11       |
| Бердянск          | -34                 | -31 | 8        | -13                 | -12 | 10       | -36                 | -33 | 10       | -68                 | -62  | 9        |
| Мариуполь         | 8                   | 7   | 10       | 29                  | 26  | 10       | 70                  | 64  | 8        | 128                 | 118  | 8        |
| Таганрог          | 17                  | 16  | 4        | 60                  | 59  | 2        | 142                 | 141 | 0        | 254                 | 253  | 0        |
| Ейск              | 10                  | 9   | 8        | 38                  | 34  | 11       | 92                  | 81  | 12       | 170                 | 156  | 8        |
| Прим.-А.          | 9                   | 8   | 11       | 34                  | 30  | 12       | 91                  | 82  | 10       | 179                 | 161  | 10       |
| Темрюк            | 5                   | 4   | 11       | 21                  | 20  | 5        | 56                  | 55  | 1        | 109                 | 108  | 1        |
| Опасное           | 3                   | 3   | 0        | 12                  | 11  | 8        | 32                  | 28  | 11       | 60                  | 54   | 9        |
| Мысовое           | -5                  | -5  | 0        | -22                 | -20 | 11       | -52                 | -49 | 6        | -96                 | -86  | 10       |

Проанализируем полученные значения максимумов нагонов и сгонов на береговых станциях в зависимости от  $\mathbf{W}_{st}^k$  ( $k=1,\dots,4$ ) и отклонения результатов при различных шагах интегрирования.

Из анализа данных, приведенных в табл. 2.16, следует, что в обоих случаях максимумы нагонов и сгонов тем больше, чем больше скорость ветра.

Максимальные отклонения при расчете нагонов ( $\delta\zeta$ ) для  $\mathbf{W}_{st}^1$  имеют место в  $A_6$  (11,1 %); для  $\mathbf{W}_{st}^2$  также в  $A_6$  (11,8 %); для  $\mathbf{W}_{st}^3$  в  $A_8$  (11,4 %) и для  $\mathbf{W}_{st}^4$  в  $A_8$  (9,4 %). Для найденных сгонов наибольшие отклонения при  $\mathbf{W}_{st}^1$  отмечаются в  $A_3$  (8,3 %); при  $\mathbf{W}_{st}^2$  в  $A_9$  (10,5 %); при  $\mathbf{W}_{st}^3$  – в  $A_1$  (10,7 %) и при  $\mathbf{W}_{st}^4$  – в  $A_1$  (11,3 %). При решении задачи о сгонно-нагонных явлениях с шагами интегрирования  $\Delta x, \Delta y, \Delta t$  и  $2\Delta x, 2\Delta y, 2\Delta t$  установлено, что отклонения решений не превышают 12 %. Отсюда следует, что можно считать выбранные шаги по пространственным и временным координатам оптимальными для численных расчетов в бассейне Азовского моря.

### **§ 2.3. Пространственно-временная эволюция загрязнений, вызываемая стационарными течениями и переменным ветром**

Азовское море – самое мелкое море в мире с очень небольшой массой воды относительно площади его акватории. Оно имеет очень чувствительную к всевозможным загрязнениям экосистему [84, 85, 91, 92, 98]. Основными причинами ухудшения экологического состояния этого бассейна являются: сброс загрязненных сточных вод предприятий, приморских городов и других населенных пунктов, вынос загрязняющих веществ речным стоком, смыв дождевым стоком в море биогенных веществ с сельскохозяйственных полей.

По данным работ [41, 65, 110, 111, 141], наиболее тяжелые последствия в Азово-Черноморском бассейне вызываются катастрофами и авариями, связанными с разливом нефтепродуктов, которые привели к росту загрязнений фенолами в 15–20 раз, а в отдельных районах в 37 раз в сравнении с 1961 г.

Для ликвидации последствий выбросов загрязнений необходимо знать скорость распространения примеси в различных частях морской акватории, а также направление переноса и формирование полей концентрации примеси. Решение задачи распространения примеси в мелком море требует знания ветровых условий над ним и скорости течений, которые для различных синоптических ситуаций

могут быть получены на основании результатов моделирования с использованием трехмерной гидродинамической модели.

### 2.3.1. Анализ трансформации полей примеси под действием переменного ветра при отсутствии стационарных течений

Имеется ряд работ по исследованию эволюции примеси в Азовском [75, 109, 119, 122, 136, 137] и Черном морях [41, 72, 103]. Генератором движения водной среды в них принимался либо постоянный, либо усредненный на определенных промежутках времени ветер.

Уравнения, граничные и начальные условия расчета концентрации примеси. Для решения задачи о переносе и рассеивании примеси система уравнений движения жидкости (1.1) – (1.4) дополняется трехмерным уравнением эволюции концентрации  $C(x, y, z, t)$ . Полагаем, что области загрязнения состоят из частиц одного типа, тогда уравнение переноса и диффузии имеет вид [142, 157]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (2.12)$$

Здесь  $A_H$  – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии;  $K_H$  – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии. К граничным условиям на свободной поверхности добавляется условие отсутствия потока примеси

$$\left( K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0. \quad (2.13)$$

На боковых границах выполняются условия прилипания [63] и отсутствия потока в направлении внешней нормали. В придонном слое к динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки  $S$  и дно бассейна:

$$\left( A_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_S = 0, \quad \left( K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=-H} = 0 \quad (2.14)$$

Загрязнение морской воды происходит после установления стационарных движений жидкости в море. Из работ [57, 58] известно, что это время тем больше, чем больше скорость действующего ветра. В связи с этим во всех численных экспериментах время поступления загрязнения ( $t_0 = 48$  ч) наступает при наибольшем значении скорости ветра. При этом начальная область загрязнения для всех рассматриваемых далее видов атмосферных возмущений расположена в поверхностном слое:

$$C_0(x, y, z, t_0) = \begin{cases} 1, & r \leq R, \quad 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, \quad z < 0; \quad r \leq R, \quad z < -z_1, \end{cases}, \quad (2.15)$$

где  $z_1$  – толщина этого слоя;  $R$  – радиус области загрязнения;  $(x_0, y_0)$  – центр возмущения;  $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  – расстояние от центра до точки, в которой вычисляется концентрация.

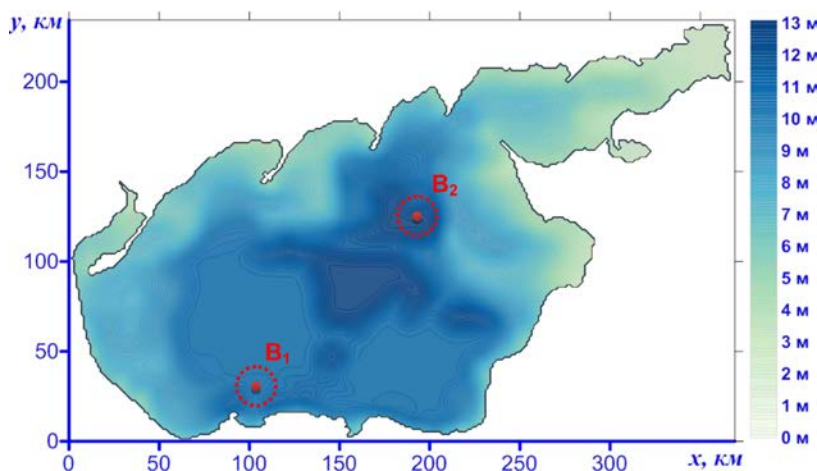
В качестве параметров, характеризующих эволюцию пассивной примеси, выбраны время рассеивания примеси ( $t_d$ ), коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах ( $K_{\max}$ ) и соответствующий этому момент времени ( $t_{\max}$ ). При этом  $K_{\max} = S_{\max}/S_0$ , где  $S_0$  – начальная площадь области загрязнения в поверхностном слое,  $S_{\max}$  – наибольшее значение этой площади на рассматриваемом горизонте в процессе трансформации примеси.

Считаем загрязнение рассеявшимся при условии, что концентрация примеси примет значение менее 2,5 % от первоначальной ( $C \leq C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$ ). Для расчета площади областей загрязнений вследствие процессов адвекции и диффузии были выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии:  $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  [2, 27, 114].

Выброс загрязнения происходит в момент времени  $t = \tilde{t}$  в виде пятна (2.15), занимающего на горизонте  $z = z_1$  площадь  $S_0$ , где концентрация примеси равна единице. Места выброса загрязнений

показаны на рис. 2.15:  $B_1$  – в районе мыса Казантип и  $B_2$  – в открытой части моря над самой глубоководной его частью ( $H = 12$  м).

Скорость и направление переноса примеси в месте выброса определяются течениями, вызываемыми различными гидрометеорологическими условиями. Трансформация области загрязнения изучается при условии отсутствия ветра над Азовским морем и при наличии переменного по времени ветра. Для численного моделирования использовались характерные поля нестационарного ветра [9, 20–22, 108], скорость которого задается соотношением (2.3).



**Рис. 2.15.** Рельеф дна Азовского моря и положение пунктов загрязнения

В *первой* серии численных экспериментов оценивается влияние наибольшей скорости переменного по времени и однородного по пространству западного ветра на изменение концентрации области загрязнения. Глубина моря в районе освоения газовых месторождений ( $B_1$ ) составляет 10 м. Центр выброса имеет координаты  $x_0 = 110$  км,  $y_0 = 45$  км, радиус пятна примеси принимаем равным 6 км.

Проанализируем, как изменяется площадь загрязнения с течением времени на горизонтах:  $z = 0$ ,  $z = -H/2 = h_1$ ,  $z = -H/2 + z_2 = h_2$ . Для этого введем безразмерную величину  $K_{\max}$ , равную отношению максимальной площади ( $S_{\max}$ ), охватываемой изолинией

концентрации примеси  $C_d$ , в момент времени  $t = t_{\max}$  к площади первоначального загрязнения ( $S_0$ )

$$K_{\max} = S_{\max}/S_0. \quad (2.16)$$

Вначале рассмотрим особенности трансформации загрязнения, когда ветер над морем отсутствует. В табл. 2.17 приведены максимальные значения коэффициента  $K_{\max}$  и соответствующие им моменты времени ( $t = t_{\max}$ ) на различных глубинах моря для четырех значений максимальной скорости ветра. Также в таблице даны моменты времени ( $t = t_d$ ), при которых значение максимума концентрации на тех же глубинах становится равным  $C_d$ .

Из анализа данных верхней части табл. 2.17 следует, что на свободной поверхности при отсутствии ветра ( $\mathbf{W} = 0$ ) наибольшая площадь загрязнения ( $K_{\max} = 1,11$ ) имеет место при  $t_{\max} = 6$  ч 31 мин. Время полного рассеяния примеси здесь составляет 21 ч 10 мин. На глубину  $z = h_1$  загрязнение проникает спустя 3 ч после его выброса на поверхность. Далее площадь загрязнения увеличивается и при  $t_{\max} = 15$  ч 08 мин становится максимальной ( $K_{\max} = 1,3$ ).

Полное рассеивание загрязнения на этой глубине происходит в 42 ч 07 мин. В придонный слой ( $z = h_2$ ) загрязнение доходит за 16 ч. Наибольшее отношение (1,03) площади загрязнения на этой глубине отмечается в  $t_{\max} = 27$  ч 11 мин. Через 57 ч 00 мин концентрация примеси становится равной  $C_d$ . Следовательно, при отсутствии ветра наибольшая площадь загрязнения имеет место на горизонте  $z = -5$  м, а наименьшая – у дна. Период времени, за который отношение  $S(t)/S_0$  становится максимальным, увеличивается с глубиной. Также с глубиной увеличивается время полного рассеяния загрязнения.

Рассмотрим теперь, как влияет переменный ветер западного направления, действующий над морем, на формирование и изменение областей загрязнения. Расчеты проведены для ветра, заданного соотношением (2.25), длительностью действия 18 ч и со значениями скорости  $\mathbf{W}_{st}^2$ ,  $\mathbf{W}_{st}^3$  и  $\mathbf{W}_{st}^4$ .

Из нижней части табл. 2.17 видно, что на свободной поверхности с увеличением максимальной скорости ветра площадь загрязнения увеличивается, а время достижения ( $t_{\max}$ ) наибольшего распространения примеси уменьшается.

Т а б л и ц а 2.17

**Значения  $K_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ ) и время полного рассеивания примеси ( $t_d$ ) в пункте  $B_1$  на различных глубинах моря для четырех значений скорости ветра**

| Скорость ветра, м/с | Горизонт, м | $t_{\max}$  | $K_{\max}$ | $t_d$       |
|---------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| 0                   | 1           | 06 ч 31 мин | 1,11       | 21 ч 10 мин |
|                     | 5           | 15 ч 08 мин | 1,30       | 42 ч 07 мин |
|                     | 10          | 27 ч 11 мин | 1,03       | 57 ч 00 мин |
| 10                  | 1           | 07 ч 41 мин | 1,32       | 21 ч 40 мин |
|                     | 5           | 17 ч 13 мин | 1,36       | 43 ч 08 мин |
|                     | 10          | 33 ч 05 мин | 1,26       | 58 ч 11 мин |
| 15                  | 1           | 07 ч 15 мин | 1,36       | 22 ч 01 мин |
|                     | 5           | 17 ч 12 мин | 1,46       | 43 ч 45 мин |
|                     | 10          | 32 ч 06 мин | 1,29       | 61 ч 15 мин |
| 20                  | 1           | 06 ч 00 мин | 1,43       | 23 ч 01 мин |
|                     | 5           | 16 ч 58 мин | 1,58       | 44 ч 10 мин |
|                     | 10          | 31 ч 03 мин | 1,36       | 63 ч 15 мин |

Так, при  $\mathbf{W}_{st}^2$  максимальная площадь загрязнения ( $K_{\max} = 1,32$ ) отмечается в  $t_{\max} = 7$  ч 41 мин, при  $\mathbf{W}_{st}^3$  ( $K_{\max} = 1,36$ ) в 7 ч 15 мин и при  $U_3^0$  ( $K_{\max} = 1,43$ ) в  $t_{\max} = 6$  ч. Для указанных значений  $U_i^0$  ( $i = 1, 2, 3$ ) время полного рассеяния имеет место в 21 ч 40 мин, 22 ч 01 мин и 23 ч 01 мин соответственно и увеличивается с ростом максимальной скорости ветра. Время проникновения загрязнения на глубину  $z = h_1$  для значений  $\mathbf{W}_{st}$ , равных 10, 15 и 20 м/с, соответствует 3–4 ч после его выброса на поверхность. Далее на этой глубине площадь загрязнения увеличивается, становится максимальной и для рассматриваемых значений скорости составляет:  $K_{\max} = 1,36$  в 17 ч 13 мин ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ),  $K_{\max} = 1,46$  в 17 ч 12 мин ( $\mathbf{W}_{st}^3$ ) и  $K_{\max} = 1,58$  в 16 ч 58 мин ( $\mathbf{W}_{st}^4$ ). Полное рассеяние загрязнения ( $z = h_1$ ) с ростом

максимальной скорости ветра становится дольше:  $t_d = 43$  ч 08 мин,  $t_d = 43$  ч 45 мин и  $t_d = 44$  ч 10 мин соответственно.

На горизонт  $z = h_2$  примесь опускается через 14–15 ч после ее выброса на поверхность моря. Наибольшие значения  $K_{\max}$  на этой глубине (1,26, 1,29 и 1,36) отмечаются в моменты времени 33 ч 05 мин, 32 ч 06 мин и 31 ч 03 мин соответственно. Через 58 ч 11 мин, 61 ч 15 мин и 63 ч 15 мин концентрация примеси на этой глубине становится равной  $C_d$ .

Из анализа приведенных данных видно, что с увеличением максимальной скорости ветра в два раза (от  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$  м/с до  $\mathbf{W}_{st}^4 = 20$  м/с) на различных глубинах моря площадь загрязнения увеличивается в 1,1–1,2 раза. Период времени, за который область загрязнения становится максимальной, с ростом  $\mathbf{W}_{st}$  уменьшается (от 2 ч 02 мин до 1 мин). С увеличением максимальной скорости ветра время полного рассеяния загрязнения на различных глубинах возрастает (от 1 ч 21 мин до 5 ч 04 мин).

Отметим, что, как и в случае, когда ветра над морем нет, так и в случае действия ветра для каждого из рассматриваемых значений его максимальной скорости, наибольший коэффициент загрязнения наблюдается на горизонте  $z = h_1$ , а наименьший у дна ( $z = h_2$ ). Также с глубиной увеличивается время полного рассеяния загрязнения.

В этом же численном эксперименте проведем анализ изменения объема загрязнения с течением времени. Введем величину  $N_{\max}$ , равную отношению максимального объема ( $V_{\max}$ ), ограниченного поверхностью с концентрацией примеси  $C_d$  в момент времени  $t = t_{\max}$ , к объему первоначального загрязнения  $V_0$ , рассчитанному как произведение площади  $S_0$  на толщину слоя  $z_1$ :

$$N_{\max} = V_{\max}/V_0, \quad (2.17)$$

В табл. 2.18 приведены значения  $N_{\max}$ , соответствующие им моменты времени  $t = t_{\max}$  и значения времени полного рассеяния примеси ( $t = t_d$ ). Из анализа приведенных данных следует, что при отсутствии ветра ( $\mathbf{W} = 0$ ) максимальный объем загрязнения ( $N_{\max} = 10,99$ ) имеет место в  $t_{\max} = 17$  ч 48 мин, при  $\mathbf{W}_{st}^2$  ( $N_{\max} = 11,79$ ) в 17 ч 34 мин, при  $\mathbf{W}_{st}^3$  ( $N_{\max} = 12,47$ ) в 17 ч 18 мин, при  $\mathbf{W}_{st}^4$  ( $N_{\max} = 13,25$ ) в 17 ч 05 мин. Видно, что с увеличением  $\mathbf{W}_{st}^i$  ( $i = 2, 3, 4$ ) (от 0 до 20 м/с) объем максимальной области загрязнения

возрастает (до 20 %), а время его достижения уменьшается. Продолжительность времени полного рассеяния  $t = t_d$  становится дольше (57 ч 53 мин, 58 ч 41 мин, 61 ч 37 мин, 63 ч 15 мин).

Т а б л и ц а 2.18

**Значения  $N_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ ) и время полного рассеивания примеси ( $t_d$ ) в пункте  $B_1$  для четырех значений скорости ветра**

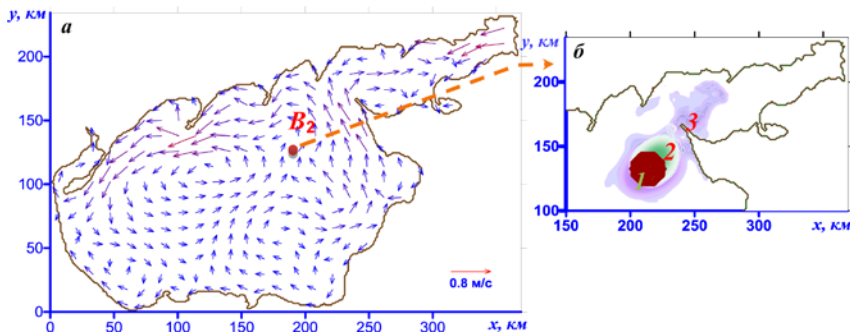
| Скорость ветра,<br>м/с | $t_{\max}$  | $N_{\max}$ | $t_d$       |
|------------------------|-------------|------------|-------------|
| 0                      | 17 ч 48 мин | 10,99      | 57 ч 53 мин |
| 10                     | 17 ч 34 мин | 11,79      | 58 ч 41 мин |
| 15                     | 17 ч 18 мин | 12,47      | 61 ч 37 мин |
| 20                     | 17 ч 05 мин | 13,25      | 63 ч 15 мин |

*Второй* численный эксперимент выполнен для загрязнения, центром которого является пункт  $B_2$  ( $x_0 = 180$  км,  $y_0 = 120$  км). Глубина моря в этом районе максимальна для Азовского моря и составляет 12 м. Радиус пятна примеси принимается равным 9 км.

На рис. 2.16 представлена трансформация пятна примеси на поверхности моря в пункте  $B_2$  при западном ветре наибольшей скоростью 15 м/с.

Штриховой линией (линия 1) показана область первоначального загрязнения. Линия 2 соответствует 16 ч после начала действия ветра, когда имеют место наиболее интенсивные течения. Видно, что области с концентрацией 0,025 и более на свободной поверхности моря увеличиваются и вытягиваются по направлению ветра и генерируемых им течений. Распространение примеси происходит от центра выброса на восток, что свидетельствует о преобладающей роли адвекции в формировании поля примеси в мелком море. К 62 ч (линия 3) над акваторией моря ветра уже нет. На данном этапе пятно смещается в западном направлении, обратном направлению ветра, происходит сокращение площадей

загрязнения и уменьшение концентрации примеси, далее за счет горизонтальной диффузии область сходится в точку.



**Рис. 2.16.** Поле течений Азовского моря при  $t = 44$  ч (а) и границы областей загрязнения (с концентрацией 2,5 %) на горизонте 1 м (б): через 1 ч (1); через 16 ч (2); через 62 ч (3)

В табл. 2.19 приведены максимальные значения коэффициента  $K_{\max}$  и соответствующие им моменты времени ( $t = t_{\max}$ ) на различных глубинах моря для четырех значений наибольшей скорости ветра. Также даны моменты времени ( $t = t_d$ ), при которых значение максимума концентрации на тех же глубинах становится равным  $C_d$ .

Из верхней части табл. 2.19 следует, что при отсутствии ветра на свободной поверхности ( $z = 0$ ) происходит увеличение площади пятна до максимального значения за 6 ч 05 мин от начального момента времени, при этом  $K_{\max} = 1,11$ . Через 23 ч 12 мин загрязнение полностью рассеивается. На горизонт  $z = h_1$  примесь проникает через 3 ч с момента ее выброса. Затем на этой глубине площадь загрязнения увеличивается и в 19 ч 10 мин становится наибольшей ( $K_{\max} = 1,19$ ), а спустя 43 ч 06 мин примесь рассеивается. В придонном слое ( $z = h_2$ ) примесь оказывается спустя 17 ч. Наибольшая ( $K_{\max} = 1,07$ ) площадь загрязнения здесь отмечается при  $t_{\max} = 32$  ч 01 мин, а время рассеяния  $t_d = 62$  ч.

Т а б л и ц а 2.19

**Значения  $K_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ ) и время полного рассеивания примеси ( $t_d$ ) в пункте  $B_2$  на различных горизонтах для четырех значений скорости ветра**

| Скорость ветра,<br>м/с | Горизонт,<br>м | $t_{\max}$  | $K_{\max}$ | $t_d$       |
|------------------------|----------------|-------------|------------|-------------|
| 0                      | 1              | 6 ч 05 мин  | 1,11       | 23 ч 12 мин |
|                        | 5              | 19 ч 10 мин | 1,19       | 43 ч 06 мин |
|                        | 10             | 32 ч 01 мин | 1,07       | 62 ч 07 мин |
| 10                     | 1              | 8 ч 03 мин  | 1,24       | 24 ч 02 мин |
|                        | 5              | 21 ч 02 мин | 1,32       | 44 ч 13 мин |
|                        | 10             | 36 ч 15 мин | 1,18       | 65 ч 04 мин |
| 15                     | 1              | 7 ч 07 мин  | 1,30       | 24 ч 33 мин |
|                        | 5              | 18 ч 05 мин | 1,35       | 46 ч 07 мин |
|                        | 10             | 34 ч 12 мин | 1,21       | 68 ч 15 мин |
| 20                     | 1              | 6 ч 13 мин  | 1,36       | 25 ч 04 мин |
|                        | 5              | 17 ч 01 мин | 1,39       | 47 ч 07 мин |
|                        | 10             | 31 ч 07 мин | 1,25       | 70 ч 09 мин |

Таким образом, аналогично предыдущему численному эксперименту получили, что при отсутствии ветра время достижения максимальной площади загрязнения и время полного его рассеивания увеличиваются с глубиной. Наибольшая площадь области загрязнения имеет место на горизонте  $z = h_1$ , а наименьшая – у дна.

Анализируя данные, приведенные в нижней части табл. 2.19, отмечаем, что на свободной поверхности при  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$  м/с максимальная площадь загрязнения ( $K_{\max} = 1,24$ ) имеет место в 8 ч 03 мин, при  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  м/с ( $K_{\max} = 1,30$ ) в 7 ч 07 мин и при  $\mathbf{W}_{st}^4 = 20$  м/с ( $K_{\max} = 1,36$ ) в 6 ч 13 мин. Для рассматриваемых значений максимальной скорости ветра площадь, охватываемая изолинией концентрации примеси  $2,5 \cdot 10^{-2}$  на поверхности, становится равной нулю спустя 24 ч 02 мин, 24 ч 33 мин и 25 ч 04 мин.

Время проникновения загрязнения на горизонт 6 м при различных максимальных скоростях ветра – по прошествии 3–3,5 ч после его выброса на поверхность. Затем площадь загрязнения на этой

глубине увеличивается до максимума. Максимальное значение  $K_{\max}$  составляет при этом 1,32 в 21 ч 02 мин ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^2$ ), 1,35 в 18 ч 05 мин ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^3$ ) и 1,39 в 17 ч 01 мин ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^4$ ). Полное рассеивание загрязнения для указанных значений скорости происходит соответственно через 44 ч 13 мин, 46 ч 07 мин и 47 ч 07 мин.

В придонный слой ( $z = h_2$ ) проникновение примеси происходит через 16–17 ч после ее выброса на поверхность моря. При рассматриваемых максимальных скоростях ветра наибольшие значения  $K_{\max}$  (1,18; 1,21 и 1,25) отмечаются в соответствующие моменты времени 36 ч 15 мин; 34 ч 12 мин и 31 ч 07 мин. Через 65 ч 04 мин, 68 15 мин и 70 ч 09 мин площадь загрязнения уменьшается до нуля.

Из анализа данных, приведенных в табл. 2.19, следует, что площадь распространения загрязнения на различных глубинах моря тем больше, чем больше максимальная скорость ветра. При отсутствии ветра область распространения загрязнения имеет наименьшую площадь. При увеличении скорости ветра в два раза (от 10 до 20 м/с) максимальная площадь концентрации примеси возрастает на 6 %. Время, за которое площадь загрязнения достигает максимума, уменьшается (от 4 ч 01 мин до 2 ч 57 мин) с ростом значения  $\mathbf{W}_{\text{st}}^i$  ( $i = 2, 3, 4$ ). На рассматриваемых глубинах моря период полного рассеяния загрязнения увеличивается (от 31 мин до 5 ч 05 мин) при увеличении максимальной скорости ветра. При рассматриваемых значениях  $\mathbf{W}_{\text{st}}^k$  ( $k = 2, 3, 4$ ) наибольший коэффициент отношения площадей загрязнения наблюдается при  $z = h_1$ , а наименьший — в придонном слое.

В табл. 2.20 приведены максимумы значений  $N_{\max}$  и соответствующие им моменты времени ( $t_{\max}$ ). Также приведены значения периодов полного рассеивания загрязнения. Из анализа данных следует, что при отсутствии ветра ( $\mathbf{W} = 0$ ) максимальный объем загрязнения ( $N_{\max} = 10,51$ ) имеет место в 21 ч 14 мин, при  $\mathbf{W}_{\text{st}}^1$  ( $N_{\max} = 10,83$ ) в 21 ч 41 мин, при  $\mathbf{W}_{\text{st}}^2$  ( $N_{\max} = 11,08$ ) в 20 ч 16 мин, при  $\mathbf{W}_{\text{st}}^3$  ( $N_{\max} = 11,25$ ) в 19 ч 10 мин. Видно, что с увеличением максимума скорости ветра (от 0 до 20 м/с) объем области загрязнения возрастает (до 20 %), а время его достижения уменьшается. Продолжительность времени полного рассеяния  $t = t_d$  становится дольше (67 ч 46 мин, 68 ч 06 мин, 69 ч 32 мин, 70 ч 45 мин).

Согласно информации о состоянии морской и прибрежной экосистем, полученной в ходе морских экспедиций на НИС «Профессор

Панов» и «Денеб» ЮНЦ РАН за период 2003–2006 гг., была проведена оценка качества вод Азовского моря, выделены зоны экологического риска [84, 85, 98, 148]. Проведено экологическое картирование акватории Таганрогского залива и выявлено, что значительная часть экосистемы залива находится в нарушенном состоянии. Поэтому представляет интерес изучение влияния параметров ветра на распространение пассивной примеси, поступающей в различные районы Азовского моря.

Т а б л и ц а 2.20

**Значения  $N_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ ) и время полного рассеивания примеси ( $t_d$ ) в пункте  $B_2$  для четырех значений скорости ветра**

| Скорость ветра,<br>м/с | $t_{\max}$  | $N_{\max}$ | $t_d$       |
|------------------------|-------------|------------|-------------|
| 0                      | 21 ч 14 мин | 10,51      | 67 ч 46 мин |
| 10                     | 21 ч 41 мин | 10,83      | 68 ч 06 мин |
| 15                     | 20 ч 16 мин | 11,08      | 69 ч 32 мин |
| 20                     | 19 ч 10 мин | 11,25      | 70 ч 45 мин |

### 2.3.2. Исследование влияния фоновых стационарных течений на эволюцию загрязнений под действием переменного ветра

Исследование эволюции поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений. С использованием трехмерной нелинейной математической модели изучены процессы переноса и диффузии загрязняющих веществ в Азовском море при наличии стационарных течений. Даны оценки области применимости линейных приближений в уравнениях движения, а также выбора размера шагов интегрирования по пространственным координатам и времени при расчете максимальных значений площади и объема области загрязнения.

В качестве действующего ветра выбран западный ветер, изменение по времени составляющей скорости ветра ( $W_x$ ) задается соотношением (2.2). Выброс примеси происходит на свободной поверхности

в момент времени ( $t = t_1$ ) выхода течений, генерируемых стационарным ветром, на установившийся режим. В начальный момент времени область загрязнения имеет вид пятна радиусом 9 км, занимающего площадь  $S_0$  с концентрацией равной единице. Место выброса загрязнения и пункт  $B_2$  (рис. 2.17) расположены над самой глубоководной ( $H = 12$  м) частью моря.

На основании результатов численных экспериментов оценим влияние линеаризации уравнений движения и граничных условий на величину максимальной площади распространения примеси и время ее полного рассеивания. Для этого сравним варианты решений, полученные в Л и НЛ случаях. Величину относительного отклонения решений ( $\delta\Lambda$ ) будем находить согласно (2.15). Изменение площади загрязнения с течением времени исследуется на горизонтах:  $z = 0$ ,  $z = h_1$ ,  $z = h_2$  с использованием соотношения (2.20). Для оценки наибольших значений объема области загрязнения вычисляется значение  $N_{\max}$  согласно (2.21).

В табл. 2.21 приведены максимальные значения коэффициентов  $K_{\max}$  и  $N_{\max}$  в соответствующие им моменты времени ( $t = t_{\max}$ ) на различных глубинах моря для четырех значений максимальной скорости ветра. Здесь приведены также отклонения результатов ( $\delta\Lambda$ ), полученные в Л и НЛ решениях; даны интервалы времени ( $t = t_d$ ) полного рассеивания примеси.

Из анализа приведенных данных видно, что при нелинейном моделировании с возрастанием максимальной скорости ветра в четыре раза (от  $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$  м/с до  $\mathbf{W}_{st}^4 = 20$  м/с) площадь загрязнения увеличивается в 1,1 раза, а при линейном 1,2–1,8 раза. Период времени, за который область загрязнения становится максимальной, с ростом  $\mathbf{W}_{st}$  уменьшается на различных глубинах (от 3 до 1 ч). С увеличением максимальной скорости ветра время полного рассеяния загрязнения на различных глубинах возрастает (от 1 до 8 ч). Относительное отклонение результатов линейного и нелинейного моделирования увеличивается с ростом максимальной скорости ветра. Так, при оценке коэффициента  $K_{\max}$  для рассматриваемых значений  $\mathbf{W}_{st}^k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ )  $\delta K_{\max}$  составляет с ростом  $\mathbf{W}_{st}$  соответственно: 0,9; 4,4; 8,3 и 16,7 % на свободной поверхности; 16,6; 42,8; 71,4 % на глубине  $z = h_1 - 6$ ; 13,4; 40,6; 62,1 % на глубине  $z = h_2 - 0,9$ . Отсюда видно, что отклонения значений  $K_{\max}$ , превышающие 17 %, имеют место при скорости ветра 15 и 20 м/с.

**Максимальные значения  $K_{\max}$ ,  $N_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ , ч), время полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) в пункте  $B_2$  для четырех значений скорости ветра и отклонение результатов моделирования ( $\delta$ , %) при учете нелинейных слагаемых (НЛ) от результатов без их учета Л)**

| Горизонт  | $K, N, t$  | $W_{st}^1$ |       |          | $W_{st}^2$ |       |          | $W_{st}^3$ |       |          | $W_{st}^4$ |       |          |
|-----------|------------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|
|           |            | Л          | НЛ    | $\delta$ | Л          | НЛ    | $\delta$ | Л          | НЛ    | $\delta$ | Л          | НЛ    | $\delta$ |
| $z = 0$   | $K_{\max}$ | 1,15       | 1,14  | 1        | 1,24       | 1,18  | 4        | 1,30       | 1,20  | 8        | 1,42       | 1,22  | 17       |
|           | $t_{\max}$ | 4,2        | 5,7   | 26       | 3,8        | 4,9   | 23       | 3,4        | 4,8   | 29       | 4,1        | 4,5   | 9        |
|           | $t_d$      | 17,1       | 17,3  | 1        | 17,5       | 18,3  | 5        | 16,6       | 18,5  | 11       | 12,9       | 18,1  | 28       |
| $z = h_1$ | $K_{\max}$ | 1,23       | 1,16  | 6        | 1,37       | 1,18  | 17       | 1,74       | 1,22  | 43       | 2,15       | 1,26  | 71       |
|           | $t_{\max}$ | 12,9       | 14,3  | 9        | 14,0       | 14,7  | 5        | 11,2       | 13,4  | 16       | 12,0       | 14,9  | 19       |
|           | $t_d$      | 36,0       | 36,7  | 2        | 32,3       | 37,6  | 14       | 25,4       | 34,0  | 25       | 21,1       | 36,0  | 41       |
| $z = h_2$ | $K_{\max}$ | 1,17       | 1,16  | 1        | 1,35       | 1,19  | 13       | 1,73       | 1,23  | 41       | 2,06       | 1,27  | 62       |
|           | $t_{\max}$ | 25,6       | 26,9  | 5        | 24,8       | 25,2  | 2        | 24,3       | 26,9  | 10       | 21,9       | 29,2  | 25       |
|           | $t_d$      | 52,0       | 53,4  | 3        | 49,5       | 55,2  | 10       | 39,6       | 58,1  | 32       | 33,9       | 61,3  | 45       |
|           | $N_{\max}$ | 11,29      | 11,06 | 2        | 11,81      | 11,07 | 7        | 13,59      | 11,14 | 22       | 15,43      | 11,23 | 37       |
|           | $t_{\max}$ | 14,3       | 15,5  | 8        | 13,7       | 14,2  | 3        | 14,6       | 15,7  | 7        | 13,1       | 14,3  | 8        |
|           | $t_d$      | 51,7       | 54,0  | 4        | 50,0       | 55,2  | 10       | 39,8       | 58,5  | 32       | 33,7       | 61,4  | 45       |

Для каждого из рассматриваемых значений максимальной скорости ветра наибольший коэффициент загрязнения наблюдается на горизонте  $z = h_1$ . Относительные отклонения моментов времени  $\delta t_{\max}$  на этой глубине составляют: 9,4 ( $W_{st}^1$ ); 5,0 ( $W_{st}^2$ ); 16,1 ( $W_{st}^3$ ) и 19,1 % ( $W_{st}^4$ ). Значительная разница результатов, полученных при линейном и нелинейном моделировании, имеет место для времени полного рассеяния примеси на глубине  $z = h_1$ . При этом относительные отклонения значений моментов времени ( $\delta t_d$ ), отвечающих условию  $K(t_d = 0)$ , на этой глубине составляют: 2,0 ( $W_{st}^1$ ); 14,1 ( $W_{st}^2$ );

25,4 ( $W_{st}^3$ ) и 41,4 % ( $W_{st}^4$ ). Следовательно, отклонение результатов линейного от нелинейного моделирования составляет менее 14 % в случае, когда максимальная скорость ветра не превышает 10 м/с.

Проанализируем далее относительные изменения объемов загрязнения при тех же скоростях ветра. Из табл. 2.21 следует, что  $\delta N_{max} = 2,1$  при  $W_{st}^1$ ;  $\delta N_{max} = 6,7$  при  $W_{st}^2$ ;  $\delta N_{max} = 21,9$  при  $W_{st}^3$  и  $\delta N_{max} = 37,4$  % при  $W_{st}^4$ . Время достижения максимального объема загрязнения ( $t_{max}$ ) отличается при линейном и нелинейном моделировании на 7,6 ( $W_{st}^1$ ); 2,9 ( $W_{st}^2$ ); 7,4 ( $W_{st}^3$ ) и 8,1 % ( $W_{st}^4$ ). Относительные отклонения моментов времени, отвечающих условию  $N(t_d) = 0$ , соответственно равны: 4,2 ( $W_{st}^1$ ); 9,5 ( $W_{st}^2$ ); 31,9 ( $W_{st}^3$ ) и 45,0 % ( $W_{st}^4$ ). Таким образом, для указанных параметров ( $N_{max}$ ,  $t_{max}$ ,  $t_d$ ) линеаризация модели правомерна при максимальных скоростях ветра, не превышающих 10 м/с.

В табл. 2.22 даны максимальные значения коэффициентов  $K_{max}$  и  $N_{max}$  с соответствующими моментами времени, периоды полного рассеяния загрязнений и относительная погрешность коэффициентов ( $\delta\Lambda = 100 \cdot |\Lambda^I - \Lambda^{II}|/|\Lambda^I|$ ), вычисленных с различным разрешением по горизонтальным координатам и времени  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta t$  и  $2\Delta x$ ,  $2\Delta y$ ,  $2\Delta t$ .

Из анализа приведенных данных следует, что для  $W_{st}^1$  значение  $\delta K_{max}$  на различных глубинах составляет 3,4 ( $z = 0$ ); 0,3 ( $z = h_1$ ) и 2,1 % ( $z = h_2$ ); для  $W_{st}^2$  – 5,1 ( $z = 0$ ); 4,2 ( $z = h_1$ ) и 9,2 % ( $z = h_2$ ); для  $W_{st}^3$  – 3,3 ( $z = 0$ ); 6,6 ( $z = h_1$ ) и 8,9 % ( $z = h_2$ ); для  $W_{st}^4$  – 0 ( $z = 0$ ); 1,7 ( $z = h_1$ ) и 4,2 % ( $z = h_2$ ). Таким образом, двукратное увеличение шагов интегрирования при расчетах максимальной площади области загрязнения приводит к менее чем 9 %-ному отклонению результатов и не зависит от скорости ветра.

Дадим оценку наибольшим погрешностям времени достижения максимумов площади загрязнения ( $\delta t_{max}$ ) на указанных горизонтах. Для рассматриваемых скоростей они составляют: 1,1 ( $W_{st}^1$ ); 1,7 ( $W_{st}^2$ ); 2,5 ( $W_{st}^3$ ) и 4,6 % ( $W_{st}^4$ ). Видно, что с ростом максимальной скорости ветра полученные значения  $\delta t_{max}$  увеличиваются, не превышая 5 %. Также погрешность менее 12 % имеет место при вычислении времени полного рассеяния площади загрязнения ( $\delta t_d$ ): 6,3 ( $W_{st}^1$ ); 7,7 ( $W_{st}^2$ ); 9,5 ( $W_{st}^3$ ) и 11,4 % ( $W_{st}^4$ ).

**Максимальные значения  $K_{\max}$ ,  $N_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ , ч), время полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) в пункте  $B_2$  для четырех значений скорости ветра и отклонения результатов моделирования ( $\delta$ , %) в зависимости от  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta t$**

| Горизонт  | $K$ ,<br>$N$ , $t$ | $W_{st}^1$ |       |          | $W_{st}^2$ |       |          | $W_{st}^3$ |       |          | $W_{st}^4$ |       |          |
|-----------|--------------------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|------------|-------|----------|
|           |                    | I          | II    | $\delta$ | I          | II    | $\delta$ | I          | II    | $\delta$ | I          | II    | $\delta$ |
| $z = 0$   | $K_{\max}$         | 1,14       | 1,18  | 3        | 1,18       | 1,12  | 5        | 1,20       | 1,16  | 3,3      | 1,22       | 1,18  | 0        |
|           | $t_{\max}$         | 5,7        | 5,7   | 0        | 4,9        | 4,9   | 1        | 4,8        | 4,7   | 2,1      | 4,5        | 4,3   | 4        |
|           | $t_d$              | 17,3       | 16,2  | 6        | 18,3       | 17,0  | 7        | 18,5       | 16,8  | 9,1      | 18,1       | 16,4  | 9        |
| $z = h_1$ | $K_{\max}$         | 1,16       | 1,14  | 0        | 1,18       | 1,13  | 4        | 1,22       | 1,14  | 6,6      | 1,26       | 1,16  | 2        |
|           | $t_{\max}$         | 14,3       | 14,1  | 1        | 14,7       | 14,5  | 1        | 13,4       | 13,1  | 2,5      | 14,9       | 14,4  | 4        |
|           | $t_d$              | 36,7       | 34,6  | 6        | 37,6       | 34,7  | 8        | 34,0       | 30,8  | 9,5      | 36,0       | 31,9  | 12       |
| $z = h_2$ | $K_{\max}$         | 1,16       | 1,14  | 2,1      | 1,19       | 1,08  | 9        | 1,23       | 1,12  | 8,9      | 1,27       | 1,14  | 4        |
|           | $t_{\max}$         | 26,9       | 26,8  | 1        | 25,5       | 25,2  | 1        | 26,9       | 26,2  | 2,5      | 29,2       | 27,9  | 5        |
|           | $t_d$              | 53,4       | 50,7  | 5        | 55,2       | 51,0  | 8        | 58,1       | 52,7  | 9,4      | 61,3       | 54,4  | 11       |
|           | $N_{\max}$         | 11,06      | 10,05 | 9        | 11,07      | 10,20 | 8        | 11,14      | 10,08 | 9,6      | 11,23      | 10,05 | 11       |
|           | $t_{\max}$         | 15,5       | 15,3  | 1        | 14,2       | 14,0  | 2        | 15,7       | 15,3  | 2,4      | 14,3       | 13,7  | 4        |
|           | $t_d$              | 54,0       | 50,1  | 7        | 55,2       | 51,3  | 7        | 58,1       | 51,9  | 10,6     | 61,4       | 53,8  | 12       |

Точность расчета максимального значения объема загрязнения ( $\delta N_{\max}$ ) для различных шагов по координатам составляет менее 2 % (при  $W_{st}^1 - 1,5$  %,  $W_{st}^2 - 1,8$  %,  $W_{st}^3 - 1,6$  %,  $W_{st}^4 - 1,3$  %). Относительные отклонения моментов времени ( $\delta t_{\max}$ ), отвечающих  $N_{\max}$  для рассматриваемых значений  $W_{st}^k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ), соответственно равны: 1,0; 1,7; 2,4 и 4,1 %. Для тех же значений максимальной скорости ветра величина отклонения ( $\delta t_d$ ) времени, за которое концентрация примеси по всему объему становится меньше  $C_d$ , составляет: 7,2; 7,1; 10,6 и 12,4 %. Следовательно, максимальные погрешности вычислений, допущенные при расчете указанных коэффициентов ( $K_{\max}$ ,  $N_{\max}$ ,  $t_{\max}$ ,  $t_d$ ), находятся в пределах от 5 до 12 %. Большие отклонения в численном моделировании с различными шагами по времени и координатами относятся ко времени полного рассеяния загрязнения.

Влияние нестационарного ветра на распространение примеси в Азовском море при наличии стационарных течений. На основании результатов моделирования исследуем влияние порывов нестационарного ветра различной скорости, возникающих в поле однородного стационарного ветра, на эволюцию областей загрязнений. С начального момента времени на водную поверхность действует постоянный ветер (2.2), генерирующий стационарные течения в море. Начиная с момента времени  $t = t_1$  в поле уже действующего стационарного ветра возникает переменный по времени ветер ( $\mathbf{W}_{\text{var}}$ ). Скорость приводного ветра ( $\mathbf{W}$ ), слагаемого из стационарной и нестационарной компонент, вычисляется согласно (2.1). Моделирование проведено для трех различных полей установившихся течений, вызванных действием постоянного ветра скоростью  $\mathbf{W}_{\text{st}}^1 = 5$ ,  $\mathbf{W}_{\text{st}}^2 = 10$ ,  $\mathbf{W}_{\text{st}}^3 = 15$  м/с и переменного ветра скоростью  $\mathbf{W}_{\text{var}} = 10$  м/с.

Для численных экспериментов районы расположения центров выбросов загрязнений были выбраны, исходя из оценки состояния экосистемы Азовского моря [42, 75, 86]. Они показаны на рис. 2.17, а:  $B_1$  – в районе Восточно-Казантипского газового месторождения;  $B_2$  – над самой глубоководной ( $H = 12$  м) частью моря;  $B_3$  – в Таганрогском заливе. Выброс загрязнений происходит на свободной поверхности в момент времени  $t = t_1$  в виде пятен радиусом 9 км. Для количественной оценки изменения площадей загрязнения с течением времени в поверхностном слое ( $z = 0$ ), в районе половины глубины бассейна  $z = h_1$  и в придонном слое ( $z = h_2$ ) используем коэффициент  $K_{\text{max}}$ , который рассчитываем по (2.38).

