

С.В.Довгая, О.А.Дымова, Н.В.Маркова,
С.Г.Демышев, Л.В.Черкесов

Морской гидрофизический институт, г.Севастополь

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ В НЕКОТОРЫХ РАЙОНАХ НЕФТЯНЫХ,
ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
У ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА**

Рассмотрены две штормовые ситуации в зимний и летний сезоны 2006 г.: в конце января и начале июля. Подробно исследованы трехмерные поля температуры морской воды и течений до, после и во время шторма. Выявлены основные особенности отклика гидрофизических полей на изменение ветрового воздействия. Для расчетов использовалась модификация модели МГИ с высоким пространственным разрешением (1,64 км) и с реальным атмосферным воздействием (данные ALADIN).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *численное моделирование, Черное море, шторм, температура, скорости течений*

В настоящее время существует необходимость в интенсивном промышленном освоении ресурсов Черного моря, а также решении различных сопутствующих экологических вопросов. Особенно ощутимой стала нехватка информации о гидрологической и гидродинамической ситуации в отдельных районах моря, подвергающихся интенсивной антропогенной нагрузке. Так, в областях морских нефтегазовых месторождений для решения инженерно-технических и экологических задач необходима информация о вероятной гидрологической и гидродинамической обстановке. Особый интерес представляют изменения гидродинамических характеристик в результате экстремальных, в частности, ветровых воздействий.

Ранее на основе трехмерной нелинейной гидродинамической модели МГИ [1] с пространственным разрешением 5 км в зональном и меридиональном направлениях были выполнены качественные и количественные оценки климатической (осредненной) циркуляции для всего Черного моря [2]. В представляемой работе проведены новые численные эксперименты, которые позволили получить уточненные поля течений, температуры, солености и уровня моря в районах нефтегазовых месторождений у черноморского побережья Крыма.

Для расчетов использовалась модификация модели МГИ с высоким пространственным разрешением 1,64 км [3] и с учетом реального атмосферного воздействия [4]. В качестве тестового был выбран 2006 г., в дальнейшем работы по диагнозу и прогнозу состояния морской среды на указанной основе предполагается продолжить. Основной целью данной работы является реконструкция при помощи численного моделирования и последующее изучение трехмерных гидрофизических полей Черного моря в областях нефтегазодобычи в штормовые периоды (на примере 2006 г.), когда измере-

ние скоростей течений и других гидродинамических параметров контактными методами максимально усложнено.

Постановка задачи. Параметры модели. Задача решалась с помощью численной нелинейной термогидродинамической модели МГИ. Уравнения модели подробно описаны в [5]. Численный эксперимент по моделированию циркуляции Черного моря был выполнен при следующих условиях. В качестве краевых полей использованы поля тангенциального напряжения трения ветра, полного потока тепла, испарения и осадков, полученные по данным региональной атмосферной модели *ALADIN* [6]. В модели каждые сутки усваивалась температура поверхности моря, полученная по данным спутника *NOAA*. При проведении расчетов граничные поля линейно интерполировались на каждый момент времени. Для задания температуры, солёности и скорости в устьях рек и Керченском проливе использовались климатические данные [7]. В расчете принималось, что в верхнебосфорском течении температура и солёность та же, что и в море; в нижнебосфорском потоке солёность равнялась 35 ‰ и температура 16 °С, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря. Начальный момент времени соответствовал 28 декабря 2005 г., начальные поля уровня, температуры, солёности и скоростей течений получены в рамках проекта "Оперативная океанография" [8]. Время интегрирования – с 1 января по 31 декабря 2006 г.

Расчеты проводились на равномерной сетке с шагом по пространству 1,6 км (698 × 390 точек), по вертикали использовалось 27 z-горизонтов, шаг по времени равнялся 1,5 мин. Коэффициенты турбулентности по вертикали вычислялись в соответствии с параметризацией Меллора-Ямады 2.5 [9]. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и горизонтальной турбулентной диффузии равны 10^{16} и $5 \cdot 10^{14}$ см⁴/с соответственно.

В работе рассматривались месторождения Архангельское (газовое; расчетные координаты 45°20'с.ш., 31°57'в.д.), Штормовое (газоконденсатное; координаты 45°17'с.ш., 31°54'в.д.) и Субботина (нефтяное; 44°50'с.ш., 36°17'в.д.). В указанных районах были оценены поля приводного ветра в 2006 г. и выбраны периоды максимальных скоростей ветров. Так, в поле касательных напряжений трения приводного ветра (τ_x , τ_y) зимой 2006 г. над Крымским полуостровом преобладали по направлению и были наиболее сильными северные и северо-восточные ветры. Максимальные значения вектора касательных напряжений приводного ветра наблюдались у западного побережья Крыма и к юго-востоку от Керченского пролива. Летом наиболее часты были восточные и северо-восточные направления. В поле (τ_x , τ_y) отмечены несколько штормовых ситуаций в январе, феврале, июле и конце октября – начале ноября 2006 г. Максимальные значения модуля вектора τ для всей северной части Черного моря наблюдались 25 января и 3 июля 2006 г., поэтому анализ гидродинамической ситуации в районах нефтегазовых месторождений проводился в указанные даты. В обоих случаях направление ветра было северо-восточным.

В конце января 2006 г. выделена первая штормовая ситуация: 22 января 2006 г. начинает дуть северо-восточный ветер, его действие продолжалось в течение шести дней. Пик скорости ветра приходился на 25 января, над исследуемым районом скорости ветра составили более 12 м/с (рис.1).

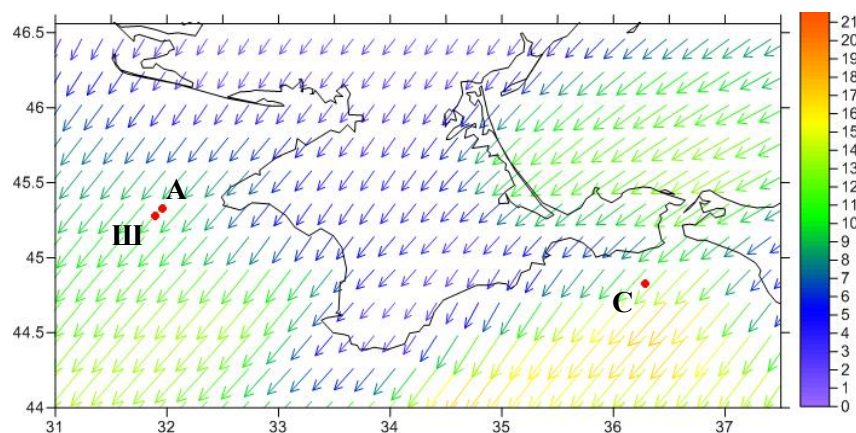
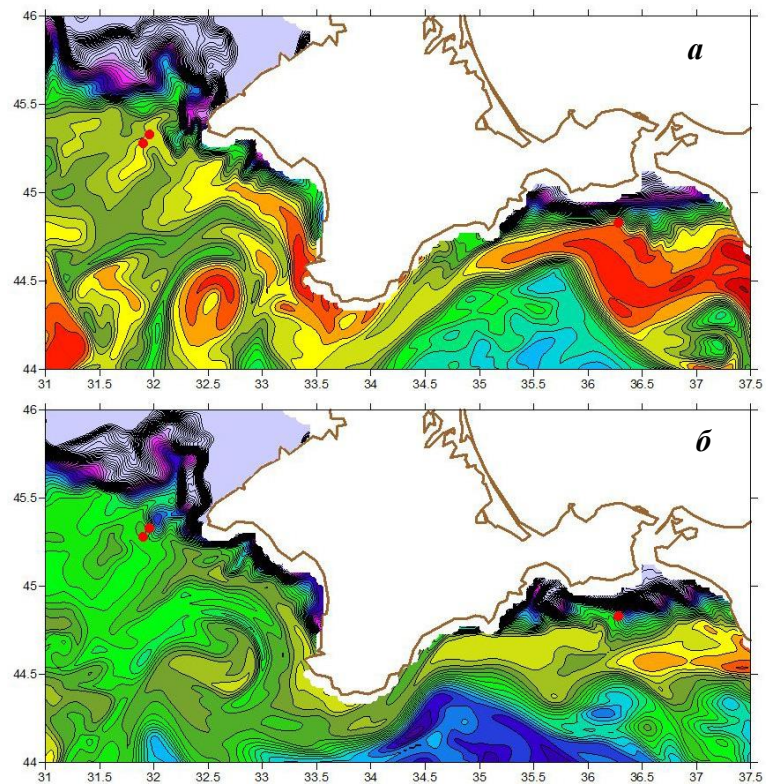


Рис. 1. Поле скорости ветра (м/с) 25 января 2006 г. Красными точками отмечено расположение исследуемых месторождений: Архангельское (А), Штормовое (Ш), Субботина (С).