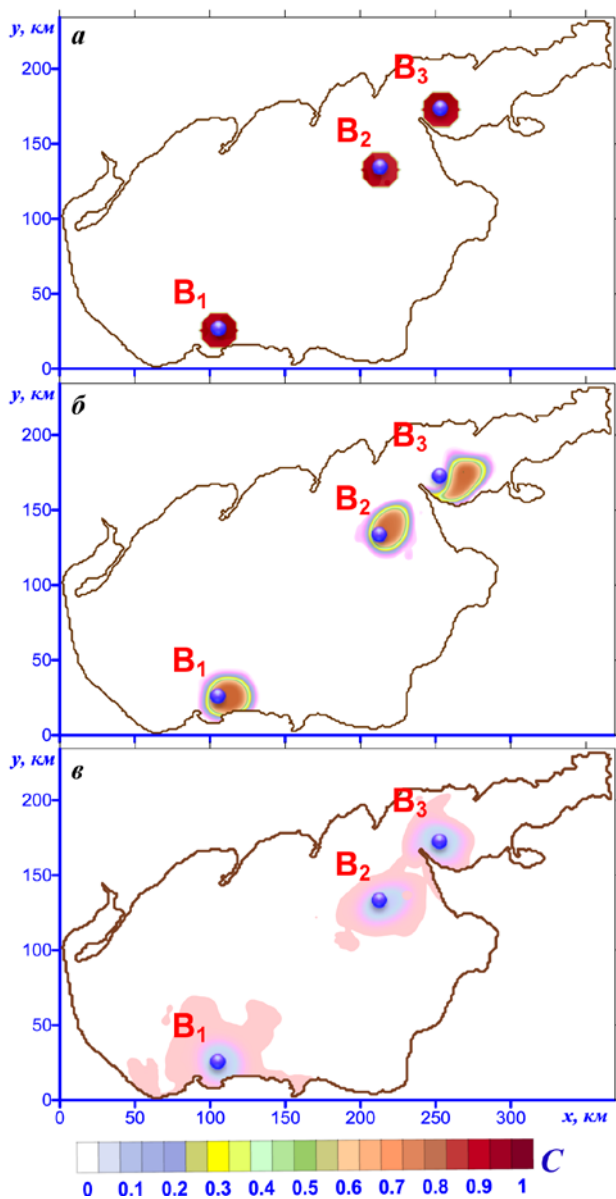
В табл. 2.23 приведены коэффициент максимального охвата области загрязнения, время его достижения ( $t_{\text{max}}$ , ч) и полного рассеяния ( $t_d$ , ч) примеси на разных глубинах моря для различных скоростей стационарных течений при наличии нестационарного ветра. Из анализа данных, приведенных в таблице 2.23, следует, что для района  $B_1$  максимальная площадь загрязнения имеет место при максимальном значении скорости стационарного ветра ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^3$ ).

**Параметры ( $K_{\max}$ ;  $t_{\max}$ , ч;  $t_d$ , ч) эволюции примеси на различных горизонтах Азовского моря при совместном действии постоянного и переменного ветров**

| Горизонт  | $K_{\max}$ ,<br>$t_{\max}$ , $t_d$ | $W_{st}^1 + W_{var}$ |       |       | $W_{st}^2 + W_{var}$ |       |       | $W_{st}^3 + W_{var}$ |       |       |
|-----------|------------------------------------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
|           |                                    | $B_1$                | $B_2$ | $B_3$ | $B_1$                | $B_2$ | $B_3$ | $B_1$                | $B_2$ | $B_3$ |
| $z = 0$   | $K_{\max}$                         | 1,22                 | 1,21  | 1,14  | 1,23                 | 1,22  | 1,15  | 1,25                 | 1,22  | 1,16  |
|           | $t_{\max}$                         | 10                   | 10    | 14    | 10                   | 10    | 14    | 11                   | 11    | 14    |
|           | $t_d$                              | 84                   | 74    | 60    | 84                   | 74    | 60    | 87                   | 74    | 60    |
| $z = h_1$ | $K_{\max}$                         | 1,24                 | 1,23  | 1,22  | 1,24                 | 1,24  | 1,22  | 1,27                 | 1,25  | 1,22  |
|           | $t_{\max}$                         | 32                   | 28    | 10    | 32                   | 28    | 10    | 34                   | 29    | 15    |
|           | $t_d$                              | 100                  | 84    | 6     | 101                  | 86    | 67    | 104                  | 89    | 70    |
| $z = h_2$ | $K_{\max}$                         | 1,31                 | 1,32  | 1,24  | 1,31                 | 1,32  | 1,24  | 1,33                 | 1,33  | 1,24  |
|           | $t_{\max}$                         | 28                   | 28    | 16    | 28                   | 28    | 16    | 35                   | 30    | 16    |
|           | $t_d$                              | 108                  | 90    | 76    | 108                  | 90    | 78    | 110                  | 92    | 79    |

Оценим влияние скорости стационарных течений и переменного ветра на трансформацию загрязнения в районе  $B_1$ , где осваиваются газовые месторождения. Глубина моря в этом районе 10 м. В пункте поступления примеси стационарные течения направлены в сторону действующего ветра, в которую переносятся примеси (рис. 2.17, б). Спустя 12 ч после прекращения действия нестационарного ветра наблюдается сокращение площадей загрязнения и уменьшение концентрации примеси (рис. 2.17, в). Так, на свободной поверхности  $K_{\max} = 1,25$  достигается через 11 ч после выброса примеси. При этом время ее полного рассеяния составляет 87 ч. На глубину  $z = -H/2$  загрязнение проникает спустя 2 ч после ее выброса на поверхность. Далее площадь загрязнения увеличивается и при  $t_d = 34$  ч становится максимальной ( $K_{\max} = 1,27$ ). Полное рассеяние загрязнения на этой глубине происходит при  $K_{\max} = 104$  ч.

В придонном слое ( $z = -H$ ) наибольший коэффициент (1,33) охвата области загрязнения отмечен при  $t_{\max} = 35$  ч, и спустя 110 ч от момента выброса примеси ее концентрация становится равной  $C_d$ .



**Рис. 2.17.** Трансформация областей загрязнений в различные моменты времени: стационарный режим  $t = t_0$  (*a*), при  $t = t_0 + 15$  ч (*б*), при  $t = t_0 + 30$  ч (*в*)

В районе выброса  $B_2$  ( $x_0 = 180$  км,  $y_0 = 120$  км) под действием нестационарного ветра перенос области загрязнения (рис. 2.17, б) также обусловлен направлением течений. После прекращения действия переменного ветра пятно смещается в западном направлении, обратном направлению ветра (рис. 2.17, в). Из анализа данных, приведенных в табл. 2,23, видно, что при  $W_{st}^3$  максимум площади, занятой загрязнением на поверхности, составляет 1,22 ( $t_{max} = 11$  ч), на глубине  $z = h_1$  – 1,25 ( $t_{max} = 29$  ч), в придонном слое – 1,33 ( $t_{max} = 33$  ч). Рассеяние примеси происходит через 92 ч после ее появления.

Глубина моря в районе выброса загрязнения, центром которого является пункт  $B_3$  ( $x_0 = 260$  км,  $y_0 = 170$  км), – наименьшая из рассматриваемых – равна 8 м. В Таганрогском заливе скорости установившихся течений наибольшие и в слое 0–1 м достигают 86 см/с. Рисунок 2.17, б соответствует 15 ч после начала действия нестационарного ветра, когда имеют место наиболее интенсивные течения. Видно, что области с концентрацией 0,025 и более на свободной поверхности увеличиваются и становятся вытянутыми вдоль ветра. Область загрязнения при этом перемещается на восток.

Согласно данным, приведенным в таблице 2.23, значения  $K_{max}$  для этого пункта наименьшие по сравнению с остальными: на поверхности  $K_{max} = 1,16$  (14 ч), на глубине  $z = h_1$   $K_{max} = 1,22$  (15 ч), в придонном слое  $K_{max} = 1,25$  (16 ч). Полное рассеяние происходит через 79 ч с момента выброса. Площадь распространения загрязнения зависит от скорости ветра, в результате действия которого течения выходят на установившийся режим. С ростом значения  $W_{st}$  становятся больше скорости течений в установившемся режиме, в связи с этим увеличиваются площадь области загрязнения и время ее полного рассеяния. Согласно приведенным данным, в районе Восточно-Казантипского газового месторождения ( $H = 10$  м) рассеивание примеси одного и того же объема происходит дольше, чем в центральной части моря ( $H = 12$  м) и Таганрогском заливе ( $H = 8$  м). Здесь также отмечается максимальная площадь распространения загрязнения. Наименьшие значения времени рассеивания и площади, охваченной загрязнением, имеют место для источника, расположенного в Таганрогском заливе.

## **§ 2.4. Положения экстремумов отклонений уровня и скорости течений, возникающих под действием постоянного ветра в открытой части Азовского моря**

Изучение колебаний уровня моря связано с научными и практическими задачами, включая строительство береговых гидротехнических сооружений, создание морских навигационных карт, прогноз наводнений, определение движения берегов. При решении некоторых прикладных проблем возникает необходимость определения положения экстремальных отклонений уровня по всей акватории Азовского моря. Представляет интерес установление тех районов моря, в которых скорости стационарных ветровых течений будут наибольшими.

В ряде работ, посвященных изучению течений и волнения в Азовском море, исследовался вопрос о максимальных сгонах и нагонах, имеющих место на ряде береговых станций, а также о наибольших значениях скорости возникающих течений. В [48] с использованием трехмерной нелинейной  $\sigma$ -координатной математической модели решена задача о сгонно-нагонных колебаниях в Азовском море при воздействии постоянного ветра, в [49] аналогичные исследования проведены для полей нестационарного ветра, в [47] – для возмущений, вызванных прохождением циклонов.

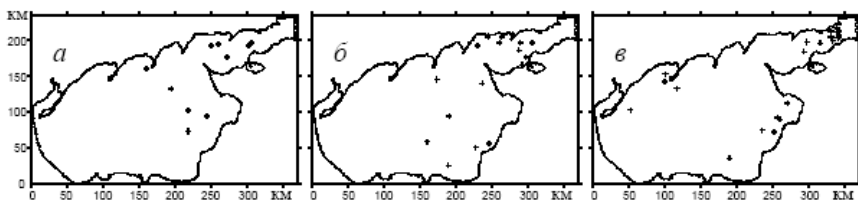
На основании анализа результатов численных экспериментов, проведенных с использованием указанной выше модели, установлены районы расположения наибольших изменений уровня моря и скорости стационарных течений, вызванных постоянным ветром в открытой части Азовского моря. Установившиеся движения в Азовском море формируются при нормальных условиях погоды. Эти условия характеризуются тем, что скорость ветра, достигнув определенного распределения над морем, продолжительное время мало меняется. В численных экспериментах при моделировании стационарных течений поле ветра над морем задается в виде однородного по пространству ветра, действующего над Азовским морем начиная с момента времени  $t = 0$ . Его скорость ( $\mathbf{W}_{st}$ ) первые 3 часа ( $0 < t \leq 3$  ч) нарастает со временем по линейному закону, достигает своего наибольшего значения и далее не меняется. Выход течений на установившийся режим осуществляется под действием постоянного западного ветра, скорость которого изменяется в пределах 5–15 м/с ( $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$ ,  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ ,  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  м/с). Момент времени выхода течений на установившейся режим ( $t = t_0$ ) определяем из условия,

что относительные изменения полной энергии, осредненной по объему моря на смежных шагах по времени, не превосходят 1 % [49].

Анализ опубликованных метеорологических данных [19] позволил выделить для района Азовского моря характерные типы погоды. Антициклонический тип погоды возникает в теплый период (апрель – октябрь), когда Азовское море оказывается в тыловой части антициклона, смещающегося с запада на восток, и характеризуется ветрами со скоростью более 8 м/с. В это время преобладают восточные и северо-восточные ветры.

Слабый циклонический тип погоды [17–19, 81] возникает 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 характеризуется слабыми и умеренными ветрами переменных направлений, облаками среднего и нижнего ярусов; эпизодическими слабыми осадками. Циклонический тип погоды возникает при прохождении над Черным и Азовским морями средиземноморских циклонов или циклонов, развивающихся на хорошо выраженных атмосферных фронтах севернее параллели  $50^\circ$  с. ш. Повторяемость его зимой и летом не превышает 15 %. Для этого типа погоды характерны ветры со скоростью 6–14 м/с вначале восточных, а затем южных и западных направлений. Западные ветры обычно бывают порывистыми и шквалистыми. Моделирование проводилось для наиболее продолжительного слабого циклонического типа погоды.

На рис. 2.18 представлены пункты, в которых отмечаются максимальные отклонения уровня в открытой части Азовского моря, вызываемые действием постоянных ветров различной скорости.

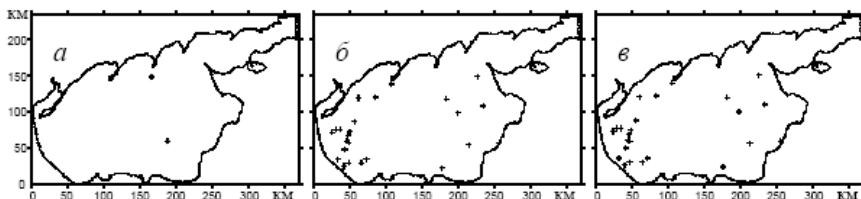


**Рис. 2.18.** Положения максимумов отклонений уровня в Азовском море под действием западного ветра скоростью 5 м/с (а); 10 м/с (б); 15 м/с (в)

Эти пункты на рисунках отмечались в течение всего расчетного периода (72 ч). Из рис. 2.18, а – в видно, что расположения максимумов при различных скоростях действующего ветра имеют как общие

черты (максимумы сосредоточены в восточной части акватории моря), так и различия. Отметим, что воздействие ветра больших скоростей приводит к смещению координат максимумов в сторону Таганрогского залива. Действие ветра со скоростью 15 м/с вызывает максимумы отклонений уровня и в западной части Азовского бассейна.

На рис. 2.19 приведены положения минимальных отклонений уровня Азовского моря с дискретностью 1 ч, вызываемых действием постоянного ветра при различных значениях скоростей. Отсюда видно, что наибольшие понижения уровня в основном имеют место в западной части моря. При больших скоростях постоянного ветра минимумы отклонений уровня наблюдаются и в восточной части моря.



**Рис. 2.19.** Положения минимумов отклонений уровня в Азовском море под действием западного ветра скоростью 5 м/с (а); 10 м/с (б); 15 м/с (в)

В табл. 2.24 приведены максимальные и минимальные значения отклонений уровня моря, время их достижения и соответствующие им координаты в зависимости от скорости ветра в течение всего расчетного периода. Данные в табл. 2.24 являются обобщением результатов, представленных на рис. 2.18 и 2.19.

Из анализа приведенных данных видно, что координаты максимумов и минимумов  $\zeta$  для рассмотренных значений скорости ветра изменяются незначительно. Различия состоят в величинах экстремальных отклонений уровня и времени их достижения. Из сравнения значений максимумов уровня следует, что они возрастают в 3,5 и 8,3 раза для значений  $W_{st}$ , больших в два и три раза (0,2 м при  $W_{st}^1$ ; 0,69 м при  $W_{st}^2$ ; 1,65 м при  $W_{st}^3$ ). Как видно из табл. 2.24, под действием ветра большей скорости достигаются и большие значения понижений уровня: -0,1 м при  $W_{st}^1$ ; -0,39 м при  $W_{st}^2$ ; -1,05 м при  $W_{st}^3$ . Анализ результатов расчетов показывает, что действие ветра со скоростями  $W_{st}^2$  и  $W_{st}^3$  (в два и три раза большими, чем  $W_{st}^1$ ) 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.

**Максимальные и минимальные значения отклонений ( $\zeta_{\min}$ )  
уровня моря, время их достижения ( $t_{\max}$ )  
и соответствующие им координаты ( $x_{\min}$ ,  $y_{\min}$ )**

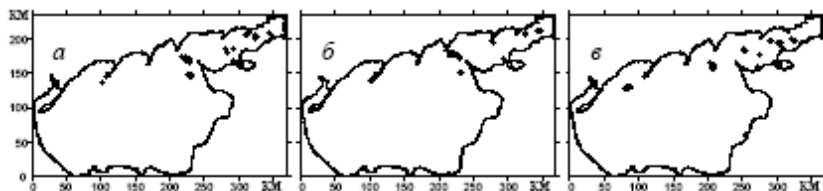
| Скорость<br>ветра,<br>м/с | $\zeta_{\max}$ ,<br>см | $t_{\max}$ ,<br>ч, мин | $x_{\max}$ ,<br>км | $y_{\max}$ ,<br>км | $\zeta_{\min}$ ,<br>см | $t_{\min}$ ,<br>ч, мин | $x_{\min}$ ,<br>км | $y_{\min}$ ,<br>км |
|---------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| 5                         | 20                     | 17.10                  | 367                | 220                | -10                    | 13.23                  | 4,02               | 95                 |
| 10                        | 69                     | 18.46                  | 368                | 218                | -39                    | 13.47                  | 4,02               | 107                |
| 15                        | 165                    | 19.48                  | 344                | 225                | -105                   | 14.09                  | 5,37               | 87                 |

По данным, приведенным в табл. 2.24, при сравнении изменения величины скорости ветра и времени достижения наибольших и наименьших значений  $\zeta$  получено, что это время больше для бóльших скоростей ветра. Так, разница во времени достижения  $\zeta_{\max}$  при  $W_{st}^1$  и  $W_{st}^3$  составляет 2 ч 38 мин, а разница во времени достижения  $\zeta_{\min}$  при тех же скоростях ветра – 46 мин. Таким образом, стационарный ветер в три раза большей скорости дольше формирует максимальный подъем уровня (на 14 %) и минимальное понижение уровня моря (на 4 %).

Сравним максимальные и минимальные значения  $\zeta$  в открытой части Азовского моря (табл. 2.24) с экстремальными значениями сгонов и нагонов, отмеченными в ряде пунктов его побережья. Наибольшие нагоны при значениях скорости ветра 5, 10 и 15 м/с отмечаются в Таганрогском заливе и составляют 0,17; 0,60 и 1,42 м соответственно. При тех же скоростях ветра в Азовском море достигаются значения  $\zeta_{\max}$ , равные 0,20; 0,69 и 1,65 м. Таким образом, максимальные повышения уровня в открытой части Азовского моря на 15, 13 и 14 % превышают нагоны на побережье. Аналогично, сравнивая наибольшие значения сгонов (Геническ) и  $\zeta_{\min}$ , отметим, что при рассматриваемых значениях скорости ветра сгон и максимальное понижение уровня практически совпадают.

В настоящее время прогнозы течений практически не составляются, причиной тому является недостаточное количество наблюдений, которые позволили бы проверить и уточнить расчеты скорости течений. Чтобы разрабатывать и использовать методы расчета и прогноза скорости морских течений в оперативной практике, необходимо хотя бы в нескольких отдельных точках моря проводить регулярные наблюдения за скоростью течений.

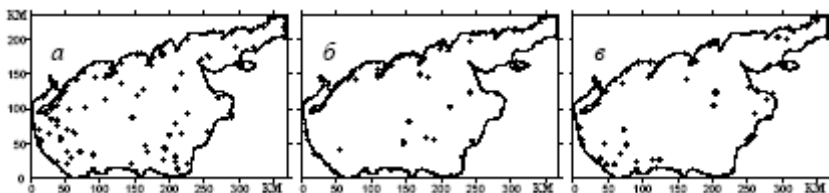
На рис. 2.20, 2.21 показаны районы, где отмечаются максимальные и нулевые значения скорости поверхностных течений в открытой части Азовского моря, вызываемых действием постоянного ветра при различных значениях скоростей.



**Рис. 2.20.** Положения максимумов скорости течений на горизонте 1 м под действием западного ветра скоростью 5 м/с (а); 10 м/с (б); 15 м/с (в)

Эти пункты на рисунках показаны с дискретностью 1 ч в течение всего расчетного периода (72 ч). Из рис. 2.20 видно, что при различных значениях скорости действующего ветра положение максимумов смещено в сторону Таганрогского залива. Как следует из рис. 2.21, положения нулевых значений скорости течений сильно разбросаны по акватории.

В табл. 2.25 приведены максимальные значения скорости течений на различных горизонтах, время их достижения и соответствующие им координаты в зависимости от скорости ветра в течение всего расчетного периода.



**Рис. 2.21.** Положения минимумов скорости течений на горизонте 1 м под действием западного ветра скоростью 5 м/с (а); 10 м/с (б); 15 м/с (в)

Из анализа данных, представленных в этой таблице, видно, что при увеличении скорости постоянного ветра в два и три раза скорость течений в поверхностном слое достигает значений 0,16; 0,49 и 1,06 м/с (возрастают соответственно в 4 и 6,6 раза). Такое же соотношение между значениями скорости течений для рассматриваемых  $W_{st}$  прослеживается и на других горизонтах. С глубиной происходит

уменьшение скорости течений, ее наименьшее значение отмечается в придонном слое.

Т а б л и ц а 2.25

**Максимальные значения скорости ( $|U|_{\max}$ ) течений на различных горизонтах моря, время их достижения ( $t_{\max}$ ) и соответствующие им координаты ( $x_{\min}$ ,  $y_{\min}$ ) для трех значений скорости ветра**

| Скорость<br>ветра,<br>м/с | Горизонт,<br>м | $ U _{\max}$ ,<br>см/с | $t_{\max}$ ,<br>ч. мин | $x_{\max}$ ,<br>км | $y_{\max}$ ,<br>км |
|---------------------------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| 5                         | 1              | 16                     | 8.00                   | 236                | 174                |
|                           | 3              | 13                     | 8.02                   | 236                | 174                |
|                           | 5              | 12                     | 8.22                   | 237                | 173                |
|                           | 10             | 08                     | 9.44                   | 235                | 173                |
| 10                        | 1              | 49                     | 8.35                   | 236                | 173                |
|                           | 3              | 44                     | 8.55                   | 236                | 173                |
|                           | 5              | 41                     | 8.26                   | 237                | 172                |
|                           | 10             | 29                     | 9.34                   | 237                | 172                |
| 15                        | 1              | 106                    | 9.45                   | 238                | 171                |
|                           | 3              | 97                     | 10.47                  | 238                | 172                |
|                           | 5              | 91                     | 11.19                  | 238                | 172                |
|                           | 10             | 64                     | 12.45                  | 238                | 172                |

Сравнивая координаты максимумов, отметим, что при разных значениях и глубины, и  $W_{st}$  их положение практически не меняется. Время достижения наибольших значений скорости течений увеличивается (на 4 и 18 %) под действием ветра с большей скоростью ( $W_{st}^2$  и  $W_{st}^3$  соответственно). Оценивая разницу во времени достижения максимумов скорости, видим, что под действием постоянного ветра с рассматриваемыми значениями скорости  $t_{\max}$  в поверхностном слое достигается на 18, 12 и 21 % раньше, чем в придонном слое. В результате численного моделирования циркуляции вод Азовского моря, вызванной действием постоянного ветра при различных значениях скоростей, установлены пункты в открытой части моря, в которых отмечаются максимальные значения отклонений уровня и наибольшие скорости течений. Получены оценки влияния скорости действующего постоянного ветра на время достижения наибольших подъемов и понижений уровня и максимальных значений скорости течений на различных горизонтах.

## Глава 3

### **Сгонно-нагонные явления, течения и трансформация загрязняющих веществ в Азовском море, вызванные движущимися циклонами**

Одной из задач современной океанологии является изучение протекающих в морских бассейнах динамических процессов и прогнозирование их будущих изменений в связи с глобальным потеплением и растущим антропогенным воздействием. При этом особое внимание уделяется анализу наиболее вероятных сценариев распространения загрязнений, эволюция которых происходит в основном за счет переноса их течениями. В Азовском море, сравнительно небольшом и мелководном бассейне, величина и направление течений зависят в основном от прямого воздействия ветра и рельефа дна. Поэтому представляет интерес исследование влияния атмосферных аномалий типа циклонов на циркуляцию вод и распространение загрязнений в этом бассейне. Численному моделированию динамики вод Азовского моря посвящен ряд работ, где с использованием трехмерной нелинейной  $\sigma$ -координатной модели [47, 48] изучены основные характеристики ветровых течений и сгонно-нагонных процессов для типовых стационарных полей ветра [49] и для нестационарного и однородного по пространству ветра [56, 23, 90, 94, 99, 134, 138]. В [52] также выполнен анализ времени полного рассеивания примеси, максимального района загрязнения и его трансформации при наличии стационарных течений, в [54, 55, 58] исследованы аналогичные процессы, вызванные действием переменного ветра.

В данной главе с применением трехмерной нелинейной математической модели изучается влияние циклонических возмущений в поле среднегодового ветра на характеристики динамических процессов и особенности трансформации пассивной примеси в Азовском море. Приведены результаты численных расчетов для различных скоростей и направлений перемещения циклонов. Выполнено сравнение отклонений уровня моря, полученных методом численного моделирования, с данными наблюдений на береговых станциях Азовского моря.

### **§ 3.1. Оценка влияния циклонических возмущений на динамические процессы при наличии фоновых стационарных течений**

На основании результатов численного моделирования [22, 29, 34, 42, 44, 55], показано, что динамика вод с прохождением циклонов над морем становится более интенсивной. Поэтому представляет интерес изучение воздействия атмосферных аномалий типа циклонов на волны, течения и их влияние на распространение загрязнений в Азовском бассейне. Указанная выше математическая модель применена для исследования воздействия циклонических возмущений в поле стационарных течений на трансформацию пассивной примеси в Азовском море. Приводятся результаты проведенных численных расчетов и их анализа для различных параметров атмосферных возмущений.

Характеристики ветра. Наибольшую повторяемость в осенний период имеют ветры северо-восточного и восточного направлений со скоростями 5–15 м/с [16, 19, 84, 105, 114]. В летний период наибольшую непрерывную продолжительность (до 2,5 сут) имеют ветры юго-восточного направления. В численных расчетах вывод течений на установившийся режим осуществляется постоянным восточным ветром, скорость которого изменяется в пределах 5–15 м/с ( $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$ ;  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ ;  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  м/с).

Как следует из анализа метеорологической информации [5, 17, 33, 148], над Азовским морем даже в течение одного месяца наблюдается частая смена ветров различных направлений. Поэтому моделирование циркуляции вод и распространения примеси проводится при условии, что циклонические атмосферные возмущения могут иметь направления и скорости перемещения, не совпадающие с направлением и скоростью постоянного ветра, выводящего течения на установившийся режим. Предполагается, что по мере своего перемещения центр циклона пересекает Азовское море по заданной траектории и проходит через его центральную часть ( $x = 173$  км,  $y = 79$  км). Выход течений на установившийся режим, перемещение примеси по акватории моря и полное ее рассеяние составляют время расчета численных экспериментов.

Считая радиус циклонического образования равным  $R_c$  [21], представим атмосферное давление  $p_a$  в виде

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R_c}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R_c, \\ \tilde{p}_a, & r > R_c, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $\tilde{p}_a$  – фоновое значение давления;  $p_0$  – максимальное отклонение от  $\tilde{p}_a$  в атмосферном возмущении;  $r$  – расстояние от центра движущегося циклона до точки с координатами  $(x, y)$ . Согласно работе [21], в неподвижном циклоне рассчитываем ветер, умножая модуль вектора геоциклострофической скорости  $W_g$  на эмпирический коэффициент  $\mu = 0,7$ , учитывая при этом, что направление ветра отклоняется от касательных к изобарам на угол  $\gamma = 20^\circ$  (угол втока) против часовой стрелки. При условии, что барическое образование возникает над полем стационарного ветра и движется поступательно со скоростью  $\mathbf{c}$ , получим следующее выражение для скорости приводного ветра:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{W}_{st} + \mu W_g T(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{c}, & r \leq R_c, \\ \mathbf{W}_{st}, & r > R_c, \end{cases} \quad (3.2)$$

$$W_g = -fr/2 + \sqrt{(fr/2)^2 + (p_a)_r r / \rho_a}. \quad (3.3)$$

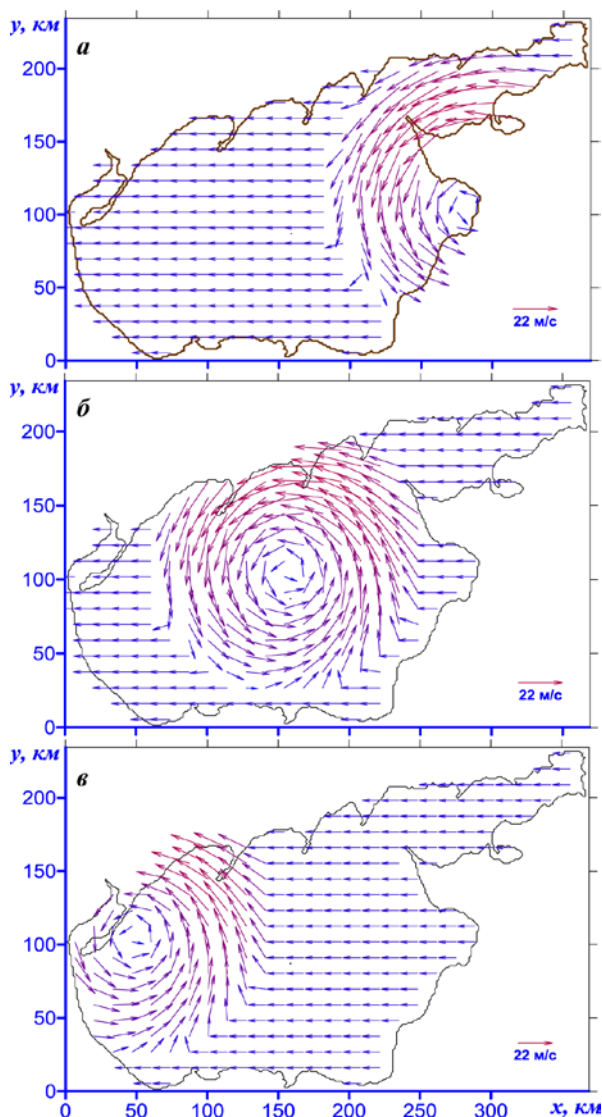
Здесь  $W_g$  – геоциклострофическая скорость,  $(p_a)_r$  – радиальный градиент атмосферного давления; вектор  $\mathbf{r}$  направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется  $\mathbf{W}$ ;  $T(\alpha)$  – матрица поворота на угол  $\alpha$ .

В серии численных экспериментов исследуется влияние различных направлений перемещения циклонов на отклонения уровня и поля скорости течений. Согласно данным наблюдений [18, 84, 148], полагаем, что циклон перемещается со скоростью 5 м/с, имеет радиус 100 км, перепад давления между центром и периферией составляет 15 гПа. Расчеты проведены для его передвижения на юго-запад (ЮЗ), запад (З) и северо-запад (СЗ). Указанные

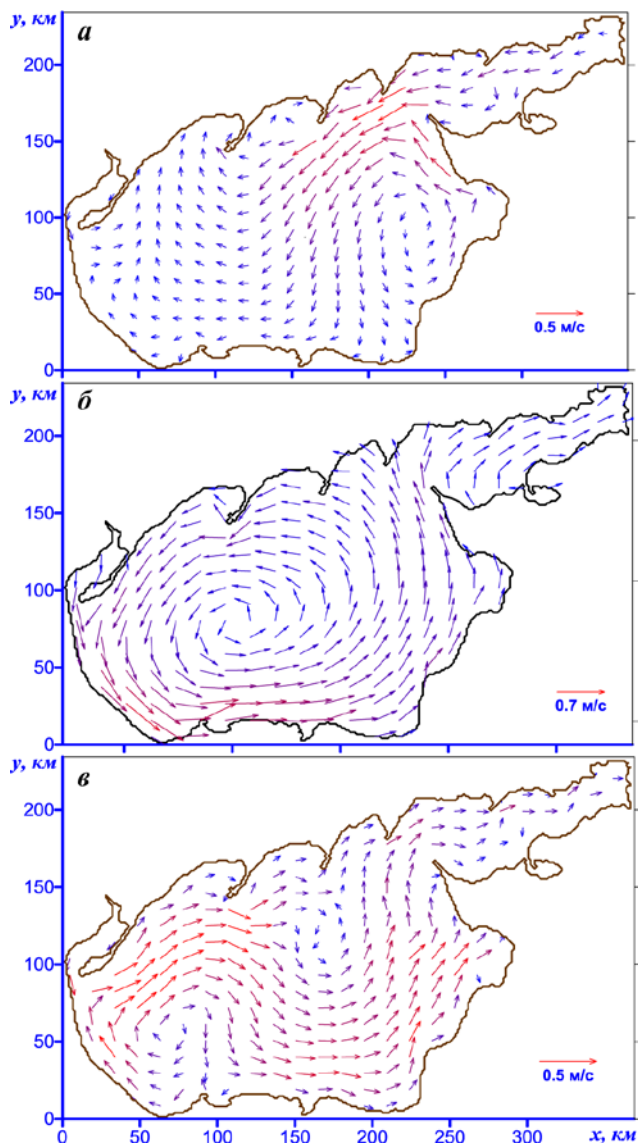
направления составляют с осью  $x$  углы  $135^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $225^\circ$  соответственно. На рис. 3.1 представлены поля ветра на высоте 10 м над Азовским морем, которые соответствуют различным этапам перемещения атмосферного образования в поле постоянного восточного ветра скоростью 10 м/с.

Через 1 ч от начального момента времени  $t = t_1$ , циклон входит в акваторию (рис. 3.1, *а*), затем при  $t = t_1 + 8$  ч (рис. 3.1, *б*) пересекает центральную часть моря и при  $t = t_1 + 15$  ч (рис. 3.1, *в*) уходит из акватории. На рис. 3.2 в те же моменты времени приведены поля течений на поверхности моря, генерируемые циклоном, движущимся на запад. Для стационарного режима (рис. 3.2, *а*) характерно преобладающее направление течений в сторону действующего ветра и наличие в центре северной части бассейна одного антициклонического вихря. С началом действия циклона структура установившихся течений изменяется (рис. 3.2, *б*). Их направление спустя 8 ч (циклон пересекает центральную часть моря) в одних районах противоположно направлению перемещения циклона, в других – перпендикулярно ему. Через 15 ч (рис. 3.2, *в*), когда циклон уходит из акватории, в северной части моря и Таганрогском заливе преобладает направление течений в сторону атмосферных возмущений, в центральной части – под углом  $90^\circ$  к ним. Поля уровня моря для указанных параметров циклона, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 3.3 (в те же моменты времени). Из их анализа следует, что в установившемся режиме (рис. 3.3, *а*) имеет место понижение уровня вдоль западного побережья (сгоны) и повышение – вдоль восточного берега (нагоны).

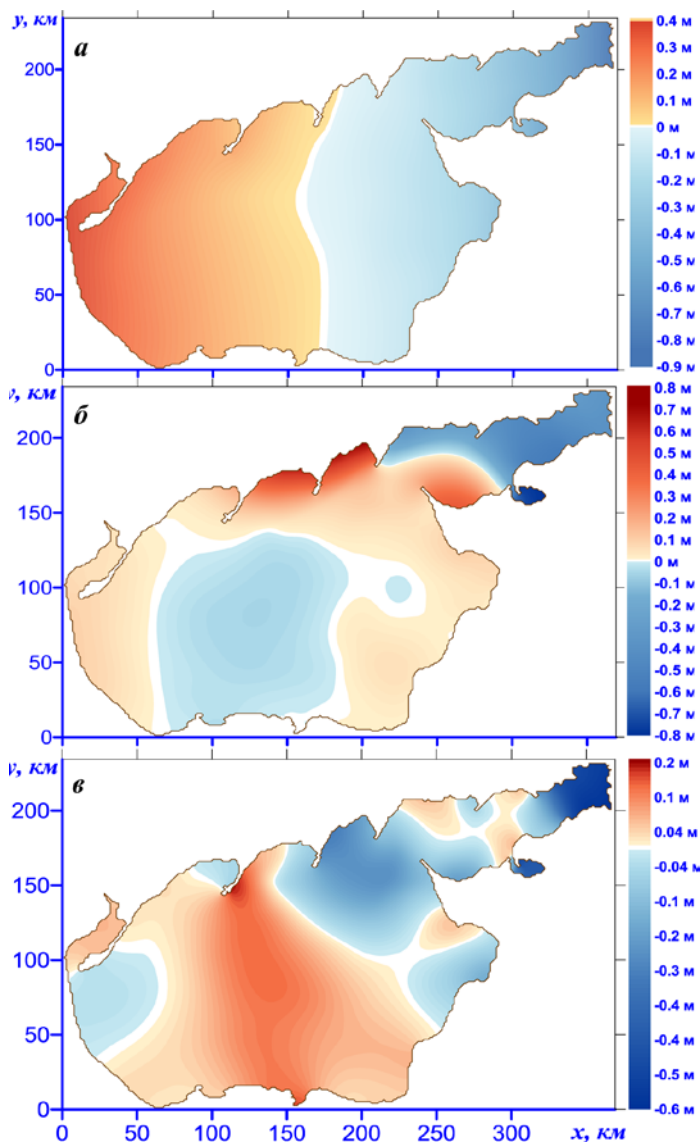
Узловая линия (на рисунке штриховая) пересекает центральную часть моря, она ориентирована перпендикулярно направлению ветра. Через 8 ч после начала действия циклона (рис. 3.3, *б*) изолиния нулевых отклонений уровня уже имеет эллиптическую форму и смещается от центра на запад. Большая ось этого эллипса ориентирована в меридиональном направлении, малая – в зональном. Центр эллипса приблизительно совпадает с узловой линией установившегося режима, разделяющей море на зоны сгона и нагона.



**Рис. 3.1.** Поля скорости приводного ветра, генерируемые восточным циклоном со скоростью 5 м/с и постоянным восточным ветром скоростью 10 м/с: *a* – циклон входит в акваторию ( $t = t_1 + 1$  ч); *б* – центр циклона пересекает центральную часть моря ( $t = t_1 + 8$  ч); *в* – циклон уходит из акватории ( $t = t_1 + 15$  ч)



**Рис. 3.2.** Поля скорости течений в Азовском море (в те же моменты времени, что на рис. 3.1)



**Рис. 3.3.** Поля уровня (м) Азовского моря в те же моменты времени, что на рис. 3.1

С удалением на восток колебания постепенно возрастают и наибольших значений достигают вблизи Мариуполя. При дальнейшем движении к Таганрогскому заливу появляются области небольших понижений уровня. К западу от центра эллипса (рис. 3.3, б) колебания уровня не превышают 3 см. С уходом циклона (рис. 3.3, в) одна из узловых линий проходит через центральную часть моря, она ориентирована практически так же, как в установившемся режиме. В восточной части моря вновь отмечается подъем уровня, в западной части – его понижение.

В табл. 3.1 приведены зависимости максимальной скорости течений от начальной скорости стационарных течений (СТ) и направления перемещения циклонов (скорость 5 м/с, радиус 100 км). Видно, что при увеличении скорости постоянного ветра в два и три раза скорости стационарных течений на поверхности достигают 14; 34; 62 см/с, т. е. возрастают соответственно в 1,8 и 4,4 раза. С прохождением циклонов над акваторией скорости течений на всех горизонтах резко увеличиваются. Наибольшие максимальные скорости имеют место при движении атмосферных возмущений на запад, наименьшие – на северо-запад.

Сравнивая генерируемые циклоном в западном направлении скорости течений в поверхностном слое (86, 108, 126 см/с), отметим их рост в 1,2 и 1,4 раза. Такое же характерное соотношение значений скорости течений прослеживается и на других горизонтах. Под действием атмосферных возмущений происходит увеличение скорости течений с глубиной, наибольшее значение отмечается в придонном слое.

По данным, приведенным в табл. 3.1, проанализируем влияние различных направлений перемещения циклонов, действующих над полем стационарных течений, установившихся при  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  м/с. Максимальные скорости течений на поверхности моря составляют: 1,25; 1,26 и 1,21 м/с. Они отличаются незначительно, разница между наибольшим и наименьшим значениями скорости 4,1 %.

Следовательно, скорости течений, вызванных прохождением циклонов, мало зависят от скорости стационарных течений. Изменение направления перемещения циклона приводит к небольшим различиям максимальных значений скорости течений.

**Скорости ( $|U|_{st}$ ) стационарных течений и максимальные скорости течений, вызванных прохождением циклонов, для трех скоростей постоянного ветра и трех направлений движения циклонов (ЮЗ, З, СЗ) со скоростью 15 м/с**

| Горизонт,<br>м | $ U _{st}$ ,<br>см/с | $W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$ |    |    | $ U _{st}$ | $W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$ |     |     | $ U _{st}$ ,<br>см/с | $W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$ |     |     |
|----------------|----------------------|----------------------------|----|----|------------|-----------------------------|-----|-----|----------------------|-----------------------------|-----|-----|
|                |                      | ЮЗ                         | З  | СЗ |            | ЮЗ                          | З   | СЗ  |                      | ЮЗ                          | З   | СЗ  |
| 1              | 14                   | 83                         | 86 | 80 | 34         | 107                         | 108 | 102 | 62                   | 125                         | 126 | 121 |
| 3              | 11                   | 77                         | 79 | 74 | 28         | 99                          | 100 | 096 | 52                   | 117                         | 116 | 113 |
| 5              | 09                   | 72                         | 75 | 70 | 24         | 93                          | 94  | 90  | 46                   | 110                         | 110 | 106 |
| 10             | 06                   | 50                         | 52 | 49 | 17         | 65                          | 66  | 63  | 32                   | 77                          | 77  | 74  |

При наличии стационарных течений движущийся в западном направлении циклон генерирует движение жидкости, скорость которого больше скорости течений, возникающих под действием циклона, перемещающегося на юго-запад или северо-запад.

### § 3.2. Воздействие перемещающихся циклонов и стационарных течений на трансформацию загрязняющих веществ

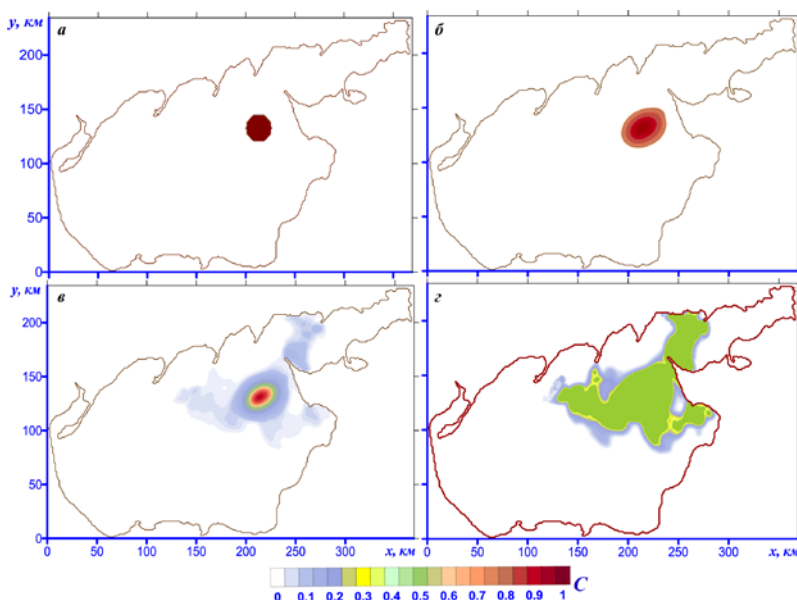
Оценим влияние параметров атмосферных возмущений на размеры области проникновения и время полного рассеивания пассивной примеси. Поступившие в море загрязняющие вещества распространяются под действием турбулентной диффузии, а также переносятся ветровыми течениями, возбуждаемыми системой ветров, состоящей из постоянного и переменного ветра, вызванного прохождением циклона. Место начального загрязнения расположено над самой глубоководной ( $H = 12 \text{ м}$ ) частью моря (рис. 2.14), координаты центра которой  $x_0 = 180 \text{ км}$ ,  $y_0 = 120 \text{ км}$ . Радиус пятна примеси равен 9 км. При решении этой задачи принимаем за начало отсчета времени трансформации загрязнений момент ( $t = t_1$ ), когда течения выходят на установившийся режим. Для количественной оценки площади области распространения загрязнения ( $K_{\max}$ ) используется соотношение (2.38).

В серии численных экспериментов с использованием трехмерной нелинейной математической модели исследуем процессы переноса и диффузии загрязняющих веществ в Азовском море при наличии стационарных течений. Установившиеся движения в различных экспериментах вызваны действием постоянного ветра со скоростями 5, 10 и 15 м/с. Оценим параметры проникновения аварийных выбросов при скорости ветра 15 м/с, которые на основании выводов, изложенных в работе [57, 58], будут наибольшими. Изменение площади загрязнения с течением времени исследуется на горизонтах:  $z = 0$ ,  $z = -H/2 = h_1$ ,  $z = -H/2 + z_2 = h_2$ . В месте поступления загрязняющих веществ скорости стационарных течений на поверхности моря составляют 62 см/с и направлены в сторону действующего ветра, где наблюдается перенос примеси (рис. 3.4). Эти области с течением времени все больше вытягиваются в западном направлении. Опускание примеси на горизонт  $z = h_1$  происходит через 2 ч, в придонный слой через 9 ч. На этих глубинах области концентрации имеют форму, вытянутую в западном направлении.

Во второй серии численных экспериментов изучим эволюцию области загрязняющих веществ под действием атмосферного образования радиусом 100 км, движущегося со скоростью 5 м/с на запад. Его воздействие происходит в поле установившихся течений, вызванных ветром с наименьшей из рассматриваемых скоростей (5 м/с). Скорости установившихся течений в районе аварийного выброса составляют: 14 см/с в поверхностном слое; 9 см/с при  $z = h_1$ ; 6 см/с у дна. При прохождении циклона эти скорости увеличиваются и достигают максимальных значений: 86 см/с при  $z = 0$  (через 15 ч), 75 см/с при  $z = h_1$  (через 18 ч); 52 см/с при  $z = h_2$  (через 20 ч).

В процессе перемещения атмосферного образования меняется направление приводного ветра и направление генерируемых им течений. В результате этого области загрязнения первые 2 часа перемещаются на запад (в направлении стационарных течений) (рис. 3.5, а), а затем (через 10 ч) распадаются на несколько небольших фрагментов (рис. 3.5, б, в).