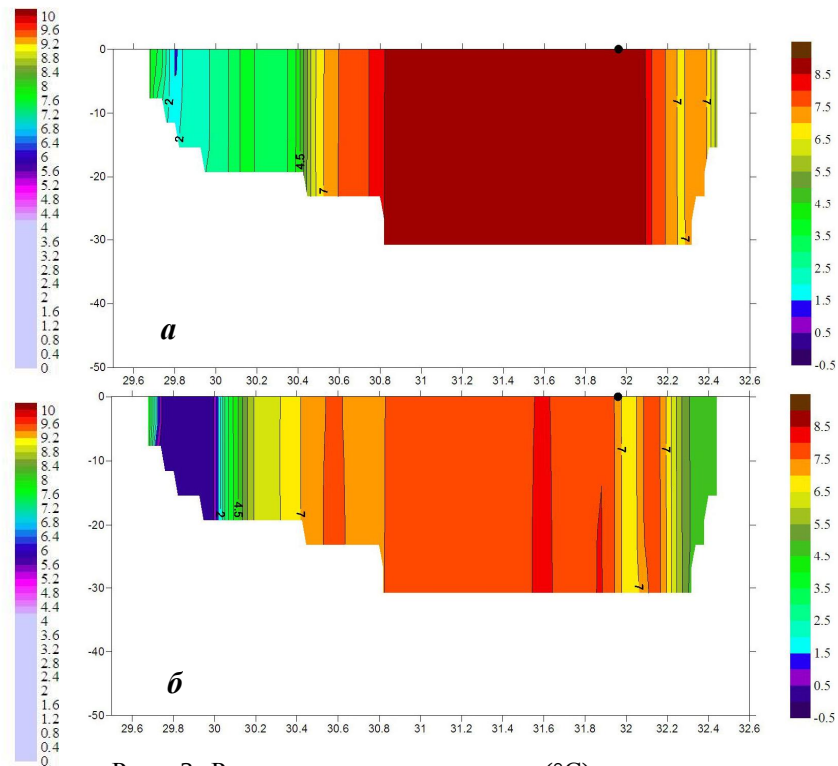
Анализ результатов численного эксперимента. Поле температуры.

В результате моделирования получено, что 21 января 2006 г. в районе месторождений Архангельское (А) и Штормовое (Ш) наблюдался северный ветер с касательными напряжениями трения около $0,5 \text{ дин/см}^2$. В районе месторождения Субботина (С) касательные напряжения северо-западного ветра составили около $0,9 \text{ дин/см}^2$. При этом температура воды на глубине 3 м в этих районах моря достигала 9°C (рис.2, а). С переменной направления ветра на северо-восточное и усилением его воздействия до $6 - 7,5 \text{ дин/см}^2$ в период его максимальной интенсивности в зимний сезон (23 – 26 января) температура воды в этих районах снизилась до $6 - 7^\circ\text{C}$ (рис.2, б). Такое резкое уменьшение температуры воды в районе месторождений Архангельское и Штормовое явилось результатом обусловленной ветром интенсификации антициклонического вихревого образования, существовавшего у западного побережья Крыма, и усиления проникающей вертикальной конвекции. Так как месторождение Субботина располагается вблизи Керченского пролива, то сильный северо-восточный ветер явился причиной направленного поступления более холодных вод из Азовского моря. Такое распределение температуры характерно до глубин залегания месторождений. В качестве примера на рис.3 представлены поля температуры на зональном разрезе по $45,33^\circ$ с.ш. по станции Архангельское до шторма (рис.3, а) и во время шторма (рис.3, б). Из рисунка видно, что в районе станции температура уменьшилась на $2,5^\circ\text{C}$ и составила $6,5^\circ\text{C}$. Приведенные распределения температуры воды на вертикальных разрезах свидетельствуют о вертикальной однородности перемещавшихся в этом регионе вод.

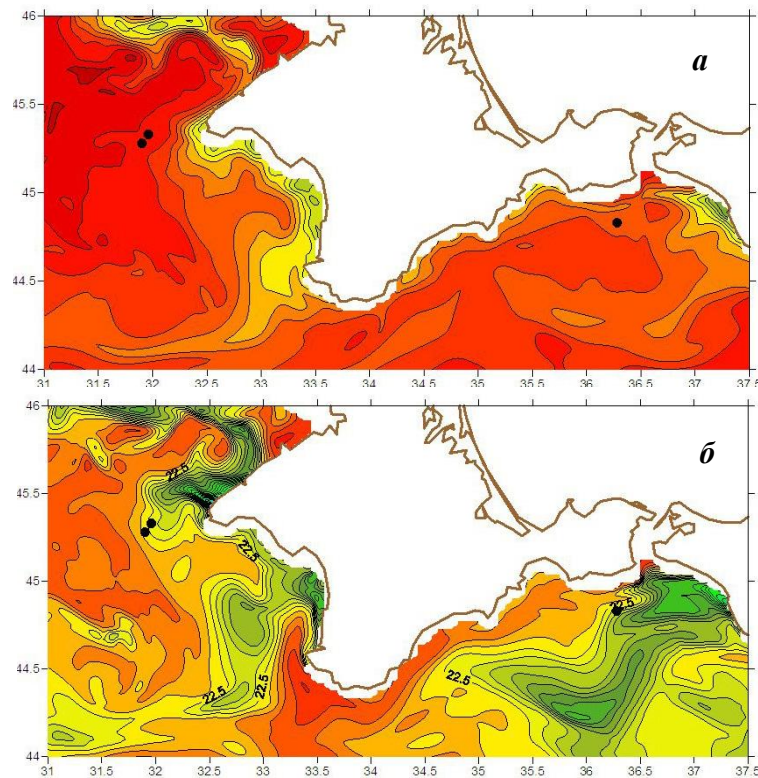
Рассмотрим далее распределение полей температуры в областях расположения станций А, Ш и С, сформировавшееся под воздействием экстремальных ветровых условий в летний сезон. 1 июля 2006 г. в районе месторождений А и Ш наблюдался северо-восточный ветер с касательными напряжениями трения до $0,45 \text{ дин/см}^2$. По месторождению С касательные напряжения достигали $0,65 \text{ дин/см}^2$. Температура воды на верхнем горизонте (3 м) в этих районах составила 25°C (А, Ш) и 24°C (С) (рис.4, а).



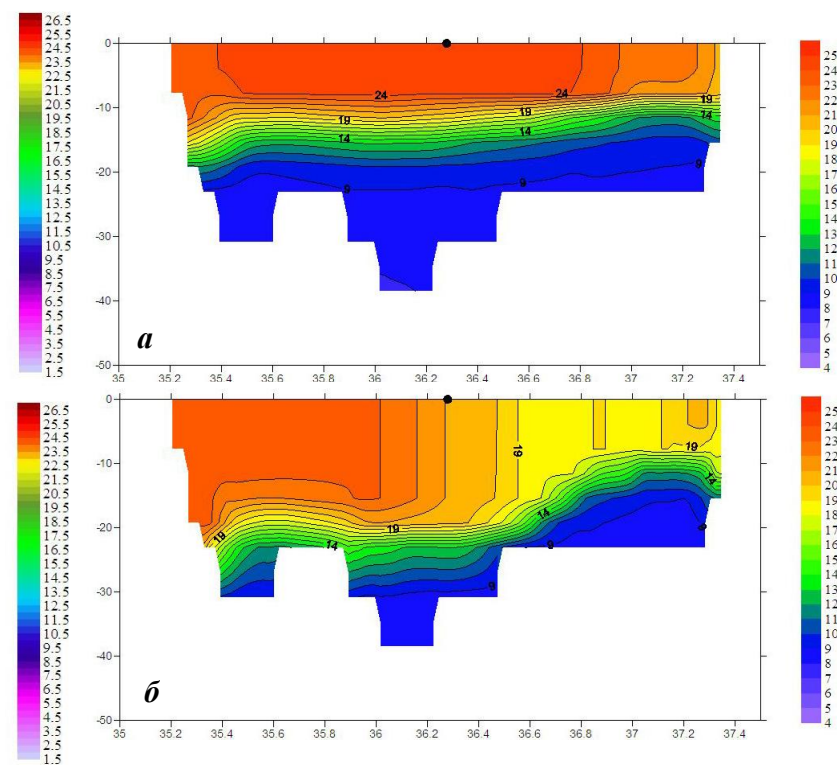
Р и с . 2 . Поля температуры ($^{\circ}\text{C}$) на горизонте 3 м: 21 (а) и 25 января (б) 2006 г.



Р и с . 3 . Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) на вертикальном разрезе вдоль $45,33^{\circ}$ с.ш. по станции Архангельское: 21 (а) и 25 января (б) 2006 г.



Р и с . 4 . Поля температуры ($^{\circ}\text{C}$) на горизонте 3 м: 1 (а) и 5 июля (б) 2006 г.



Р и с . 3 . Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) на вертикальном разрезе вдоль $44,83^{\circ}$ с.ш. по станции Субботина: 1 (а) и 5 июля (б) 2006 г.

С усилением ветрового воздействия до $3,5 - 4 \text{ дин/см}^2$ в период максимальной интенсивности ветра в летний сезон (3 июля 2006 г.) температура воды снизилась до 24°C в районе месторождений А и Ш (на станции С температура не изменилась). Однако минимальные значения по температуре в изучаемых районах достигаются 5 июля с запаздыванием по отношению к максимальному ветровому воздействию и равны 22°C (А и Ш) и 21°C (С) (рис.4, б). Такое понижение температуры воды в рассматриваемых областях явилось следствием сгонно-нагонных процессов и вертикального перемешивания, вызванных воздействием устойчивого северо-восточного ветра. Сгон вод у западного побережья Крыма и у побережья северного Кавказа привел к подъему более холодных нижележащих вод. Так, на рис.5 представлены распределения температуры на вертикальном разрезе вдоль $44,83^\circ \text{ с.ш.}$ по станции Субботина на 1 июля (рис.5, а) и 5 июля 2006 г. (рис.5, б). Из рисунка видно, что в результате ветрового воздействия происходил подъем изотерм из района восточного крымского побережья моря к зоне северного кавказского побережья.