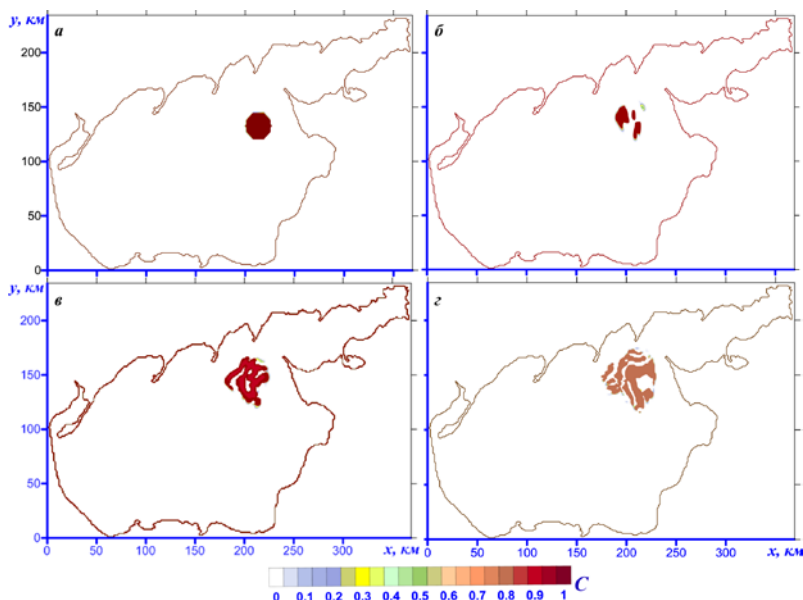
Эти фрагменты переносятся от центра выброса в различных направлениях на значительные расстояния и спустя 30 ч достигают северного побережья Азовского моря в районе Бердянска и Мариуполя (рис. 3.5, г). С течением времени участки загрязняющих веществ переносятся на запад.



**Рис. 3.4.** Трансформация области загрязнения под действием постоянного ветра скоростью 15 м/с: *а, б, в* – в те же моменты времени, что на рис. 3.1, *з* – через 30 ч после ухода циклона ( $t = t_1 + 45$  ч)

Полное рассеяние происходит через 149 ч, что превышает в 2,7 раза время рассеяния такой же области загрязнения в установившемся режиме.

Исследуем влияние направления перемещения (ЮЗ, З, СЗ) атмосферных образований с радиусом 100 км и скоростью 5 м/с на эволюцию области загрязнения с теми же параметрами, которые рассматривались ранее в установившемся режиме. Для циклонов различных направлений время проникновения примеси на глубину  $z = h_1$  длится значительно дольше, чем в установившемся режиме, и составляет 15 ч после его выброса на поверхность. Также более продолжительным (до 20 ч) становится опускание загрязняющих веществ в придонный слой. Таким образом, вертикальное распространение примеси под действием циклона замедляется в сравнении со стационарным случаем в 7,5 раз при ( $z = h_1$ ) и в 2,2 раза при  $z = h_2$ .



**Рис. 3.5.** Трансформация области загрязнения при перемещении циклона на запад со скоростью 5 м/с: *а, б* – в те же моменты времени, что на рис. 3.4, *г* – через 30 ч после ухода циклона ( $t = t_1 + 45$  ч)

В таблице 3.2 приведены коэффициент максимального охвата площади области загрязнения, время его достижения ( $t_{\max}$ , ч) и время полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) на различных глубинах моря в установившемся режиме и при наличии циклонов, перемещающихся со скоростью 5 м/с в различных направлениях. Из анализа данных, приведенных в таблице 3.2, следует, что прохождение циклонов оказывает существенное влияние на параметры распространения примеси. Среди рассматриваемых направлений перемещения атмосферных возмущений западному направлению отвечают наибольшие параметры проникновения и времени полного рассеяния областей загрязнения. Сравнивая значения  $K_{\max}$  для этого направления циклона с полученными в расчетах при наличии только стационарных течений, отметим их более чем восьмикратное увеличение на различных горизонтах.

Т а б л и ц а 3.2

**Параметры эволюции примеси на различных глубинах  
под действием стационарных течений и циклонов,  
перемещающихся в трех направлениях**

| Горизонт,<br>м | $K_{\max},$<br>$t_{\max},$<br>$t_d$ | $ U _{st},$<br>см/с | $W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$ |      |      | $ U _{st},$<br>см/с | $W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$ |      |      | $ U _{st},$<br>см/с | $W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$ |      |      |
|----------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------------|------|------|---------------------|-----------------------------|------|------|---------------------|-----------------------------|------|------|
|                |                                     |                     | ЮЗ                         | З    | СЗ   |                     | ЮЗ                          | З    | ЮЗ   |                     | СЗ                          | З    | ЮЗ   |
| $z = 0$        | $K_{\max}$                          | 1,14                | 7,52                       | 7,75 | 7,24 | 1,19                | 8,63                        | 8,69 | 8,66 | 1,22                | 8,91                        | 9,15 | 8,78 |
|                | $t_{\max}$                          | 4                   | 140                        | 142  | 141  | 3                   | 150                         | 156  | 150  | 3                   | 162                         | 165  | 162  |
|                | $t_d$                               | 18                  | 149                        | 150  | 149  | 17                  | 162                         | 167  | 162  | 17                  | 170                         | 175  | 170  |
| $z = h_1$      | $K_{\max}$                          | 1,17                | 7,65                       | 7,98 | 7,39 | 1,18                | 8,56                        | 8,61 | 8,59 | 1,23                | 9,08                        | 9,16 | 8,93 |
|                | $t_{\max}$                          | 13                  | 140                        | 143  | 141  | 10                  | 151                         | 157  | 151  | 10                  | 162                         | 166  | 162  |
|                | $t_d$                               | 35                  | 150                        | 151  | 150  | 34                  | 163                         | 168  | 163  | 33                  | 170                         | 176  | 170  |
| $z = h_2$      | $K_{\max}$                          | 1,12                | 7,29                       | 7,67 | 7,00 | 1,17                | 8,48                        | 8,54 | 8,52 | 1,22                | 8,87                        | 9,09 | 8,72 |
|                | $t_{\max}$                          | 23                  | 140                        | 143  | 141  | 21                  | 151                         | 157  | 151  | 15                  | 163                         | 166  | 162  |
|                | $t_d$                               | 57                  | 150                        | 151  | 151  | 55                  | 163                         | 168  | 163  | 53                  | 170                         | 176  | 170  |

Площадь распространения загрязнения зависит от скорости ветра, выводящего течения на установившийся режим, и от направления перемещения циклона. Видно, что с ростом  $W_{st}$  (табл. 3.1) становятся больше скорости течений в установившемся режиме и в связи с этим увеличиваются область проникновения и время полного рассеяния примеси (табл. 3.2). На основании приведенных данных максимальное время полного рассеяния при  $W_{st}^3$  (176 ч) в 1,2 раза больше, чем при  $W_{st}^1$  (151 ч).

В рассматриваемом поле установившихся течений максимум площади, занятой загрязнением, составляет 1,22 на поверхности ( $t_{\max} = 3$  ч); 1,23 на глубине  $z = h_1$  ( $t_{\max} = 10$  ч); 1,22 в придонном слое ( $t_{\max} = 15$  ч). Полное рассеяние имеет место через 53 ч от момента выброса, при этом с течением времени направление трансформации примеси существенно не меняется.

Таким образом, на основании анализа результатов проведенных исследований следует, что вертикальное распространение примеси под действием циклона при наличии стационарных течений замедляется по сравнению со случаем только стационарного течения. Перемещение циклона в поле стационарного течения приводит к суще-

ственному увеличению площади распространения загрязнения по сравнению со случаем только стационарного течения.

Изучение эволюции полей примеси в зависимости от начального распределения концентрации и параметров циклона. Акватория Азовского моря и прибрежные зоны представляют собой единый территориальный регион, который требует организации рационального природопользования и обеспечения экологической безопасности. В прибрежных областях, как правило, располагаются крупные промышленные центры. Интенсивное развитие производительных сил, хозяйственное освоение природных ресурсов морей ставит перед исследователями этих районов ряд важных задач. Большое значение приобретает прогноз ожидаемых изменений в гидрологическом режиме, происходящих в результате естественных процессов и хозяйственной деятельности.

В связи с тем, что прямые эксперименты с природными экосистемами затруднены, математическое моделирование является одним из наиболее перспективных методов прогнозирования динамических процессов и их влияния на распространение загрязнений в морских бассейнах. Результаты расчетов ветровых течений и уровня моря на основе трехмерной гидродинамической модели позволяют специалистам построить карты течений и распространения загрязнений на различных горизонтах.

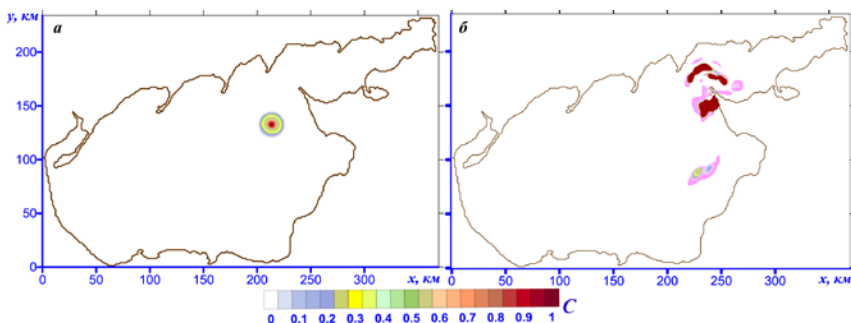
Исследуем влияние переменного начального распределения концентрации примеси на время ее рассеяния и максимальный объем области загрязнения при движении циклона. Показано, что неоднородное начальное распределение поля концентрации примеси приводит к уменьшению объема области загрязнения по сравнению со случаем постоянной начальной концентрации. Получена зависимость изменения площади области загрязнения на различных горизонтах от изменения градиента начальной концентрации примеси.

В серии численных экспериментов исследуется влияние различных начальных распределений концентрации примеси на процесс ее эволюции. Поступившие в море загрязняющие вещества трансформируются под действием турбулентной диффузии и переноса течениями, вызванными переменным ветром, генерируемым движущимся циклоном. Концентрация примеси в момент времени  $t = t_0$  убывает с удалением от центра области. Пусть изменение поля concentra-

ции от максимального значения (в центре выброса) до нуля (на границе области) происходит по линейному закону

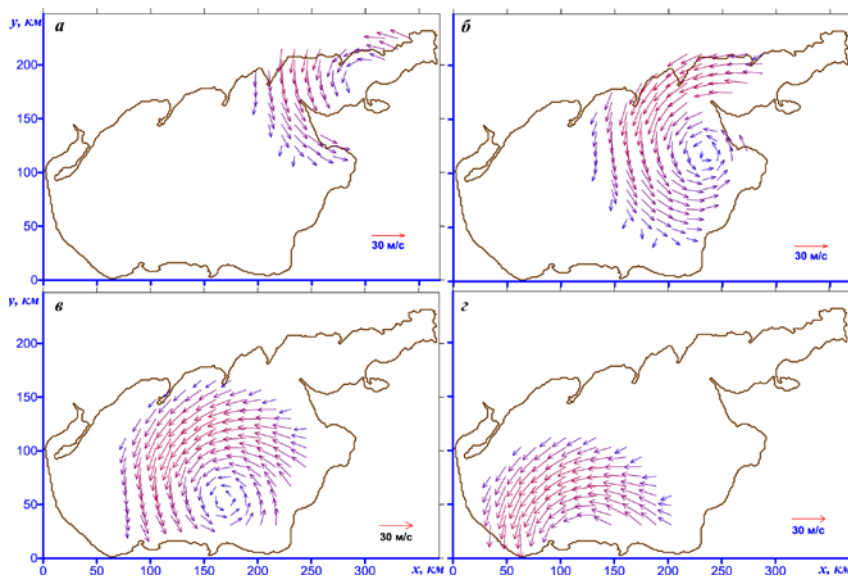
$$C_{02}(x, y, z, 0) = \begin{cases} C_{\max}(R - r_1)/R, & r_1 \leq R, \quad 0 \geq z \geq -h_1, \\ 0, & r_1 > R, \quad z < 0; \quad r_1 \leq R, \quad z < -h_1, \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $r_1 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  – расстояние от центра  $(x_0, y_0)$  области загрязнения до точки, в которой вычисляется концентрация;  $C_{\max}$  – максимальное значение концентрации в центре области. Место выброса загрязнения расположено в открытой части моря в самом глубоководном районе (рис. 3.6, а). На рис. 3.6, б представлено изменение со временем области загрязнения переменной начальной концентрации ( $C_{\max} = 1$ ) под действием циклона радиусом 100 км, движущегося со скоростью 10 м/с на запад, при этом центр циклона проходит через центральную область моря.



**Рис. 3.6.** Трансформация области загрязнения в результате действия восточного циклона со скоростью 10 м/с: а – циклон входит в акваторию моря ( $t = 1$  ч); б – через 30 ч после ухода циклона ( $t = 45$  ч)

В процессе распространения атмосферного образования меняется направление приводного ветра (рис. 3.7) и, как следствие этого, характер генерируемых им течений.



**Рис. 3.7.** Поля скорости приводного ветра на различных этапах перемещении циклона на запад со скоростью 10 м/с: *a* – циклон входит в акваторию ( $t = 1$  ч); *б* –  $t = 8$  ч; *в* –  $t = 12$  ч; *г* –  $t = 15$  ч

Для расчета эволюции областей загрязнения вследствие процессов адвекции и диффузии выбраны следующие значения коэффициентов турбулентной диффузии:  $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  [24]. В результате этого область загрязнения вначале перемещается на запад (в направлении движения циклона), а затем распадается на несколько небольших областей, которые переносятся от центра выброса в различных направлениях (рис. 3.6, б). Полное рассеяние происходит через 135 ч, что меньше времени рассеяния такой же области загрязнения постоянной начальной концентрации. В табл. 3.3 приведены значения  $K_{\max}$  и  $N_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ , ч), а также время полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) на различных горизонтах при перемещении циклона радиусом 100 км на запад со скоростью 10 м/с в зависимости от начального распределения концентрации примеси.

Т а б л и ц а 3.3

**Параметры загрязнения  $K_{\max}$ ,  $N_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ , ч) и время полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) при наличии циклона, перемещающегося на запад со скоростью 10 м/с, в зависимости от начального распределения концентрации примеси**

| Горизонт,<br>область | Параметры<br>загрязнения | $C_{01}$ | $C_{02}$       |                |                |
|----------------------|--------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|
|                      |                          |          | $C_{\max} = 1$ | $C_{\max} = 2$ | $C_{\max} = 3$ |
| $z = 0$              | $K_{\max}$               | 2,7      | 1,9            | 2,2            | 2,6            |
|                      | $t_{\max}$               | 42       | 35             | 39             | 41             |
|                      | $t_d$                    | 149      | 110            | 122            | 140            |
| $z = -H/2$           | $K_{\max}$               | 1,8      | 1,3            | 1,5            | 1,8            |
|                      | $t_{\max}$               | 51       | 43             | 48             | 51             |
|                      | $t_d$                    | 152      | 131            | 139            | 140            |
| $z = -H+h_2$         | $K_{\max}$               | 1,1      | 0,7            | 0,9            | 1,1            |
|                      | $t_{\max}$               | 56       | 47             | 52             | 56             |
|                      | $t_d$                    | 155      | 135            | 141            | 155            |
| $-H \leq z \leq 0$   | $N_{\max}$               | 7,3      | 3,5            | 5,0            | 6,8            |
|                      | $t_{\max}$               | 55       | 35             | 42             | 45             |
|                      | $t_d$                    | 155      | 135            | 141            | 155            |

Из анализа данных, представленных в этой таблице, следует, что значения параметров распространения примеси постоянной начальной концентрации  $C_{01}(x, y, z, 0)$  превышают значения соответствующих параметров, полученных для линейного начального распределения ее концентрации (11). Отметим, что в обоих случаях  $C_{\max} = 1$ . При этом величина  $K_{\max}$  при  $z = 0$  и на горизонте  $z = -H/2$  для  $C_{01}$  превышает в 1,4 раза значение  $K_{\max}$  для  $C_{02}$ ; на горизонте  $z = -H+h_2$  величина  $K_{\max}$  больше в 1,6 раза. Сравнивая значения  $N_{\max}$  для указанных начальных распределений концентрации, получаем их более чем двукратное уменьшение для линейной начальной концентрации примеси.

Учитывая результаты моделирования, приведенные в табл. 3.3, оценим влияние градиента начальной линейной концентрации примеси на размеры области ее проникновения и время полного рассеяния пассивной примеси при наличии циклона. Исследование переноса и распространения примеси выполнено для значений  $C_{\max} = 1$ ,  $C_{\max} = 2$  и  $C_{\max} = 3$ . Получено, что с ростом  $C_{\max}$  отношение наибольшей

площади загрязнения к ее первоначальному значению ( $K_{\max}$ ) увеличивается и при  $z = 0$  составляет 1,9 ( $C_{\max} = 1$ ); 2,2 ( $C_{\max} = 2$ ) и 2,6 ( $C_{\max} = 3$ ); на глубине  $z = -H/2$  значения отношения равны 1,3; 1,5 и 1,8; в придонном слое ( $z = -H + h_2$ ) – 0,7; 0,9 и 1,1 соответственно. Из анализа этих данных следует, что на рассматриваемых горизонтах двукратное и трехкратное увеличение начальной концентрации примеси приводит к росту максимальной площади области загрязнения в 1,3 и 1,6 раза соответственно.

Время полного рассеяния примеси  $t_d$  зависит от максимума начальной концентрации и становится тем больше, чем больше значение  $C_{\max}$ . При этом  $t_d$  равняется 135 ч ( $C_{\max} = 1$ ), 141 ч ( $C_{\max} = 2$ ), 155 ч ( $C_{\max} = 3$ ) и увеличивается на 4 и 15 % соответственно относительно  $C_{\max} = 1$ . Результаты моделирования, представленные в табл. 3.3, свидетельствуют о том, что вертикальное распространение примеси замедляется с увеличением максимального значения ее начальной концентрации. В этом случае наибольший объем области загрязнения  $N_{\max}$  при  $C_{\max} = 2$  и  $C_{\max} = 3$  больше соответственно в 1,4 и 1,9 раза, чем для  $C_{\max} = 1$ .

Выполним сравнение параметров эволюции примеси в центральной части Азовского моря для различных начальных концентраций при отсутствии ветра (на тихой воде). В табл. 3.4 представлены значения  $K_{\max}$ ,  $N_{\max}$ , время их достижения  $t_{\max}$  и время полного рассеяния примеси  $t_d$  на различных горизонтах моря в зависимости от начального распределения ее концентрации без учета действия циклона.

Из анализа данных, приведенных в табл. 3.3 и 3.4, следует, что в обоих вариантах расчетов при наличии циклона и на тихой воде с ростом градиента начальной концентрации происходит увеличение районов распространения загрязнений. Как видно, для одних и тех же значений начальной концентрации при отсутствии ветра происходит увеличение параметров загрязнений ( $K_{\max}$ ,  $N_{\max}$ ,  $t_d$ ) не более чем в 3 раза по сравнению со случаем наличия циклона. Исследование переноса и распространения примеси постоянной и переменной начальной концентрации с равными максимумами показало, что в первом случае имеют место большие время рассеяния и размеры области проникновения загрязнения. Двукратное и трехкратное увеличение градиента начальной концентрации примеси приводит к росту максимальной площади области проникновения загрязнения

в 1,3 и 1,6 раза соответственно при прохождении циклона над Азовским морем. Рассеяние примеси при наличии циклона и на тихой воде замедляется с увеличением градиента начальной концентрации.

Т а б л и ц а 3.4

**Параметры  $K_{\max}$ ,  $N_{\max}$ , время их достижения ( $t_{\max}$ , ч) и время полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) при отсутствии циклона в зависимости от начальной концентрации примеси**

| Горизонт, область  | Параметры загрязнения | $C_{01}$ | $C_{02}$       | $C_{02}$       | $C_{02}$       |
|--------------------|-----------------------|----------|----------------|----------------|----------------|
|                    |                       |          | $C_{\max} = 1$ | $C_{\max} = 2$ | $C_{\max} = 3$ |
| $z = 0$            | $K_{\max}$            | 8,8      | 3,6            | 4,1            | 8,7            |
|                    | $t_{\max}$            | 74       | 65             | 47             | 97             |
|                    | $t_d$                 | 168      | 199            | 345            | 343            |
| $z = -H/2$         | $K_{\max}$            | 2,0      | 2,3            | 3,0            | 5,9            |
|                    | $t_{\max}$            | 85       | 88             | 51             | 94             |
|                    | $t_d$                 | 254      | 157            | 363            | 168            |
| $z = -H+h_2$       | $K_{\max}$            | 4,3      | 1,5            | 1,1            | 2,6            |
|                    | $t_{\max}$            | 128      | 104            | 88             | 61             |
|                    | $t_d$                 | 224      | 377            | 377            | 279            |
| $-H \leq z \leq 0$ | $N_{\max}$            | 25,5     | 8,9            | 8,4            | 21,5           |
|                    | $t_{\max}$            | 118      | 39             | 86             | 63             |
|                    | $t_d$                 | 311      | 265            | 341            | 288            |

### **§ 3.3. Водообмен с Черным морем и его влияние на сгонно-нагонные явления и течения, вызываемые движущимися циклонами**

Актуальность изучения сгонных и нагонных движений связана со строительством береговых гидротехнических сооружений, прогнозом наводнений, экстремальных высот волн и другими проблемами. В этих исследованиях особое место занимает определение катастрофических подъемов и понижений уровня моря. Особенно важно проведение этих исследований для прибрежных областей, связанных мелкими проливами. Как следует из многолетних наблюдений [13, 19, 32, 33, 148], в Азовском море и на его побережье в зимний и весенний периоды отмечаются ураганы, активизированные

циклонической деятельностью и вызывающие штормовые сгоны и нагоны, влияющие на водообмен между Черным и Азовским морями. С использованием трехмерной гидродинамической модели в этом параграфе изучается воздействие циклонических возмущений на динамику вод Азовского моря с учетом и без учета водообмена с Черным морем. Анализируется влияние направления движения и размеров циклонических образований, а также учет водообмена через Керченский пролив на сгоны и нагоны.

Характеристики полей ветра и расчетной области. Над Азовским морем и его побережьем отмечаются штормовые циклоны, которые приводят к катастрофическим спадам и подъемам уровня. Они перемещаются над Азовским морем в течение всего года, но чаще всего зимой и весной. Наиболее часто они приходят из западных районов Черного моря и центральных районов Европы (западные циклоны), а также из Малой Азии (южные) [17, 41, 105, 130].

На основании анализа материалов контактных и спутниковых наблюдений в районах Черного и Азовского морей [22, 84] получены осредненные характеристики циклонов за два года. Средние значения скорости поступательного перемещения циклонов составляют 5–10 м/с, средний диаметр области атмосферных образований составляет 480–700 км, перепад давления между центром и периферией 11–21 гПа.

Для численного моделирования динамических процессов в Азовском море выбраны южные (Ю) и западные (З) циклоны, направления движения которых составляют с осью  $x$ , направленной на восток,  $90^\circ$  и  $0$  соответственно. Скорость их движения ( $c$ ) принимаем равной 5 м/с, максимальное отклонение ( $p_0$ ) от фонового значения давления полагаем равным 15 гПа. Расчеты проведены для трех значений радиуса основания барических образований ( $R_c^i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) 100, 200 и 400 км. Предполагается, что по мере перемещения центр циклона пересекает Азовское море по заданной траектории и проходит через его центральную часть.

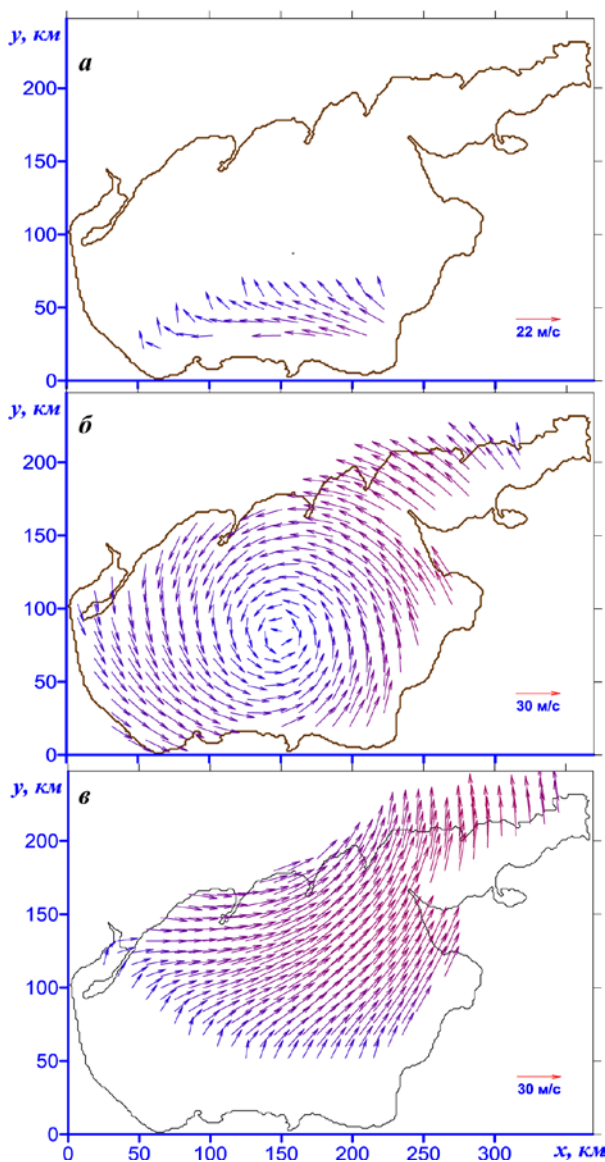
Глубина при входе в пролив из Азовского моря равна 10,5 м. Жидкая граница (рис. 3.8) соответствует вертикальному разрезу по  $39,33^\circ$  с .ш. вдоль акватории Керченского пролива ( $177 \leq x \leq 192$  км,  $y = 62$  км). Во всех точках, расположенных на этой

границе, выполняется условие свободного протекания (2.4). При решении задачи без учета пролива рассматривается замкнутый бассейн.

Расчетные значения сгонов и нагонов, возникающих под действием циклонов, отмечаются на береговых станциях Азовского моря ( $A_1 - A_9$ ), расположенных вблизи крупных населенных пунктов (рис. 3.8). Исследование осредненных по вертикали скоростей течений в проливе проводим в пяти пунктах ( $P_1 - P_5$ ), равномерно расположенных на свободной поверхности (рис. 2.6). На основании реальной батиметрии средняя глубина сечения пролива составляет 8 м, ширина 10 км. Для оценки влияния водообмена через Керченский пролив на каждом шаге по времени рассчитывается суммарный расход воды, проходящей через сечение, перпендикулярное оси  $y$ . При этом объем протекающей жидкости за время  $0 \leq t \leq t_n$  определяется выражением (2.5).

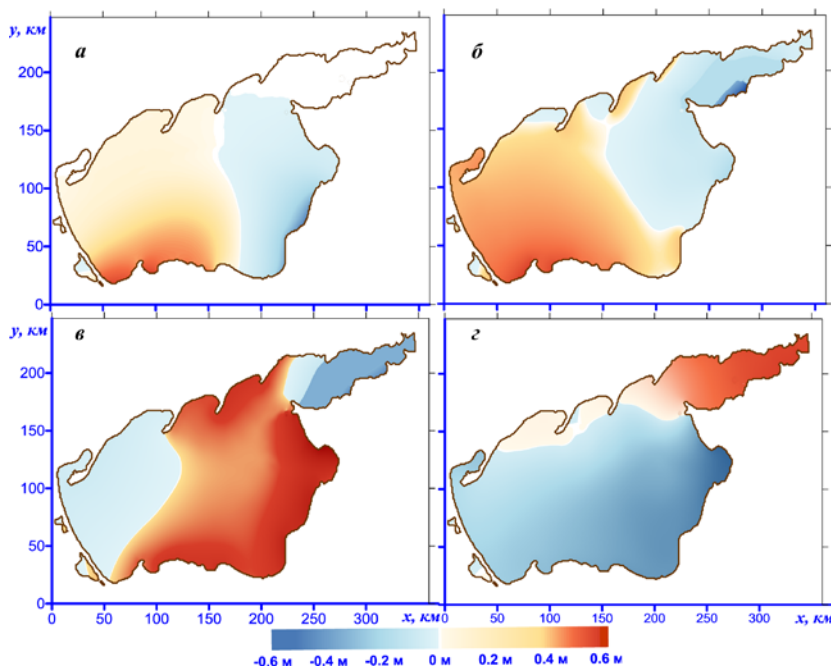
Проанализируем результаты численных экспериментов, позволяющие сделать выводы о влиянии Керченского пролива на сгонно-нагонные движения в Азовском море, вызываемые прохождением южных циклонов с различными радиусами основания. На рис. 3.8 представлены поля ветра в приводном слое (на высоте 10 м), которые соответствуют трем этапам перемещения атмосферного образования с юга на север со скоростью 5 м/с и радиусом основания 100 км.

Анализ результатов расчетов показывает, что максимумы скоростей приводного ветра ( $|\mathbf{W}|_{\max}$ ), вызываемого поступательными перемещениями атмосферных образований с одинаковой скоростью, зависят от размера циклонов и составляют: 21,34 м/с ( $R_c^1 = 100$  км); 19,5 м/с ( $R_c^2 = 200$  км); 16,5 м/с ( $R_c^3 = 400$  км). Время, в течение которого циклон движется по поверхности моря ( $t = t_k$ ), неодинаково и зависит от величины радиуса основания:  $t_k = 25$  часов при  $R_c^1$ ,  $t_k = 36$  часов при  $R_c^2$ ,  $t_k = 58$  часов при  $R_c^3$ . Заметим, что расчетный период для всех циклонов составляет 168 ч (7 сут). Следовательно, при прохождении циклонов в два и четыре раза больших размеров промежутки времени нахождения их над акваторией увеличивается в 1,4 и 2,3 раза соответственно, при этом максимальная скорость ветра уменьшается на 8,6 и 22,7 %.



**Рис. 3.8.** Поля скорости приводного ветра при южном циклоне со скоростью 5 м/с: циклон входит в акваторию (*a*); центр циклона пересекает центральный район моря (*б*); уходит из акватории (*в*)

На рис. 3.9 представлены поля уровня Азовского моря, генерируемые прохождением южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом основания 100 км, полученные в результате моделирования.



**Рис. 3.9.** Поля уровня Азовского моря, генерируемые южным циклоном скоростью 5 м/с, при учете пролива: циклон входит в акваторию (*а*); центр циклона пересекает центральный район моря (*б*); уходит с акватории (*в*)

Рисунки 3.9, *а–в* даны в моменты времени  $t = 1$  ч;  $t = 8$  ч;  $t = 24$  ч, соответствующие трем этапам перемещения атмосферного образования, рис. 3.9, *г* – через 12 ч после его ухода из акватории. Из анализа приведенных полей следует, что при  $t = 1$  ч (рис. 3.9, *а*) вдоль южного побережья имеет место изменение уровня, симметричное относительно входа в пролив. В это время ( $t = 1$  ч) у северо-восточного и северо-западного берегов возмущений нет. Узловая линия (на рисунке показана штриховой) пересекает центральную часть моря и ориентирована по направлению перемещения циклона. Первый этап соответствует моменту времени 1 ч после вхождения

циклона в акваторию моря (рис. 3.8, а); второй этап перемещения ( $t = 8$  ч) отмечается при пересечении центром циклона центральной части моря (рис. 3.9, б); третий – отвечает моменту времени  $t = 24$  ч, когда циклон покидает поверхность Азовского моря (рис. 3.8, в).

Через 8 ч после начала действия циклона (рис. 3.9, б) изолинии уровня имеют эллиптическую форму и находятся в центральной области акватории. Узловая линия, разделяющая море на зоны сгона и нагона, смещена на восток и ориентирована по ходу циклона. Теперь в западной части имеет место повышение, а в восточной – понижение уровня. С уходом циклона (рис. 3.9, в) изолинии уровня перестают быть замкнутыми, а узловая линия по-прежнему ориентирована по ходу движения циклона. В Таганрогском заливе, в его западной части, отмечается сгущение изолиний уровня, имеет место его подъем, в восточной части – понижение. Из рис. 3.9, г видно, что узловая линия теперь ( $t = 36$  ч) ориентирована перпендикулярно траектории перемещения циклона, южное побережье моря при этом становится зоной сгонов, северное – зоной нагонов.

В таблице 3.5 приведены максимальные значения нагонов и сгонов (см) и соответствующие им моменты времени ( $t_{\text{extr}}$ , ч) на станциях  $A_1 - A_9$ . Нагоны и сгоны вызываются южными циклонами с радиусами основания 100, 200 и 400 км, перемещающимися со скоростью 5 м/с.

Рассматриваются случаи наличия и отсутствия пролива. Как следует из анализа данных, приведенных в табл. 3.6, для различных параметров возмущающих циклонических образований и для всех рассматриваемых станций наибольшие по абсолютной величине отклонения уровня имеют место при условии учета водообмена через пролив. В первой (верхней) части табл. 3.5 приведены значения нагонов. Видно, что максимальные нагоны имеют место на ст. Таганрог. Для рассматриваемых значений радиуса основания циклонов, а также в зависимости от граничных условий в проливе на этой станции они составляют: 49 см ( $U_n = 0$ ) и 54 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^1$ ; 93 см ( $U_n = 0$ ) и 97 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^2$ ; 102 см ( $U_n = 0$ ) и 115 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^3$ . Относительная разница значений нагонов, рассчитанных с учетом и без учета пролива, не превышает 12 %.

Минимальные нагоны отмечаются в пос. Опасное и соответственно равны: 5 см ( $U_n = 0$ ) и 7 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^1$ ; 8 см ( $U_n = 0$ ) и 9 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^2$ ; 10 см ( $U_n = 0$ ) и 12 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^3$ . Время

достижения наибольших подъемов уровня при учете пролива возрастает не более чем на 7 %.

Т а б л и ц а 3.5

**Максимальные (см) нагоны (1) и сгоны (2), вызываемые южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с, с учетом ( $U'_n = 0$ ) и без учета ( $U_n = 0$ ) водообмена через Керченский пролив и соответствующие им моменты времени**

| Береговые станции | $R_c^1 = 100$ км |                   |                  |                   | $R_c^2 = 200$ км |                   |                  |                   | $R_c^3 = 400$ км |                   |                  |                   |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                   | $U_n = 0$        |                   | $U'_n = 0$       |                   | $U_n = 0$        |                   | $U'_n = 0$       |                   | $U_n = 0$        |                   | $U'_n = 0$       |                   |
|                   | $ \zeta _{\max}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\max}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\max}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\max}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\max}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\max}$ | $t_{\text{extr}}$ |
| 1. Геническ       | 10               | 24,6              | 11               | 25,1              | 12               | 11,0              | 15               | 21,1              | 12               | 15,8              | 19               | 16,3              |
| Бердянск          | 8                | 19,6              | 10               | 20,0              | 11               | 20,5              | 16               | 21,2              | 10               | 39,8              | 13               | 41,1              |
| Мариуполь         | 39               | 17,7              | 46               | 17,8              | 59               | 26,3              | 68               | 28,5              | 70               | 44,5              | 79               | 46,2              |
| Таганрог          | 49               | 22,6              | 54               | 23,6              | 93               | 29,4              | 97               | 31,4              | 102              | 45,3              | 115              | 46,7              |
| Ейск              | 34               | 19,6              | 48               | 19,3              | 58               | 29,1              | 64               | 29,1              | 62               | 43,9              | 70               | 45,2              |
| П.-Ахтарск        | 35               | 13,2              | 47               | 14,1              | 57               | 22,2              | 66               | 22,3              | 32               | 36,2              | 37               | 38,6              |
| Темрюк            | 11               | 14,8              | 8                | 15,8              | 19               | 18,6              | 10               | 19,5              | 9                | 23,0              | 15               | 22,6              |
| Опасное           | 5                | 4,8               | 7                | 5,1               | 8                | 13,6              | 9                | 14,7              | 10               | 19,0              | 12               | 19,2              |
| Мысовое           | 6                | 29,0              | 10               | 29,7              | 8                | 14,0              | 12               | 14,3              | 18               | 17,1              | 19               | 17,7              |
| 2. Геническ       | 13               | 19,2              | 22               | 19,5              | 12               | 21,8              | 18               | 22,3              | 36               | 40,4              | 43               | 40,1              |
| Бердянск          | 2                | 42,7              | 3                | 43,1              | 5                | 26,9              | 8                | 27,4              | 3                | 50,8              | 4                | 54,2              |
| Мариуполь         | 12               | 30,3              | 7                | 31,4              | 15               | 15,3              | 11               | 15,5              | 22               | 20,5              | 17               | 21,3              |
| Таганрог          | 19               | 33,3              | 21               | 33,8              | 27               | 20,1              | 47               | 20,7              | 60               | 44,6              | 63               | 45,7              |
| Ейск              | 45               | 12,6              | 48               | 13,3              | 48               | 15,5              | 53               | 16,8              | 39               | 20,6              | 44               | 20,9              |
| П.-Ахтарск        | 44               | 8,2               | 46               | 8,8               | 45               | 10,9              | 52               | 11,4              | 30               | 14,3              | 34               | 14,5              |
| Темрюк            | 9                | 20,5              | 13               | 21,1              | 12               | 28,3              | 19               | 29,6              | 26               | 46,1              | 19               | 47,1              |
| Опасное           | 8                | 19,7              | 12               | 20,6              | 12               | 27,4              | 16               | 27,2              | 27               | 43,2              | 22               | 44,2              |
| Мысовое           | 10               | 17,6              | 15               | 18,4              | 10               | 23,0              | 17               | 23,6              | 31               | 40,1              | 33               | 41,9              |

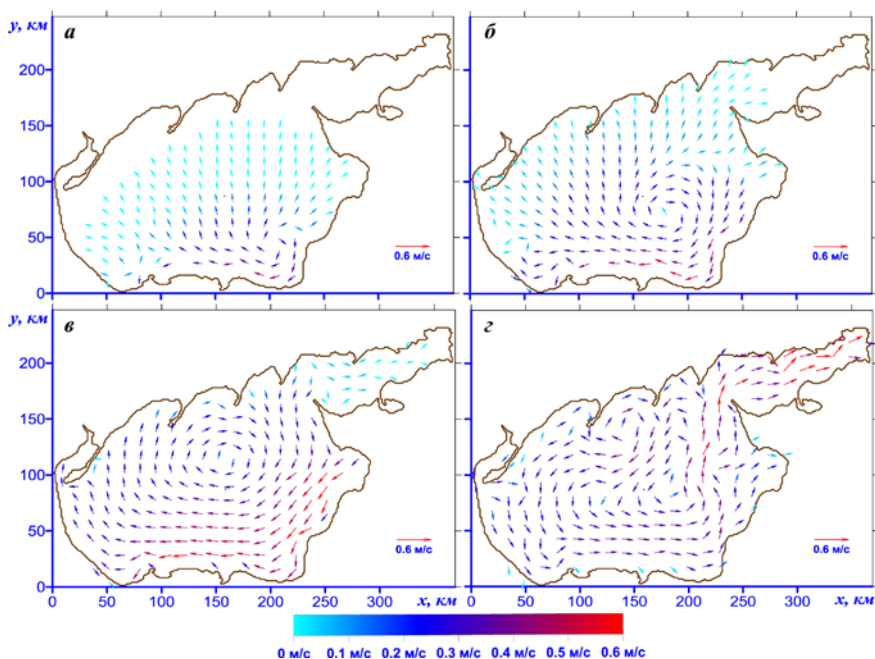
При увеличении размера циклона в четыре раза время достижения максимумов нагонов не превышает 40 %. Во второй (нижней) части табл. 3.5 даны максимальные значения сгонов в тех же пунктах. Отсюда видно, что под действием циклонов различных размеров наибольшие сгоны имеют место на станции Ейск: 45 см ( $U_n = 0$ )

и 48 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^1$ ; 48 см ( $U_n = 0$ ) и 53 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^2$ ; 39 см ( $U_n = 0$ ) и 44 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^3$ . Изменения максимальных значений сгонов в районе г. Ейска с учетом и без учета водообмена через пролив для  $R_c^1$ ,  $R_c^2$  и  $R_c^3$  соответственно равны 6, 15 и 11 %. Минимальные сгоны отмечаются в районе г. Бердянска и равны: 2 см ( $U_n = 0$ ) и 3 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^1$ ; 5 см ( $U_n = 0$ ) и 8 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^2$ ; 3 см ( $U_n = 0$ ) и 4 см ( $U'_n = 0$ ) при  $R_c^3$ . Как и для нагонов, с увеличением радиуса основания циклона уменьшается время достижения максимумов сгонов.

Результаты, приведенные в табл. 3.5, позволяют сделать вывод о том, что на рассматриваемых станциях при увеличении размеров основания циклона в два раза ( $R_c^2 = 2R_c^1$ ) максимумы сгонов и нагонов растут не более чем в 2,3 раза. Увеличение размера основания циклона в четыре раза ( $R_c^3 = 4R_c^1$ ) приводит к росту наибольших значений сгонов и нагонов не более чем в три раза. Учет водообмена через пролив приводит к изменению экстремальных отклонений уровня, не превышающих 40 %. Период времени, за который происходит формирование экстремальных значений уровня, уменьшается с увеличением размеров действующих циклонов.

Проанализируем особенности пространственного распределения полей скорости течений в поверхностном слое моря с учетом водообмена через пролив. В те же моменты времени ( $t = 1$ ;  $t = 8$ ;  $t = 24$  и  $t = 36$  ч) на рис. 3.10 приведены поля указанной скорости течений, генерируемых действием южного циклона радиусом основания 100 км, движущегося со скоростью 5 м/с.

В момент времени  $t = 1$  ч (рис. 3.10, а) направление течений в значительной степени повторяет характер полей скорости приводного ветра (рис. 3.10, а). Структура и направление течений (рис. 3.10, б), спустя 8 ч изменяются. В центральной части бассейна имеет место антициклонический вихрь, в восточных и западных районах моря течения ориентированы перпендикулярно к траектории передвижения циклона. Через 24 ч (рис. 3.10, в), когда циклон уходит из акватории, в большей части моря и Таганрогском заливе преобладает западное направление течений, в центральной части сохраняется антициклоническая структура. Через 12 ч после ухода циклона из акватории поля течений становятся более разнородными (рис. 3.10, г).



**Рис. 3.10.** Поля средней скорости течений в Азовском море с учетом пролива, генерируемых действием южного циклона со скоростью 5 м/с (радиус основания 100 км): *а* – циклон входит в акваторию ( $t = 1$  ч); *б* – центр циклона пересекает центральный район моря ( $t = 8$  ч); *в* – циклон покинул акваторию ( $t = 24$  ч); *г* – через 12 ч после его ухода из акватории ( $t = 36$  ч)

В западной и центральной частях моря отмечаются несколько вихревых образований, между которыми проходит полоса течений, направленных в сторону пролива, в восточной части течения ориентированы на запад.

В табл. 3.6 приведены рассчитанные с учетом и без учета пролива максимумы скорости течений, генерируемых южными циклонами с радиусами основания 100, 200 и 400 км, перемещающимся со скоростью 5 м/с. Значения максимумов представлены на различных глубинах моря. Из анализа приведенных данных следует, что под действием циклона радиусом 200 км при учете водообмена через пролив скорости течений на рассматриваемых горизонтах достигают наибольших значений:

1,34 (в поверхностном слое), 1,23 (на глубине 3 м), 1,16 (при  $z = -5$  м), 0,82 м/с (в придонном слое). Видно, что учет пролива влияет на величину максимальной скорости течений, которая также зависит от размеров действующих циклонов. При этом наибольшие значения относительных отклонений максимумов скорости течений для  $U'_n = 0$  и  $U_n = 0$  составляют: 23 ( $R_c^1$ ), 18 ( $R_c^2$ ) и 8 % ( $R_c^3$ ).

Т а б л и ц а 3.6

**Максимальные значения скорости течений (см/с), вызываемых южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с (значения радиуса основания циклонов 100, 200 и 400 км), без учета (1) и с учетом (2) пролива на различных горизонтах,**

| Горизонт, м | $R_c^1$ |     | $R_c^2$ |     | $R_c^3$ |     |
|-------------|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
|             | 1       | 2   | 1       | 2   | 1       | 2   |
| 0           | 89      | 115 | 110     | 134 | 104     | 113 |
| 3           | 82      | 104 | 102     | 123 | 91      | 99  |
| 5           | 75      | 97  | 97      | 116 | 81      | 86  |
| 10          | 55      | 67  | 70      | 82  | 68      | 71  |

Рассмотрим теперь влияние Керченского пролива на интегральный водообмен ( $G(t)$ ), вызываемый прохождением южных циклонов. В численных экспериментах на каждом шаге по времени рассчитаны значения функции  $G(t)$ . При этом положительные значения  $G(t)$  отвечают поступлению воды в Азовское море. Отрицательные – свидетельствуют о том, что поток через пролив меняет направление на противоположное и происходит отток воды из бассейна.

Из анализа зависимости от времени интегральных расходов ( $m^3$ ) воды через пролив в течение расчетного периода (168 ч) следует, что наибольший расход воды через пролив имеет место для циклона самого большого размера ( $53,6 m^3$ ), наименьший – для циклона с наименьшим основанием ( $12,7 m^3$ ). Нарастание расхода до максимума происходит от начального момента времени до момента, когда центр циклона пересекает центральную часть моря. После ухода циклона из акватории моря расход уменьшается

до нуля и затем принимает отрицательные значения, вызванные оттоком воды из моря.

Результаты расчетов в пунктах пролива представлены в табл. 3.7. Здесь даны максимальные значения средней по глубине скорости течений, генерируемых южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с, в зависимости от величины радиусов их оснований с соответствующими моментами времени. Из приведенных данных следует, что уменьшение радиуса основания циклонов приводит к увеличению максимальной скорости течений в проливе. Отметим, что наибольшие значения максимумов скорости течений достигаются в центре пролива (пункт  $P_3$ ) и составляют: 0,33 ( $R_c^1$ ); 0,29 ( $R_c^2$ ); 0,21 м/с ( $R_c^3$ ).

Т а б л и ц а 3.7

**Максимальные значения средней скорости течений ( $|U|_{\max}$ , см/с), генерируемых южными циклонами, перемещающимся со скоростью 5 м/с, и время их наступления ( $t_{\max}$ , ч) в пунктах пролива для трех значений радиуса их основания**

| Пункты<br>в проливе | $R_c^1$      |            | $R_c^2$      |            | $R_c^3$      |            |
|---------------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                     | $ U _{\max}$ | $t_{\max}$ | $ U _{\max}$ | $t_{\max}$ | $ U _{\max}$ | $t_{\max}$ |
| $P_1$               | 23           | 11,1       | 19           | 17,6       | 14           | 34,5       |
| $P_2$               | 27           | 11,2       | 23           | 17,8       | 17           | 34,6       |
| $P_3$               | 33           | 11,2       | 29           | 17,8       | 21           | 34,6       |
| $P_4$               | 32           | 11,3       | 29           | 17,9       | 22           | 34,8       |
| $P_5$               | 31           | 11,3       | 28           | 17,9       | 21           | 34,8       |

Наименьшие максимумы скорости течений имеют место в пункте, расположенном у западной границы пролива ( $P_1$ ): 0,23 ( $R_c^1$ ); 0,19 ( $R_c^2$ ); 0,14 м/с ( $R_c^3$ ). Отсюда следует, что при одном и том же значении радиуса основания циклонов в центральной части пролива возникают течения, максимальные скорости которых превышают в 1,5 раза максимальные скорости течений на его границе. При увеличении размера основания циклона в два и четыре раза наибольшие значения скорости течений во всех рассматриваемых пунктах пролива уменьшаются в 1,3 и 1,6 раза соответственно. Время достижения

максимальных значений скорости возрастает в три раза при увеличении размеров циклонов в четыре раза.

В следующей серии численных экспериментов оценим влияние на результаты расчетов изменения траектории передвижения циклонов с теми же основными параметрами, что и в предыдущем эксперименте. Моделирование штормовой ситуации [9, 34, 89] проведем для циклонов, перемещающихся с запада на восток (З), с учетом и без учета водообмена через пролив.

В табл. 3.8 приведены полученные на береговых станциях Азовского моря максимальные значения нагонов и сгонов, вызываемых действием западных и южных циклонов, перемещающихся со скоростью 5 м/с, для трех значений радиуса их основания. Здесь же даны соответствующие моменты времени.

Из анализа представленных данных видно, что южные циклоны (Ю) приводят к возникновению больших нагонов и сгонов во всех пунктах побережья. Максимальные отклонения значений уровня, вызываемые циклонами разных направлений, не превышают 40 %. Время достижения максимумов подъемов и понижений уровня моря под действием западного циклона незначительно увеличивается (менее чем на 14%) по сравнению с южными циклонами.

Как следует из анализа результатов моделирования штормовой ситуации, вызванной прохождением западных циклонов, с учетом и без учета пролива, это направление передвижения атмосферных возмущений не дает заметного увеличения максимумов сгонов и нагонов по сравнению с действием южных циклонов. Таким образом, учет водообмена через пролив вызывает возрастание на 40 % экстремальных сгонов и нагонов. При увеличении радиуса основания южного циклона в два раза происходит рост максимумов сгонов и нагонов не более чем в 2,3 раза. Увеличение радиуса основания циклона в четыре раза приводит к возрастанию наибольших значений сгонов и нагонов не более чем в три раза. Время, в течение которого происходит формирование экстремальных значений уровня, уменьшается с увеличением радиуса основания действующих атмосферных образований. В центральной части пролива максимальная скорость течений превышает в 1,5 раза скорость течений вблизи его боковых границ.

Т а б л и ц а 3.8

**Максимальные нагоны (1) и сгоны (2) (см) на береговых станциях Азовского моря, вызываемые действием западных (3) и южных (Ю) циклонов, перемещающихся со скоростью 5 м/с, с соответствующими моментами времени ( $t_{\text{extr}}$ , ч) для трех значений радиуса их основания**

| Береговые станции | $R_c^1 = 100$ км       |                   |                        |                   | $R_c^2 = 200$ км       |                   |                        |                   | $R_c^3 = 400$ км       |                   |                        |                   |
|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
|                   | 3                      |                   | Ю                      |                   | 3                      |                   | Ю                      |                   | 3                      |                   | Ю                      |                   |
|                   | $ \zeta _{\text{max}}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\text{max}}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\text{max}}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\text{max}}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\text{max}}$ | $t_{\text{extr}}$ | $ \zeta _{\text{max}}$ | $t_{\text{extr}}$ |
| 1. Геническ       | 9                      | 25,7              | 11                     | 25,1              | 12                     | 21,8              | 15                     | 21,1              | 17                     | 17,1              | 19                     | 16,3              |
| Бердянск          | 8                      | 20,6              | 10                     | 20,0              | 14                     | 22,2              | 16                     | 21,2              | 12                     | 41,6              | 13                     | 41,1              |
| Мариуполь         | 32                     | 18,5              | 46                     | 17,8              | 44                     | 29,7              | 68                     | 28,5              | 76                     | 46,3              | 79                     | 46,2              |
| Таганрог          | 44                     | 23,9              | 54                     | 23,6              | 85                     | 32,0              | 97                     | 31,4              | 88                     | 46,7              | 115                    | 46,7              |
| Ейск              | 47                     | 20,0              | 48                     | 19,3              | 44                     | 29,8              | 64                     | 29,1              | 46                     | 45,4              | 70                     | 45,2              |
| П.-Ахтарск        | 42                     | 14,2              | 47                     | 14,1              | 45                     | 22,9              | 66                     | 22,3              | 29                     | 38,7              | 37                     | 38,6              |
| Темрюк            | 5                      | 17,0              | 8                      | 15,8              | 7                      | 19,7              | 10                     | 19,5              | 14                     | 22,8              | 15                     | 22,6              |
| Опасное           | 7                      | 6,4               | 7                      | 5,1               | 7                      | 14,9              | 9                      | 14,7              | 11                     | 19,3              | 12                     | 19,2              |
| Мысовое           | 6                      | 30,4              | 10                     | 29,7              | 9                      | 14,4              | 12                     | 14,3              | 18                     | 17,9              | 19                     | 17,7              |
| 2. Геническ       | 17                     | 20,3              | 22                     | 19,5              | 16                     | 22,5              | 18                     | 22,3              | 37                     | 40,3              | 43                     | 40,1              |
| Бердянск          | 3                      | 43,2              | 3                      | 43,1              | 6                      | 28,5              | 8                      | 27,4              | 3                      | 54,5              | 4                      | 54,2              |
| Мариуполь         | 4                      | 32,6              | 7                      | 31,4              | 9                      | 16,1              | 11                     | 15,5              | 11                     | 21,5              | 17                     | 21,3              |
| Таганрог          | 16                     | 35,0              | 21                     | 33,8              | 34                     | 21,2              | 47                     | 20,7              | 36                     | 46,0              | 63                     | 45,7              |
| Ейск              | 30                     | 14,1              | 48                     | 13,3              | 34                     | 17,0              | 53                     | 16,8              | 37                     | 20,9              | 44                     | 20,9              |
| П.-Ахтарск        | 31                     | 8,8               | 46                     | 8,8               | 34                     | 12,1              | 52                     | 11,4              | 29                     | 14,9              | 34                     | 14,5              |
| Темрюк            | 8                      | 21,6              | 13                     | 21,1              | 14                     | 30,1              | 19                     | 29,6              | 14                     | 47,5              | 19                     | 47,1              |
| Опасное           | 8                      | 20,7              | 12                     | 20,6              | 12                     | 27,3              | 16                     | 27,2              | 16                     | 44,7              | 22                     | 44,2              |
| Мысовое           | 11                     | 19,0              | 15                     | 18,4              | 12                     | 23,8              | 17                     | 23,6              | 25                     | 42,3              | 33                     | 41,9              |

## Глава 4

### **Численный анализ течений, сгонно-нагонных процессов и распространения загрязнений при штормовых ситуациях в Азовском море с использованием атмосферной модели *SKIRON***

Своевременное предупреждение сгонно-нагонных явлений позволяет создать условия для нормального судоходства и избежать возможного ущерба загруженным прибрежным регионам. Одним из способов, позволяющих дать прогноз колебаний уровня моря, является численное моделирование. С применением трехмерной нелинейной математической модели выполнены численные эксперименты по исследованию динамики Азовского моря под действием полей ветра и атмосферного давления, полученных с использованием модели *SKIRON* [146] (<http://forecast.uoa.gr>), использующей усвоение данных метеорологических наблюдений. Здесь же проведена верификация модели по данным прямых измерений уровня на ст. Геничск и Мариуполь. Это позволило определить наиболее приемлемое использование в расчетах различных представлений коэффициента поверхностного трения.

#### **§ 4.1. Течения и колебания уровня, генерируемые ветром, данные о котором приведены в прогностической модели *SKIRON***

Параметры модели и характеристики полей ветра. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды (1.1) – (1.4). Граничные и начальные условия имеют вид (1.5), (1.6), (1.8), (1.9), (1.11). Для численной реализации исходными данными являются рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря (см. рис. 1.4). В качестве входных метеорологических данных используются результаты численного моделирования полей приводного ветра и атмосферного давления, полученные с помощью региональной прогностической модели *SKIRON* за ноябрь 2006 г. Эти данные предоставлены С. В. Станичным. Пространственное разрешение атмосферных полей составляет 10 км, дискретность по времени – 2 ч.

Для численных расчетов выбрано три коэффициента поверхностного трения  $C_a^i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Первый коэффициент (1.7) взят на основе известного соотношения W. Large, S. Pond [147]. Из более поздней работы S. Hsu [150] для  $C_a^2$  используется формула

$$C_a^2 = k^2 (14,56 - 2 \ln W_0)^{-2}, \quad (4.1)$$

где  $k = 0,4$  – постоянная Кармана;  $W_1 = |\mathbf{W}|W_0^{-1}$ ,  $W_0 = 1$  м/с. Третий коэффициент рассчитывается по наиболее современному представлению (J. Wu, 1987 г.) [159]:

$$C_a^3 = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^3, & |\mathbf{W}_0| \geq 7,5 \text{ м/с} \\ (0,8 + 0,065|\mathbf{W}_0|) \cdot 10^3, & |\mathbf{W}_0| > 7,5 \text{ м/с} \end{cases}. \quad (4.2)$$

В серии численных экспериментов исследуется влияние совместного действия стационарного и полученного по данным региональной прогностической системы *SKIRON* (с 1 по 30 ноября 2007 г.) ветров на максимальные скорости течений, эволюцию примеси и экстремальные значения сгонов и нагонов в Азовском море. Пространственное разрешение атмосферных полей 10 км, дискретность по времени 2 ч.

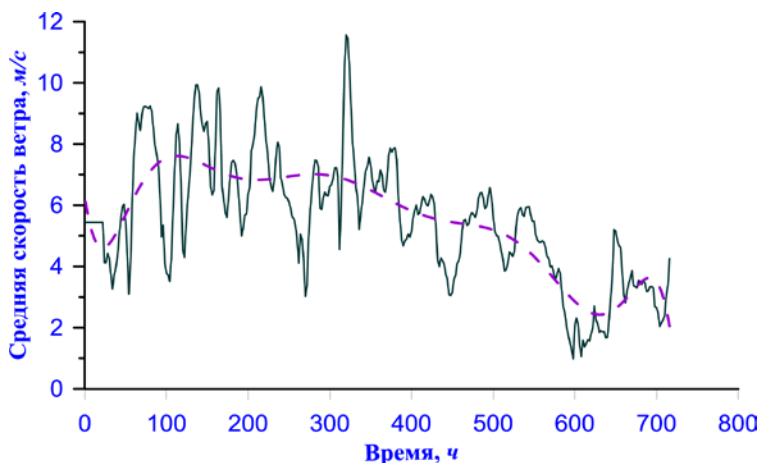
На рис. 4.1 даны графики осредненной по акватории моря скорости прогностического ветра и ее тренд в течение 720 ч (30 сут). Средняя скорость ветра в каждый момент времени рассчитывается по формуле

$$\overline{\mathbf{W}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\mathbf{W}_k(t)|, \quad (4.3)$$

где  $N$  – число узлов расчетной сетки;  $|\mathbf{W}_k(t)| = \sqrt{W_x^2(t)_k + W_y^2(t)_k}$  – модуль скорости ветра в ее  $k$ -ом узле. Аппроксимация  $\overline{\mathbf{W}}$  полиномом 9-й степени проводится по методу наименьших квадратов и дает тренд поведения скорости (рис. 4.1, штриховая линия).

Из анализа поведения кривой 2 видно, что за первые 6 сут происходит усиление ветра до 7 м/с, следующие 15 сут скорость монотонно уменьшается до 5 м/с, затем в течение следующих 5 сут отмечается резкое снижение скорости до 1 м/с, после чего она возрастает и через 6 сут не превышает 4 м/с (над морем штиль). Максимум средней скорости составляет 11,56 м/с и имеет место 13 ноября (в 320 ч), минимум – 0,98 м/с 25 ноября (в 598 ч). В среднем в течение ноября скорость приводного ветра составляет 5,53 м/с.

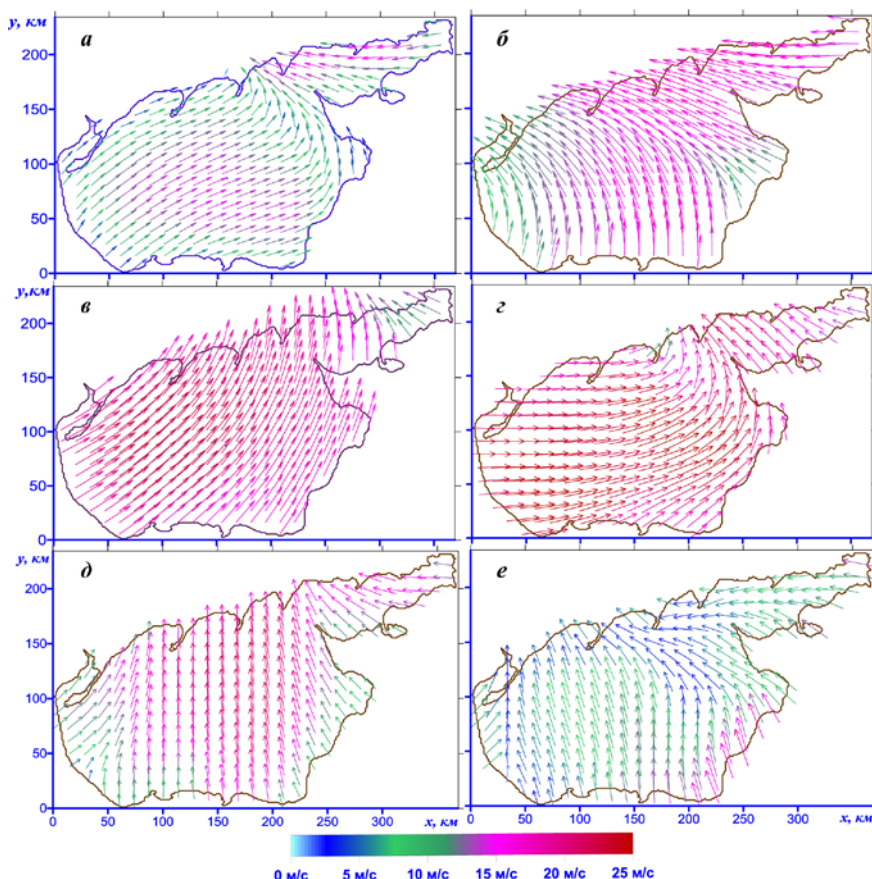
Как следует из графика (рис. 4.1, линия 1), поле средней скорости неоднородно. В течение коротких периодов от 1 до 2 сут скорость то растет, то убывает и направление ветра меняется. В течение ноября над акваторией преобладал ветер западного и северо-западного направлений, но также было отмечено прохождение нескольких циклонов.



**Рис. 4.1.** Средняя скорость ветра над Азовским морем в течение расчетного периода (сплошная линия) и ее тренд (штриховая)

На рис. 4.2 представлены поля ветра над Азовским морем, которые соответствуют экстремумам его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация отмечается 3–4 ноября (рис. 4.2, *а*), ветер меняет направление, и его скорость достигает на отдельных участках 14 м/с. На восьмые сутки над акваторией движется циклон (рис. 4.2, *б, в*) с большой скоростью, который формирует экстремальные нагоны и сгоны на станциях. Следующий максимум

скорости приходится на середину месяца, что соответствует обширному циклоническому образованию (рис. 4.2, *з, д*). На рис. 4.2, *е* показано поле ветра 13 ноября – последний экстремум скорости, в это время на ст. Геничеськ и Мариуполь имеют место максимальные сгоны. Далее до конца ноября над Азовским морем скорость ветра уменьшается и его направление практически не меняется.



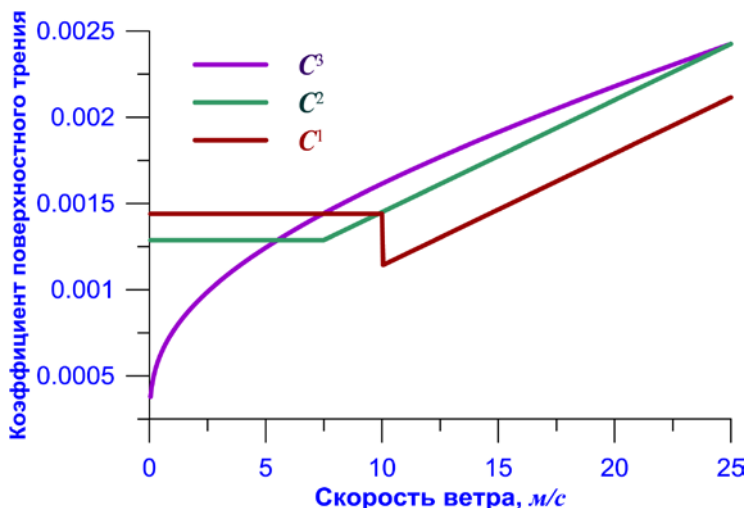
**Рис. 4.2.** Поля приводного ветра в различные моменты времени: 96 ч (*a*), 168 ч (*б*); 196 ч (*в*); 240 ч (*з*); 252 ч (*д*); 314 ч (*е*)

Анализ максимальной скорости ветра в период шторма 13–14 ноября показал, что максимум его скорости составлял 15,2 м/с.

В третьей декаде ноября скорость ветра значительно уменьшилась, а 25 ноября была близка к нулю.

В серии численных экспериментов оценивается влияние коэффициента поверхностного трения на максимумы сгонов и нагонов, формируемых на станциях побережья. Данный эксперимент проводится с целью изучения чувствительности решения к коэффициенту поверхностного трения. Расчетные значения сгонов и нагонов, возникающих под действием прогностического ветра, отмечаются на береговых станциях Азовского моря, расположенных по его периметру.

На рис. 4.3 представлены зависимости коэффициентов поверхностного трения от скорости ветра, рассчитанные по соотношениям (1.7), (4.1), (4.2). Видно, что при скорости ветра более 10 м/с между коэффициентами трения выполняется неравенство  $C_a^3 > C_a^2 > C_a^1$ , при малой скорости (до 4 м/с) –  $C_a^2 > C_a^1 > C_a^3$ , при средней (4–5,2 м/с) –  $C_a^2 > C_a^3 > C_a^1$ .



**Рис. 4.3.** Зависимость коэффициента поверхностного трения от скорости ветра

В течение всего расчетного периода ( $0 \leq t \leq 720$  ч) по всей акватории Азовского моря наибольшее значение среди максимумов коэффициентов поверхностного трения принимает  $C_a^3$ , наименьшее –

$C_a^1$ . Наибольшее значение  $C_a^2$  находится между  $C_a^3$  и  $C_a^1$  ( $C_a^3 > C_a^2 > C_a^1$ ), и только в отдельные моменты времени оно становится больше, чем  $C_a^1$ .

Сравним варианты решений, полученных при применении формул (1.7), (4.1), (4.2), по относительным изменениям экстремумов  $|\zeta|$  на станциях  $A_1 - A_9$ . Величину относительного отклонения решений ( $\delta, \%$ ) будем находить по формуле:  $\delta|\zeta| = 100 \% \cdot ||\zeta|_{\text{наиб}} - |\zeta|_{\text{наим}}|/|\zeta|_{\text{наиб}}$ . В табл. 4.1 приведены максимальные значения нагонов и сгонов (см) на береговых станциях и отклонение результатов ( $\delta, \%$ ) в зависимости от коэффициента поверхностного трения  $C_a^i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

Из анализа данных, приведенных в первой (верхней) части табл. 4.1, следует, что максимальные нагоны имеют место на ст. Таганрог. Они составляют для коэффициентов:  $C_a^1 - 0,75$  м (в 331,7 ч);  $C_a^2 - 0,829$  м (в 331,4 ч);  $C_a^3 - 0,738$  м (в 331,9 ч). Отклонение уровня на этой станции максимально и равно 11 %. Минимальные нагоны отмечаются в Геническе и соответственно равны:  $C_a^1 - 0,171$  м (в 538,1 ч);  $C_a^2 - 0,192$  м (в 538,2 ч);  $C_a^3 - 0,192$  м (в 538,2 ч). Наименьшее отклонение при расчете нагонов с разными коэффициентами поверхностного трения имеет место в Бердянске и составляет 0,2 %.

Во второй (нижней) части табл. 4.1 даны максимальные значения сгонов на тех же станциях. Анализируя приведенные данные, отметим, что наибольшие сгоны для различных коэффициентов поверхностного трения  $C_a^i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) имеют место на ст. Геническ:  $C_a^1 - 0,377$  м ( $t_{\text{extr}} = 324,6$  ч);  $C_a^2 - 0,41$  м ( $t_{\text{extr}} = 326,4$  ч);  $C_a^3 - 0,369$  м ( $t_{\text{extr}} = 324,5$  ч), где  $t_{\text{extr}}$  – время достижения максимальных нагонов и сгонов на ст.  $A_1 - A_9$ . Максимальное отклонение, полученное при расчете сгонов, равно 12,7 % и наблюдается в Ейске. Минимальные сгоны отмечаются в Бердянске и соответственно равны:  $C_a^1 - 0,153$  м ( $t_{\text{extr}} = 163,2$  ч);  $C_a^2 - 0,171$  м ( $t_{\text{extr}} = 162,9$  ч);  $C_a^3 - 0,169$  м ( $t_{\text{extr}} = 163,1$  ч). Наименьшее отклонение при расчете нагонов с разными коэффициентами поверхностного трения имеет место в Бердянске и составляет 0,2 %.

Т а б л и ц а 4.1

**Максимальные нагоны (1) и сгоны (2) (см) и соответствующие им моменты времени  $t_{extr}$  (ч) на береговых станциях для трех значений  $C_a^{1, 2, 3}$**

| Береговые станции | $C_a^1$          |            | $C_a^2$          |            | $C_a^3$          |            |
|-------------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|
|                   | $ \zeta _{\max}$ | $t_{extr}$ | $ \zeta _{\max}$ | $t_{extr}$ | $ \zeta _{\max}$ | $t_{extr}$ |
| 1. Геническ       | 17,1             | 538,1      | 19,2             | 538,2      | 19,2             | 538,2      |
| Бердянск          | 22,4             | 137,9      | 22,3             | 137,8      | 22,3             | 137,8      |
| Мариуполь         | 38,8             | 142,1      | 43,8             | 219,1      | 39,3             | 142,1      |
| Таганрог          | 75,0             | 331,7      | 82,9             | 331,4      | 73,8             | 331,9      |
| Ейск              | 48,2             | 329,3      | 51,9             | 330,1      | 48,0             | 329,3      |
| П.-Ахтарск        | 74,2             | 322,2      | 73,3             | 322,9      | 68,1             | 321,7      |
| Темрюк            | 33,0             | 319,9      | 32,4             | 163,4      | 32,5             | 163,4      |
| Опасное           | 22,0             | 163,8      | 22,2             | 163,6      | 22,3             | 163,6      |
| Мысовое           | 13,6             | 161,5      | 14,0             | 161,3      | 14,1             | 161,3      |
| 2. Геническ       | 37,7             | 324,6      | 41,0             | 326,4      | 36,9             | 324,5      |
| Бердянск          | 15,3             | 163,2      | 17,1             | 162,9      | 16,9             | 163,1      |
| Мариуполь         | 15,5             | 417,8      | 17,4             | 417,8      | 17,5             | 417,8      |
| Таганрог          | 24,9             | 420,2      | 27,7             | 500,0      | 27,7             | 500,1      |
| Ейск              | 15,8             | 496,6      | 17,8             | 496,7      | 17,8             | 496,8      |
| П.-Ахтарск        | 17,3             | 292,4      | 19,4             | 292,4      | 19,5             | 292,4      |
| Темрюк            | 17,8             | 138,3      | 19,1             | 218,8      | 18,1             | 138,6      |
| Опасное           | 17,9             | 219,4      | 20,1             | 219,4      | 18,6             | 219,4      |
| Мысовое           | 27,0             | 326,0      | 28,9             | 326,2      | 25,8             | 325,7      |

Для ст.  $A_1$ ,  $A_3 - A_5$  наибольшие значения нагонов рассчитаны с коэффициентом  $C_a^2$ , для  $A_2$ ,  $A_6$ ,  $A_7$  при  $C_a^1$ , для  $A_8$   $A_9$  при  $C_a^3$ . Наибольшие сгоны на станциях  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_7 - A_9$  рассчитаны с коэффициентом  $C_a^2$ , на ст.  $A_3$  и  $A_6$  при  $C_a^3$ . Следовательно, на большинстве станций наибольшие сгоны и нагоны получены при расчетах, где коэффициент трения вычисляется по формуле (3.5), а минимальные – при вычислении по формуле (2.8). Из анализа значений погрешности  $\delta$ , которую дают вычисления по формулам (1.7), (4.1),

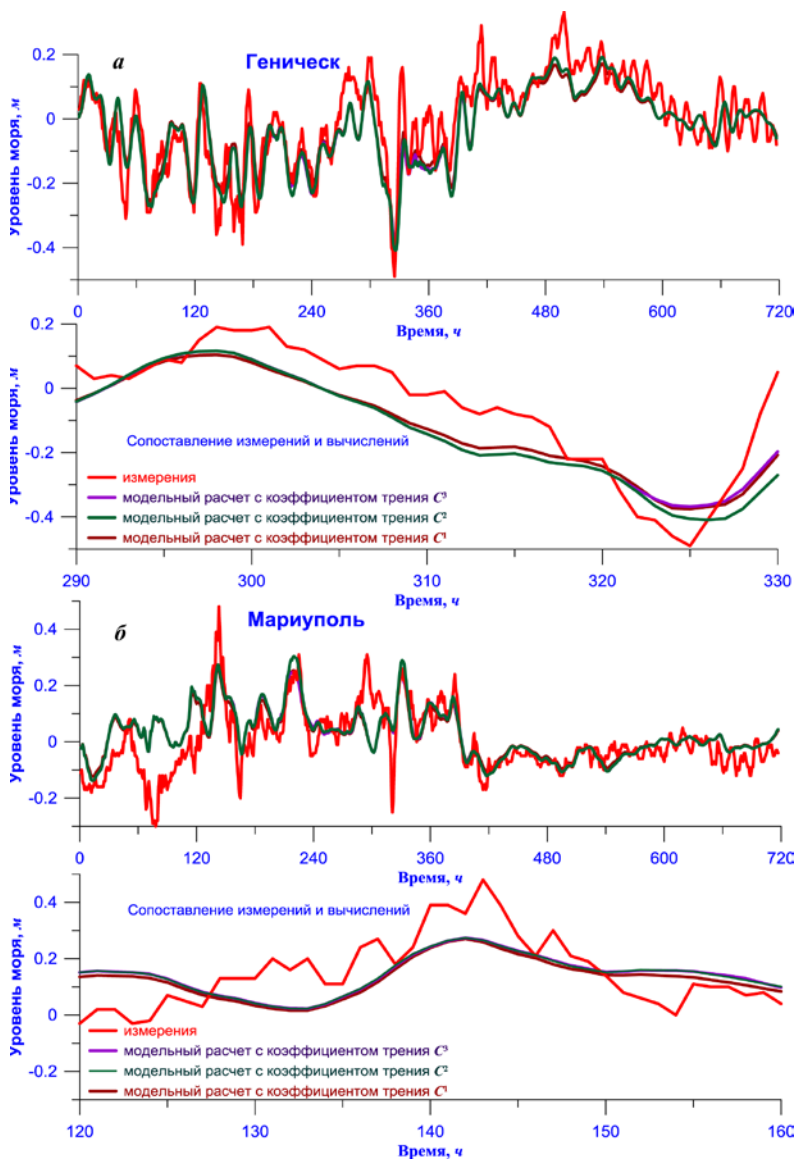
(4.2), видно, что для нагонов она не превышает 11 %, а для сгонов 12,7 %.

В этой же серии численных экспериментов проанализируем, как влияет изменение коэффициента поверхностного трения на время достижения экстремальных значений  $|\zeta|$ . Из анализа данных, приведенных в табл. 4.1, следует, что нагоны на станциях Азовского моря, кроме ст. Аз и А<sub>7</sub>, имеют место в моменты времени, отличающиеся не более чем на 12 ч. Для сгонов, кроме ст. А<sub>4</sub> и А<sub>7</sub>, значения  $t = t_{\text{extr}}$  отличаются в пределах половины суток.

Проведем анализ результатов моделирования и натурных измерений уровня моря, полученных на основании показаний мареографов, за тот же расчетный период на ст. Геническ и Мариуполь. Сравнение проводилось на основании таблиц ежечасных высот уровня моря Государственной метеорологической службы Украины за ноябрь 2006 г. Для верификации модели были привлечены данные наблюдений за уровнем моря на береговых гидрометеорологических станциях и постах Азовского моря за ноябрь 2006 г. Эта информация представляет собой измерения уровня с помощью самописцев на ст. Геническ и Мариуполь.

Графики зависимости уровня моря от времени, полученные по данным наблюдений за ноябрь 2006 г. и по модели, показаны на рис. 4.4. Видно, что общие черты колебаний уровня моря для указанных станций Азовского моря в основном совпадают. В Геническе (рис. 4.4, а) наибольшее экстремальное значение уровня – это сгон как по модели, так и по наблюдениям, который достигается в 325 ч. Отличие состоит в величине сгона, по измерениям она больше, чем по расчетам. Значение сгона по измерениям составляет 0,49 м, ближайшее к нему расчетное значение 0,41 м получено при  $C_a^2$ .

Отклонение величины  $|\zeta|$  составляет 8 см или 16 %. Наибольший из нагонов на этой станции (рис. 4.4, а) наблюдается в 501 ч. По измерениям нагон составляет 0,33 м, самое близкое к нему модельное значение 0,22 м отмечается при вычислении с коэффициентами  $C_a^2$  и  $C_a^3$ . На ст. Мариуполь наибольший наблюдаемый и расчетный подъем уровня имеет место в 145 ч (рис. 4.4, б). Здесь значение нагона по модели (0,48 м при  $C_a^2$ ) больше, чем по данным наблюдений (0,44 м) на 4,2 см или 9 %. Наибольший сгон здесь по измерениям составляет 0,30 м и также больше, чем модельный (0,18 м при  $C_a^2$  и  $C_a^3$ ), на 12 см.



**Рис. 4.4.** Изменения уровня моря на ст. Геническ (а) в интервалах  $0 \leq t \leq 800$  ч и  $290 \leq t \leq 330$  ч. Изменения уровня моря на ст. Мариуполь (б) в интервалах  $0 \leq t \leq 800$  ч и  $120 \leq t \leq 160$  ч

Анализ графиков уровня свидетельствует о сравнительно хорошем согласии основных черт колебаний. Некоторые отличия, например, по величине максимумов сгонов и нагонов могут быть объяснены определенными погрешностями при измерениях и вычислениях.

Для ст. Геническ и Мариуполь модельные значения  $|\zeta|$ , полученные с использованием коэффициентов трения (4.1) и (4.2), лучше согласуются с измерениями, чем с коэффициентом (1.7). Оценим относительные отклонения модельных и измеренных экстремальных значений уровня при тех коэффициентах, которые лучше всего согласуются с данными наблюдений. В Геническе величина модельного абсолютного максимума  $|\zeta|_{\max}$  (при  $C_a^2$ ) на 8 см (или 16 %) меньше, чем по данным наблюдений. Отклонение по времени его достижения отличается на 2,4 ч (или 0,7 %). В Мариуполе  $|\zeta|_{\max}$  (при  $C_a^2$ ), полученный по модели, на 4,2 см (или 9 %) меньше измеренного. Модельное время достижения максимума здесь отличается от измерений на 2 ч (или 1,4 %).

Для указанных атмосферных полей проведено исследование чувствительности модели к различным представлениям коэффициента поверхностного трения  $C_a^1$ ,  $C_a^2$  и  $C_a^3$  согласно J. Wu [159]. По полученным оценкам, приведенным в табл. 4.2, использование коэффициента поверхностного трения, предложенного S. A. Hsu [150], дает наилучшее соответствие с данными наблюдений в Геническе и Мариуполе.

Т а б л и ц а 4.2

**Абсолютные максимумы отклонений уровня и время их достижения на береговых станциях Геническ и Мариуполь, полученные численно и по данным измерений**

| Станция   | Экстремумы $ \zeta $<br>и время их<br>достижения | Результаты<br>моделирования |         |         | Данные<br>измерений |
|-----------|--------------------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------------------|
|           |                                                  | $C_a^1$                     | $C_a^2$ | $C_a^3$ |                     |
| Геническ  | $ \zeta _{\max}$ , см                            | 37,7                        | 41,0    | 36,9    | 49,0                |
|           | $t_{\text{extr}}$ , ч                            | 324,6                       | 326,4   | 324,5   | 324,0               |
|           | $ \zeta _{\max}$ , см                            | 38,8                        | 43,8    | 39,3    | 48,0                |
| Мариуполь | $t_{\text{extr}}$ , ч                            | 142,1                       | 142,2   | 142,1   | 146,1               |

Результаты сравнения модельных значений и прямых измерений уровня моря подтверждают удовлетворительное описание моделью динамических процессов в Азовском море.

Фактические величины сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря бывают очень большими, что приводит к возникновению опасных и даже катастрофических последствий. Эти колебания могут приводить к изменениям очертаний береговой линии. Значительные пространства прибрежных районов в результате этого затопляются или, наоборот, вода отступает.

В табл. 4.3 приведены экстремальные характеристики колебаний уровня Азовского моря по данным береговой сети гидрометеорологических станций за весь исторический период наблюдений. Эти сведения получены из базы данных МО УкрНИГМИ.

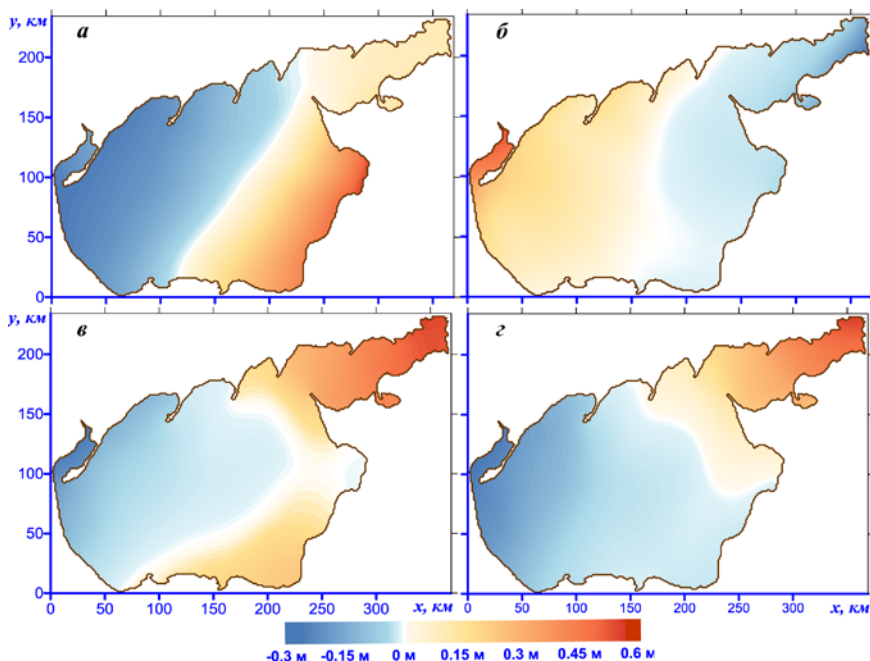
Т а б л и ц а 4.3

**Максимальные ( $\zeta_{\max}$ , см) и минимальные ( $\zeta_{\min}$ , см) отклонения уровня Азовского моря от среднегоголетних значений по данным береговой сети гидрометеорологических станций**

| Станция            | Период наблюдений | $\zeta_{\max}$ | $\zeta_{\min}$ | Размах |
|--------------------|-------------------|----------------|----------------|--------|
| Опасное            | 1945–2001         | 108            | –85            | 193    |
| Мысовое            | 1926–2001         | 139            | –121           | 260    |
| Геническ           | 1878–2001         | 225            | –187           | 412    |
| Бердянск           | 1923–2001         | 84             | –112           | 196    |
| Мариуполь          | 1923–2001         | 128            | –121           | 249    |
| Таганрог           | 1882–1998         | 251            | –358           | 609    |
| Ейск               | 1915–1998         | 151            | –287           | 438    |
| Ясенская переправа | 1928–1989         | 147            | –156           | 303    |
| Приморско-Ахтарск  | 1916–1998         | 188            | –175           | 363    |
| Темрюк             | 1910–1998         | 316            | –84            | 400    |

Как видно, подъемы уровня более 2 м относительно нулевых отметок возможны в районах Геническа, Таганрога и Темрюка. В свою очередь опускания уровня более чем на 2,5 м имеют место в Таганроге и Ейске. Максимальный размах колебаний на большинстве станций превышает 3 м, а в Таганроге – более 6 м.

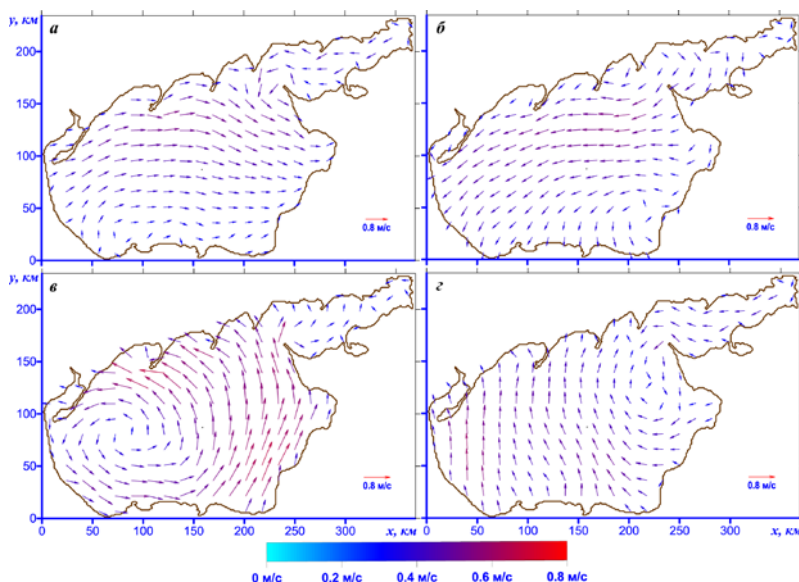
На рис. 4.5 и 4.6 представлены поля уровня свободной поверхности и пространственные распределения величины и направления скорости течений на поверхности моря в моменты времени, соответствующие штормовым ситуациям ноября 2006 г. Как следует из рис. 4.5 и 4.6, интенсивные нагоны отмечаются у северо-восточного побережья моря, а значительные спады уровня на западном побережье.



**Рис. 4.5.** Поля уровня Азовского моря, вызванные действием полей ветра, полученным по модели *SKIRON* в различные моменты времени: 96 ч (а), 168 ч (б); 240 ч (в); 314 ч (г)

При перемещении над морем циклонов с юга, запада или северо-запада возможны кратковременные значительные повышения

уровня в восточной и юго-восточной частях моря. Поскольку сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря имеют вид сейши с одной узловой линией, проходящей через центральную область моря [46, 93] (рис. 4.6, *a*), то наименьшие амплитуды колебаний наблюдаются вблизи узловой линии (в Бердянске), а наибольшие – на отдаленных станциях Геническ, Ейск, Таганрог.



**Рис. 4.6.** Поля течений (м/с) на горизонте 1 м в те же моменты времени, что и на рис. 3.11

## § 4.2. Изучение динамических процессов и их влияния на трансформацию пассивной примеси при наличии стационарных течений в Азовском море с использованием данных атмосферной модели *SKIRON*

Волны, течения и сгонно-нагонные процессы, вызванные действием ветра в Азовском море, являются одним из основных факторов, влияющих на безопасность и эффективность эксплуатации прибрежной инфраструктуры и морского транспорта. Последствия промышленной и сельскохозяйственной деятельности в Азово-Черноморском регионе оказывают заметное негативное воздействие

на морскую среду. В связи с этим возникает необходимость проведения научных исследований, ставящих своей целью оценить последствия этого воздействия и найти пути его существенного уменьшения. Одним из направлений таких исследований является изучение волн [68, 131], течений, сгонно-нагонных процессов и связанного с ними распространения загрязнений в прибрежных районах Азовского моря.

Анализ течений и колебаний уровня, возникающих в этом море под действием переменного по времени ветра и атмосферного давления при отсутствии стационарных течений, выполнен в [47, 52, 133, 136, 137]. Целью данной работы является исследование влияния стационарных течений на сгонно-нагонные явления и трансформацию пассивной примеси, вызываемые действием ветра, приповерхностные поля которого рассчитываются методом реанализа (*SKIRON*). Ставится задача – найти оценки изменений значений скорости течений, уровня поверхности моря и характеристик областей загрязнения при наличии и отсутствии стационарных течений. Для построения численного алгоритма использована модель *POM*, адаптированная к условиям бассейна Азовского моря.

Стационарные движения в Азовском море генерируются полем ветра, скорость которого ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} = 5, 10$  м/с) на поверхности моря не зависит от  $x$  и  $y$ , а первые 3 часа ( $0 < t \leq 3$  ч) нарастает со временем по линейному закону ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} = 0$  при  $t = 0$ ), достигает наибольшего значения и далее ( $t \geq 3$  ч) не меняется. Момент выхода течений на установившийся режим ( $t = t_0$ ) определяется тем, что между двумя соседними значениями времени ( $t_k > t_0$  и  $t_k + \Delta t$ ) не происходит заметных изменений отклонений уровня и скорости течений (изменения не превышают 3 %). Исходя из этого, находим время установления движения жидкости ( $t = t_{01}, \mathbf{W}_{st}^1; t = t_{02}, \mathbf{W}_{st}^2$ ), которое также является временем начала действия переменного ветра *SKIRON*. В момент установления движения жидкости ( $t = t_0$ ) к стационарному ветру ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ ) присоединяется неоднородное по пространству и времени поле ветра, полученное по данным реанализа ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ). При  $t > t_0$   $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$  поддерживает стационарное движение, а  $\mathbf{W}_{SKIRON}$  – добавляет к нему нестационарную составляющую.

В серии численных экспериментов изучается влияние совместного действия стационарного ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ ) и переменного ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ) ветра на максимальную скорость течений и экстремальные значения сго-

нов и нагонов. Эти результаты сравниваются с данными, полученными при расчете волн и течений, вызванных действием только постоянного ветра или только ветром, определенным по данным реанализа.

Исследование установившихся течений выполняется для постоянного западного ветра, скорость которого равна 5 и 10 м/с ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} = 5, 10$  м/с). В качестве переменного по времени и неоднородного по пространству используются поля приводного ветра модели *SKIRON* за период с 8 по 18 сентября 2007 г. Действие ветра при наличии стационарных течений в Азовском море происходит в течение 10 сут, начиная с 0 ч 8 сентября ( $t = t_0$ ).

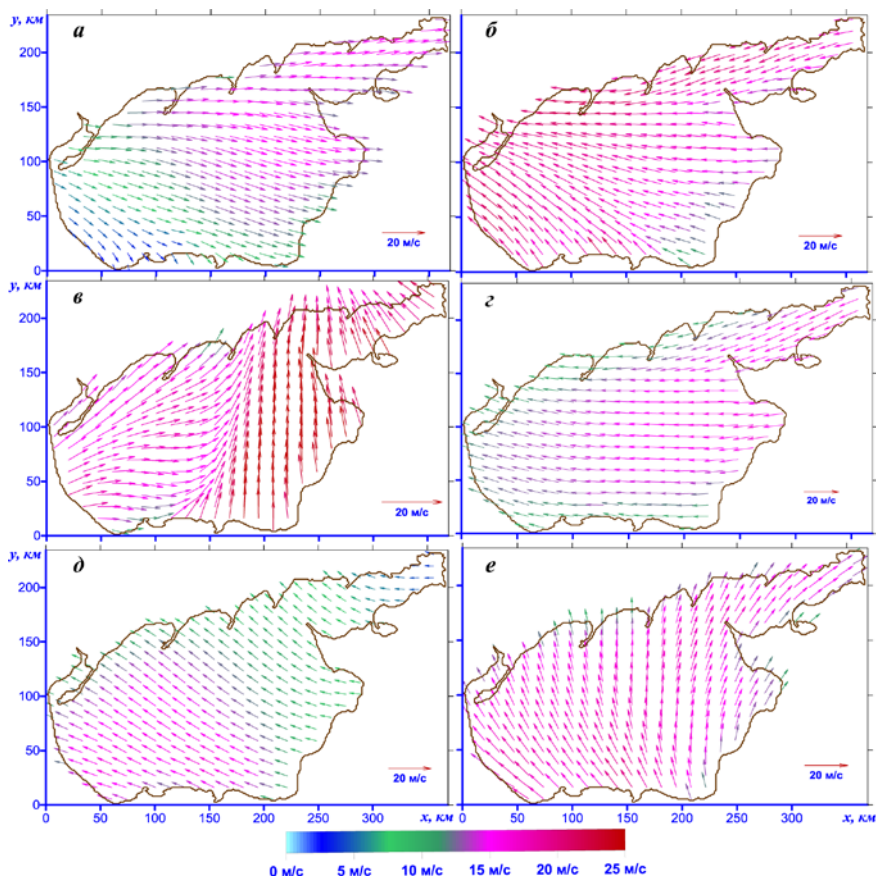
Анализ информации о характерных условиях погоды для района Азовского моря свидетельствует о том, что в теплый период года (апрель – октябрь) имеет место антициклонический тип со скоростью ветра не более 8 м/с. При этом Азовское море оказывается в тыловой части антициклона, смещающегося с запада на восток. В это время преобладают восточные и северо-восточные ветры.