Таким образом проведенный анализ полей температуры в период интенсивного ветрового воздействия в зимний и летний сезоны 2006 г. показал, что произошло понижение температуры на $2,5 - 3^\circ\text{C}$ в местах расположения месторождений Архангельское, Штормовое и Субботина. В зимнее время это было обусловлено интенсификацией антициклонического вихревого образования и усилением проникающей вертикальной конвекции, в летнее – подъемом более холодных нижележащих вод.

Поле течений. Рассмотрим динамику вод в районе исследуемых месторождений. Анализ термогидродинамических характеристик в районе п.Архангельское и Штормовое показал, что картины развития отклика моря на ветровое воздействие похожи качественно и количественно. Поэтому далее в тексте для акватории западнее мыса Тарханкут будут приведены данные соответствующие п.Штормовое. Для всех месторождений были построены таблицы скоростей течений в точке, соответствующей координатам платформы, на всех расчетных горизонтах (табл.1 – 2).

21 января 2006 г. скорости течений по всей глубине были близки 1 см/с и направлены на юго-запад, усиление ветра вызывало резкий отклик системы, скорость течений увеличилась в среднем в 7 раз и направление сменилось

Т а б л и ц а 1. Величина скоростей течений (см/с) на глубинах $2,5 - 50 \text{ м}$ в районе месторождения Штормовое (зима).

горизонт сутки \	2,5 м	5 м	10 м	15 м	20 м	30 м	40 м	50 м
21 января	7,78	5,64	3,70	2,40	1,40	0,91	1,72	2,34
22 января	6,53	5,65	4,83	4,30	3,88	3,21	2,62	1,80
23 января	14,13	12,23	10,62	9,57	8,71	7,35	6,31	4,82
24 января	13,91	11,98	10,30	9,17	8,19	6,61	5,40	3,82
25 января	13,69	11,43	9,38	7,97	6,76	4,85	3,48	1,96
26 января	15,13	12,46	10,11	8,34	6,95	4,83	3,41	1,92
27 января	11,19	9,48	7,93	6,84	5,90	4,45	3,44	2,26

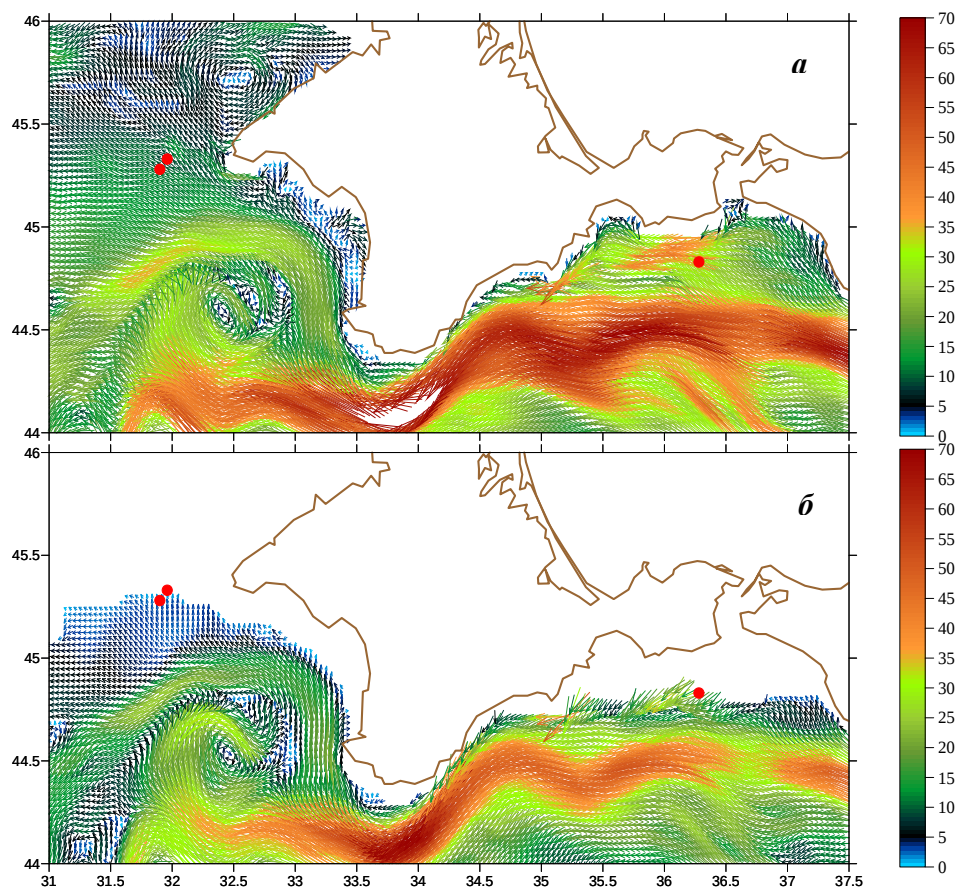
Т а б л и ц а 2. Величина скоростей течений (см/с) на глубинах 2,5 – 40 м в районе месторождения Субботина (зима).