На рис. 4.7 представлены векторные поля ветра над Азовским морем модели *SKIRON*, которые соответствуют экстремальным значениям его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация возникает через 36 ч (рис. 4.7, *а*). В этом случае над южной частью моря отмечается антициклоническое воздействие, а в его северной части скорость ветра достигает на отдельных участках 10 м/с. Через 68 ч ( $t = t_0 + 68$  ч) со скоростью 15–20 м/с перемещаются два небольших циклона (рис. 4.7, *б*), которые формируются в восточной и западной частях моря.

Следующие максимумы скорости течений, которые соответствуют обширным циклоническим образованиям (рис. 4.7, *в*, *г*), достигаются в 90 и 140 ч. На рис. 4.7, *д*, *е* показаны направления полей ветра в 152 и 168 ч, соответствующие экстремумам его скорости. В дальнейшем (до 18 сентября) интенсивность ветра уменьшается.

В табл. 4.4 представлены как функции времени величины максимальных скоростей и направления ветра ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ) над Азовским морем с 11 по 18 сентября 2007 г. При этом между двумя соседними значениями времени его скорость меняется монотонно. Отклонения вектора скорости ветра от направления оси  $x$  (ось  $x$  направлена на восток под углом  $50^\circ$  к параллели) указаны в градусах. Отсюда видно, что за указанный период (192 ч) наибольшее и наименьшее зна-

чения максимальной скорости равны 12,7 и 1,6 м/с соответственно. Преобладающими направлениями ветра являются северо-восточное и северо-западное.



**Рис. 4.7.** Поля ветра, полученные по данным реанализа модели *SKIRON* в различные моменты времени от 0 ч 11 сентября 2007 г: 36 ч (*a*), 68 ч (*б*); 90 ч (*в*); 140 ч (*г*); 152 ч (*д*); 168 ч (*е*)

Отметим, что результаты многолетних наблюдений атмосферных возмущений в районе Азовского моря [17, 98, 148] для указан-

ного периода (сентябрь месяц) удовлетворительно согласуются с данными *SKIRON*, приведенными в этой таблице.

Т а б л и ц а 4.4

**Максимальные скорости ветра, полученные по данным модели *SKIRON* с 0 ч 11 сентября до 24 ч 18 сентября 2007 г.**

| Время,<br>ч | Скорость<br>ветра,<br>м/с | Направление<br>ветра,<br>град | Время,<br>ч | Скорость<br>ветра,<br>м/с | Направление<br>ветра,<br>град |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------------|
| 2           | 6,8                       | 107                           | 76          | 9,4                       | 354                           |
| 14          | 2,6                       | 344                           | 92          | 12,7                      | 350                           |
| 28          | 5,8                       | 9                             | 104         | 9,6                       | 100                           |
| 30          | 3,0                       | 10                            | 106         | 7,5                       | 210                           |
| 32          | 5,2                       | 107                           | 108         | 5,7                       | 200                           |
| 44          | 5,8                       | 344                           | 112         | 3,5                       | 110                           |
| 48          | 8,1                       | 100                           | 124         | 5,2                       | 344                           |
| 50          | 4,2                       | 213                           | 130         | 3,3                       | 354                           |
| 54          | 5,8                       | 195                           | 132         | 1,6                       | 347                           |
| 56          | 7,9                       | 192                           | 140         | 2,1                       | 100                           |
| 58          | 9,6                       | 108                           | 152         | 4,9                       | 106                           |
| 62          | 11,6                      | 350                           | 192         | 5,8                       | 200                           |

Численные эксперименты реализованы для двух значений скорости стационарного ветра западного направления с целью исследования влияния величины возникающих при этом стационарных течений на отклонения уровня моря и поля скоростей неустановившихся течений, вызванных действием  $\mathbf{W}_{SKIRON}$ .

В табл. 4.5 даны максимальные значения ( $U_{\max}$ ) скорости стационарных течений, вызванных постоянным ветром  $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ , а также наибольшие значения скорости нестационарных течений, генерируемых только ветром  $\mathbf{W}_{SKIRON}$  и их совместным действием.

Отметим, что результаты многолетних наблюдений атмосферных возмущений в районе Азовского моря [17, 98, 148] для указанного периода (сентябрь месяц) удовлетворительно согласуются с данными *SKIRON*, приведенными в этой таблице.

Т а б л и ц а 4.5

**Максимальные значения скорости течений ( $U_{\max}$ )  
на различной глубине моря, время их достижения ( $t_{\max}$ )  
и соответствующие им координаты ( $x_{\max}$ ,  $y_{\max}$ )**

| Скорость<br>ветра,<br>м/с | Горизонт,<br>м | $U_{\max}$ ,<br>м/с | $x_{\max}$ ,<br>км | $y_{\max}$ ,<br>км | $t_{\max}$ ,<br>ч.мин |
|---------------------------|----------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| $W_{st}^1 = 5$            | 1              | 0,16                | 236,29             | 174,08             | 8.00                  |
|                           | 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                  |
| $W_{st}^2 = 10$           | 1              | 0,49                | 235,38             | 172,19             | 8.35                  |
|                           | 3              | 0,44                | 235,97             | 172,86             | 8.55                  |
|                           | 5              | 0,41                | 237,07             | 171,50             | 9.16                  |
|                           | 10             | 0,29                | 235,99             | 171,16             | 9.54                  |
| $W_{SKIRON}$              | 1              | 0,48                | 206,25             | 189,27             | 128.15                |
|                           | 3              | 0,46                | 241,76             | 188,88             | 130.10                |
|                           | 5              | 0,41                | 263,30             | 199,05             | 137.20                |
|                           | 10             | 0,35                | 238,20             | 175,76             | 145.15                |
| $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$   | 1              | 0,73                | 201,48             | 106,15             | 130.20                |
|                           | 3              | 0,69                | 224,73             | 176,44             | 135.10                |
|                           | 5              | 0,61                | 225,31             | 156,78             | 139.15                |
|                           | 10             | 0,45                | 174,86             | 160,92             | 147.20                |
| $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$   | 1              | 0,91                | 159,09             | 175,58             | 152.10                |
|                           | 3              | 0,85                | 199,38             | 159,67             | 154.15                |
|                           | 5              | 0,72                | 258,19             | 188,40             | 157.10                |
|                           | 10             | 0,65                | 209,66             | 146,44             | 162.20                |

Здесь же указаны координаты максимальных значений скорости и время их достижения на различных глубинах. Из анализа этих данных следует, что при наличии стационарных течений увеличиваются скорости нестационарных течений по сравнению с их величинами при действии только ветра  $W_{SKIRON}$ . Так, в случае

$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$  значения  $U_{max}$  в 1,52; 1,50; 1,48 и 1,28 раза больше, чем для  $W_{SKIRON}$  на глубинах 1, 3, 5 и 10 м соответственно.

Аналогично при  $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$  величины  $U_{max}$  в 1,25; 1,23; 1,18 и 1,44 раза больше, чем для  $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$  на этих же уровнях. При этом для всех скоростей ветра значения  $U_{max}$  монотонно убывают с ростом глубины и на каждой из них для  $W_{st}^1$  и  $W_{SKIRON}$  отличаются не более чем на 5 %.

В табл. 4.6 приведены максимумы повышений ( $\zeta_{max}$ ) и понижений ( $|\zeta|_{max}$ ) уровня, координаты ( $x_{max}$ ,  $y_{max}$ ) и время их достижения ( $t_{max}$ ) в открытой части моря для значений  $W_{st}^{1,2}$ , равных 5 и 10 м/с, а также при  $W_{SKIRON}$  и  $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$ .

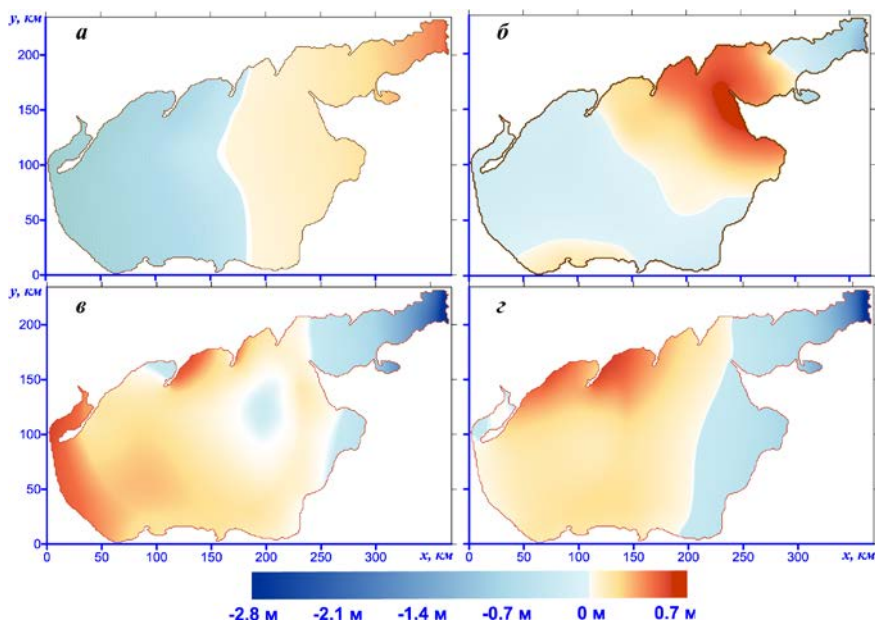
Т а б л и ц а 4.6

**Максимальные значения отклонений уровня моря  
( $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$ , см), время их достижения  
и соответствующие им координаты**

| Скорость<br>ветра           | $\zeta_{max}$ ,<br>см | $x_{max}$ ,<br>км | $y_{max}$ ,<br>км | $t_{max}$ ,<br>ч.мин | $ \zeta _{max}$ ,<br>см | $x_{min}$ ,<br>км | $y_{min}$ ,<br>км | $t_{min}$ ,<br>ч.мин |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| $W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$  | 20                    | 367               | 220               | 17.10                | 10                      | 4                 | 95                | 13.23                |
| $W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$ | 69                    | 368               | 218               | 18.46                | 39                      | 4                 | 107               | 13.47                |
| $W_{SKIRON}$                | 43                    | 279               | 90                | 168.15               | 25                      | 20                | 123               | 190.55               |
| $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$     | 55                    | 296               | 100               | 171.11               | 39                      | 22                | 124               | 191.30               |
| $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$     | 72                    | 290               | 101               | 172.20               | 58                      | 21                | 124               | 192.45               |

Анализ данных, приведенных в этой таблице, свидетельствует о том, что для  $W_{st}^2$  значения  $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$  в 3,45 и 3,9 раза больше, чем при  $W_{st}^1$ . В случае  $W_{SKIRON}$  значения  $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$  в 2,15 и 2,5 раза больше, чем для  $W_{st}^1$ , и в 1,6 и 1,5 раза меньше, чем при  $W_{st}^2$ . Для  $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$   $\zeta_{max}$  в 1,31, а  $|\zeta|_{max}$  в 2,1 раза больше, чем в случае  $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ . Таким образом, действие стационарного ветра одного направления, но большей скорости (5 и 10 м/с) при наличии  $W_{SKIRON}$  вызывает возрастание максимумов отклонений уровня ( $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$ ) на 31 % и 80 % соответственно.

Изменения профиля поверхности моря, вызванные действием ветра, показаны на рис. 4.8. Отсюда видно, что в установившемся режиме (рис. 4.8, *а*) имеет место понижение уровня вдоль западного побережья и повышение – вдоль восточного. Узловая (на рисунке штриховая) линия пересекает центральную часть моря перпендикулярно скорости ветра. В процессе действия переменного ветра (рис. 4.8, *б – з*) районы достижения наибольших и наименьших значений отклонений уровня моря меняются.



**Рис. 4.8.** Поля уровня Азовского моря в различные моменты времени: стационарный режим  $\mathbf{W}_{st}^1$ ,  $t = 48$  ч (*а*); нестационарный режим  $\mathbf{W}_{st}^1 + \mathbf{W}_{SKIRON} - t = 48$  ч (*б*),  $t = 90$  ч (*в*),  $t = 140$  ч (*г*)

В табл. 4.7 даны максимальные отклонения уровня на береговых станциях Азовского моря, вызванные стационарным ветром ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ ), только ветром по данным атмосферной модели ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ) и их совместным действием ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ).

В верхней части таблицы приведены значения нагонов, в нижней – сгонов.

Т а б л и ц а 4.7

**Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря в стационарном режиме, а также вызванные прогностическим ветром при наличии стационарных течений**

| Береговые станции | $W_{st}^1$ | $W_{st}^2$ | $W_{SKIRON}$ | $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ | $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ |
|-------------------|------------|------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| Геническ          | —          | —          | 25,4         | 32,2                    | 62,3                    |
| Бердянск          | —          | —          | 9,6          | 16,9                    | 44,3                    |
| Мариуполь         | 9,8        | 37,3       | 29,3         | 46,4                    | 80,4                    |
| Таганрог          | 20,7       | 62,4       | 50,6         | 63,1                    | 89,5                    |
| Ейск              | 13,8       | 52,2       | 38,1         | 76,0                    | 102,2                   |
| П.-Ахтарск        | 8,1        | 43,2       | 57,1         | 80,4                    | 91,1                    |
| Темрюк            | 10,2       | 26,9       | 24,5         | 29,7                    | 49,9                    |
| Опасное           | —          | —          | 9,4          | 16,1                    | 24,8                    |
| Мысовое           | 7,5        | 13,9       | 12,1         | 19,6                    | 34,2                    |
| Геническ          | 12,2       | 51,7       | 42,5         | 76,5                    | 87,0                    |
| Бердянск          | 4,0        | 17,6       | 17,3         | 30,9                    | 62,1                    |
| Мариуполь         | —          | —          | 18,2         | 26,0                    | 39,7                    |
| Таганрог          | —          | —          | 29,0         | 42,4                    | 72,9                    |
| Ейск              | —          | —          | 18,9         | 41,1                    | 45,3                    |
| П.-Ахтарск        | —          | —          | 14,1         | 23,8                    | 35,5                    |
| Темрюк            | —          | —          | 8,7          | 15,2                    | 23,0                    |
| Опасное           | 3,3        | 11,1       | 10,6         | 20,5                    | 34,2                    |
| Мысовое           | —          | —          | 22,3         | 39,4                    | 63,9                    |

Из анализа представленных результатов расчетов следует, что наибольшие нагоны, генерируемые системой стационарного и переменного ветров ( $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$ ), имеют место на ст. Таганрог — 20,7 см ( $W_{st}^1$ ), 62,4 см ( $W_{st}^2$ ); Приморско-Ахтарск — 57,1 см ( $W_{SKIRON}$ ), 80,4 см ( $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ ); Ейск — 102,2 см ( $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ ). Отсюда видно, что максимум нагона в случае  $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$  (102,2 см) в 1,27 раза больше, чем для  $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$  (80,4 см). Минимальные нагоны возникают в Мысовом — 7,5 см ( $W_{st}^1$ ), 13,9 см ( $W_{st}^2$ ); в Опасном — 9,4 см ( $W_{SKIRON}$ ), 16,1 см ( $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ ) и 34,0 см ( $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ ).

При совместном действии переменного и постоянного ветров максимумы сгонов становятся больше, чем в установившемся режиме и в случае отсутствия стационарных течений. Для всех рассматриваемых видов ветра наибольшие сгоны имеют место в Геническе: 12,2 см ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ), 51,7 см ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ), 42,5 см ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ), 76,5 см ( $\mathbf{W}_{st}^1 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ) и 80,7 см ( $\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ). Наименьшие сгоны возникают в Опасном 3,3 см ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ), 11,1 см ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ) и в Темрюке 8,7 см ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ), 11,2 м ( $\mathbf{W}_{st}^1 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ) и 33,0 см ( $\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ).

Сравним результаты моделирования и данные натурных измерений, приведенные в таблицах ежечасных значений высот уровня моря Государственной метеорологической службы Украины за период с 8 по 18 сентября 2007 г. Оценим полученные численно экстремальные значения нагонов, вызванных ветром  $\mathbf{W}_{SKIRON}$ , с ежечасными данными из указанных таблиц. В Геническе расчетный максимум нагона составляет 25,4 см, что на 4,7 см (16 %) меньше, чем по данным наблюдений. В Мариуполе найденное численно наибольшее значение нагона (29,3 см) на 4,0 см (12 %) меньше измеренного. Отсюда следует, что значения амплитуд колебаний уровня, полученные по натурным данным и путем численных расчетов, достаточно хорошо совпадают. Указанные отличия, по-видимому, вызваны определенными погрешностями при измерениях и математическом моделировании.

Целью следующих численных экспериментов является оценка влияния рассматриваемых полей ветра и возникающих при этом течений на распространение пассивной примеси, поступающей в центральный район моря. Начальное положение центра области выброса примеси находится в точке с координатами  $x_0 = 180$  км,  $y_0 = 120$  км, где глубина моря равна 12 м. Область выброса примеси имеет вид цилиндра радиусом  $R = 9$  км и глубиной  $h_1$  ( $0 \geq z \geq h_1$ ), где  $h_1$  (1 м) – шаг по вертикали в поверхностном слое. При этом начальное значение концентрации постоянно в данной области и равно единице ( $C_0(x, y, z) = 1$ ).

Время выброса загрязнения в различных экспериментах неодинаково и зависит от характеристик действующего ветра. В случае стационарного ветра моменты выброса загрязнения ( $t = t_{01}$ ,  $\mathbf{W}_{st}^1$ ;  $t = t_{02}$ ,  $\mathbf{W}_{st}^2$ ) и установления движения жидкости ( $t = t_{11}$ ,  $\mathbf{W}_{st}^1$ ;  $t = t_{12}$ ,  $\mathbf{W}_{st}^2$ ) совпадают:  $t_{01} = t_{11} = 38$  и  $t_{02} = t_{12} = 43$  ч. При наличии только ветра  $\mathbf{W}_{SKIRON}$  момент времени выброса отвечает 0 ч

11 сентября 2007 г ( $t_{03} = 72$  ч). Рассматривая совместное действие стационарного и нестационарного ветров, время выброса определяется так:  $t_{04} = t_{01} + t_{03} (\mathbf{W}_{st}^1 + \mathbf{W}_{SKIRON})$  и  $t_{05} = t_{02} + t_{03} (\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON})$ . Для удобства анализа полученных результатов принимаем, что во всех случаях время выброса примеси равно нулю ( $t_0 = 0$ ).

В табл. 4.8 для трех горизонтов приведены значения коэффициента максимального распространения пассивной примеси ( $K_{max}$ ), время его достижения ( $t_{max}$ , ч) и время полного рассеивания примеси ( $t_d$ , ч) для двух скоростей постоянного ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ ) и трех скоростей переменного ветра ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$  и  $\mathbf{W}_{st}^{1,2} + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ). Из анализа приведенных данных видно, что максимум площади области загрязнения на каждом горизонте зависит от скорости ветра, приводящего к установившемуся движению.

Т а б л и ц а 4.8

**Параметры ( $K_{max}$ ;  $t_{max}$ , ч;  $t_d$ , ч) эволюции распространения примеси на различных глубинах Азовского моря**

| Глубина,<br>м | Максимальные<br>значения<br>$K_{max}$ , $t_{max}$ и $t_d$ | $\mathbf{W}_{st}^1$ | $\mathbf{W}_{st}^2$ | $\mathbf{W}_{SKIRON}$ | $\mathbf{W}_{st}^1 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ | $\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ |
|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $z = 0$       | $K_{max}$                                                 | 1,14                | 1,18                | 1,25                  | 1,30                                      | 1,32                                      |
|               | $t_{max}$ , ч                                             | 5,7                 | 4,9                 | 31                    | 40                                        | 40                                        |
|               | $t_d$ , ч                                                 | 17,3                | 18,2                | 57,1                  | 84,5                                      | 86,5                                      |
| $z = -H/2$    | $K_{max}$                                                 | 1,16                | 1,18                | 1,27                  | 1,33                                      | 1,35                                      |
|               | $t_{max}$ , ч                                             | 14,3                | 14,7                | 34                    | 42                                        | 42                                        |
|               | $t_d$ , ч                                                 | 36,7                | 37,6                | 104                   | 106                                       | 110                                       |
| $z = -H+h_b$  | $K_{max}$                                                 | 1,16                | 1,19                | 1,33                  | 1,37                                      | 1,38                                      |
|               | $t_{max}$ , ч                                             | 26,9                | 25,5                | 55                    | 58                                        | 59                                        |
|               | $t_d$ , ч                                                 | 53,4                | 55,2                | 108                   | 110                                       | 115                                       |

В случае бóльшей скорости постоянного ветра ( $\mathbf{W}_{st}^2 > \mathbf{W}_{st}^1$ ) возрастает скорость течений (табл. 4.5), увеличивается площадь области распространения примеси ( $K_{max}$ ) и время ее полного рассеивания ( $t_d$ ). Совместное действие стационарного ветра и  $\mathbf{W}_{SKIRON}$  вызывает

рост области загрязнения. В этом случае наибольшая площадь загрязнения имеет место для максимального значения скорости действующего ветра ( $\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ). При этом на свободной поверхности  $K_{max}$  равен 1,32 через 40 ч после выброса примеси, а время ее полного рассеивания ( $t_d$ ) составляет 86,5 ч. Наибольшая величина площади области загрязнения на глубине  $z = -H/2$  достигается спустя 42 ч после выброса примеси ( $K_{max} = 1,35$ ), а полное рассеивание загрязнения происходит через 110 ч. В придонном слое ( $z = -H + h_d$ ) коэффициент максимального распространения примеси принимает значение 1,38 ( $t_{max} = 59$  ч). Отметим, что в рассматриваемом случае ( $\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ ) через 115 ч после выброса примеси ее концентрация во всей акватории моря не превышает 2,5 % от начального значения ( $C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$ ).

Достоверность результатов исследования как сгонно-нагонных явлений, так и распространения пассивной примеси системой течений, вызванных действием постоянного и переменного ветров в Азовском море, подтверждается сравнением рассчитанных значений экстремальных сгонов и нагонов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия приводного ветра по модели *SKIRON* на береговых гидрометеорологических станциях. Выполнен также анализ влияния скорости ветра и возникающих при этом течений на характеристики процесса эволюции пассивной примеси.

Анализ результатов моделирования динамических процессов в Азовском море позволил получить следующие выводы:

- при исследовании стационарных движений в бассейне установлено, что под действием постоянного ветра в два раза большей скорости (5 и 10 м/с) максимальные отклонения уровня увеличиваются в 3,45 раза (0,2 и 0,69 см), минимальные – в 3,9 раза (0,1 и 0,39 см); максимальные скорости установившихся течений возрастают в 12 раз (0,16 и 1,17 м/с);
- увеличение максимальной скорости ветра приводит к росту объема области загрязнения, наименьшая площадь загрязнения имеет место при отсутствии ветра;
- время достижения максимального объема области загрязнения уменьшается с увеличением скорости ветра.

#### 4.2.1. Моделирование процесса распространения примеси в Азовском море в зависимости от интенсивности атмосферных полей модели *SKIRON*

Изменения уровня, являющиеся следствием сгонно-нагонных явлений и сопровождающиеся при сгонах обмелением фарватеров, а при нагонах затоплением островов, берегов, разрушением портовых сооружений, имеют место, как правило, на участках у берегов с пологими подводными склонами, в заливах, узких проливах (оз. Донузлав, заливы Таганрогский, Финский, Обская губа и др.). Фактические величины сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря бывают очень значительными, что приводит к возникновению опасных и катастрофических последствий. Для одного из наиболее изученных бассейнов – бассейна Азовского моря, где имеется сеть морских береговых станций и постов для анализа величин сгонов и нагонов, недостаточно проведения только стандартных специализированных экспедиционных исследований. Наиболее обоснованное представление о гидрометеорологических процессах возможно вследствие анализа расчетов, базирующихся на применении современных трехмерных численных моделей. Они позволяют учитывать реальные атмосферные воздействия, рельеф дна, конфигурацию береговой линии. Исследование течений и колебаний уровня, возникающих в этом море под действием переменных во времени ветра и атмосферного давления при отсутствии стационарных течений проведено в работах [46, 53, 127]. В этих работах для изучения динамических процессов в Азовском море применяется трехмерная нелинейная  $\sigma$ -координатная модель, которая основывается на нелинейных уравнениях движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики. При построении численного алгоритма в этой модели используется криволинейная система координат [142].

В серии численных экспериментов исследуется влияние совместного действия стационарного и полученного по данным региональной прогностической системы *SKIRON* (с 8 по 18 сентября 2007 г.) ветров на максимальную скорость течений, эволюцию примеси и экстремальные значения сгонов и нагонов в Азовском море. Стационарные движения в Азовском море генерируются полем ветра,

скорость которого ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} = 5, 10$  м/с) на поверхности моря не зависит от  $x$  и  $y$ , а по времени первые 3 часа ( $0 < t \leq 3$  ч) нарастает со временем по линейному закону ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} = 0$  при  $t = 0$ ), достигает наибольшего значения и далее ( $t \geq 3$  ч) не меняется.

Момент выхода течений на установившийся режим ( $t = t_0$ ) определяется тем, что между двумя соседними значениями времени ( $t_k > t_0$  и  $t_k + \Delta t$ ) не происходит заметных изменений отклонений уровня и скорости течений (изменения не превышают 3 %). Исходя из этого, находим время установления движения жидкости ( $t = t_{01}$ ,  $\mathbf{W}_{st}^1$ ;  $t = t_{02}$ ,  $\mathbf{W}_{st}^2$ ), которое также является временем начала действия переменного ветра *SKIRON*. В момент установления движения жидкости ( $t = t_0$ ) к стационарному ветру ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ ) присоединяется неоднородное по пространству и времени поле ветра, полученное по данным реанализа ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ). При  $t > t_0$   $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$  поддерживает стационарное движение, а  $\mathbf{W}_{SKIRON}$  — добавляет к нему нестационарную составляющую. Исследование установившихся течений выполнено для двух значений скорости постоянного западного ветра 5 и 10 м/с ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} = \{5; 10\}$  м/с). Для установления физических закономерностей влияния интенсивности атмосферных воздействий в качестве переменного по времени и неоднородного по пространству ветра выбраны поля приводного ветра модели *SKIRON*, а также поля ветра, в два раза увеличенные и уменьшенные по отношению к указанным выше данным ( $\gamma \mathbf{W}_{SKIRON}$ ;  $\gamma = 1/2; 1; 2$ ). Результаты расчетов сравниваются с информацией, полученной при моделировании волн и течений, вызванных действием только постоянного или прогнозистического ветра.

По данным *SKIRON* с 8 по 18 сентября 2007 г. выполним анализ величины осредненной по акватории Азовского моря скорости ветра. На рис. 4.9 даны графики средней скорости и ее тренд в течение 192 ч (результаты, полученные для первых 3 суток, не анализируются и используются для определения начальных данных о скорости течений и уровне моря на 0 ч 11 сентября 2007 г.). Средняя скорость ветра в каждый момент времени рассчитывается по формуле (4.3). Аппроксимация модуля средней скорости ветра полиномом 9-й степени проводится по методу наименьших квадратов и дает тренд поведения скорости (рис. 4.9, штриховая линия).



**Рис. 4.9.** Средняя скорость ветра над Азовским морем в течение расчетного периода (сплошная линия) и ее тренд (штриховая)

Из рисунка видно, что в течение первых 2 суток происходило усиление ветра до 9 м/с, в период следующих 3 суток скорость монотонно уменьшалась до 5 м/с. Затем в течение еще 3 сут отмечалось ее резкое снижение до 2 м/с, после чего она уже не превышала 3 м/с (над морем штиль). Средняя (по времени) скорость приводного ветра была равна 5,5 м/с. Максимум средней скорости составлял 12,7 м/с и имел место 15 сентября, минимум – 1,6 м/с 17 сентября. В среднем в течение сентября скорость приводного ветра составляла 5,5 м/с. За указанный период (192 ч) наибольшее, среднее и наименьшее значения максимальной скорости были равны 12,7; 6,7 и 1,6 м/с соответственно.

Как следует из рис. 4.9 (сплошная линия), поле средней скорости неоднородно. В течение коротких периодов 1–2 сут скорость то нарастает, то убывает, следовательно, меняется направление ветра. Отклонения вектора скорости ветра от направления оси  $x$  (ось  $x$  направлена на восток под углом  $50^\circ$  к параллели) анализировались в градусах.

Из анализа преобладающих направлений ветра следует, что за указанный период преобладающими направлениями являлись северо-восточное и северо-западное, при этом также было отмечено прохождение нескольких циклонов. Подчеркнем, что результаты

многолетних наблюдений атмосферных возмущений в районе Азовского моря удовлетворительно согласуются с используемыми в данных расчетах атмосферными полями системы *SKIRON*.

В табл. 4.9 приведены максимальные значения скорости стационарных течений, вызванных постоянным ветром ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ ), максимальные значения скорости течений, генерируемых приводным ветром ( $\gamma \mathbf{W}_{SKIRON}$ ;  $\gamma = 1/2; 1; 2$ ) и их суперпозицией ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} + \gamma \mathbf{W}_{SKIRON}$ ).

Т а б л и ц а 4.9

**Максимальные значения скорости течений ( $U_{max}$ ) на различных глубинах Азовского моря, время их достижения ( $t_{max}$ ) и соответствующие им координаты ( $x_{max}, y_{max}$ )**

| Скорость ветра                       | Горизонт,<br>м | $U_{max}$ ,<br>м/с | $x_{max}$ ,<br>км | $y_{max}$ ,<br>км | $t_{max}$ ,<br>ч.мин |
|--------------------------------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| $\mathbf{W}_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$  | 1              | 0,16               | 236,29            | 174,08            | 8.00                 |
|                                      | 3              | 0,13               | 236,39            | 173,44            | 8.02                 |
|                                      | 5              | 0,12               | 237,01            | 173,31            | 8.22                 |
|                                      | 10             | 0,09               | 235,34            | 173,00            | 9.44                 |
| $\mathbf{W}_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$ | 1              | 0,34               | 235,38            | 172,19            | 8.35                 |
|                                      | 3              | 0,28               | 235,97            | 172,86            | 8.55                 |
|                                      | 5              | 0,24               | 237,07            | 171,50            | 8.26                 |
|                                      | 10             | 0,17               | 235,99            | 171,16            | 9.34                 |
| $\mathbf{W}_{SKIRON}$                | 1              | 0,45               | 206,25            | 189,27            | 128.00               |
|                                      | 3              | 0,39               | 241,76            | 188,88            | 130.00               |
|                                      | 5              | 0,37               | 263,30            | 199,05            | 137.00               |
|                                      | 10             | 0,28               | 238,20            | 175,76            | 145.00               |
| $2\mathbf{W}_{SKIRON}$               | 1              | 0,58               | 206,69            | 190,59            | 132.36               |
|                                      | 3              | 0,54               | 236,96            | 184,66            | 134.06               |
|                                      | 5              | 0,52               | 263,53            | 193,96            | 136.24               |
|                                      | 10             | 0,41               | 238,66            | 174,55            | 142.36               |

| Скорость ветра              | Горизонт,<br>м | $U_{\max}$ ,<br>м/с | $X_{\max}$ ,<br>км | $Y_{\max}$ ,<br>км | $t_{\max}$ ,<br>ч.мин |
|-----------------------------|----------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| $W_{st}^1 + 1/2 W_{SKIRON}$ | 1              | 0,61                | 201,47             | 109,47             | 128.00                |
|                             | 3              | 0,59                | 224,43             | 183,70             | 130.00                |
|                             | 5              | 0,54                | 225,04             | 161,18             | 137.00                |
|                             | 10             | 0,35                | 174,63             | 166,87             | 145.00                |
| $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$     | 1              | 0,73                | 201,48             | 106,15             | 128.00                |
|                             | 3              | 0,69                | 224,73             | 176,44             | 130.00                |
|                             | 5              | 0,61                | 225,31             | 156,78             | 137.00                |
|                             | 10             | 0,35                | 174,86             | 160,92             | 145.00                |
| $W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$    | 1              | 1,57                | 208,72             | 111,75             | 128.00                |
|                             | 3              | 1,39                | 229,55             | 183,06             | 130.00                |
|                             | 5              | 1,24                | 229,67             | 161,92             | 137.00                |
|                             | 10             | 1,02                | 175,72             | 168,25             | 145.00                |
| $W_{st}^2 + 1/2 W_{SKIRON}$ | 1              | 0,57                | 166,19             | 176,81             | 152.00                |
|                             | 3              | 0,45                | 204,45             | 162,96             | 154.00                |
|                             | 5              | 0,43                | 258,30             | 194,36             | 157.00                |
|                             | 10             | 0,40                | 210,08             | 147,40             | 162.00                |
| $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$     | 1              | 0,91                | 159,09             | 175,58             | 152.00                |
|                             | 3              | 0,78                | 199,38             | 159,67             | 154.00                |
|                             | 5              | 0,70                | 258,19             | 188,40             | 157.00                |
|                             | 10             | 0,40                | 209,66             | 146,44             | 162.00                |
| $W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$    | 1              | 1,32                | 161,14             | 176,58             | 152.00                |
|                             | 3              | 1,12                | 202,31             | 166,34             | 154.00                |
|                             | 5              | 0,77                | 259,62             | 194,33             | 157.00                |
|                             | 10             | 0,66                | 214,06             | 147,13             | 162.00                |

Здесь же указаны горизонты и координаты наибольших значений скорости, а также время их достижения. Из анализа этих данных следует, что при наличии стационарных течений максимумы скорости нестационарных течений ( $U_{\max}$ ) увеличиваются по сравнению с их значениями при действии только прогностического ветра.

Из сравнения максимумов скоростей течений на различных горизонтах следует, что значения  $U_{\max}$  при  $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$  возрастают

на 38 (горизонт 1 м); 43 (3 м); 39 (5 м) и 20 % (10 м) по сравнению со случаем  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  и на 78 (1 м); 81 (3 м); 80 (5 м) и 74 % (10 м) по сравнению с действием только  $\mathbf{W}_{\text{st}}^1$ . При увеличении скорости постоянного ветра в два раза совместное действие  $\mathbf{W}_{\text{st}}^2 + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  приводит к росту  $U_{\text{max}}$  на 50 (1; 3 м); 47 (5 м) и 30 % (10 м) по сравнению с действием  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  и на 63 (1 м); 64 (3 м); 62 (5 м) и 57 % (10 м) по сравнению со случаем  $\mathbf{W}_{\text{st}}^2$ . При этом максимальные скорости стационарных течений, вызванных действием постоянного ветра со скоростью 5 м/с ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^1$ ) и 10 м/с ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^2$ ), увеличиваются на тех же горизонтах на 52; 53; 50 и 47 % соответственно. Отсюда следует, что удвоение интенсивности стационарного ветра при совместном действии с одним и тем же нестационарным ветром приводит к увеличению максимумов скоростей нестационарных течений на 64 % и стационарных течений на 53 %. Анализ скоростей течений (табл. 4.9) показал, что в поверхностном слое значения  $U_{\text{max}}$  под действием суперпозиции ветров  $\mathbf{W}_{\text{st}}^1 + \gamma \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  становятся больше в 1,7; 1,6 и 2,7 раза и под действием  $\mathbf{W}_{\text{st}}^2 + \gamma \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  увеличиваются в 1,6; 2,0 и 2,2 раза, по сравнению с действием только прогностического ветра без учета стационарного (при  $\gamma \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$   $\gamma = 1/2; 1; 2$  соответственно). При этом для всех скоростей ветра значения  $U_{\text{max}}$  убывают с ростом горизонта. Скорости течений, рассчитанные без учета стационарных течений для полей прогностического ветра интенсивности  $1/2 \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  и  $2 \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ , отличаются не более чем на 25 % по сравнению со скоростями, вызванными действием  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ .

В табл. 4.10 приведены максимальные значения подъемов  $\zeta_{\text{max}}$  и понижений  $|\zeta|_{\text{max}}$  уровня в открытой части Азовского моря, вызванных действием стационарного ветра ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^{1,2}$ ), полями ветра модели *SKIRON* ( $\gamma \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ ;  $\gamma = 1/2; 1; 2$ ) и их совместным действием. Здесь также представлены время достижения и соответствующие координаты экстремумов уровня моря. Анализ этих данных свидетельствует о том, что при увеличении скорости действующего ветра увеличиваются максимумы отклонений свободной поверхности. Так, удвоение скорости только стационарного ветра  $\mathbf{W}_{\text{st}}^2$  приводит к росту величины  $\zeta_{\text{max}}$  и  $|\zeta|_{\text{max}}$  в 2 и 1,7 раза по сравнению с действием  $\mathbf{W}_{\text{st}}^1$ . При изменении интенсивности полей ветра, полученных по атмосферной модели ( $\gamma \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ ;  $\gamma = 1/2; 1; 2$ ), значения  $\zeta_{\text{max}}$  и  $|\zeta|_{\text{max}}$  возрастают соответственно в 1,3; 3 и 1,4; 3,3 раза по сравнению с действием  $1/2 \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ . Совместное действие суперпозиции

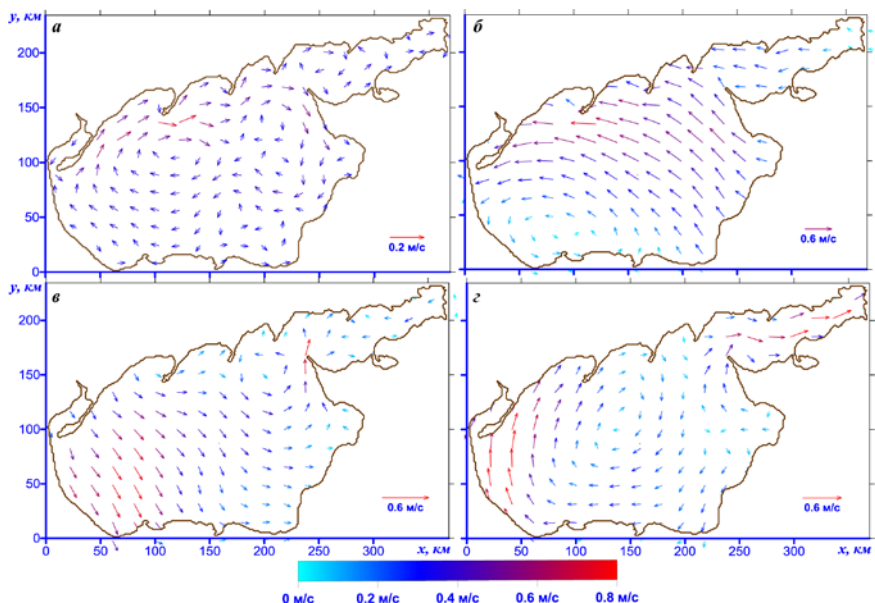
рассматриваемых ветров  $W_{st}^{1,2} + \gamma W_{SKIRON}$  также приводит к росту величин экстремальных отклонений. Так, при  $W_{st}^2 + 1/2 W_{SKIRON}$   $\zeta_{max}$  в 1,3 и  $|\zeta|_{max}$  в 1,8 раза больше, чем при  $W_{st}^1 + 1/2 W_{SKIRON}$ ; при  $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$   $\zeta_{max}$  в 1,3 и  $|\zeta|_{max}$  в два раза больше, чем при  $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ ; при  $W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$   $\zeta_{max}$  в 1,2 и  $|\zeta|_{max}$  в 2,1 раза больше, чем при  $W_{st}^1 + 2 W_{SKIRON}$ . Таким образом, действие стационарного ветра одного направления, но бóльшей скорости (10 м/с) вызывает возрастание максимальных отклонений уровня  $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$ : при  $1/2 W_{SKIRON}$  на 48 и 65 %; при  $W_{SKIRON}$  на 40 и 57 %; при  $2W_{SKIRON}$  на 37 и 54 % соответственно.

Т а б л и ц а 4.10

**Максимальные значения подъемов ( $\zeta_{max}$ ) и понижений ( $|\zeta|_{max}$ ) уровня в открытой части Азовского моря, время их достижения и соответствующие им координаты**

| Скорость ветра              | $\zeta_{max}$ ,<br>(см) | $x_{max}$ ,<br>(км) | $y_{max}$ ,<br>(км) | $t_{max}$ ,<br>(ч.мин) | $ \zeta _{max}$ ,<br>(см) | $x_{min}$ ,<br>(км) | $y_{min}$ ,<br>(км) | $t_{min}$ ,<br>(ч.мин) |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| $W_{st}^1 = 5$ м/с          | 20                      | 367                 | 220                 | 17.10                  | 10                        | 4                   | 95                  | 13.23                  |
| $W_{st}^2 = 10$ м/с         | 69                      | 368                 | 218                 | 18.46                  | 39                        | 4                   | 107                 | 13.47                  |
| $1/2 W_{SKIRON}$            | 32                      | 283                 | 96                  | 168.14                 | 17                        | 24                  | 127                 | 190.55                 |
| $W_{SKIRON}$                | 43                      | 279                 | 90                  | 168.15                 | 25                        | 20                  | 123                 | 190.55                 |
| $2 W_{SKIRON}$              | 97                      | 285                 | 92                  | 168.15                 | 56                        | 20                  | 123                 | 190.55                 |
| $W_{st}^1 + 1/2 W_{SKIRON}$ | 46                      | 299                 | 105                 | 171.11                 | 27                        | 30                  | 128                 | 191.30                 |
| $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$     | 55                      | 296                 | 100                 | 171.11                 | 28                        | 22                  | 124                 | 191.30                 |
| $W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$    | 121                     | 303                 | 100                 | 171.11                 | 59                        | 29                  | 131                 | 191.30                 |
| $W_{st}^2 + 1/2 W_{SKIRON}$ | 62                      | 295                 | 102                 | 172.20                 | 49                        | 23                  | 124                 | 192.45                 |
| $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$     | 72                      | 290                 | 101                 | 172.20                 | 58                        | 21                  | 124                 | 192.45                 |
| $W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$    | 154                     | 292                 | 104                 | 172.20                 | 123                       | 24                  | 131                 | 192.45                 |

Полученные в результате моделирования поля поверхностных течений Азовского моря, вызванных ветром различной интенсивности, показаны на рис. 4.10.



**Рис. 4.10.** Поля скорости поверхностных течений Азовского моря: *а* – установившиеся течения ( $t = t_0$ ); *б* – начало действия прогностического ветра ( $t = t_0 + 24$  ч); *в* – момент времени ( $t = t_0 + 120$  ч); *г* – окончание действия прогностического ветра ( $t = t_0 + 170$  ч)

В начальный период действия постоянного западного ветра при максимальной скорости 10 м/с направление течений совпадает с направлением ветра на всей акватории моря (рис. 4.10, *а*). Начиная с момента установления движения жидкости в северной части моря происходит уменьшение скорости течений и изменение их направления на противоположное. В центральной части моря наблюдается циркуляция вод против часовой стрелки (рис. 4.10, *б*).

С началом действия полей переменного по времени и пространству ветра  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  циркуляция вод нарушается, и течения становятся хаотическими (рис. 4.10, *в*). У северного побережья возникают два вихря одинакового знака. Вдоль противоположных границ моря течения направлены против ветра. В момент прохождения циклона при скорости ветра 11,6 м/с циркуляция характеризуется наличием трех круговоротов: антициклонического (в северной части моря)

и двух циклонических (у южного берега). Вдоль границ, разделяющих основные круговороты, формируются полосы, в которых скорость течений направлена против ветра (рис. 4.10, з).

В табл. 4.11 для береговых станций Азовского моря даны значения максимальных отклонений уровня, вызванных действием стационарного ветра ( $W_{st}^{1,2}$ ), только приводного ветра различной интенсивности ( $\gamma W_{SKIRON}$ ;  $\gamma = 1/2; 1; 2$ ) и суперпозицией этих ветров ( $W_{st}^{1,2} + \gamma W_{SKIRON}$ ). В верхней части таблицы приведены величины нагонов, в нижней – сгонов.