горизонт сутки	2,5 м	5 м	10 м	15 м	20 м	30 м	40 м
21 января	19,81	17,91	16,08	14,73	13,53	11,08	6,52
22 января	3,87	3,69	3,57	3,47	3,37	3,21	2,70
23 января	5,50	4,61	4,01	3,73	3,60	3,37	3,57
24 января	16,96	16,25	15,60	14,81	11,65	11,36	11,06
25 января	21,27	18,68	16,42	15,04	13,77	10,70	10,37
26 января	41,66	38,32	34,93	32,56	30,21	23,60	15,76
27 января	26,28	24,47	22,32	20,36	17,40	18,86	12,30

на северо-западное. Данное направление скорости течений в районе м. Штормовое сохранялось по всей глубине в течение всего исследуемого периода времени. Наиболее сильные течения развились к 23 января и достигли величины 14 см/с. Далее со временем скорость немного упала и затем снова увеличилась 25 января в слое 2,5 – 15 м. На глубинах ниже 20 м усиление ветра 25 января не привело к значительному изменению скоростей.

21 января над месторождением Субботина по всей глубине проходила периферийная часть антициклонического вихря, сформировавшегося между ветвью ОЧТ и берегом, скорость течения составила около 20 см/с на верхнем горизонте и уменьшалась с глубиной. В рассматриваемом пункте течения были направлены на восток. С усилением ветра структура вихря на поверхности стала разрушаться, произошла перестройка динамики: поменялось направление течения, к 22 января величина скорости уменьшилась примерно в 5 раз. 22 января по всей глубине наблюдаются минимальные за исследуемый период величины скоростей. С окончательным распадом вихря к 24 января сменилось направление потока: в слое 2,5 – 30 м установилось течение, направленное на юго-запад, а ниже 40 м – на запад, и увеличились скорости. Дальнейшее усиление ветра привело к тому, что к 26 января скорости достигли максимальных значений по всей глубине (табл.2). Здесь преобладали западные направления вектора течений (рис.6). Значительный рост скоростей к югу от Керченского пролива по сравнению с западным побережьем Крыма был связан с увеличением мощности Основного черноморского течения под воздействием северо-восточного ветра. Также усиление скоростей связано с возросшим потоком, втекающим из Азовского моря, влияние которого оказалось существенным на глубинах 10 – 50 м. После прекращения действия ветра скорость во всем слое воды резко упала, а направление течений осталось неизменным.

Таким образом, зимой действие штормовых ветров вызывало значительную перестройку динамики вод в верхнем перемешанном слое. В начале действия ветра произошло уменьшение абсолютных величин скоростей, связанное со сменой направления вектора течений, а затем наблюдался резкий скачок величины модуля скорости по всей глубине. При этом скорость могла возрасти в 6 – 7 раз.



Р и с . 6 . Поле скорости течений 26 января 2006 г. на горизонте 10 (а) и 50 м (б).

Рассмотрим теперь поле течений на расчётных горизонтах во время июльского шторма 2006 г. В слое воды до 5 – 10 м районы месторождений Архангельское и Штормовое находились на периферии северо-западного течения, распространявшегося под воздействием сильного ветра вдоль всего западного побережья Крыма. Скорости течений достигали 16 см/с. На глубинах ниже 15 – 20 м в п.Архангельское и п.Штормовое влияние ветра было меньше. Но практически на всех горизонтах прослеживалось не одновременное, но значительное усиление скоростей течений (1 июля и 4 – 5 июля, табл.3, 4). Так, в районе месторождения Архангельское (табл.3) на верхних горизонтах скорости 4 июля возросли по сравнению с 1 июля в 5 – 30 раз, а на глубинах ниже 15 м – в 3 – 5 раз к 5 июля.

Для месторождения Штормовое (табл.4) в этот период также установлено увеличение скоростей в слое до 10 м – в 5 – 20 раз. На глубинах 15 – 30 м 4 – 5 июля усиления скоростей не было, в этот период происходило перенаправление векторов скорости, и модуль скорости начал расти 5 – 6 июля. В слое 40 – 50 м в районе Штормового во время летнего шторма сохранялась исходная структура придонной циркуляции, преимущественно южной и юго-восточной направленности. Таким образом, генерируемая северо-восточным

Т а б л и ц а 3. Величина скоростей течений (см/с) на глубинах 2,5 – 40 м в районе месторождения Архангельское (лето).

горизонт сутки	2,5 м	5 м	10 м	15 м	20 м	25 м	30 м	40 м
1 июля	3,49	0,67	0,44	0,48	0,77	1,09	1,02	0,66
2 июля	5,02	2,46	0,55	0,25	0,36	0,79	0,77	0,41
3 июля	13,13	11,72	4,13	0,17	0,76	1,17	1,13	0,92
4 июля	16,73	15,84	14,81	1,41	1,75	1,80	1,73	1,35
5 июля	10,57	9,82	8,92	3,51	4,04	4,14	3,98	3,42
6 июля	7,61	5,80	1,48	1,97	2,48	2,45	1,94	1,07

Т а б л и ц а 4. Величина скоростей течений (см/с) на глубинах 2,5 – 50 м в районе месторождения Штормовое (лето).

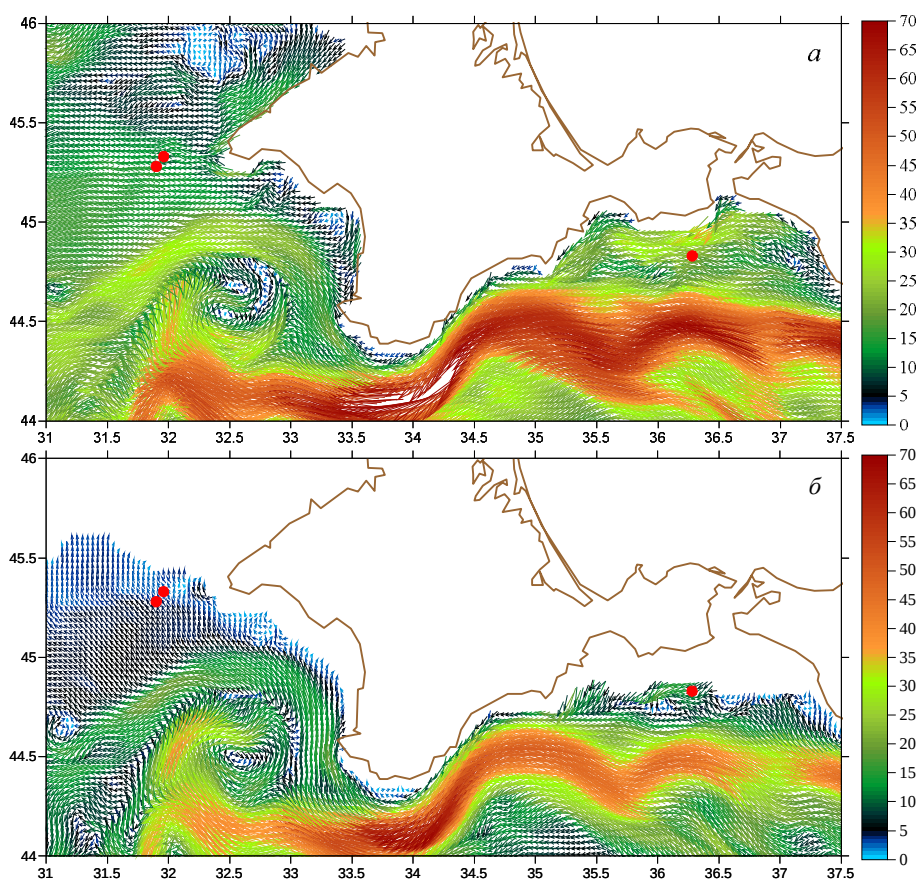
горизонт сутки	2,5 м	5 м	10 м	15 м	20 м	25 м	30 м	40 м	50 м
1 июля	3,12	0,19	0,78	1,54	1,94	1,76	1,52	0,97	0,66
2 июля	4,76	1,76	0,76	1,96	2,11	1,72	1,40	0,83	0,49
3 июля	13,03	11,61	3,12	1,76	1,95	1,63	1,27	0,73	0,59
4 июля	16,25	15,54	14,79	0,42	0,73	0,44	0,25	0,56	0,97
5 июля	9,27	8,72	8,18	1,43	0,72	0,41	0,64	1,12	1,55
6 июля	5,92	4,10	0,50	0,77	1,51	1,71	1,41	0,66	0,41

ветром интенсификация течений достигала здесь глубин 20 – 30 м.