Т а б л и ц а 4.11

**Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях  
Азовского моря в стационарном режиме и вызванные  
прогностическим ветром при наличии стационарных течений**

| Береговые станции | $W_{st}^1$ | $W_{st}^2$ | $\frac{1}{2}W_{SKIRON}$ | $W_{SKIRON}$ | $2W_{SKIRON}$ | $W_{st}^1 + \frac{1}{2}W_{SKIRON}$ | $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ | $W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$ | $W_{st}^2 + \frac{1}{2}W_{SKIRON}$ | $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ | $W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$ |
|-------------------|------------|------------|-------------------------|--------------|---------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Геническ          | –          | –          |                         | 20,0         | 25,4          | 31,4                               | 29,432,2                | 51,5                     | 39,4                               | 62,3                    | 66,7                     |
| Бердянск          | –          | –          |                         | 4,9          | 9,6           | 10,9                               | 7,0 16,9                | 16,9                     | 10,2                               | 44,3                    | 51,7                     |
| Мариуполь         | 9,8        | 37,3       |                         | 18,5         | 29,3          | 39,9                               | 28,046,4                | 65,4                     | 35,5                               | 80,4                    | 85,1                     |
| Таганрог          | 20,7       | 62,4       |                         | 40,6         | 50,6          | 79,6                               | 57,163,1                | 128,2                    | 81,2                               | 89,5                    | 159,1                    |
| Ейск              | 13,8       | 52,2       |                         | 19,1         | 38,1          | 59,9                               | 30,076,0                | 93,7                     | 38,5                               | 102,2                   | 123,1                    |
| П.-Ахтарск        | 8,1        | 43,2       |                         | 40,6         | 57,1          | 89,3                               | 61,780,4                | 129,2                    | 85,2                               | 91,1                    | 189,5                    |
| Темрюк            | 10,2       | 26,9       |                         | 20,2         | 24,5          | 28,6                               | 28,429,7                | 43,3                     | 40,8                               | 49,9                    | 60,9                     |
| Опасное           | –          | –          |                         | 5,5          | 9,4           | 14,5                               | 7,9 16,1                | 23,6                     | 10,8                               | 34,0                    | 40,6                     |
| Мысовое           | 7,5        | 13,9       |                         | 7,5          | 12,1          | 17,0                               | 12,119,6                | 25,0                     | 15,2                               | 34,2                    | 34,9                     |
| Геническ          | 12,2       | 51,7       |                         | 22,3         | 42,5          | 62,2                               | 35,576,5                | 92,5                     | 45,4                               | 87,0                    | 128,0                    |
| Бердянск          | 4,0        | 17,6       |                         | 9,7          | 17,3          | 27,1                               | 15,130,9                | 38,0                     | 20,5                               | 62,1                    | 77,0                     |
| Мариуполь         | –          | –          |                         | 12,7         | 18,2          | 27,2                               | 18,726,0                | 43,7                     | 24,6                               | 39,7                    | 51,9                     |
| Таганрог          | –          | –          |                         | 21,2         | 29,0          | 37,2                               | 35,042,4                | 60,8                     | 40,3                               | 72,9                    | 74,0                     |
| Ейск              | –          | –          |                         | 8,7          | 18,9          | 21,5                               | 12,341,1                | 34,5                     | 17,6                               | 45,3                    | 47,4                     |
| П.-Ахтарск        | –          | –          |                         | 8,4          | 14,1          | 16,1                               | 12,223,8                | 26,2                     | 16,3                               | 35,5                    | 44,4                     |
| Темрюк            | –          | –          |                         | 6,8          | 8,7           | 13,3                               | 10,211,2                | 18,9                     | 13,0                               | 33,0                    | 36,0                     |
| Опасное           | 3,3        | 11,1       |                         | 5,5          | 10,6          | 15,2                               | 8,5 20,5                | 22,7                     | 11,2                               | 34,2                    | 38,7                     |
| Мысовое           | –          | –          |                         | 12,6         | 22,3          | 30,0                               | 20,039,4                | 42,8                     | 24,7                               | 63,9                    | 67,3                     |

Из анализа представленных здесь результатов расчетов следует, что наибольшие нагоны возникают при совместном действии стационарного и удвоенного прогностического ветров

$(W_{st}^2 + 2W_{SKIRON})$  и имеют место на ст. Приморско-Ахтарск (189,5 см), Таганрог (159,1 см) и Ейск (123,1 см).

Отсюда видно, что максимум нагона (189,5 см) в случае действия рассмотренной системы ветров в 4,38 раза больше, чем в стационарном режиме (43,2 см). При совместном действии переменного и постоянного ветров максимальные сгоны становятся больше, чем в установившемся режиме. Для всех рассматриваемых видов ветра максимальные сгоны имеют место в Геническе: 51,7 см ( $W_{st}^2$ ); 45,4 см ( $W_{st}^2 + 1/2W_{SKIRON}$ ); 87,0 см ( $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ ); 128,0 см ( $W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$ ).

Значения сгонов и нагонов, рассчитанные в результате моделирования с использованием ветра, полученного по данным прогностической системы *SKIRON*, сравнивались с натурными измерениями за тот же период, приведенными в таблицах ежечасных значений высот уровня моря государственной метеорологической службой Украины. Проведенный анализ подтверждает достаточно хорошее совпадение значений амплитуд колебаний уровня, полученных путем численных расчетов и по натурным данным. Так, в Геническе рассчитанный максимум нагона на 16 % меньше, чем по данным наблюдений, а в Мариуполе максимальное модельное значение нагона на 12 % меньше измеренного.

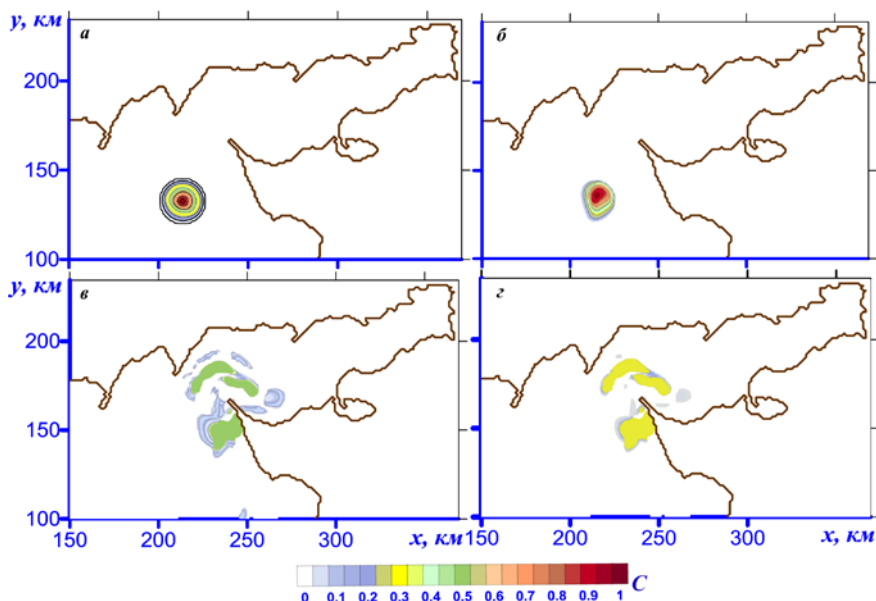
Целью следующей серии численных экспериментов является оценка влияния рассматриваемых полей ветра и возникающих при этом течений на распространение пассивной примеси, поступающей в центральный район Азовского моря.

Начальное положение центра области выброса примеси находится в точке с координатами  $x_0 = 180$  км,  $y_0 = 120$  км, где глубина моря составляет 12 м. Область выброса примеси имеет вид цилиндра радиусом  $R = 9$  км и глубиной  $h_1$  ( $0 \geq z \geq h_1$ ), где  $h_1$  – шаг по вертикали в поверхностном слое. При этом начальное значение концентрации постоянно в данной области и равно единице ( $C(x, y, z, t_0) = C_0(x, y, z) = 1$ ).

Распространение пассивной примеси в море происходит вследствие турбулентной диффузии и адвективного переноса ее течением. На рис. 4.11 приведены результаты расчетов процессов турбулентно-диффузионного развития области поверхностного загрязнения.

Как видно, область загрязнения первые 2 часа перемещается на запад в соответствии с направлением стационарных течений

(рис. 4.11, а), а затем через 10 ч распадается на несколько небольших фрагментов (рис. 4.11, б, в). Части области переносятся от центра выброса в различных направлениях на значительные расстояния и спустя 30 ч достигают северного побережья Азовского моря в районе Бердянска и Мариуполя (рис. 4.11, г). С течением времени участки загрязняющих веществ переносятся на запад. Полное рассеяние происходит через 149 ч, что в 2,7 раза превышает время рассеяния такой же области загрязнения в установившемся режиме.



**Рис. 4.11.** Трансформация области загрязнения в Азовском море, вызванная действием прогностического ветра при наличии стационарных течений в те же моменты времени, что на рис. 4.10

Время выброса загрязнения ( $t = t_0$ ) в экспериментах различно и задается согласно типу действующего ветра. Так, для стационарного ветра  $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$  это время отвечает моменту установления движения жидкости:  $t_0 = t_0^1 = 38$  ч и  $t_0 = t_0^2 = 43$  ч соответственно. Для прогностического ветра момент времени выброса равен 0 ч 11 сентября 2007 г. ( $t_0 = t_0^3 = 72$  ч). При совместном действии стационарного и прогностического ветров ( $\mathbf{W}_{st}^{1,2} + \gamma \mathbf{W}_{SKIRON}$ ) это время определяется так:  $t_0 = t_0^2 + t_0^3$ . При анализе времени распространения и рассеяния

примеси для удобства принимаем, что во всех случаях время выброса равно нулю ( $t_0 = 0$ ).

Анализ результатов численных расчетов свидетельствует о том, что площадь распространения области загрязнения в поверхностном и глубинных слоях Азовского моря зависит от скорости ветра, действующего над акваторией. С увеличением интенсивности ветра становится больше скорость течений (см. табл. 4.9) и, как следствие этого, возрастают площади распространения примеси и время ее полного рассеяния. В связи с этим наибольшая площадь загрязнения имеет место при максимальном значении скорости действующего ветра ( $\mathbf{W}_{st}^2 + 2\mathbf{W}_{SKIRON}$ ).

В этом случае на свободной поверхности через 40 ч после выброса примеси достигается наибольшая величина отношения площади области загрязнения к площади области начального загрязнения ( $K_{\max} = 1,32$ ), а время полного рассеяния составляет 87 ч. Максимальное значение отношения этих площадей (1,35) на глубине 5 м достигается спустя 42 ч после выброса примеси, а ее полное рассеяние – через 110 ч. В придонном слое на глубине 12 м максимальное значение отношения этих площадей (1,38) достигается через 59 ч после выброса примеси, и через 115 ч ее концентрация во всей акватории моря не превышает 2,5 % от начального значения.

Выполнен анализ результатов исследования сгонно-нагонных явлений и распространения пассивной примеси системой течений, вызванных действием постоянного и переменного ветров в Азовском море. Достоверность этих результатов подтверждается сравнением рассчитанных значений экстремальных сгонов и нагонов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия приводного ветра по модели *SKIRON* на береговых гидрометеорологических станциях.

#### 4.2.2. Анализ зависимости характеристик уровня, течений и процессов трансформации загрязняющих веществ различного начального объема от интенсивности атмосферных возмущений

Течения и волны, возникающие в море под действием ветра, вносят существенный вклад в процесс переноса и рассеивания загрязнений. Методом математического моделирования в настоящее время получены достаточно серьезные результаты в исследовании этих процессов. Тем не менее, они еще не позволяют надежно

прогнозировать негативные экологические изменения, происходящие в акватории моря вследствие интенсификации ее экономического освоения в последние годы.

Имеются публикации цикла работ, посвященных изучению волн и течений, генерируемых ветровыми воздействиями, характерными для бассейна Азовского моря [57, 58, 63, 23, 24, 94]. При анализе трансформации примеси в качестве причин, вызывающих движение водной среды, рассматривались: постоянный на определенных промежутках времени ветер [57] и меняющиеся со временем атмосферные образования [63]. Изучение течений и колебаний уровня, возникающих в море под действием этих возмущений, проведено в [60]. Отметим, что указанные в [57, 58] исследования выполнены при условии отсутствия стационарных течений.

Целью данной работы является анализ влияния стационарных течений в Азовском море на трансформацию загрязняющих веществ, волны и сгонно-нагонные явления, возникающие под действием ветровых полей, приближенных к реальным условиям и найденным по данным региональной системы прогноза *SKIRON*. При этом ставится задача получения оценок изменений величин скорости течений, уровня поверхности моря и размеров районов загрязнения при наличии и отсутствии стационарных течений. Следующая цель – анализ зависимости характеристик волновых движений, течений и процессов трансформации областей загрязняющих веществ различного начального объема от параметров атмосферных возмущений.

В серии численных экспериментов исследуется влияние совместного действия стационарного и полученного по данным региональной прогностической системы *SKIRON* (с 8 по 18 сентября 2007 г.) ветров на максимальные скорости течений, эволюцию примеси и экстремальные значения сгонов и нагонов в Азовском море.

Момент выхода течений на установившийся режим ( $t = t_0$ ) определяется тем, что между двумя соседними значениями времени ( $t_k > t_0$  и  $t_k + \Delta t$ ) не происходит заметных изменений отклонений уровня и скорости течений (изменения не превышают 3 %). Исходя из этого, находим время установления движения жидкости ( $t_0 = 48$  ч). В момент установления движения жидкости ( $t = t_0$ ) к постоянному ветру ( $\mathbf{W}_{st} = \text{const}$ ,  $t \geq 3$  ч) присоединяется неоднородное по пространству и времени поле ветра, полученное по данным атмо-

сферной модели ( $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ ). При  $t > t_0$  стационарную составляющую течений поддерживает  $\mathbf{W}_{\text{st}}$ , а нестационарную добавляет  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ .

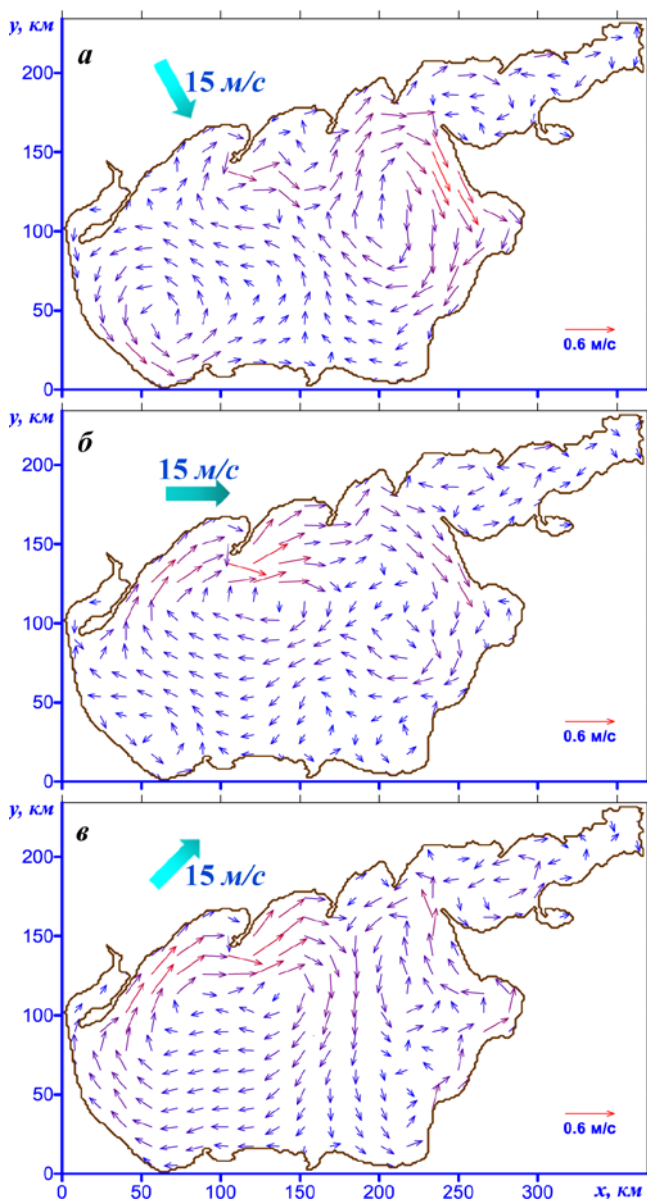
В первой серии численных экспериментов изучается влияние различных направлений и скоростей постоянного ветра на сгонно-нагонные процессы и течения. Вследствие относительно симметричной конфигурации берегов, весьма однородных глубин и небольших размеров моря характеристики волн при различных направлениях ветра меняются незначительно. При этом преобладают [19, 105] ветры зональных направлений (СЗ – северо-западное, З – западное и ЮЗ – юго-западное), которые в общей циркуляции атмосферы обуславливают воздушный обмен между различными широтами Земли.

На рис. 4.12 приведены поля скорости стационарных течений в поверхностном слое моря в моменты времени, соответствующие различным ветровым режимам. Отсюда видно, что генеральная циркуляция вод, вызванная действием ветра зонального направления, характеризуется циклоническим движением. В квазистационарном состоянии главным структурным элементом движения является течение, опоясывающее прибрежный район моря шириной 50–60 км и направленное на северо-запад.

На удалении 20–35 км от берега возникает ядро наибольших (стрельнь потока) скоростей, достигающих в поверхностном слое моря значения 60–80 см/с. В Таганрогском заливе (рис. 4.12) при интенсивных западных (З), северо-западных (СЗ) и юго-западных (ЮЗ) ветрах основное направление течений – восточное. Их структура в заливе сохраняется во время действия полей ветра всех рассматриваемых направлений.

Известно [105], что в центральной части моря с марта по ноябрь наиболее часто повторяются западные и юго-западные течения – более интенсивные, чем при других направлениях ветра. В Таганрогском заливе чаще всего имеют место западные, при этом их скорость и повторяемость намного меньше, чем для других направлений.

В табл. 4.12 даны на четырех глубинах Азовского моря максимальные значения скорости течений, вызванных действием постоянного западного ветра ( $\mathbf{W}_{\text{st}}^2 = 10 \text{ м/с}$ ), а также приводным ветром  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  и их совместным действием.



**Рис. 4.12.** Поля стационарных течений Азовского моря, генерируемые действием ветра скоростью 15 м/с: (а) – северо-западного направления, (б) – западного, (в) – юго-западного

Т а б л и ц а 4.12

**Максимальные значения скорости течений (см/с), вызванных действием постоянного западного ветра со скоростью 10 м/с, приводным ветром модели *SKIRON* и их совместным действием, на различных горизонтах Азовского моря**

| Горизонт,<br>м | $W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$ | $W_{SKIRON}$ | $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ |
|----------------|-----------------------------|--------------|-------------------------|
| 0              | 49,2                        | 48,2         | 199                     |
| 3              | 44,8                        | 46,2         | 181                     |
| 5              | 41,5                        | 43,9         | 169                     |
| 10             | 29,1                        | 31,5         | 118                     |

Анализ этих величин свидетельствует о том, что совместное действие стационарного и переменного ветров приводит к существенному росту максимумов скорости течений на всех горизонтах. Так, в случае одновременного действия системы ветров увеличение этих максимумов на глубинах 1, 3, 5 и 10 м относительно скорости течений, вызванных только постоянным ветром, составляет: 75,28; 75,25; 75,44 и 75,34 %, а относительно скорости течений, обусловленных только  $W_{SKIRON}$ : 75,78; 74,48; 74,02 и 73,31 %.

Для рассматриваемых полей ветра и установившегося движения жидкости в табл. 4.13 содержатся максимальные значения нагонов и сгонов на береговых станциях моря. Их анализ приводит к выводу, что ветер одного направления, но бóльшей скорости увеличивает предельные значения сгонов на 31 % и нагонов на 80 % для скоростей 5 и 15 м/с соответственно.

Ветры одной и той же скорости, но различных направлений (от юго-западного до северо-западного) приводят к изменению районов максимальных значений нагонов. Так, постоянные юго-западный и северо-западный ветры со скоростью 15 м/с вызывают соответственно наибольшие нагоны на ст. Таганрог (204 см) и Приморско-Ахтарск (102 см).

В то же время под действием ветра рассматриваемых значений скорости и направления не происходят изменения положения районов максимальных сгонов. Во всех случаях наибольшие значения сгонов достигаются на ст. Геническ. При этом для скорости ветра

15 м/с максимальная величина сгона (139 см) имеет место для западного направления.

Т а б л и ц а 4.13

**Максимальные нагоны («+») и сгоны («-») (см), вызванные ветром трех скоростей и трех направлений, на береговых станциях Азовского моря**

| Береговые станции | $W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$ |     |    | $W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$ |     |     | $W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$ |      |      |
|-------------------|----------------------------|-----|----|-----------------------------|-----|-----|-----------------------------|------|------|
|                   | ЮЗ                         | З   | СЗ | ЮЗ                          | З   | СЗ  | ЮЗ                          | З    | СЗ   |
| Геническ          | -9                         | -12 | -8 | -41                         | -57 | -39 | -96                         | -139 | -101 |
| Бердянск          | 3                          | -4  | -6 | 17                          | -20 | -29 | 46                          | -47  | -78  |
| Мариуполь         | 13                         | 10  | -4 | 53                          | 41  | -17 | 119                         | 88   | 42-  |
| Таганрог          | 22                         | 21  | 6  | 94                          | 84  | 25  | 204                         | 180  | 52   |
| Ейск              | 13                         | 14  | 6  | 54                          | 57  | 27  | 117                         | 123  | 63   |
| П.-Ахтарск        | 7                          | 10  | 9  | 34                          | 48  | 41  | 86                          | 117  | 102  |
| Темрюк            | -5                         | 6   | 7  | -19                         | 30  | 35  | -41                         | 73   | 89   |
| Опасное           | -6                         | 4   | 5  | -26                         | 17  | 28  | -59                         | 41   | 72   |
| Мысовое           | -8                         | -6  | 4  | -38                         | -29 | 18  | -92                         | -65  | 47   |

Отметим, что для одной и той же скорости ветра, но разных направлений в одном и том же береговом районе могут быть и нагоны и сгоны. На ст. Мариуполь при скорости 15 м/с возникают нагоны (119 и 88 см) для юго-западного и западного направлений ветра и сгон (42 см) для северо-западного.

Из анализа характера представленных на рис. 4.13 кривых изолиний уровня моря следует, что для ветра скоростью 15 м/с всех трех направлений (северо-западное (а), западное (б) и юго-западное (в)) имеет место в каждом случае одна узловая линия в центральном районе моря, ориентированная перпендикулярно скорости ветра. К юго-западу от этой линии происходит повышение уровня, к северо-западу – понижение. Как видно (рис. 4.13, а, б), при юго-западном и западном ветрах области наименьших высот

волн (узловая линия) располагаются в центральной части моря с некоторым смещением к югу. При северо-западном ветре той же скорости изолинии уровня меняются мало, область их наименьших значений несколько смещается в юго-западном направлении (рис. 4.13, в).

В серии численных экспериментов получена оценка влияния скорости и направления зональных ветров на трансформацию области загрязнения в центральном районе Азовского моря ( $A_0$ ). Известно [13], что главными источниками поступления загрязняющих веществ в морскую среду являются реки, ливневые стоки и сточные коллекторы бытовых вод вблизи больших городов [66, 84–86, 98]. Часть из них представляет собою непрерывные источники, остальные действуют в режиме мгновенных сбросов (например, ливневые канализации). Основной объем антропогенных нечистот выносятся ливневыми водостоками и паводковыми речными водами в центральную часть моря.

Пусть в момент выброса загрязнения ( $t_0 = 48$  ч) на поверхность моря центр его области находился в пункте  $A_0$  ( $x_0 = 110$  км,  $y_0 = 145$  км). Радиусы этих областей при  $t = t_0$  в каждом из трех рассматриваемых экспериментов принимались равными 6,364; 9 и 12,728 км. При этом их площади на поверхности моря составляют  $S_0/2$ ,  $S_0$  и  $2S_0$  соответственно ( $S_0 = 254$  км<sup>2</sup>). Отметим, что скорость течений для всех полей ветра при  $t \geq t_0$  не зависит от времени.

Дальнейшее изменение концентрации загрязняющих веществ и занимаемых ими районов определяется в основном течениями, существенно зависящими от характеристик действующего ветра. В численных экспериментах для изучения механизмов переноса и трансформации этих веществ используются поля постоянного ветра трех направлений, указанных в п. 1.

В табл. 4.14 приведены значения следующих параметров: коэффициента максимального распространения области загрязнения ( $K_{\max}$ ), времени его достижения ( $t_{\max}$ , ч) и полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) на разных глубинах для четырех скоростей и трех направлений ветра. Отметим, что здесь имеется в виду время с момента выброса загрязнения.

Из анализа данных (табл. 4.14) следует, что на свободной поверхности с увеличением скорости ветра максимум площади,

занимаемой примесью, возрастает, а время достижения наибольшего ее распространения ( $t_{\max}$ ) убывает.

В численном эксперименте с наименьшей начальной площадью загрязнения ( $S_0/2$ ) при скорости ветра 5 м/с максимум его площади ( $K_{\max} = 1,23$ ) достигается в 5,11 ч; при 10 м/с (1,33) – в 4,30 ч, при 15 м/с (1,36) – в 4,15 ч.

Т а б л и ц а 4.14

**Параметры загрязнения  $K_{\max}$ , время их достижения  $t_{\max}$  (ч) и время полного рассеяния примеси  $t_d$  (ч) на различных горизонтах моря в зависимости от начальной площади загрязнения ( $\gamma S_0$ ,  $\gamma = 1/2, 1, 2$ ), направления и скорости ветра**

| $K_{\max}$       |            |            | $\mathbf{W}_{\text{st}}^1 = 5 \text{ M/c}$ |       |       | $\mathbf{W}_{\text{st}}^2 = 10 \text{ M/c}$ |       |       | $\mathbf{W}_{\text{st}}^3 = 15 \text{ M/c}$ |       |       |       |
|------------------|------------|------------|--------------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|
| $\gamma S_0$     | z, M       | $t_{\max}$ | $\mathbf{W}_0$                             | IO3   | 3     | C3                                          | IO3   | 3     | C3                                          | IO3   | 3     | C3    |
|                  |            | $t_d$      |                                            |       |       |                                             |       |       |                                             |       |       |       |
| 0                | $K_{\max}$ | 1,16       | 1,22                                       | 1,20  | 1,23  | 1,27                                        | 1,28  | 1,33  | 1,33                                        | 1,33  | 1,36  |       |
|                  | $t_{\max}$ | 3,00       | 5,07                                       | 5,00  | 5,11  | 5,00                                        | 4,03  | 4,30  | 4,00                                        | 4,00  | 4,15  |       |
|                  | $t_d$      | 15,00      | 14,02                                      | 14,00 | 14,25 | 14,00                                       | 14,10 | 14,30 | 14,00                                       | 14,08 | 14,39 |       |
|                  | $K_{\max}$ | 1,28       | 1,28                                       | 1,28  | 1,29  | 1,35                                        | 1,32  | 1,36  | 1,42                                        | 1,37  | 1,46  |       |
| $\frac{1}{2}S_0$ | $-H/2$     | $t_{\max}$ | 12,00                                      | 14,00 | 14,00 | 14,20                                       | 14,06 | 13,00 | 14,55                                       | 13,45 | 12,00 | 16,70 |
|                  |            | $t_d$      | 35,00                                      | 31,00 | 31,00 | 31,17                                       | 30,83 | 31,00 | 31,42                                       | 30,42 | 32,00 | 34,70 |
|                  |            | $K_{\max}$ | 1,05                                       | 1,33  | 1,29  | 1,28                                        | 1,43  | 1,31  | 1,40                                        | 1,50  | 1,43  | 1,58  |
| $-H_1$           |            | $t_{\max}$ | 29,00                                      | 25,00 | 27,00 | 30,00                                       | 27,00 | 25,00 | 29,00                                       | 28,00 | 27,00 | 28,00 |
|                  |            | $t_d$      | 45,00                                      | 49,00 | 52,00 | 53,00                                       | 48,00 | 51,00 | 49,00                                       | 47,00 | 51,00 | 52,00 |
|                  |            | $t_d$      | 50,00                                      | 54,30 | 58,00 | 57,00                                       | 54,20 | 57,00 | 55,37                                       | 53,02 | 56,00 | 51,18 |

| $\gamma S_0$ | $z, \text{ м}$    | $W_0$ | 5 м/с |       |       | 10 м/с |       |       | 15 м/с |       |       |
|--------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|              |                   |       | ЮЗ    | З     | СЗ    | ЮЗ     | З     | СЗ    | ЮЗ     | З     | СЗ    |
| 0            | $K_{\max}$        | 1,11  | 1,16  | 1,15  | 1,17  | 1,19   | 1,20  | 1,22  | 1,23   | 1,24  | 1,27  |
|              | $t_{\max}$        | 4,00  | 4,28  | 4,21  | 4,10  | 4,42   | 4,33  | 4,09  | 3,50   | 3,45  | 3,38  |
|              | $t_d$             | 15,00 | 49,56 | 52,04 | 53,00 | 49,32  | 51,00 | 50,39 | 47,99  | 51,00 | 52,49 |
|              | $K_{\max}$        | 1,20  | 1,21  | 1,19  | 1,22  | 1,26   | 1,22  | 1,26  | 1,29   | 1,25  | 1,32  |
| $S_0$        | $-H/2$ $t_{\max}$ | 13,00 | 14,08 | 13,00 | 13,30 | 13,61  | 13,00 | 13,07 | 14,60  | 12,00 | 13,37 |
|              | $t_d$             | 39,00 | 34,10 | 35,00 | 40,49 | 32,08  | 33,00 | 34,30 | 31,45  | 32,00 | 31,43 |
|              | $K_{\max}$        | 1,02  | 1,23  | 1,19  | 1,19  | 1,29   | 1,20  | 1,27  | 1,32   | 1,26  | 1,41  |
|              | $-H_1$ $t_{\max}$ | 28,00 | 27,12 | 28,00 | 28,00 | 24,41  | 26,00 | 27,38 | 28,46  | 27,00 | 33,08 |
| 0            | $t_d$             | 50,00 | 54,30 | 58,00 | 57,00 | 54,20  | 57,00 | 55,37 | 53,02  | 56,00 | 51,18 |
|              | $K_{\max}$        | 1,08  | 1,11  | 1,10  | 1,12  | 1,13   | 1,13  | 1,15  | 1,15   | 1,16  | 1,18  |
|              | $t_{\max}$        | 3,00  | 3,08  | 5,00  | 3,17  | 4,00   | 4,00  | 4,08  | 4,00   | 4,02  | 3,34  |
|              | $t_d$             | 15,00 | 16,09 | 16,00 | 16,13 | 16,00  | 16,00 | 16,23 | 16,00  | 16,13 | 16,09 |
| $2S_0$       | $-H/2$ $K_{\max}$ | 1,13  | 1,14  | 1,13  | 1,14  | 1,16   | 1,14  | 1,17  | 1,19   | 1,17  | 1,21  |
|              | $t_{\max}$        | 13,00 | 13,07 | 14,00 | 12,04 | 12,21  | 13,00 | 14,26 | 12,22  | 13,00 | 14,64 |
|              | $t_d$             | 71,00 | 38,06 | 48,00 | 51,09 | 36,03  | 37,00 | 38,20 | 35,01  | 35,00 | 34,01 |
|              | $-H_1$ $K_{\max}$ | 1,00  | 1,13  | 1,11  | 1,11  | 1,15   | 1,12  | 1,17  | 1,17   | 1,15  | 1,26  |
|              | $t_{\max}$        | 26,00 | 28,25 | 26,00 | 28,00 | 25,14  | 25,00 | 27,40 | 28,27  | 27,00 | 29,89 |
|              | $t_d$             | 55,00 | 61,31 | 63,00 | 60,00 | 60,03  | 62,00 | 61,09 | 58,05  | 60,00 | 55,30 |

Отметим, что северо-западное направление ветра сильнее влияет на величину максимума площади примеси ( $K_{\max}$ ) и время ее полного рассеивания ( $t_d$ ) по сравнению с юго-восточным и западным направлениями. Так, для северо-западного ветра  $t_d$  в поверхностном слое увеличивается с ростом его скорости (5, 10, 15 м/с) и принимает значения 14,25; 14,3 и 14,4 ч соответственно. Через 4 ч после выброса примеси на поверхность моря происходит ее проникновение на горизонт  $z = -H/2$ , где  $H = 12$  м – глубина моря в данном районе.

При этом здесь с течением времени постепенно увеличивается площадь области загрязнения от нуля до наибольшего значения. Отметим, что  $-H_1 = -H + h_d$ .

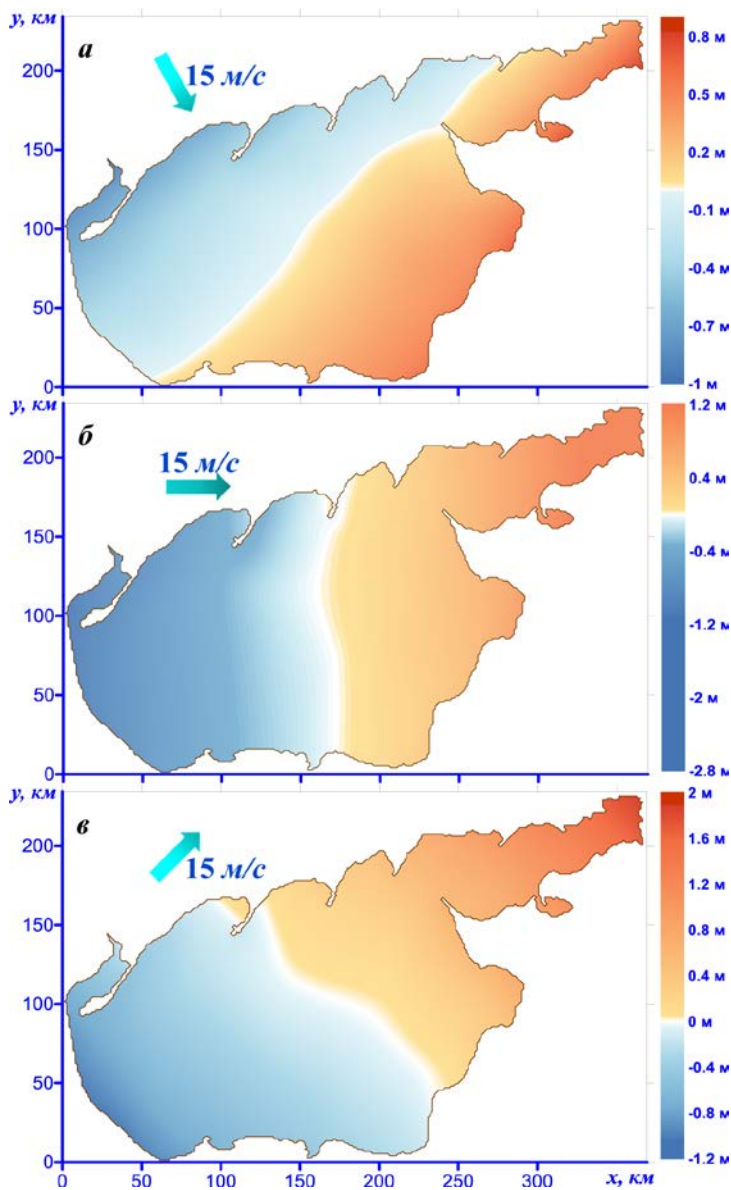
В этом же численном эксперименте ( $S_0/2$ ) для всех значений скорости ветра наибольшая площадь распространения загрязнения ( $K_{\max}$ ) имеет место в случае северо-западного ветра и составляет: 1,29 ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ); 1,36 ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ) и 1,46 ( $\mathbf{W}_{st}^3$ ).

При этом растет и время ее достижения  $t_{\max}$  (14,20; 14,55 и 16,7 ч) (см. табл. 4.14). С ростом начальной площади загрязнения увеличивается и время ее полного рассеивания ( $t_d$ ). На тихой воде ( $\mathbf{W}_0 = 0$ ) оно принимает значения 45; 50 и 55 ч для  $S_0/2$ ,  $S_0$ ,  $2S_0$  соответственно. При наличии рассматриваемых атмосферных возмущений значения  $t_d$  равны 53; 58 и 63 ч и достигаются для  $S_0/2$ ,  $S_0$ ,  $2S_0$  соответственно.

Исследуем влияние изменения величины скорости ветра на размеры областей загрязнения одинаковой начальной площади, используя данные численных экспериментов, представленные в табл. 4.14. В результате приходим к выводу, что наименьшие из указанных параметров распространения примеси имеют место при нулевой скорости ветра, наибольшие – при ветрах максимальной скорости (15 м/с).

Сравним время рассеивания ( $t_d$ ) и максимумы размеров занимаемых примесью областей ( $K_{\max}$ ) в зависимости от начальной площади загрязнения ( $\gamma S_0$ ,  $\gamma = 1/2$ ; 1; 2). Анализ результатов численных экспериментов по установлению закономерностей переноса и распространения примеси показал, что начальные размеры областей загрязнений мало влияют на характер их горизонтальных и вертикальных трансформаций.

Для оценки интенсивности эволюции примеси рассмотрен эксперимент при наличии северо-западного ветра скоростью 15 м/с и увеличении начальной площади загрязнения ( $S_0/2$ ,  $S_0$ ,  $2S_0$ ). В этом случае в поверхностном слое моря  $K_{\max}$  с ростом начальной площади принимает значения (1,36; 1,27 и 1,18). На глубине  $z = -H/2$  для соответствующих начальных площадей  $K_{\max}$  также убывает на 9,6 и 17,1 %. В придонном слое при тех же условиях  $K_{\max}$  уменьшается на 10,7 и 20,2 %.

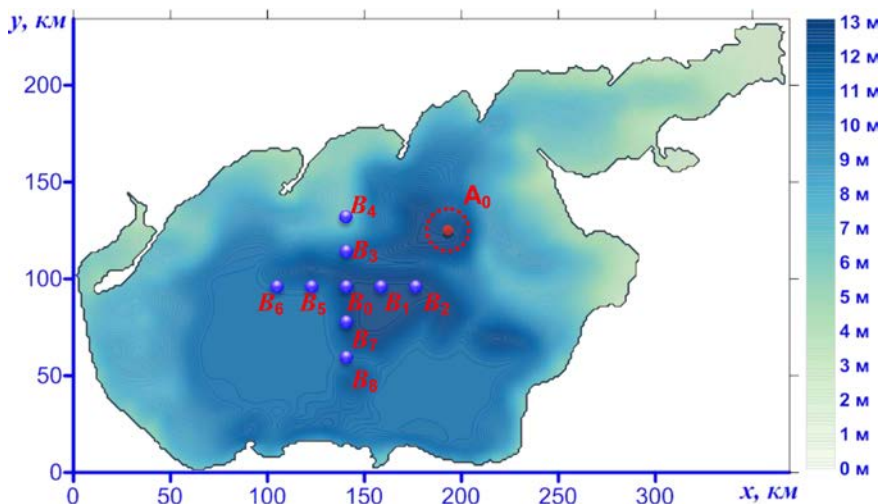


**Рис. 4.13.** Изменения уровня (м) Азовского моря, вызываемые действием ветра скоростью 15 м/с: (а) – северо-западного направления, (б) – западного, (в) – юго-западного

Выполним анализ влияния размеров области начального загрязнения на продолжительность времени полного рассеивания загрязнений ( $t_d$ ). Из рассмотренных данных, приведенных в табл. 4.14, следует, что наибольшее значение  $t_d$  имеет место в случае юго-западного ветра скоростью 5 м/с. При этом в придонном слое ( $z = -H_1$ ) с ростом начальных площадей  $t_d$  увеличивается по сравнению с вариантом  $S_0/2$  на 11 и 25 % и составляет: 49 ( $S_0/2$ ); 54,3 ( $S_0$ ); 61,3 ч ( $2S_0$ ).

Рассматривая результаты, представленные в этой таблице, приходим к выводу о том, что наибольшая площадь загрязнения по отношению к площади начального загрязнения в процессе трансформации увеличивается на 28 % на тихой воде и на 58 % для всех рассматриваемых атмосферных возмущений.

С целью изучения волновых характеристик Азовского моря рассчитаны временные массивы для девяти характерных пунктов ( $B_N$ ), расположенных в центральной части:  $B_0 - B_8$ . Схема расположения приведена на рис. 4.14, координаты этих пунктов в табл. 4.15.



**Рис. 4.14.** Положение центра области загрязнения  $A_0$  и пунктов  $B_0 - B_8$  в Азовском море. Координаты пунктов  $B_0 - B_8$  приведены в табл. 4.15

Данные в указанных точках получены в результате численного моделирования при наличии и отсутствии стационарных течений.

Экстремальные значения ( $\zeta_{\max}$  и  $|\zeta|_{\max}$ ) амплитуды колебаний уровня Азовского моря, вызванных приводным ветром  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  и его совместным действием с постоянным ветром ( $\mathbf{W}_{\text{st}} + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ ), приведены в табл. 4.15.

Отсюда следует, что под действием  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  имеют место наибольшие смещения уровня моря  $\zeta_{\max} = 48$  см ( $B_6$ ) и  $|\zeta|_{\max} = 30$  см ( $B_7$ ); при наличии постоянного и прогностического ветров ( $\mathbf{W}_{\text{st}}$  и  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ ) –  $\zeta_{\max} = 173,9$  см ( $B_6$ ) и  $|\zeta|_{\max} = 188,8$  см ( $B_7$ ). Максимальная амплитуда волн ( $A_{\max} = \zeta_{\max} + |\zeta|_{\max}$ ) принимает следующие значения: при  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$   $A_{\max} = 63$  см ( $B_6$ ); под действием суммарного ветра ( $\mathbf{W}_{\text{st}} + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ )  $A_{\max} = 276,5$  см ( $B_6$ ). Отсюда следует, что при ветре  $\mathbf{W}_{\text{st}} + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  максимальная амплитуда колебаний ( $A_{\max}$ ) увеличилась в 4,38 раза по сравнению с наличием только  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ .

Т а б л и ц а 4.15

**Экстремумы колебаний уровня Азовского моря, вызванных действием приводного ветра  $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$  и его совместным действием с западным ветром скоростью 10 м/с, и время их достижения**

| Пункты<br>$B_N$ | Координаты,<br>град |       | $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ |                   |                          |                   | $\mathbf{W}_{\text{st}} + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ |                   |                          |                   |
|-----------------|---------------------|-------|------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
|                 | с.ш.                | в.д.  | $\zeta_{\max}$ ,<br>см       | $t_{\max}$ ,<br>ч | $ \zeta _{\min}$ ,<br>см | $t_{\min}$ ,<br>ч | $\zeta_{\max}$ ,<br>см                                | $t_{\max}$ ,<br>ч | $ \zeta _{\min}$ ,<br>см | $t_{\min}$ ,<br>ч |
| 0               | 46,25               | 36,46 | 6                            | 30,9              | 4,5                      | 14,6              | 25,6                                                  | 30,0              | 13,3                     | 15,7              |
| 1               | 46,77               | 36,46 | 10                           | 31,0              | 11,2                     | 18,1              | 41,2                                                  | 34,6              | 37,6                     | 20,3              |
| 2               | 47,29               | 36,46 | 21                           | 208,8             | 7,8                      | 14,4              | 85,6                                                  | 208,1             | 5,5                      | 15,3              |
| 3               | 46,25               | 36,21 | 16                           | 30,9              | 9,1                      | 223,9             | 46,3                                                  | 30,7              | 17,5                     | 5,5               |
| 4               | 46,25               | 36,95 | 6                            | 102,3             | 16,1                     | 34,2              | 5,5                                                   | 100,7             | 48,9                     | 207,7             |
| 5               | 45,20               | 36,46 | 9                            | 208,3             | 15,8                     | 37,9              | 38,4                                                  | 5,2               | 18,6                     | 15,7              |
| 6               | 45,21               | 36,46 | 48                           | 207,8             | 16,5                     | 102,9             | 173,9                                                 | 207,3             | 5,1                      | 102,6             |
| 7               | 46,25               | 34,97 | 11                           | 103,9             | 30,7                     | 34,0              | 5,0                                                   | 101,1             | 118,8                    | 208,7             |
| 8               | 46,25               | 34,97 | 18                           | 207,9             | 27,1                     | 37,8              | 72,8                                                  | 4,7               | 40,3                     | 37,1              |

Изучение влияния стационарных течений на трансформацию пассивной примеси и динамические процессы, вызываемые в Азовском море атмосферными возмущениями, позволяет сделать следующие выводы. Основная циркуляция вод, возникающая при наличии зональных ветров, характеризуется циклоническим движением. В квазистационарном состоянии главным структурным элементом движения жидкости является течение, опоясывающее прибрежный район моря шириной 50–60 км в западном направлении.

Совместное действие постоянного и переменного ветров приводит к увеличению максимумов скоростей течений, по сравнению со случаем только постоянного ветра, до 75 % на всех рассматриваемых глубинах. При этом для всех трех направлений ветра имеет место одна узловая линия в центральном районе моря, ориентированная перпендикулярно действующему ветру.

## Глава 5

### Свободные колебания уровня Азовского моря

В бассейне Азовского моря свободные волновые (сейшеобразные) колебания уровня, происходящие после прекращения действия атмосферных возмущений, наблюдаются постоянно. При этом в районах сужения береговых границ скорость течений может достигать 1,5 м/с, а высота волн – 0,8 м [18, 32]. В этих случаях создается реальная угроза возникновения экстремальных течений, затопления прибрежных районов моря и разрушения береговых сооружений.

Изучение сейшеобразных колебаний в Азовском море с использованием математического моделирования и с учетом анализа данных натурных наблюдений проведено в работах [14, 15, 42], в которых методом конечных элементов найдены значения периодов и структур первых шести мод свободных колебаний. В ряде работ Ю. И. Инжебейкина [88, 89] сейшевые колебания уровня Азовского моря и течения, возникающие в результате нагонов величиной 1 м на открытой границе, исследованы в рамках линейной двумерной математической модели.

С использованием нелинейной трехмерной численной модели анализируются физические закономерности свободных колебаний жидкости в акватории Азовского моря. Изучены пространственные характеристики сейшеобразных колебаний, расположение узловых линий и скорости возникающих при этом течений.

#### **§ 5.1. Исследование скорости течений и колебаний уровня моря после прекращения длительно действующего ветра**

Атмосферные возмущения являются основным источником генерации сейш в Азово-Черноморском регионе [5, 13, 18, 105]. Под влиянием ветра, имеющего устойчивое направление и скорость, возникают течения и повышения уровня у одного берега и понижения у другого. После прекращения действия ветра имеют место свободные волновые колебания жидкости на поверхности моря.

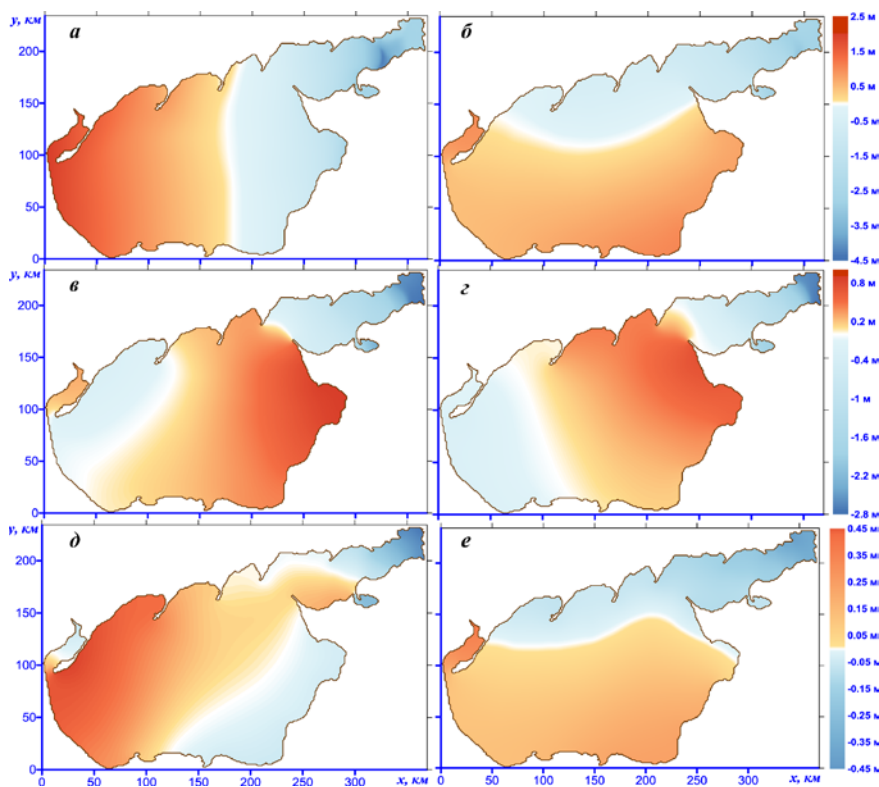
С использованием результатов численных экспериментов, проведенных на основе указанной выше гидродинамической модели, изучается движение жидкости в бассейне Азовского моря после прекращения действия стационарного ветра. Начиная с  $t = 0$

на первоначально невозмущенную поверхность действует восточный ветер, скорость которого нарастает за первые 3 часа до постоянного значения  $\mathbf{W}_{st}^4 = 20$  м/с. После установления течений ( $t_{st} = 48$  ч) скорость ветра линейно уменьшается за 3 ч до нуля ( $t_0 = 51$  ч). Условие выхода движения жидкости на установившийся режим определяется тем, что между двумя соседними значениями времени не происходит заметных изменений отклонений уровня и скорости течений (не более чем на 5 %).

С целью получения выводов о физических закономерностях свободных колебаний, возникающих после прекращения действия указанного выше ветра, проанализируем результаты численных экспериментов.

На рис. 5.1 показаны изолинии уровня моря в различные моменты времени. В начальный период поверхность уровня представляет собой одноузловую сейшу. В установившемся режиме (рис. 5.1, *а*) возникает понижение уровня вдоль восточного побережья (сгоны) и повышение вдоль западного (нагоны). Узловая (на рисунке штриховая) линия пересекает центральную часть моря, она ориентирована перпендикулярно направлению ветра. Отметим, что самые интенсивные понижения происходят на востоке, в Таганрогском заливе, а наибольшие повышения – в западной части моря. Наименьшие амплитуды колебаний уровня имеют место в его центральной части.

С прекращением действия ветра (рис. 5.1, *б – е*) возникает существенное изменение с течением времени расположения линий равного уровня и узловой линии. В момент прекращения действия ветра (рис. 5.1, *б*) узловая линия не смещается, а зоны сгона и нагона сохраняются в тех же областях моря, что и в установившемся режиме. При этом величины сгонов и нагонов уменьшаются. Из рис. 5.1, *в* видно, что узловая линия через 3 ч после прекращения действия ветра развернута относительно центральной области моря и ориентирована в зональном направлении. Зоны сгона и нагона также смещаются на запад, в сторону действующего ветра. В Таганрогском заливе прекращение действия ветра через 3 ч мало сказывается на изменениях уровня.



**Рис. 5.1.** Изменения уровня (м) Азовского моря при установившемся движении (а), в момент прекращения действия ветра (б), через 3 ч (в), через 6 ч (з), через 9 ч (д), через 12 ч (е)

Через 6 ч (рис. 5.1, з) происходит дальнейшее перемещение узловой линии в восточном направлении. Области нагонов и сгонов перемещаются соответственно в южном и северном направлениях, при этом их величины существенно уменьшаются. На рис. 5.1, д, е приведены изолинии уровня моря через 9 и 12 ч после прекращения действия ветра. Видно, что свободные колебания в указанные моменты времени имеют вид двухузловых сейш.

Т а б л и ц а 5.1

**Стационарные сгоны и нагоны ( $\zeta_{st}$ , см), обусловленные действием постоянного восточного ветра со скоростью 20 м/с, время их достижения ( $t_k$ , ч) и экстремумы сейшеобразных колебаний ( $\zeta_k$ ,  $k = 1, \dots, 4$ ), возникающих после прекращения действия ветра**

| Станция    | $\zeta_{st}$ | $\zeta_1$ | $t_1$ | $\zeta_2$ | $t_2$ | $\zeta_3$ | $t_3$ | $\zeta_4$ | $t_4$ |
|------------|--------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Геническ   | 202          | -27       | 9,5   | 33        | 16,5  | -12       | 24,7  | 12        | 32,7  |
| Бердянск   | 25           | -57       | 2,5   | 46        | 7,7   | -8        | 17,6  | 10        | 25,6  |
| Мариуполь  | -153         | -1        | 12,3  | -20       | 20,2  | 17        | 27,1  | 2         | 39,2  |
| Таганрог   | -158         | -89       | 24,3  | 30        | 31,5  | -8        | 41,3  | 8         | 50,4  |
| Ейск       | -244         | -6        | 18,3  | 21        | 28,5  | -2        | 38,9  | 7         | 55,7  |
| П.-Ахтарск | -175         | 92        | 5,3   | -10       | 13,9  | 34        | 21,3  | -3        | 26,7  |
| Темрюк     | -18          | 103       | 2,7   | -14       | 13,5  | 25        | 18,5  | -5        | 28,5  |
| Опасное    | 32           | 93        | 1,7   | -8        | 13,0  | 23        | 18    | -4        | 27,9  |
| Мысовое    | 98           | -20       | 8,7   | 26        | 15,4  | -6        | 24,2  | 3         | 37,3  |

Изменения со временем колебаний уровня в любом пункте Азовского моря представляют собой суперпозицию сейш различных мод, на формирование которых влияет много факторов. Используя результаты численного моделирования, выполним анализ изменения амплитуды и периодов сейшеобразных колебаний в пунктах побережья и центральной части бассейна.

В табл. 5.1 приведены экстремумы сейшеобразных колебаний ( $\zeta_k$ ;  $k = 1, \dots, 4$ ) в районе береговых станций Азовского моря и время их достижения ( $t_k$ ).

Из анализа представленных данных следует, что наибольший нагон, генерируемый восточным ветром, имеет место на ст. Геническ (2 м). После полного ослабления действия ветра происходит монотонное понижение уровня до наименьшего значения ( $\zeta_1 = -0,27$  м;  $t = 9,5$  ч). При этом размах колебания от стационарного нагона

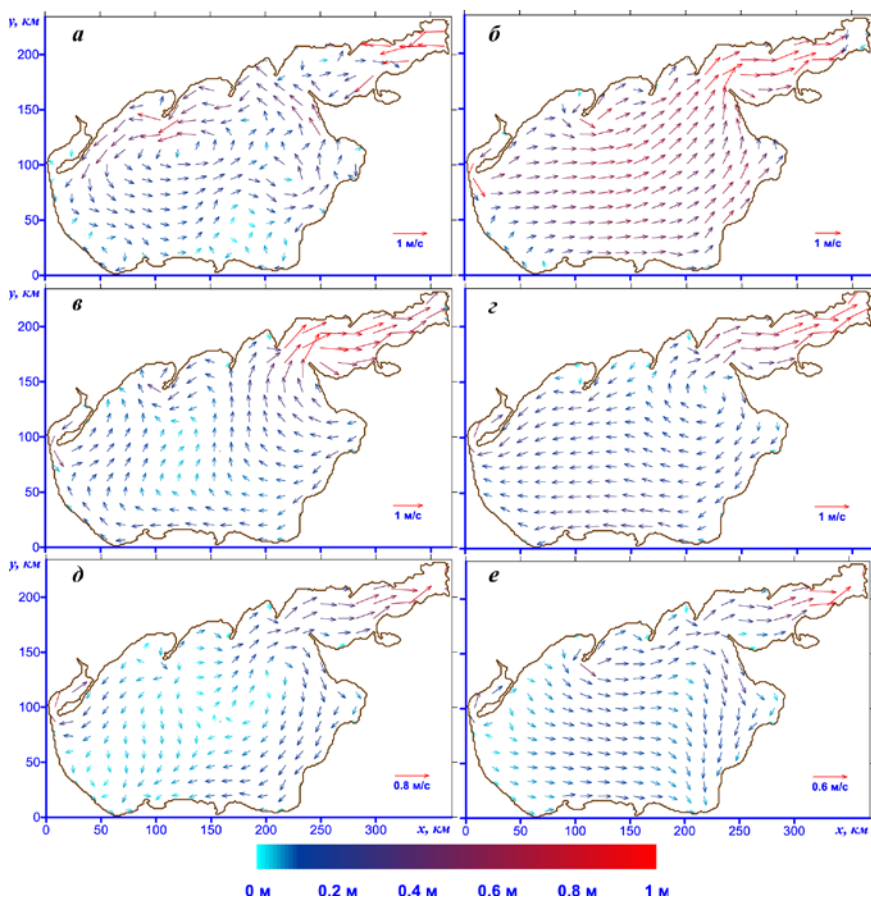
составляет 2,3 м. При  $t = 16,5$  ч отмечается повышение уровня до 0,33 м. Размах второго колебания (0,6 м) в 3,8 раза меньше первого (на 1,63 м). Экстремальное значение при следующем колебании ( $-0,12$  м) имеет место через 8,2 ч (24,7 ч), его размах 0,45 м мало отличается от предыдущего (на 0,15 м). Максимум четвертого свободного колебания  $\zeta_4 = 0,12$  м наступает через  $t_4 = 32,7$  ч, его размах (0,24 м) вдвое меньше предыдущего и в 9,6 раза меньше первого.

Используя данные табл. 5.1, выполним анализ свободных колебаний на ст. Ейск, где отмечается наибольший сгон ( $-2,44$  м;  $t = t_0$ ). Прекращение действия ветра вызывает повышение уровня ( $\zeta_1 = -0,06$  м;  $t = 18,3$  ч). При этом размах первого колебания составляет 2,38 м. В дальнейшем уровень продолжает повышаться и через 10,2 ч достигает наибольшего значения 0,21 м, размах второго колебания (0,27 м) в 8,8 раза меньше первого. Еще через 10,4 ч имеет место понижение уровня на 0,23 м ( $\zeta_3 = -0,02$  м;  $t = 38,9$  ч), размах колебания отличается от предыдущего на 0,04 м. Размах следующего колебания ( $\zeta_4 = 0,07$  м), которое происходит через 16,9 ч ( $t_4 = 55,7$  ч), составляет 0,1 м, что в 23,8 раза меньше первого.

На рис. 5.2 приведены поля течений в поверхностном слое Азовского моря в различные моменты времени.

Видно, что в установившемся движении ( $t_{st} = 48$  ч) векторы скорости течений вдоль северо-восточной части побережья и в Таганрогском заливе имеют преимущественное направление в одну сторону с действующим ветром (рис. 2, а). В центральной части моря отмечаются два вихревых образования противоположных знаков с пространственным масштабом  $\sim 100$  км. Между вихрями выделяются узкие меандрирующие струи.

При уменьшении скорости ветра до нуля ( $t = t_0$ ) процесс вихреобразования продолжает развиваться, а поле течений представляет собой цепочки вихрей (рис. 5.2, б). В дальнейшем картина течений существенно меняется (рис. 5.2, в). Теперь во всей акватории моря векторы скорости течений направлены в сторону, противоположную действующему ветру. Видно, что скорости больше, чем при  $t_{st}$ , и при этом присутствует один вихрь возмущений. Через 6 и 9 ч после прекращения действия ветра течения остаются достаточно интенсивными и направлены в сторону, противоположную стационарному ветру (рис. 5.2, г, д). При этом вдоль северного побережья начинает формироваться антициклонический вихрь.

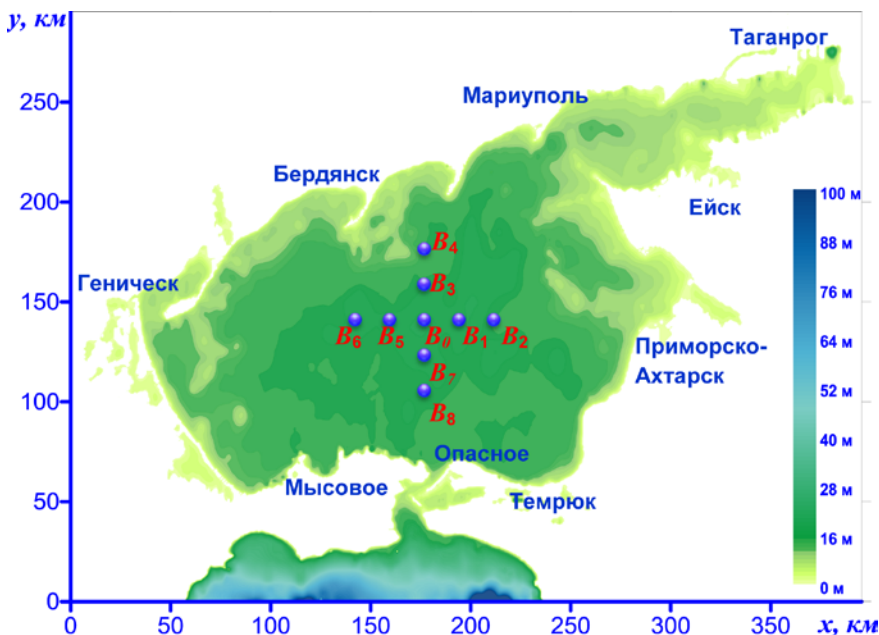


**Рис. 5.2.** Поля течений Азовского моря при установившемся движении (а), в момент прекращения действия ветра (б), через 3 ч (в), через 6 ч (г), через 9 ч (д), через 12 ч (е)

Через 12 ч (рис. 5.2, е) в Таганрогском заливе сохраняется направление течений с запада на восток, у входа в него имеет место антициклонический вихрь, в центральной и западной частях моря течения направлены в противоположную сторону (с востока на запад).

Для определения периодов и амплитуд сейш в открытой части Азовского моря в табл. 5.2 приводятся экстремумы сейшеобразных

колебаний (см), возникающих после затухания ветра, и соответствующие им моменты времени для девяти пунктов моря (рис. 5.3).



**Рис. 5.3.** Рельеф дна (м) и расположение пунктов  $B_0 - B_8$  в центральной части Азовского моря

Из анализа представленных данных следует, что наименьшее отклонение уровня в установившемся режиме движения ( $0,04$  м) имеет место в амфидромической точке  $B_0$  ( $46,25^\circ$  с. ш.,  $36,46^\circ$  в. д.) – геометрическом центре бассейна. В пунктах, расположенных на расстоянии  $50$  км от центра, амплитуды уровня значительно выше. Так, максимумы отклонений уровня в п.  $B_5$  и  $B_7$  составляют соответственно  $-1,25$  и  $1$  м, что в  $31,3$  и  $25,3$  раза больше, чем в точке  $B_0$  ( $t = t_{st}$ ). Из сравнения наибольших значений нагона на ст. Геничеськ ( $2$  м) и повышения уровня в п.  $B_7$  ( $1,01$  м); сгона на ст. Ейск ( $2,44$  м) и понижения уровня в п.  $B_5$  ( $-1,25$  м) следует, что стационарные нагоны и сгоны двукратно превышают максимальные отклонения уровня в открытой части моря.

**Экстремумы сейшеобразных колебаний, возникающих после прекращения действия ветра, в открытой части Азовского моря**

| Пункт | $\zeta_{st}$ | $\zeta_1$ | $t_1$ | $\zeta_2$ | $t_2$ | $\zeta_3$ | $t_3$ | $\zeta_4$ | $t_4$ |
|-------|--------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| $B_0$ | 4            | 33        | 7,7   | 2         | 14,7  | 8         | 20,6  | 2         | 29,6  |
| $B_1$ | -46          | 59        | 5,6   | -3        | 15,3  | 18        | 22,1  | 0         | 30,5  |
| $B_2$ | 5            | -37       | 1,9   | 43        | 7,4   | -3        | 17,4  | 10        | 23,9  |
| $B_3$ | 48           | 2         | 4,3   | 16        | 8,8   | 2         | 19,4  | 2         | 22,3  |
| $B_4$ | 10           | 53        | 2,8   | 1         | 13,7  | 15        | 18,5  | 0         | 28,6  |
| $B_5$ | -125         | 88        | 5,3   | -10       | 16,3  | 30        | 21,5  | -2        | 27,0  |
| $B_6$ | 10           | -52       | 1,9   | 45        | 7,4   | -7        | 17,4  | 10        | 24,7  |
| $B_7$ | 101          | -14       | 5,7   | 25        | 13,3  | -2        | 20,3  | 7         | 28,8  |
| $B_8$ | 11           | 86        | 2,5   | -8        | 13,3  | 22        | 18,3  | -3        | 28,1  |

*Примечание.* Обозначения – в табл. 5.1. Координаты пунктов  $B_N$  ( $N = 0, \dots, 8$ ) в табл. 4.15.

Анализируя табл. 5.2, отметим, что максимальное повышение уровня моря имеет место в п.  $B_7$  (1,01 м). После полного ослабления действия ветра происходит монотонное понижение уровня до наименьшего значения ( $\zeta_1 = -0,14$  м;  $t_1 = 5,7$  ч). При этом размах колебания составляет 1,15 м. Через 7,6 ч отмечается повышение уровня ( $\zeta_2 = 0,25$  м;  $t_2 = 13,3$  ч). Размах второго колебания (0,39 м) в три раза меньше первого. Экстремальное понижение при следующем колебании  $\zeta_3 = -0,02$  м имеет место через 7 ч, его размах 0,27 м отличается от предыдущего на 0,12 м. Следующее экстремальное повышение уровня ( $\zeta_4 = 0,07$  м) возникает через 8,5 ч с размахом 0,09 м, который в 12,7 раза меньше первого, оно отмечается через 28,8 ч от момента времени  $t = t_0$ . Наибольшее понижение уровня моря среди всех рассматриваемых пунктов происходит в п.  $B_5$  (-1,25 м), через 5,3 ч с размахом 2,13 м достигается максимум первого свободного колебания ( $\zeta_1 = 0,88$  м). Через 11 ч имеет место

наибольшее понижение уровня ( $\zeta_2 = -0,1$  м;  $t = 16,3$  ч) с размахом колебания (0,98 м) в 2,2 раза меньше первого. Следующий экстремум свободных колебаний достигается через 5,2 ч ( $\zeta_3 = 0,3$  м), размах 0,4 м меньше предыдущего в 2,5 раза. Понижение уровня  $\zeta_4 = -0,02$  м происходит через 5,5 ч с размахом колебания 0,32 м, который в 6,7 раза меньше первого, оно наступает через 27 ч после момента времени  $t = t_0$ .

Особенности высот сейшеобразных колебаний в центральной части моря четко проявляются при сопоставлении с высотами сейш, возникающих в прибрежных районах. Из анализа данных табл. 5.1 и 5.2 следует, что амплитуда и размахи свободных колебаний в пунктах открытой части Азовского моря (табл. 5.2) меньше, чем на береговых станциях. При этом наибольшие значения отклонений уровня в прибрежной и центральной частях моря в стационарном режиме отличаются в два раза, а экстремумы сейшеобразных колебаний – в 1,2–2 раза. Наибольшие значения размахов первых колебаний для сгонов на ст. Ейск (2,38 м) в 1,2 раза меньше, чем в п.  $B_5$  (2,13 м), для нагонов на ст. Геническ (2,3 м) они в два раза больше, чем в п.  $B_7$  (1,15 м). Таким образом, экстремальные размахи сейшевых колебаний в открытой части моря сопоставимы с размахами свободных колебаний в прибрежных районах и составляют 50–89 % от последних.

Время достижения экстремумов собственных колебаний, приведенное в табл. 5.1 и 5.2, позволяет выполнить сравнение двух первых периодов в береговой и открытой частях моря. Период первого свободного колебания на ст. Ейск составляет 21 ч, а в остальных пунктах побережья – 15–16 ч. Период второго свободного колебания на ст. Мысовое составляет 22 ч, на ст. Ейск – 27 ч, а в остальных пунктах – 13–19 ч. При этом в центральной части Азовского моря первое сейшеобразное колебание совершается за 13–16,5 ч, второе – за 11–17 ч. Следовательно, за исключением станций, расположенных на сложных береговых линиях (рис. 5.3), первые периоды сейш центральной и береговой частей моря отличаются на 2–3 ч.

В табл. 5.3 приведены значения скорости поверхностных стационарных течений ( $|U|_{st}$ , см/с), вызванных действием постоянного восточного ветра со скоростью 20 м/с, а также скорости течений сейшеобразных колебаний ( $|U|_k$ ,  $k = 1, \dots, 6$ ) в центральной части

Азовского моря (рис. 3). Здесь же указаны соответствующие им моменты времени ( $t_k$ , ч).

В районе узловой линии сейшеобразных колебаний (рис. 5.1, б), где вертикальные колебания уровня близки к нулю, расположены пункты  $B_0$ ,  $B_3$ ,  $B_4$ ,  $B_7$  и  $B_8$ . Рассмотрим некоторые из них. Из анализа данных, представленных в табл. 3, следует, что в п.  $B_0$  первое экстремальное значение скорости ( $|U|_1 = 66,3$  см/с) превышает стационарную скорость ( $|U|_{st} = 20,8$  см/с) в 3,2 раза. Через 13,8 ч значение скорости  $|U|_4 = 3,7$  см/с существенно уменьшается – в 5,6 раза по сравнению с  $|U|_{st}$  и в 18 раз по сравнению с  $|U|_1$ . Дальнейшее убывание скорости до 1–2 см/с происходит через 29,2 ч. Аналогичное изменение скорости имеет место в п.  $B_3$ . Скорость течений в начале сейшеобразных колебаний (84,8 см/с) значительно превосходит скорость при стационарном движении (2,6 см/с), при этом время, за которое интенсивность течений уменьшается до 1 см/с, составляет 24,1 ч.

В пунктах  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_5$ ,  $B_6$ , расположенных на удалении 50 и 100 км в зональном направлении от амфидромической точки ( $B_0$ ), начало свободных движений жидкости не приводит к столь резкому изменению стационарной скорости. Изменение скорости сейшеобразных колебаний рассмотрим на примере п.  $B_1$ , расположенного на 50 км восточнее п.  $B_0$ . Здесь скорость установившегося течения  $|U|_{st} = 40,1$  см/с мало отличается от первого экстремального значения скорости сейшеобразных колебаний  $|U|_1 = 52,9$  см/с ( $t_1 = 4,4$  ч), превышение составляет 1,3 раза. Уменьшение скорости до 2 см/с происходит здесь на 9–12 ч дольше (через 34,3 ч), чем в районе узловой линии.

Из анализа величин модуля скорости течений следует, что в открытом море преобладают высокие скорости течений, до 84,8 см/с (п.  $B_3$ ). При этом направление поверхностных течений имеет вихревой характер с доминирующим меридиональным движением потоков.

Численные эксперименты с использованием гидродинамической модели показали, что затухание свободных колебаний в пунктах центральной части моря происходит быстрее, чем в береговых районах (максимум амплитуды не превышает 2 см). Время затухания свободных колебаний жидкости в прибрежном районе составляет 92,1 ч, что на 23,7 ч больше, чем в центральной части моря (68,4 ч).

Периоды первого колебания в центральной и береговой частях Азовского моря также различны. Наибольшие по периоду сейшевые колебания в прибрежном районе (ст. Ейск и Таганрог) составляют 20,6 и 17,0 ч, что на 4,1 и 0,8 ч больше, чем в центральной части моря (п.  $B_1$  и  $B_5$ ) – 16,5 и 16,2 ч.

Т а б л и ц а 5.3

**Максимальные скорости поверхностных стационарных течений ( $|U|_{st}$ ), вызванных действием постоянного восточного ветра со скоростью 20 м/с, и максимальные скорости течений ( $|U|_k$ ,  $k = 1, \dots, 6$ ), возникающих после прекращения действия ветра в центральной части Азовского моря**

| Пункт | $ U _{st}$ | $ U _1$ | $t_1$ | $ U _2$ | $t_2$ | $ U _3$ | $t_3$ | $ U _4$ | $t_4$ | $ U _5$ | $t_5$ | $ U _6$ | $t_6$ |
|-------|------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| $B_0$ | 20,8       | 66,3    | 0,6   | 57,9    | 2,2   | 64,2    | 4,1   | 3,7     | 13,8  | 16,0    | 20,1  | 0,2     | 29,2  |
| $B_1$ | 40,1       | 52,9    | 4,4   | 16,7    | 9,7   | 5,9     | 13,4  | 10,9    | 16,1  | 9,0     | 18,0  | 1,9     | 34,3  |
| $B_2$ | 47,0       | 57,1    | 0,8   | 7,8     | 12,0  | 18,3    | 20,2  | 1,4     | 31,6  | 2,1     | 36,4  | 1,8     | 37,8  |
| $B_3$ | 2,6        | 84,8    | 0,8   | 0,7     | 8,0   | 21,0    | 10,2  | 0,5     | 14,2  | 15,5    | 17,1  | 0,1     | 24,1  |
| $B_4$ | 19,0       | 72,4    | 0,7   | 6,5     | 8,3   | 18,1    | 11,0  | 1,4     | 14,5  | 11,5    | 17,5  | 3,2     | 23,3  |
| $B_5$ | 13,2       | 22,5    | 8,8   | 6,9     | 14,0  | 18,4    | 7,4   | 3,4     | 21,7  | 10,7    | 24,1  | 1,2     | 35,1  |
| $B_6$ | 70,4       | 69,2    | 0,8   | 4,0     | 10,7  | 21,4    | 14,7  | 2,3     | 26,8  | 0,36    | 31,0  | 1,1     | 32,6  |
| $B_7$ | 22,8       | 46,2    | 0,9   | 41,1    | 2,1   | 43,7    | 3,9   | 5,1     | 8,6   | 19,5    | 11,3  | 3,1     | 14,4  |
| $B_8$ | 24,5       | 79,2    | 0,9   | 5,7     | 6,1   | 11,9    | 17,6  | 1,4     | 21,3  | 11,0    | 26,3  | 0,3     | 33,4  |

На основании результатов моделирования свободных колебаний жидкости в Азовском море, возникающих после прекращения действия ветра, выполнен анализ физических закономерностей пространственного распределения отклонений уровня и скорости течений. Максимальные величины размахов сейшеобразных колебаний в прибрежной зоне сопоставимы с величинами штормовых сгонов и нагонов, при этом высоты свободных колебаний в открытой части моря составляют 50–89 % от высот колебаний в прибрежной зоне.

В центральной части моря максимальная скорость течений (84,8 м/с) при сейшеобразных колебаниях на 21% превышает скорость

стационарных течений, вызванных штормовым ветром (70,4 м/с). Таким образом, сейши вносят существенный вклад в изменчивость скорости течений. Свободные колебания уровня (не более 2 см) затухают быстрее (60 ч), чем амплитуды скоростей течений, которые не превышают 2 см/с и прослеживаются в интервале времени 60–200 ч.

## **§ 5.2. Анализ влияния параметров барических образований на свободные и вынужденные колебания уровня и течения в Азовском море**

Колебания уровня и течений в морях и океанах формируются под действием различных внешних и внутренних сил, многообразие которых приводит к образованию разномасштабных океанологических процессов с периодами от нескольких секунд до нескольких десятков лет. Важную роль в формировании экстремальных уровней и гидрологических процессов в прибрежной области Азовского моря имеют сгонно-нагонные, сейшевые и сейшеобразные колебания, представляющие собой волновые движения с периодами от нескольких часов до нескольких суток [81, 104]. При этом структура доминирующих продольных собственных колебаний такова, что их вершины приходятся на районы, расположенные вблизи крупных населенных пунктов [14, 89, 98]. Поэтому представляет интерес изучение влияния сейшеобразных колебаний на формирование экстремальных амплитуд колебаний уровня и течений Азовского моря.

Частой причиной сейшеобразных колебаний в природных бассейнах являются изменения атмосферного давления. Резкое изменение давления в различных частях водоема приводит в колебательное движение всю массу воды в нем. Сейши со значительной амплитудой возникают при явлении резонанса, когда период собственных колебаний бассейна совпадает с периодом вынуждающей силы. При этом относительно малые перепады давления на концах водоема и соответствующие им малые разности уровней вызывают значительные сейши. Барический фронт, двигаясь над водной поверхностью со скоростью, близкой к скорости свободной длинной волны, формирует экстремальные нагоны и сгоны, переходящие после прекращения действия атмосферных возмущений в сейши с большой амплитудой.

Поведение волн в области атмосферных фронтов начали изучать сравнительно недавно, и практического опыта прогнозирования волнения в этих условиях пока еще недостаточно [10, 106, 113, 140]. В настоящее время исследование динамики вод природных морских бассейнов под действием мезомасштабных атмосферных процессов относят к числу наиболее интересных [35–38]. Изучение сейшеобразных колебаний в Азовском море и анализ данных натурных наблюдений проведены в работах [14, 139]. Сейшевые колебания уровня и течения, возникающие в этом море в результате нагонов величиной 1 м на открытой границе, исследованы в [89] в рамках линейной двумерной математической модели.

Исследования являются продолжением работ [57, 46–61, 63], посвященных изучению свободных и вынужденных колебаний уровня Азовского моря в рамках трехмерной нелинейной сигма-координатной модели. В данной работе на основании анализа результатов численного моделирования исследовано развитие течений, сгонно-нагонных и сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря в поле возмущений атмосферного давления. Проверена гипотеза о роли резонансного механизма в возникновении экстремально высоких амплитуд сгонно-нагонных колебаний и сейш, генерируемых перемещающимся над морем барическим полем со скоростью, равной скорости свободной длиной волны [78]. При этом период возмущающих давлений равен периоду собственных колебаний жидкости в бассейне. Установлены пространственно-временные особенности сейшеобразных колебаний, возникающих после прохождения атмосферных образований. Сделаны выводы о зависимости характеристик штормовых нагонов и сейш от параметров атмосферных воздействий.

Входные метеорологические данные. Согласно наблюдениям на территориях морских акваторий, пересекающих либо соприкасающихся с континентами, в переходные сезоны возникают достаточно быстрые изменения метеорологических величин по горизонтали. Они представляют собой фронтальные зоны, которые перемещаются со скоростью 30–35 км/ч (8–10 м/с) и проходят за сутки 600–800 км. Ширина фронтальной поверхности, покрывающей часть акватории Азовского моря, составляет несколько десятков километров. Режим ветра и волнения перед фронтом и за фронтом существенно различаются. В зонах фронтов, особенно холодных,

имеют место значительные градиенты температуры воздуха, влажности и других метеорологических факторов, которые способствуют резкому усилению ветра до шквального [17, 18].

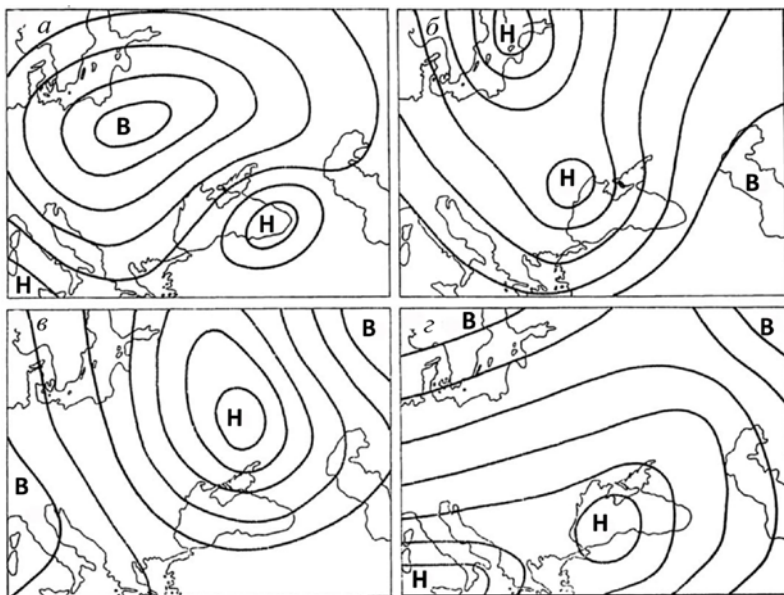
В ходе вычислительных экспериментов воспроизведены сценарии прохождения сезонных атмосферных фронтов над Азовским морем (рис. 5.4).

Движение границы раздела областей давлений совершается по одной из заданных траекторий: меридиональной (рис. 5.4, *а*), зональной (рис. 5.4, *б, з*), диагональной (рис. 5.4, *в*). Барический градиент, ширина фронтальной зоны, а также их значения в областях повышенного и пониженного давлений принимаются на основе анализа обобщенных справочных гидрометеорологических данных [17, 18]. Скорость и время движения барического поля выбраны с учетом предположения о генерации волн с максимальными амплитудами. Это возможно, когда период вынуждающей силы приближается к периоду собственных колебаний бассейна. При этом барический фронт, перемещающийся над водной поверхностью со скоростью, близкой к  $\sqrt{gH}$ , формирует высокие нагоны у берегов, вызывающие затем сейши с большой амплитудой [78].

Время перемещения фронта ( $t_f$ ) над акваторией моря задается равным первому наибольшему подъему уровня Азовского моря, происходящему в течение половины периода старшей моды свободных колебаний. Его значение определяется исходя из данных наблюдений и результатов аналитических расчетов. Так, в [14, 17, 18] отмечены сейши с периодами 6–7 и 23 ч ( $T_{\text{набл}}$ ). Теоретические значения периодов ( $T_{\text{Мериан}}$ ) получены по формуле Мериана с учетом поправки Релея [14]:

$$T_{\text{Мериан}} = \frac{2L}{\sqrt{gh}}(1 + \varepsilon), \quad \varepsilon = \frac{b}{\pi l} \left( \frac{3}{2} - \ln \frac{\pi b}{l} - C_\varepsilon \right). \quad (5.1)$$

Здесь  $C_\varepsilon = 0,5772$  – постоянная Эйлера;  $L = 360$  км – длина моря (по линии Геническ – Перебойный);  $h = 10$  м – средняя глубина моря;  $b = 30,6$  км – ширина пролива у входа в Таганрогский залив;  $l = 137$  км – длина Таганрогского залива. Период первой моды, вычисленный по формуле (5.1), равен 24,1 ч.



**Рис. 5.4.** Типы барических синоптических процессов для района Азовского моря: антициклон над центральными районами европейской части России (а), антициклон над Малой Азией и Казахстаном (б), антициклон над отрогом над Балканским полуостровом (в), средиземноморские циклоны (г)

Таким образом, сравнивая значения  $T_{\text{набл}}$  и  $T_{\text{Мериан}}$ , считаем, что доминирующие продольные собственные колебания первой моды уровня Азовского моря имеют период, близкий к  $T = 24$  ч. Структура этой моды такова, что одна ее вершина находится в Таганрогском заливе, а противоположная – вблизи Геническа. Поэтому представляет интерес изучение влияния неоднородных барических полей на формирование сгонно-нагонных явлений и сейшеобразных колебаний в этих районах.

Исследование гипотезы о возникновении экстремальных сейш при изменении атмосферного давления в различных частях моря выполнено на основе анализа результатов двух серий численных экспериментов. Условия проведения экспериментов различаются резонансными механизмами формирования экстремальных амплитуд сгонно-нагонных колебаний и сейш Азовского моря. В первой части экспериментов характеристикой барического фронта является

период действия неоднородного поля атмосферного давления, кратный периоду собственных колебаний бассейна. Во второй серии экспериментов – скорость, близкая к скорости свободной длинной волны.

В каждом эксперименте развитие фронта происходит в поле фоновых стационарных течений, а начало его движения соответствует времени установления движения жидкости ( $t_{st} = 48$  ч) [63]. Установившиеся движения в Азовском море генерируются действием однородного по времени и пространству юго-западного ветра со скоростью 10 м/с. На этом этапе ( $0 \leq t \leq t_{st}$ ) атмосферное давление постоянно по всей акватории моря, его значение равно стандартному атмосферному давлению 760 мм.рт.ст. при температуре 0 °С на широте 45° ( $P_{atm}$ ).

Следующий этап соответствует прохождению по акватории Азовского моря неоднородного поля атмосферного давления. От начала его движения ( $t_{st} = 48$  ч) акватория моря разделяется на части: область ( $D$ ), над которой давление постоянно и равно нормальному атмосферному давлению  $P_{atm}$ , и область ( $\bar{D}$ ), над которой перемещается неоднородное барическое поле. Размеры областей  $D$  и  $\bar{D}$  изменяются с течением времени и ограничены размерами расчетной сетки бассейна Азовского моря ( $0 \leq x \leq x_{max} = 350$  км,  $0 \leq y \leq y_{max} = 250$  км).

В уравнениях движения (1.1) – (1.3) изменяется величина давления  $P(x, y, t)$  за счет неоднородного барического поля. Функция  $P_a(x, y, t)$ , моделирующая давление в атмосферном фронте, задается двумя различными аналитическими выражениями для областей  $D$  и  $\bar{D}$ :

$$P_a(x, y, t) = \begin{cases} P_H = \text{const}, & (x, y) \in D, \\ P_H + a(t - t_{st}), & (x, y) \in \bar{D}, \end{cases} \quad (5.2)$$

Коэффициент  $a$  подобран так, что  $P_a(x, y, t)$  имеет единственный скачок с амплитудой, равной градиенту приземного давления вдоль линии фронта ( $a(t_f - t_{st}) = \Delta P_f$ ). При этом  $\Delta P_f$  рассчитывается по известному в данном эксперименте значению скорости ветра на основании формулы  $|U_w| = 0,7 \sqrt{(4,8/\sin \varphi)^2 (\Delta P_f^2 + \alpha^2 \Delta \theta_f^2) + 64}$ ,

предложенной в [100]. Здесь  $\Delta\theta_f$  – перепад температуры воздуха в зоне фронта на расстоянии 50 км;  $\alpha$  – переходной коэффициент;  $\varphi$  – географическая широта.

Области постоянного и переменного атмосферного давления ( $D$  и  $\bar{D}$ ) разнесены по обе стороны от линии фронта  $\gamma$ , положение которой зависит от текущих координат ( $x, y$ ) и времени ( $t$ ). Задание пространственной кривой  $\gamma$  выполнено с использованием параметрических выражений  $\gamma$ :  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$ . Вид параметрических уравнений определяет конфигурацию линий фронта: прямые – с определенным углом наклона, кривые – с заданным радиусом кривизны. Скорость и время передвижения возмущающих барических полей по акватории Азовского моря определяется по скорости  $U_\gamma$  и времени движения границы фронта  $t_f$ . Для указанных серий численных экспериментов эти величины находятся по-разному.

Для первой серии численных экспериментов период действия атмосферных возмущений ( $t_f$ ) выбираем кратным периоду старшей моды свободных колебаний Азовского моря ( $T$ ). В этом случае скорость передвижения границы фронта получаем на основании формулы:  $|U_\gamma| = 2L/T$ . Для второй серии расчетов скорость движения границы области атмосферного давления – величина переменная. Она равна скорости свободной длинной волны, зависящей от глубины моря ( $|U_\gamma(H)| = \sqrt{gH}$ ). В этом случае время действия атмосферных возмущений при разной скорости их передвижения – различно и также определяется из известного соотношения  $t_f = L/|U_\gamma(H)|$ .

Анализ результатов моделирования. В рамках математической модели выполнен расчет экстремальных нагонов и сгонов, вызванных действием барических возмущений, и определены максимальные характеристики свободных колебаний в Азовском море, возникающих после прохождения атмосферных фронтов. Величины амплитуд уровня, скорости течений и периодов сейшеобразных колебаний подробно анализируются на береговых станциях моря и в районах центральной части бассейна.

Таганрогский залив, расположенный в северо-восточной части Азовского моря, представляет собой бассейн почти прямоугольной формы протяженностью 137 км и максимальной шириной 30 км. Одноузловая продольная сейша, доминирующая в Таганрогском заливе, влияет на формирование сгонно-нагонных колебаний уровня,

и это влияние может быть существенным в случае совпадения периодов собственных и вынужденных колебаний.

Целью численных экспериментов является исследование реакции свободных и вынужденных колебаний уровня Азовского моря на прохождение барического поля за время, равное периоду собственных колебаний бассейна. Воздух движется из областей с высоким давлением в область с низким давлением благодаря барическому градиенту.

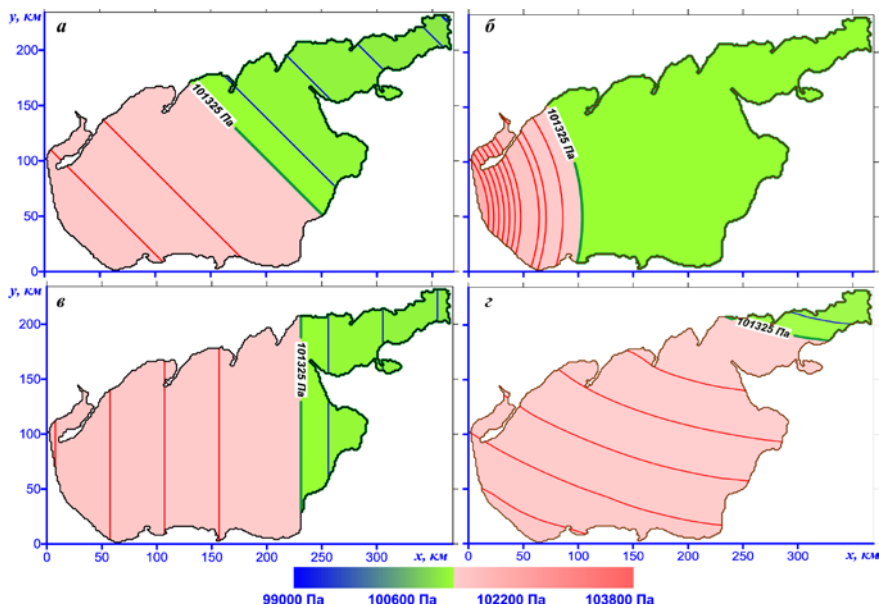
При этом, как только воздух приходит в движение, начинает действовать и сила Кориолиса, которая отклоняет его поток вправо. С увеличением скорости ветра увеличивается и отклонение его направления под влиянием силы Кориолиса. В результате чего геострофический ветер движется уже не от области высокого давления в область низкого давления, а вдоль изобары.

Траектории движения неоднородных барических полей над Азовским морем, принятые в численных экспериментах, представлены на рис. 5.5. Изолинии барических уровней соответствуют моменту времени  $t = 9$  ч, отсчитываемому от начала движения полей пониженного давления.

На рис. 5.5, *а*, *б* показаны примеры распространения этих областей со скоростью  $|\mathbf{U}_\gamma| = 8$  м/с в направлении действующего зонального ветра по линии Геническ – Перебойный. Они различаются геометрией линий раздела ( $\gamma$ ): на рис. 5.5, *а* – это прямая линия с углом наклона  $45^\circ$  к оси  $x$ ; на рис. 5.5, *б* – кривая с заданным радиусом кривизны 250 км. Движение границы раздела областей давлений по диагональной траектории (с углом наклона  $0^\circ$  к оси  $x$ ) показано на рис. 5.5, *в*, *д*.

Результаты расчетов экстремальных отклонений уровня моря, полученные при постоянном давлении, а также при прохождении неоднородного барического фронта и действии одного и того же стационарного западного ветра скоростью 10 м/с, приведены в табл. 5.4. Здесь даны максимальные и минимальные значения отклонений уровня на береговых станциях Азовского моря в момент прекращения действия ветра ( $\zeta_{st}$ ,  $\zeta_{extr}$ ), и первые последовательные экстремумы амплитуд сейшеобразных колебаний ( $\zeta_{1,2}$ ) с соответствующими им моментами времени ( $t_{1,2}$ ). В левой части таблицы представлены результаты моделирования при неизменном давлении

( $P_{\text{atm}}$ ), в правой части – при прохождении через всю акваторию области переменного давления  $P_a(x,y,t)$  со скоростью 8 м/с.



**Рис. 5.5.** Движение области переменного атмосферного давления со скоростью 8 м/с в направлении Геническ – Перебойный при различной геометрии ее границ: (а) и (с) – прямые под наклоном  $0^\circ$  и  $45^\circ$  к оси  $x$ ; (б) и (д) – кривые с заданным радиусом кривизны

Из анализа данных, приведенных в левой части табл. 5.4, следует, что действующий ветер вызывает максимальные стационарные нагоны на ст. Геническ (202 см), сгоны – на ст. Ейск (244 см), Приморско-Ахтарск (175 см) и Таганрог (158 см). В сравнении с экстремумами амплитуды отклонений уровня, вызванных прохождением барического поля, видно, что наибольшие различия на указанных станциях составляют 14 %.

Используя данные, приведенные в табл. 5.4, выполним анализ сейшеобразных колебаний на станциях, где имеют место наибольшие сгонно-нагонные явления.