В районе месторождения Субботина (табл.5) во время летнего шторма происходило формирование антициклонического вихря, вовлекающего в круговорот воды от поверхности до дна (рис.7). Скорости течений возросли по сравнению с состоянием до начала шторма минимум в 2 (горизонт 2,5 м), а максимум в 55 раз (горизонт 10 м). Так, из табл.5 видно, что первыми на усиление ветра среагировали поля течений на верхних горизонтах (2,5 – 10 м, 4 июля). Затем 5 июля в антициклонический круговорот были вовлечены воды горизонтов 15 – 20 м. И к 6 июля под влиянием штормового ветра уже вся толща морской воды в районе месторождения Субботина была

Т а б л и ц а 5. Величина скоростей течений (см/с) на глубинах 2,5 – 40 м в районе месторождения Субботина (лето).

горизонт сутки	2,5 м	5 м	10 м	15 м	20 м	25 м	30 м	40 м
1 июля	10,08	8,96	0,33	0,31	0,80	1,16	1,06	0,76
2 июля	7,42	6,62	1,09	0,75	1,14	1,36	1,12	0,53
3 июля	13,72	12,12	6,44	1,03	0,94	1,33	1,12	0,67
4 июля	21,97	20,24	18,13	7,39	2,68	2,29	2,37	1,82
5 июля	16,18	14,31	12,86	11,91	7,15	1,77	3,05	2,16
6 июля	14,11	12,58	10,04	7,99	6,58	5,58	5,07	3,33



Р и с . 7 . Поле скорости течений (см/с) 5 июля 2006 г. на горизонтах 5 (а) и 40 м (б).

вовлечена в указанную антициклоническую структуру. Скорости течений в антициклоне достигли максимальных значений 4 июля и составили на поверхности около 22 см/с.

Выводы. В 2006 г. отмечены два периода наиболее сильных ветров, охватывающих всю северную часть Чёрного моря: в конце января и начале июля. Исследованы трехмерные поля температуры морской воды и течений, выявлены основные особенности отклика гидрофизических полей на изменение ветрового воздействия.

Воздействие устойчивого северо-восточного ветра инициирует интенсивные сгонно-нагонные процессы в прибрежных областях моря и усиливает вертикальное перемешивание, что приводит к понижению температуры морской воды в рассматриваемых районах на 2 – 4 °С.

На северо-западном шельфе (район месторождений Архангельское и Штормовое) действие сильных северо-восточных ветров вызывает значительную перестройку динамики вод в верхнем 30-метровом слое моря. Величины скоростей течений резко возрастают.

В районе месторождения Субботина сильный ветер воздействует на всю толщу вод, разрушая ранее существовавшие (январь) или формируя новые (июль) антициклонические вихри.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьшев С.Г., Кортаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С.– М.: ОВМ, 1992.– С.163-231.
2. Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В., Черкесов Л.В. Построение поля течений в Черном море на основе вихреразрешающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солёности // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.– вып.15.– С.215-226.
3. Демьшев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2013.– т.49, № 6.– С.655-663.
4. Ратнер Ю.Б., Мартынов М.В., Баянкина Т.М., Бородин С.В. Информационные потоки в системе оперативного мониторинга гидрофизических полей Черного моря и автоматизация процессов их обработки // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– С.140-149.
5. Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2012.– т.48, № 1.– С.137-149.
6. Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research / members of the ALADIN international team the ALADIN PROJECT // World Meteorological Organization Bulletin.– 1997.– v.46, № 4.– P.317-324.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.– С-Пб: Гидрометеиздат, 1991.– 428 с.
8. Кортаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 382 с.
9. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys.– 1982.– v.20, № 4.– P.851-875.

Материал поступил в редакцию 17.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Розглянуто дві штормові ситуації в зимовий та літній сезони 2006 р.: в кінці січня й на початку липня. Детально досліджено тривимірні поля температури морської води й течій до, після та під час шторму. Виявлено основні особливості відгуку гідрофізичних полів на зміну вітрової дії. Для розрахунків використовувалася модифікація моделі МГІ з високим просторовим розділенням (1,64 км) і з реальною атмосферою дією (дані ALADIN).

ABSTRACT Two storm situations in winter and summer seasons of 2006 were considered. The first storm was at the end of January and the second one at the beginning of July. Three-dimensional fields of sea water temperature and currents were investigated in detail for these periods. Main features of hydrophysical field response to wind forcing change were investigated. A modification of MHI model with high spatial resolution (equal to 1,64 km) and with real atmospheric action (data of ALADIN) was used for the calculations.