**Стационарные сгоны и нагоны ( $\zeta_{st}$ , см), экстремумы амплитуд вынужденных ( $\zeta_{extr}$ , см) и двух первых сейшеобразных колебаний ( $\zeta_{1, 2}$ , см) с соответствующими моментами времени ( $t_{1, 2}$ , ч), при постоянном атмосферном давлении и после прохождения барического фронта со скоростью 8 м/с под действием ветра скоростью 10 м/с**

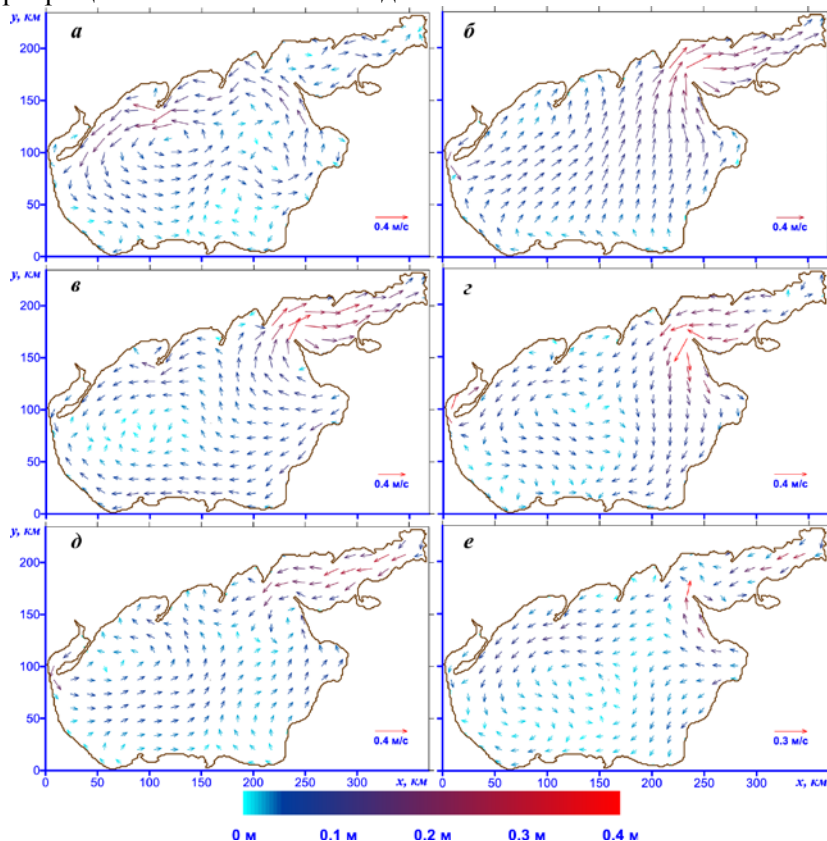
| Станция    | $P_a = P_n$  |           |       |           |       | $P_a = P_a(x, y, t)$ |           |       |           |       |
|------------|--------------|-----------|-------|-----------|-------|----------------------|-----------|-------|-----------|-------|
|            | $\zeta_{st}$ | $\zeta_1$ | $t_1$ | $\zeta_2$ | $T_2$ | $\zeta_{extr}$       | $\zeta_1$ | $t_1$ | $\zeta_2$ | $T_2$ |
| Геническ   | 202          | -27       | 9,5   | 33        | 16,5  | 215                  | -28       | 10,0  | 39        | 16,8  |
| Бердянск   | 25           | -57       | 2,5   | 46        | 7,7   | 25                   | -60       | 2,8   | 48        | 7,7   |
| Мариуполь  | -153         | -1        | 12,3  | -20       | 20,2  | -182                 | -1        | 12,5  | -21       | 20,6  |
| Таганрог   | -158         | -89       | 24,3  | 30        | 31,5  | -164                 | -97       | 24,4  | 35        | 31,5  |
| Ейск       | -244         | -6        | 18,3  | 21        | 28,5  | -262                 | -7        | 18,7  | 25        | 28,9  |
| П.-Ахтарск | -175         | 92        | 5,3   | -10       | 13,9  | -188                 | 95        | 5,5   | -10       | 13,9  |
| Темрюк     | -18          | 103       | 2,7   | -14       | 13,5  | -18                  | 107       | 3,1   | -14       | 13,6  |
| Опасное    | 32           | 93        | 1,7   | -8        | 13,0  | 37                   | 93        | 2,2   | -9        | 13,1  |
| Мысовое    | 98           | -20       | 8,7   | 26        | 15,4  | 106                  | -22       | 8,7   | 30        | 15,6  |

На ст. Ейск, где возникает наибольший сгон ( $-2,44$  м;  $t = t_0$ ), прекращение действия ветра вызывает повышение уровня ( $\zeta_1 = -0,06$  м;  $t = 18,3$  ч). При этом размах первого колебания составляет 2,38 м. В дальнейшем уровень продолжает повышаться и через 10,2 ч достигает наибольшего значения 0,21 м, размах второго колебания (0,27 м) в 8,8 раза меньше первого.

Прохождение барического фронта приводит к изменениям значений размахов и периодов свободных колебаний, которые на этой станции (Ейск) существенно отличаются. Так, в момент прекращения действия возмущений понижение уровня на 2,62 м формирует последующие свободные колебания с размахами 2,55 и 0,32 м.

Отметим, что величина стационарного сгона на этой станции на 7 % меньше нестационарного, отличия размахов сейшеобразных колебаний не превышают 16 %, а их периодов на 0,5 ч. Так как в обоих случаях основой генерации волн и течений являлся один и тот же ветер, то эта разница, очевидно, обусловлена прохождением барического фронта с перепадом давления 100 гПа.

На рис. 5.6 приведены поля течений в поверхностном слое Азовского моря через равные промежутки времени (3 ч) от момента прекращения атмосферных воздействий.



**Рис. 5.6.** Поля течений Азовского моря при установившемся движении, вызванном восточным ветром скоростью 10 м/с (а), в момент прекращения атмосферных воздействий (б) и через 3 ч (в), 6 ч (г), 9 ч (д), 12 ч (е)

Из рис. 5.6 видно, что положение максимумов скоростей течений смещено в сторону Таганрогского залива. Положения нулевых значений скорости течений сильно разбросаны по акватории. При этом одному и тому же направлению перемещения границы барических возмущений над акваторией соответствуют противоположные по направлению течения.

Следующий цикл экспериментов проведен с целью анализа влияния резонансных характеристик, связанных со скоростью свободной длинной волны. Движение полей атмосферного давления над акваторией рассчитывается на основе известного дисперсионного соотношения и является функцией, зависящей от глубины природного бассейна:  $(|U_{\gamma}(H)| = \sqrt{gH})$ .

В табл. 5.5 представлена зависимость максимальной амплитуды колебаний уровня Азовского моря от скорости перемещения границы барического возмущения в меридиональном направлении в поле постоянного западного ветра скоростью 10 м/с. Скорость свободной длинной волны изменяется в зависимости от выбираемых значений глубины моря (7–14 м).

Сравнение данных результатов, представленных в табл. 5.5, с результатами расчетов, проведенных при постоянном значении атмосферного давления [63], подтверждают гипотезу о влиянии движущихся барических образований на колебания уровня и скорости течений Азовского моря. Увеличения значений амплитуды колебаний уровня и максимальной скорости течений ( $\zeta_{\max} = 0,56$  м;  $\zeta_{\min} = 0,4$  м;  $|U|_{\max} = 26,2$  см/с), по сравнению со случаем неизменной величины давления (1013,0 гПа), достигают 20; 23 и 14 %.

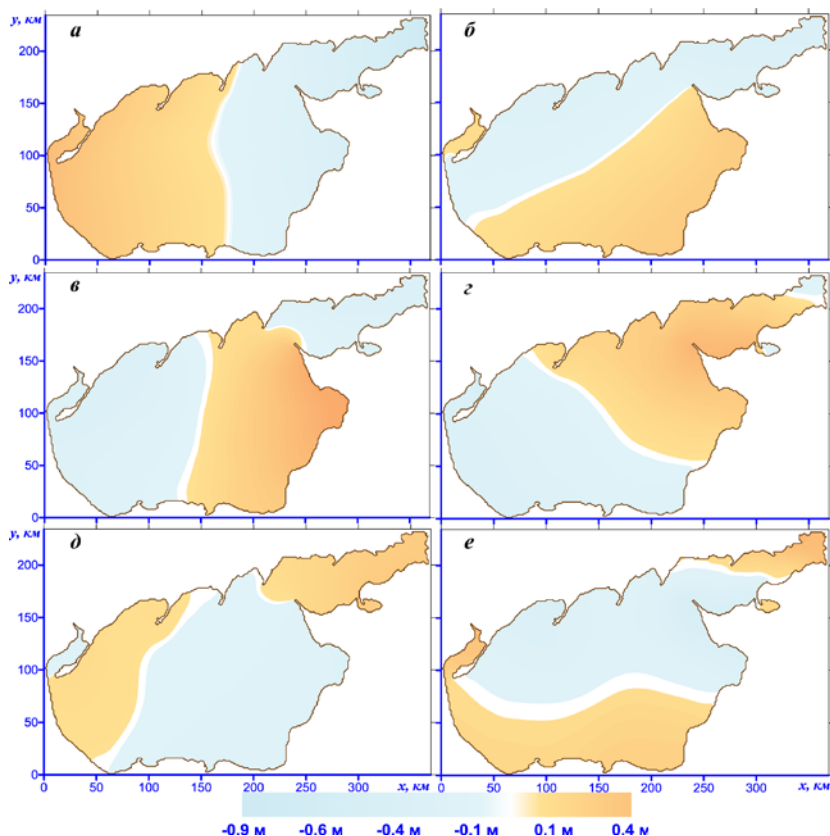
Из анализа данных, представленных в табл. 5.5, следует, что скорость передвижения барических возмущений влияет на максимальную скорость течений и отклонения уровня моря. Наибольшие значения этих величин достигаются при скорости фронта  $U_{\Gamma} = 9,4$  м/с, соответствующей глубине моря  $H = 9$  м. Время прохождения этого барического образования от крайней западной до крайней восточной границы Азовского моря составляет 10 ч 40 мин. Отметим, что фронт, перемещающийся дольше, например со скоростью 8,3 м/с (12,8 ч), оказывает меньшее воздействие на параметры волновых движений.

**Зависимость экстремальных характеристик волнения  
от скорости перемещения барических атмосферных полей  
( $W_{\Gamma}(H)$ , м/с) над Азовским морем**

| $ U_{\Gamma}(H) $ , м/с | $\zeta_{\max}$ , м | $\zeta_{\min}$ , м | $ U _{\max}$ , м/с |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 8,3                     | 0,56               | 0,40               | 0,26               |
| 8,9                     | 0,66               | 0,46               | 0,27               |
| 9,4                     | 0,74               | 0,52               | 0,3                |
| 9,9                     | 0,70               | 0,50               | 0,28               |
| 10,4                    | 0,68               | 0,48               | 0,24               |
| 10,9                    | 0,64               | 0,41               | 0,23               |
| 11,3                    | 0,58               | 0,40               | 0,22               |
| 11,7                    | 0,58               | 0,40               | 0,21               |

По результатам эксперимента исследуем изменение уровня свободной поверхности в момент установления движения жидкости, прохождения атмосферного возмущения всей акватории моря и через равные промежутки времени (3 ч) от момента прекращения всех внешних воздействий.

На рис. 5.7 представлены результаты численного эксперимента – прохождения барического возмущения над Азовским морем с запада на восток в поле постоянного ветра, дующего со скоростью 10 м/с в том же направлении. При этом перемещение границы раздела воздушных масс с перепадом атмосферного давления происходит со скоростью свободной длинной волны 8,29 м/с, отвечающей среднему значению глубины моря 7 м. Время прохождения атмосферного возмущения выбрано равным половине периода свободных колебаний ( $t_f = T/2 = 12$  ч). В момент прекращения действия ветра (рис. 5.7, а) динамика вод определяется узловой линией, проходящей через центр бассейна, а максимум амплитуды достигается в западной и восточной частях бассейна.



**Рис. 5.7.** Изменения уровня (м): при установившемся движении, вызванном восточным ветром скоростью 10 м/с (*a*), в момент прекращения атмосферных воздействий (*б*) и через 3 ч (*в*), 6 ч (*г*), 9 ч (*д*), 12 ч (*е*)

При дальнейшем развитии процесса свободных колебаний возрастает генерация вихревых возмущений, узловая линия ассиметрично вращается против часовой стрелки, занимая продольное (рис. 5.7, *б*) и диагональное (рис. 5.7, *в*) положения. Свободные колебания через 11 ч после прекращения ветра (рис. 5.7, *г*) представляют собой трехузловую сейшу с центральной узловой линией, повторяющей ее конфигурацию в начальный период времени  $t = t_0 + 15$  ч (рис. 5.7, *а*). Две более коротких узловых линии симметричны, они являются полуокружностями, диаметры которых

располагаются перпендикулярно направлению атмосферного фронта.

Наименьшая интенсивность свободных колебаний уровня отмечается в центральной области бассейна. Через 12 ч (рис. 5.7, *д*) система трехузловых сейш перемещается в восточном направлении, при этом наибольшие отклонения уровня имеют место в противоположных углах бассейна. Дальнейшее развитие процесса свободных колебаний ( $t = t_0 + 15$  ч; рис. 5.7, *е*) приводит к тому, что участки малых узловых линий компенсируются, объединяясь в одну, проходящую по диагонали бассейна, разделяющую его на области возвышения и понижения уровня. На основе анализа результатов численного моделирования установлено, что возмущения, движущиеся со скоростью, близкой к скорости свободной длинной волны, вызывают генерацию волн с амплитудами большими, чем при том же ветре и постоянном атмосферном давлении. Их наибольшие значения достигаются при скорости перемещения границы барических возмущений 9,4 м/с, соответствующей глубине моря 9 м.

Перемещающиеся барические поля за время, равное полупериоду собственных колебаний бассейна, вызывают вынужденные, а затем свободные колебания с амплитудами, отличающимися не более чем на 14 % от полученных при постоянном значении атмосферного давления и одном и том же ветре. Возмущению атмосферного давления принадлежит важная, но не решающая роль при формировании структуры течений и колебаний уровня Азовского моря. В работе показано, что одному и тому же направлению перемещения границы барических возмущений над акваторией моря могут соответствовать противоположные по направлению течения, зависящие только от направления действующего ветра. Важная роль в формировании течений и уровня принадлежит процессам, вызываемым длительно действующим постоянным ветром.

## Заключение

Изучение динамических процессов в Азовском море представляет собой комплексное исследование в области прикладной океанологии, экологии, гидродинамики. Целый ряд аспектов трудно разграничить в условиях близости и взаимного проникновения различных направлений. Тем не менее в целях систематизации результатов такое разграничение необходимо проводить, излагая отдельно вопросы, относящиеся к динамике стационарных движений, эволюции циклонов, атмосферных фронтов.

Подводя итоги, отметим, что в монографии обобщены и представлены в систематизированном виде результаты исследований динамических процессов и распространения загрязнений в Азовском море. Установлены вызванные характерными ветровыми воздействиями физические закономерности генерации волн и течений, трансформации пассивной примеси. На основании анализа результатов численных экспериментов и физико-статистического анализа сезонных и многолетних данных наблюдений выполнена идентификация экстремальных синоптических возмущений уровня и скоростей течений бассейна Азовского моря. Получение результатов выполнено с использованием трехмерной нелинейной сигма-координатной модели, учитывающей вязкость и горизонтальную диффузию с высоким пространственным разрешением. Натурные наблюдения использованы для проверки результатов моделирования, выполненных с привлечением данных о полях приводного ветра и атмосферного давления по известным атмосферным моделям (*SKIRON*). Апробация полученных результатов позволяет сделать выводы о фактическом и ожидаемом экологическом состоянии Азовского моря, оценить современное экологическое состояние его шельфовой зоны, выяснить характер антропогенной нагрузки с учетом особенностей региональных климатических изменений.

В работе исследовано влияние поступления морской воды через Керченский пролив на экстремальные отклонения уровня и скорость течений в Азовском море, вызываемые действием полей климатического ветра. Особенности динамики вод изучены с учетом изменения интенсивности и чередования направлений действующего ветра. При этом получены убедительные оценки экстремальных характеристик сгонно-нагонных процессов в прибрежных районах

Азовского моря. В масштаб комплексного исследования входит вся акватория Азовского моря, включая Керченский пролив.

Из анализа результатов моделирования волн и течений, вызываемых действием однородного по пространству и переменного по времени западного ветра, получены следующие выводы об экстремальных отклонениях уровня моря. Наиболее сильному влиянию нагонных процессов подвержен Таганрогский залив в северо-восточной части Азовского моря. Показано, что действие ветра в три раза бóльшей скорости (5 и 15 м/с) приводит к увеличению максимальных нагонов в заливе на 1,2 м (0,17 и 1,4 м соответственно). Минимальные нагоны (до 2 см) отмечены на ст. Мысовое, расположенной в юго-западной части моря. Характерной особенностью временного хода уровня на береговых станциях при постоянном действии ветра является достижение его экстремальных значений через 15 ч после начала действия. Наибольший сгон возникает на ст. Геническ, расположенной в северо-западной части Азовского моря. При этом действие ветра со скоростью, большей в три раза, вызывает увеличение сгона на 0,94 м.

Анализ результатов численных экспериментов, полученных при исследовании стационарных движений в Азовском море, позволил получить вывод о том, что одной из особенностей установившихся движений в Азовском море является существование компенсационных противотечений в нижних слоях. Так, в поверхностном слое 0–1 м течение направлено в сторону действующего ветра, а в слое 5–10 м – против ветра. Время формирования противотечений, возникающих под действием постоянного ветра с различной (от 5 до 15 м/с) скоростью составляет от 10 до 12 ч. Установлено, что под действием постоянного ветра в четыре раза большей скоростью (5 и 20 м/с) нагоны и сгоны увеличиваются на 2 м, а значения максимальной скорости установившихся течений возрастают в 12 раз (0,16 и 1,17 м/с).

Решение задачи о сгонно-нагонных явлениях при наличии стационарных течений, полученное без учета нелинейных членов в выражении ускорения, отличается от случая с учетом конвективного ускорения при скоростях ветра более 5 м/с не менее, чем на 30 %. Использование в численных экспериментах шагов интегрирования  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta t$  и  $2\Delta x$ ,  $2\Delta y$ ,  $2\Delta t$  позволило установить, что максимальные отклонения решений не превышают при этом 12 %.

Методом математического моделирования изучено влияние различных синоптических ситуаций на трансформацию зон загрязнения в Азовском море. Представленные результаты расчетов распространения примеси дают возможность проанализировать характерные особенности изменения ее концентрации на любом выбранном горизонте. При этом увеличение максимальной скорости ветра (от 5 до 20 м/с) приводит к росту объема области загрязнения. Трансформация областей загрязнения обусловлена величиной и направлением ветровых течений, время проникновения примеси на глубину  $z = -H/2$  для рассмотренных скоростей ветра (от 5 до 20 м/с) не превышает 4 ч. При этом проникновение в придонный слой не превосходит 16 ч. Время полного рассеяния примеси увеличивается с глубиной. Оно возрастает с увеличением скорости действующего ветра. На тихой воде время полного рассеивания примеси ( $t_d$ ), когда её максимальная концентрация во всей жидкости не превышает 2,5 % от первоначальной, составляет 58 ч. В поле фоновых стационарных течений с максимальными значениями скорости 14, 34, 62 и 107 см/с величина  $t_d$  принимает значения 54, 55, 58 и 61 ч соответственно, а под действием нестационарного ветра, дующего со скоростью 5, 10, 15 и 20 м/с,  $t_d$  равна 60, 65, 63 и 71 ч соответственно. При наличии стационарного течения с максимальной скоростью 62 см/с перемещение циклона с радиусом основания 100 км в юго-западном, западном и северо-западном направлениях со скоростью 5 м/с приводит к увеличению  $t_d$  на 107, 113 и 107 ч по сравнению со случаем отсутствия циклона.

Анализ результатов численных расчетов циркуляции вод в Азовском море с использованием полей приводного ветра и атмосферного давления, полученных по данным атмосферной модели *SKIRON*, позволил прийти к подтвержденному численными экспериментами выводу, что изменение величин сгонов и нагонов при вариациях коэффициента поверхностного трения не превышает 13 %. Установлено, что при использовании аппроксимации параметра шероховатости водной поверхности, предложенной в [142], результаты моделирования наиболее точно согласуются с измерениями на ст. Геническ и Мариуполь. Полученные основные черты колебаний уровня удовлетворительно согласуются с результатами прямых измерений на указанных прибрежных станциях. Экстремальные отклонения уровня на ст. Геническ, полученные в результате

численного моделирования, отличаются от прямых измерений уровня моря на этой станции на 11 %, а на ст. Мариуполь на 9 %. При этом разница во времени наступления модельных и натурных экстремумов не превышает 20 мин.

На основе анализа результатов расчетов сделаны выводы о влиянии направления перемещения циклонов на максимальные значения скорости генерируемых ими течений. Установлено, что циклон, движущийся на запад, вызывает течения с большими значениями максимальной скорости, чем циклоны других направлений. Показано, что перемещение атмосферных возмущений приводит к существенному увеличению площади распространения загрязнения по сравнению с воздействием только стационарных течений. Исследовано влияние скорости стационарных течений на максимальные отклонения уровня, вызванные прохождением циклонических возмущений.

В поле стационарных течений распространяющийся в западном направлении циклон генерирует движение жидкости, скорость которой больше скорости течений, возникающих под действием циклона, перемещающегося на юго-запад или северо-запад. При этом движение циклона приводит к существенному росту скорости вертикального распространения загрязнения по сравнению с действием только стационарного течения. Увеличение скорости постоянного ветра от 5 до 15 м/с приводит к росту скорости течений (до 40 %) при прохождении одного и того же циклона.

При наличии стационарных течений переменный ветер того же направления, что и постоянный, вызывает изменение расположения областей максимальных сгонов и нагонов и увеличение скорости течений, имеющих место в стационарном режиме. В этом случае чем больше скорость стационарного движения жидкости, тем значительнее площадь распространения примеси и время ее рассеивания. Наибольшие размеры области загрязнения одного и того же начального объема имеют место в районе Восточно-Казантипского газового месторождения.

Помимо физических выводов, расширяющих круг наших знаний об изучаемых явлениях, большое значение для дальнейших исследований имеют методические результаты: в теоретическом плане – определение общего подхода к анализу динамических процессов с позиций теории волновых движений; в плане обработки данных – использование специальных и комплексных натурных измерений.

## Список литературы

1. *Альтман Э.Н.* Структура течений Керченского пролива // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеоиздат, 1975. – Вып. 125. – С. 11–20.
2. *Альтман Э.Н.* К вопросу об изменчивости расходов воды в Керченском проливе по натурным наблюдениям // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеоиздат, 1976. – Вып. 132. – С. 11–20.
3. *Аксенов А.А.* Морфология и динамика северного берега Азовского моря // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеоиздат, 1955. – Вып. 29 (41). – С. 107–142.
4. *Андросович А.И., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Численная модель и расчеты циркуляции вод северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1994. – № 5. – С. 28–41.
5. *Белов В.П.* Режим ветра и ветрового волнения на Азовском море // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеоиздат, 1978. – Вып. 134. – С. 48–56.
6. *Белов В.П., Филиппов Ю.Г.* Основные черты динамики вод Азовского моря и Керченского пролива // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеоиздат, 1978. – Вып. 139. – С. 11–20.
7. *Белов В.П., Филиппов Ю.Г.* Динамика и вертикальная структура течений Азовского моря // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеоиздат, 1980. – Вып. 159. – С. 127–134.
8. *Бронфман А.М.* Некоторые черты циркуляции на устьевом взморье Дона при сгонах // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеоиздат, 1964. – Вып. 78. – 130 с.
9. *Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Соломаха Т.А.* Численное моделирование динамики Азовского моря при сгонно-нагонных явлениях // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 6. – С. 69–75.
10. *Быков Ф.Л., Гордин В.А.* Объективный анализ трехмерной структуры атмосферных фронтов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 172–188.
11. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Л. : Гидрометеоиздат, 1968. – 300 с.
12. *Вольцингер Н.Е.* Длинные волны на мелкой воде. – Л. : Гидрометеоиздат, 1985. – 160 с.
13. *Геоэкология шельфа и берегов морей России* / Под ред. Н. А. Айбулатова – М. : Ноосфера, 2001. – 427 с.

14. *Герман В.Х.* Исследование и расчет вероятностных характеристик экстремальных уровней моря // Тр. ГОИН. – М.: Гидрометеоздат, 1971. – Вып. 107. – 148 с.
15. *Герман В.Х.* Спектральный анализ колебаний уровня Азовского, Черного и Каспийского морей в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток // Тр. ГОИН. – М.: Гидрометеоздат, 1970. – Вып. 103. – С. 52–73.
16. *Гидродинамика береговой зоны и эстуариев.* – Л.: Гидрометеоздат, 1970. – 392 с.
17. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР.* Том III, Азовское море. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 218 с.
18. *Гидрометеорологический справочник Азовского моря.* – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 856 с.
19. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР.* Т.V. Азовское море. – СПб.: Гидрометеоздат, 1991. – 234 с.
20. *Годунов С.К., Рябенкий В.С.* Разностные схемы. – М.: Наука, 1977. – 439 с.
21. *Григоркина Р.Г., Фукс В.Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 242 с.
22. *Гришин Г.А., Баянкина Т.М., Калинин Е.И. и др.* Об эволюции южных циклонов, выходящих на Черное море и территорию Украины, по данным спутниковых и наземных наблюдений // Исследование земли из космоса. – 1991. – № 3. – С. 89–94.
23. *Дацюк В.Н., Крукиер Л.А., Чикин А.Л., Чикина Л.Г.* Моделирование экстремального наводнения в дельте Дона на многопроцессорных вычислительных системах // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2014. – Т. 3, № 1. – С. 80–88.
24. *Дашкевич Л.В., Бердников С.В.* Математическое моделирование температурного режима и тепловой баланс Азовского моря // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2008. – № 4. – С. 5–18.
25. *Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке  $C$  // ОВМ. – 1999. – С. 163–231.
26. *Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К.* Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // Морской гидрофизический журнал – 2002. – № 3. – С. 12–27.

27. Демышев С.Г. Численные эксперименты по моделированию вертикальных движений в Черном море при постоянной плотности // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 1. – С. 58–66.
28. Динамические процессы береговой зоны моря / Под ред. Р. Д. Косьяна, И. С. Подымова и Н. В. Пыхова. – М. : Научный мир, 2003. – 320 с.
29. Доценко С.Ф. Трансформация уровня баротропного океана под эллиптической областью возмущения барического поля // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 2. – С. 3–13.
30. Доценко С.Ф. Генерация квазиинерционных внутренних волн при эволюции локальных возмущений океана // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 2. – С. 12–23.
31. Доценко С.Ф., Миклашевская Н.А. Трансформация уровня океана под движущейся областью возмущений атмосферного давления // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 2. – С. 3–15.
32. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь : МГИ НАНУ, 2010. – 174 с.
33. Дьяков Н.Н., Фомин В.В. Синоптические условия возникновения аномальных колебаний уровня Азовского моря // Наукові праці УкрНДГІ. – 2002. – Вип. № 250. – С. 332–341.
34. Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов // Океанология. – 2000. – Т. 40, № 5. – С. 658–665.
35. Ефимов В.В., Полников В.Г., Сычев Е.Н. Спектральная модель эволюции ветрового волнения и численные эксперименты на ее основе. (Препринт / НАНУ, МГИ). – Севастополь, 1986. – 50 с.
36. Ефимов В.В., Комаровская О.И., Шокуров М.В. Численная модель ветровых волн в Черном море. (Препринт / НАНУ, МГИ). – Севастополь, 1998. – 45 с.
37. Ефимов В.В., Анисимов А.Е. Численное моделирование влияния температурных контрастов суша – море на атмосферную циркуляцию в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 4. – С. 3–12.
38. Ефимов В.В., Барабанов В.С., Крутин А.В. Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 1. – С. 64–74.
39. Залесный В.Б., Гусев А.В., Мошонкин С.Н. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, № 6. – С. 699–716.

40. *Иванов В.А., Кубряков А.И., Михайлова Э.Н.* Моделирование распре-няющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на се-веро-западном шельфе Черного моря // Известия РАН. Физика атмо-сферы и океана. – 1996. – Т. 32, № 1. – С. 152–160.
41. *Иванов В.А.* Мониторинг экосистемы шельфовой зоны на примере Черного моря. – Севастополь, 2003. – 151 с.
42. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В.* Влияние циклонов на из-менение уровня поверхности Азовского и Черного морей // Метео-рология и гидрология. – 2003. – № 4. – С. 73–80.
43. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Математи-ческое моделирование сгонно-нагонных колебаний в Черном море // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 1. – С. 56–63.
44. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В.* Влияние циклонов на из-менение уровня поверхности Азовского и Черного морей // Метео-рология и гидрология. – 2003. – № 4. – С. 73–80.
45. *Иванов В.А., Шапиро Н.Б.* Моделирование течений в Керченском про-ливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь : МГИ НАНУ. – 2004. – Вып. 10. – С. 207–232.
46. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Математическое моделирование баротропных волн в озере Донузлав // Морской гид-рофизический журнал. – 2006. – № 1. – С. 37–51.
47. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Доповіді НАНУ. – 2006. – № 11. – С. 109–113.
48. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влия-ния течений, вызванных западным ветром на эволюцию областей загряз-нения в Азовском море // Доповіді НАНУ. – 2007. – № 3. – С. 112–117.
49. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование эволюции поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // Доповіді НАНУ. – 2007. – № 7. – С. 160–120.
50. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование характеристик сгонно-нагонных явлений Азовского моря // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 1. – С. 12–25.
51. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Моделирование сгонно-нагонных явлений и трансформация поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 4. – С. 52–68.

52. *Иванов В.А., Наумова В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Моделирование колебаний уровня Азовского моря, вызываемых ветром // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 6. – С. 53–65.
53. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния стационарных течений на динамические процессы и трансформацию примеси в Азовском море, вызываемые прохождением циклонов // Доповіді НАНУ. – 2008. – № 11. – С. 119–122.
54. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния циклонических возмущений на динамические процессы и эволюцию примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 2. – С. 12–25.
55. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Влияние Керченского пролива на сгонно-нагонные явления и течения в Азовском море, вызываемые циклоническими возмущениями // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 4. – С. 3–18.
56. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование сгонно-нагонных движений с учетом водообмена через Керченский пролив, вызываемых циклонами в Азовском море // Доповіді НАНУ. – 2009. – № 3. – С. 130–137.
57. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Динамические процессы и их влияние на распространение и трансформацию загрязняющих веществ в ограниченных морских бассейнах. – Севастополь : МГИ НАНУ, 2010. – 178 с.
58. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Атлас сгонно-нагонных процессов, волн и течений, вызываемых действием атмосферных возмущений в Азовском море. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – 96 с.
59. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение примеси в Азовском море // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 8. – С. 69–79.
60. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование зависимости эволюции примеси от начального распределения ее концентрации и параметров циклона // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 5. – С. 24–33.
61. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Динамические процессы и их влияние на трансформацию пассивной в Азовском море // Океанология. – 2014. – Т. 54, № 4. – С. 464–472.

62. *Иванов В.А., Матишов Г.Г., Кушнир В.М. и др.* Керченский пролив в осенний период 2011 года: результаты совместных комплексных исследований, выполненных в экспедиции МГИ НАН Украины и ЮНЦ РАН // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 1. – С. 44–57.
63. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения длительного действия ветра // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 2. – С. 15–25.
64. *Инжебейкин Ю.И.* Особенности формирования кратковременных наводнений и экстремальных течений в Азовском море // Тр. ГОИН. – 2011. – № 213. – С. 91–102.
65. *Инжебейкин Ю.И., Матишов Д.Г.* Морская программа ЮНЦ РАН и некоторые научные результаты экспедиционных исследований (субинерционные процессы на северо-восточном шельфе Черного моря) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2012. – Т. 2, № 26. – С. 380–392.
66. *Инжебейкин Ю.И.* Мелкомасштабная изменчивость термохалинной структуры верхнего перемешанного слоя северо-восточной части Черного моря // Вестник ЮНЦ РАН. – 2015. – Т. 11, № 2. – С. 45–52.
67. *Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане. – СПб. : Гидрометеиздат, 1987. – 512 с.
68. *Каракаш А.И.* Метод прогноза краткосрочных изменений уровня на внутренних морях СССР // Метрология и гидрология. – 1939. – № 3. – С. 78–79.
69. *Китайгородский С.А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 284 с.
70. *Кныш В.В., Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – № 2. – С. 36–52.
71. *Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Влияние Азовского моря и Керченского пролива на сгонно-нагонные колебания в Черном море // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 5. – С. 5–14.
72. *Коротенко К.А., Дитрих Д.Е., Боуман М. Дж.* Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // Океанология. – 2003. – Т. 43, № 4. – С. 504–515.
73. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. – М. : Гостехиздат, 1955. – Т. 1. – 560 с.

74. Краус Е. Взаимодействие атмосферы и океана. – Л. : Гидрометеиздат, 1956. – 295 с.
75. Крукиер Л.А. Математическое моделирование гидродинамики Азовского моря при реализации проектов реконструкции его экосистемы // Математическое моделирование. – 1991. – Т. 3, № 9. – С. 3–20.
76. Кушнир В.М., Поважный В.В., Бердников С.В. Минеральная и органическая компоненты взвеси по данным космических съемок и непосредственных измерений в Азовском море и Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 2. – С. 22–31.
77. Ламб Г. Гидродинамика. – М. : Гостехиздат, 1947. – 948 с.
78. Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня моря. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 237 с.
79. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. – М. : Мир, 1980. – Т. 1. – 480 с.
80. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. – М. : Мир, 1980. – Т. 2. – 363 с.
81. Лоция Азовского моря [Электронный ресурс]. – URL: <http://katamaran.ru/maps/azov/2.htm> (дата обращения 10.08.2017).
82. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 304 с.
83. Марчук Г.И., Саркисян С.А. Математическое моделирование циркуляции океана. – М. : Наука, 1988. – 302 с.
84. Матишов Г.Г. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. – М. : Наука, 2006. – 304 с.
85. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Степаньян О.В. и др. Экологическое картирование акватории Азовского моря и береговой зоны на основе комплексного экосистемного мониторинга и современных информационных технологий // Наука Кубани. – 2008. – № 3. – С. 57–63.
86. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В. и др. Внутривековые флуктуации климата Азовского моря (по термохалинным данным за 120 лет) // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 422, № 1. – С. 106–109.
87. Матишов Г.Г., Савицкий Р.М., Инжебейкин Ю.И. Условия и последствия аварий судов в Керченском проливе во время шторма 11 ноября 2007 г. // Вестник ЮНЦ РАН. – 2008. – Т. 4, № 3. – С. 54–63.
88. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Инжебейкин Ю.И. Влияние сейш на формирование экстремальных уровней и течений в Азовском море // Вестник ЮНЦ РАН. – 2008. – Т. 4, № 2. – С. 46–61.

89. Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И. Численные исследования сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря // *Океанология*. – 2009. – Т. 49, № 4. – С. 485–493.
90. Матишов Г.Г., Чикин А.Л. Исследование ветровых течений в Керченском проливе с помощью математического моделирования // *Вестник ЮНЦ РАН*. – 2012. – Т. 8, № 2. – С. 27–32.
91. Матишов Г.Г., Гаргона Ю.М., Чикин А.Л. Моделирование ледостава в Азовском море с учетом климатического тренда в начале XXI века // *Доклады Академии наук*. – 2012. – Т. 445, № 5. – С. 590.
92. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г. Современные природные и социальные риски в Азово-Черноморском регионе // *Вестник Российской академии наук*. – 2013. – Т. 83, № 12. – С. 1059.
93. Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И., Савицкий Р.М. Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. // *Водные ресурсы*. – 2013. – Т. 40, № 3. – 259 с.
94. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В. и др. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // *Доклады Академии наук*. – 2014. – Т. 455, № 3. – 342 с.
95. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Бердников С.В. и др. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // *Вестник ЮНЦ РАН*. – 2014. – Т. 10, № 1. – С. 17–24.
96. Матишов Г.Г., Чикин А.Л., Дашкевич Л.В. и др. Ледовый режим Азовского моря и климат в начале XXI века // *Доклады Академии наук*. – 2014. – Т. 457, № 5. – С. 603.
97. Матишов Г.Г. Керченский пролив и дельта Дона: безопасность коммуникаций и населения // *Вестник ЮНЦ*. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 6–15.
98. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Беспалова Л.А. и др. Современные опасные экзогенные процессы в береговой зоне Азовского моря. – Ростов-на-Дону : Издательство ЮФУ, 2015. – 324 с.
99. Матишов Г.Г., Бердников С.В. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. // *Известия РАН. Серия географическая*. – 2015. – № 1. – С. 111–118.
100. Мастерских М.А. Методическое пособие по составлению прогноза фронтальной боры. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 35 с.

101. Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Моделирование распространения и трансформации речных вод на северо-западном шельфе и в глубоководной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1996. – № 3. – С. 30–40.
102. Михайлова Э.Н., Иванов В.А., Кубряков А.И. и др. Особенности циркуляции вод в окрестности острова Змеиный при воздействии ветров различной направленности // Морской гидрофизический журнал. – 1998. – № 4. – С. 17–23.
103. Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б., Ющенко С.А. Моделирование распространения пассивной примеси в севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 3. – С. 29–42.
104. Монин А.С. Классификация нестационарных процессов в океане // Известия АН СССР. Физика земли. – 1972. – № 7. – С. 26–30.
105. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3, Многолетние данные. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 10, Кн.1. – 604 с.
106. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / ред. Е.С. Нестеров. – М. : Росгидромет, 2013. – 292 с.
107. Овсиенко С.Н. Расчет сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря // Тр. Гидрометцентра СССР. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – Вып. 60. – С. 55–58
108. Овсиенко С.Н. Расчет катастрофического нагона у юго-восточного побережья Азовского моря // Тр. Гидрометцентра СССР. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – Вып. 127. – С. 33–36.
109. Орадовский О.И., Сафронов Г.Ф., Зильберштейн О.И. Расчет переноса нефтепродуктов от источников сброса в Таганрогском заливе Азовского моря // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 5. – С. 77–90.
110. Рябинин А.И., Губанов В.И., Клименко В.И. и др. О состоянии загрязнения Азовского моря по экспедиционным материалам 1992 г. // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 12. – С. 72–83.
111. Рябинин А.И., Губанов В.И., Шибачева С.А. Нефтяные углеводороды и взвешенное вещество в водах Азовского моря // Морской гидрофизический журнал. – 1997. – № 3. – С. 58–65.
112. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
113. Сиротов К.М., Сидельникова Т.М. Опыт расчета скорости ветра и высоты волн в зоне холодного фронта // Тр. ГМИЦ СССР. – 1984. – Вып. 263. – С.72–75.

114. *Справочник по климату Черного моря* / Под ред. А. И. Сорокиной. – М. : Гидрометеиздат, 1974. – 406 с.
115. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. – М ; Онти ; Ленинград : Глав. ред. Общетеchn. Лит-ры и номографии, 1936. – 303 с.
116. *Современный и перспективный водный и солевой баланс южных морей СССР* // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеиздат, 1972. – Вып 108. – 236 с.
117. *Скриптунов Н.А.* Течения на устьевом взморье Дона (Таганрогский залив) // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеиздат, 1978. – Вып 139. – С. 43–57.
118. *Филиппов Ю.Г.* Об одном способе расчета морских течений // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеиздат, 1970. – Вып. 103. – С. 87–94.
119. *Филиппов Ю.Г.* Исследование некоторых разностных схем расчета распространения примеси в море // Тр. ГОИН. – М. : Гидрометеиздат, 1975. – Вып. 126. – С. 77–91.
120. *Филлипс О.М.* Динамика верхнего слоя океана. Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 319 с.
121. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Науч. тр. УкрНИГМИ. – Киев, 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
122. *Фомин В.В., Дьяков Н.Н.* Ветровое волнение и транспорт наносов в Азовском море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 8. – С. 175–181.
123. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 10. – С. 233–242.
124. *Фомин В.В., Иванов В.А.* Моделирование ветровых течений и транспорта наносов в прибрежной зоне Евпатории // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып. 13. – С. 211–226.
125. *Фомин В.В., Черкесов Л.В.* Моделирование дрейфовых течений в мелководном бассейне с учетом изменения касательных напряжений, вызванных ветровыми волнами // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42, № 3. – С. 393–402.

126. *Фомин В.В., Шульга Т.Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // *Доповіді НАНУ.* – 2006. – № 12. – С. 110–115.
127. *Фомин В.В., Шульга Т.Я.* Исследование сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря с использованием прогностических полей ветра // *Доповіді НАНУ.* – 2007. – № 12. – С. 121–126.
128. *Черкесов Л.В.* Основы динамики несжимаемой жидкости. – К. : Наукова думка, 1984. – 164 с.
129. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб. : Гидрометиздат, 1992. – 264 с.
130. *Чернякова А.П.* Типовые поля ветра Черного моря // *Сб. работ БГМО ЧАМ.* – Ленинград, 1965. – Вып. 3. – С.79–121.
131. *Чикин А.Л.* Трехмерная задача расчета гидродинамики Азовского моря // *Математическое моделирование.* – 2001. – Т.13, № 2. – С. 86–92
132. *Чикин А.Л., Шабас И.Н., Сидиропуло С.Г.* Моделирование процесса переноса загрязняющего вещества в Цимлянском водохранилище // *Водные ресурсы.* – 2008. – Т. 35, № 1. – С. 53–59.
133. *Чикин А.Л.* Математическая модель ветровых течений в Керченском проливе // *Вестник ЮНЦ РАН.* – 2009. – Т. 5, № 2. – С. 58–63.
134. *Чикин А.Л.* Двухслойная математическая модель ветровых течений в водоемах, имеющих большие площади мелководья // *Математическое моделирование.* – 2009. – Т. 21, № 12. – С. 152–160.
135. *Чикин А.Л., Бирюков П.А.* Расчет ветровых течений в Керченском проливе с помощью двухслойной математической модели // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки.* – 2010. – № 5. – С. 12–16.
136. *Шабас И.Н., Чикин А.Л.* Трехмерная задача распространения примесей // *Математическое моделирование.* – 2001. – Т. 13, № 3. – С. 85–88.
137. *Шабас И.Н., Чикин А.Л., Чикина Л.Г.* Математическое моделирование задач переноса многокомпонентных примесей в Азовском море на многопроцессорных вычислительных системах // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 12 (161). – С. 200–210.
138. *Шульга Т.Я.* Исследование влияния скорости и направления ветра на сгонно-нагонные явления в бассейне переменной глубины // *Системы контроля окружающей среды: сб. науч. тр.* – Севастополь, 2005. – С. 180–182.

139. Шульга Т.Я. Моделирование сгонно-нагонных явлений в ограниченном морском бассейне // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – № 2. – С. 3–11.
140. Шереметевская О.И. Сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря, методы их расчетов и прогнозов. – Обнинск : ВНИИГМИ МЦД, 1977. – 39 с.
141. Якушев Е.В., Сухинов А.И., Лукашев Ю.Ф. и др. Комплексные океанологические исследования Азовского моря в 28-м рейсе научно-исследовательского судна «Акванавт» (июль-август 2001 г.) // Океанология. – 2003. – Т. 43, № 1. – С. 44–53.
142. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Edit. by N. S. Heaps. – Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1987. – P. 1–16. – doi:10.1029/CO004p0001.
143. Burchard H., Bolding K., Villareal M.R. Three-dimensional modelling of estuarine turbidity maxima in a tidal estuary // Ocean Dynamics. – 2004. – Vol. 54, Iss. 2. – P. 250–265.
144. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. Res. Dev. – 1967. – Vol. 11, Iss. 2. – P. 215–234. – doi: 10.1147/rd.112.0215.
145. Grant W.D., Madsen O.S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // J. Geophys. Res. – 1979. – Vol. 84, Iss. C4. – P. 1797–1808. – doi:10.1029/JC084iC04p01797.
146. Kallos G., Kotroni V., Lagouvardos K. The regional weather forecasting system SKIRON: An overview // Proc. Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments. – Athens: Univ. of Athens, 1997. – P. 109–122. – ISBN:960-8468-22-1.
147. Large W.G., Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – Vol. 11, No. 3. – P. 324–336. – [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2).
148. Matishov G., Matishov D., Gargopa G. et al. Climatic Atlas of the Azov Sea 2006 / Ed. G. Matishov, S. Levitus. – Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2006. – 148 pp. – (NOAA Atlas NESDIS 59).
149. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. – 1982. – Vol. 20, Iss. 4. – P. 851–875. – doi:10.1029/RG020i004p00851.

150. *Hsu S.A.* A mechanism for the increase of wind stress (drag) coefficient with wind speed over water surfaces: A parametric model // *J. Phys. Oceanogr.* – 1986. – Vol. 16, No. 1. – P. 144–150. – [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1986\)016<0144:AMFTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1986)016<0144:AMFTIO>2.0.CO;2).
151. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P.* Seasonal variability of wind and thermohaline-driven circulation in the Black Sea: Modeling studies // *J. Geophys. Res.* – 1996. – Vol. 101, Iss. C7. – P. 16551–16569. – doi: 10.1029/96JC01093.
152. *Papadopoulos A., Katsafados P., Kallos G. et al.* The weather forecasting system for Poseidon – An overview // *The Global Atmosphere and Ocean System.* – 2002. – Vol. 8, Iss. 2–3. – P. 219–237. – <http://dx.doi.org/10.1080/1023673029000003543>.
153. *Pietrzak J.* The use of TVD limiters for forward-in-time upstream-biased advection schemes in ocean modeling // *Mon. Wea. Rev.* – 1998. – Vol. 126, No. 3. – P. 812–830. – [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0812:TUOTLF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0812:TUOTLF>2.0.CO;2).
154. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* – 1963. – Vol. 91, No. 3. – P. 99–164. – [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2).
155. *Stanev E.V.* Understanding Black Sea Dynamics: Overview of recent numerical modeling // *Oceanography.* – 2005. – Vol. 18, No. 2. P. 56–75. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>.
156. *Sweby P.K.* High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws // *SIAM J. Numer. Anal.* – 1984. – Vol. 21, Iss. 5. – P. 995–1011. – <https://doi.org/10.1137/0721062>.
157. *Yang Zh., Hamrick J.M.* Variational inverse parameter estimation in a cohesive sediment transport model: An adjoint approach // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108, Iss. C2. – 3055. – doi: 10.1029/2002JC001423.
158. *Wannawong W., Wongwiset U., Vongvisessomjai S.* Mathematical modeling of storm surge in three dimensional primitive equations // *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering.* – 2011. – Vol. 5, № 6. – P. 797–806.
159. *Wu J.* Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane // *J. Geophys. Res.* – 1982. – Vol. 87, Iss. C12. – P. 9704–9706. – doi:10.1029/JC087iC12p09704.

*Научное издание*

**Черкесов Леонид Васильевич  
Шульга Татьяна Яковлевна**

**Волны, течения, сгонно-нагонные процессы  
и трансформация загрязнений в Азовском море**

На русском языке

Сдано в набор 10.09.2017 г. Подписано в печать 13.09.2017 г.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Цифровая печать. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 13,32. Уч.-изд. л. 10,3.  
Тираж 100 экз. Заказ 51.

---

Отпечатано в типографии ИП Бондаренко Н.Ю. ИНН 920100017340  
299038 Севастополь, пр-т Октябрьской Революции, 32

ISBN 978-5-9908460-1-2

