



СОДЕРЖАНИЕ

Статьи

<i>Каган Б.А., Тимофеев А.А.</i> Моделирование поверхностного и внутреннего K_1 (деклинационных) приливов в Белом море	4
<i>Владиминова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Литвин А.Д., Скопин Н.А.</i> Исследование течений в верхнем слое Черного моря в диапазоне мезомасштабов	19
<i>Тюгин Д.Ю., Куркина О.Е., Куркин А.А.</i> Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане	32
<i>Семёнов Е.В., Мортиков Е.В.</i> Методы обработки глубоководных термохалинных измерений	45
<i>Зимин А.В., Солощук П.В., Исаев А.В.</i> Особенности течений в восточной части Финского залива по результатам инструментальных измерений в июле 2010 года	58
<i>Диденкулова И., Вишка М., Куренной Д.</i> Изменчивость берегового профиля под совместным воздействием судовых и ветровых волн	66
<i>Сухоруков А.Л.</i> Применение метода статистических испытаний в задаче о подъеме груза с большой глубины в условиях нерегулярного волнения моря	79
Конференции	100
Хроника	102
Правила представления материалов в редакцию.....	103

CONTENTS

Articles

- Kagan B.A., Timofeev A.A.* Modelling of the K_1 Surface and Internal Tides in the White Sea 4

On the basis of the use of hydrodynamic equations to incompressible liquid, reduced to non-dimensional form within the framework of similarity law, probabilistic structure of the field is constructed and researched as the basis of the decision of the problem of the non-dimensional parameter estimation of the flow, created by moving outside source, as well as for estimation of the source proper parameters and parameters of the statistical field propagation channel. The analytical form of the likelihood ratio is found and algorithms of the unknown information parameter estimation as the object of the statistical inverse problem solving are formed..

Key words: surface & internal tides, K_1 harmonic, modelling, White Sea.

- Vladimirova E.M., Ivanov V.G., Ivanov D.V., Litvin A.D., Skopin N.A.* The Investigation of Mesoscale Flows within the Black Sea Upper Layer 19

The results of velocity and temperature nature investigations in the Black sea upper layer during August 2005 are presented. The information about dynamics and structure of these fields was obtained. The existence of internal waves and localized regions of equal temperature and velocity is shown. The energetic and geometric structure characteristics of different nature in a season thermocline region were estimated.

Key words: seasonal thermocline, mezzo-scale structure, internal waves, temperature fluctuations, eddies.

- Tyugin D., Kurkina O., Kurkin A.* Software Package for Modeling of Internal Gravity Waves in the World Ocean 32

In this paper software package for numerical modeling of transformation and propagation of internal gravity waves (IGW) in the World Ocean is presented. Short overview of implemented numerical models is given. They are: extended nonlinear evolutionary equation of Korteweg-de-Vries type with combined nonlinearity with variable coefficients (Gardner equation) and ray model reproducing the effect of refraction in an IGW package. The developed software package is unique and topical for this class of geophysical applications. Description of user interface and main working modes of the software are presented.

Key words: numerical modeling, data processing and visualization, wave refraction.

- Semenov E.V., Mortikov E.V.* Methods for Processing of Deep-Water Thermohaline Measurements 45

We describe a method for approximate reconstruction of main hydrophysic fields using deep-water thermohaline measurements. Methods for solving both non-stationary and stationary, known as “diagnostic” problems, are presented. Proposed approaches are based on full non-linear system of equations of geophysical thermo-hydrodynamics. A series of results of computations performed from the mid 80-s and up to nowadays are reported.

Key words: data assimilation, variational problems, ocean thermo-hydrodynamics.

Zimin A.V., Soloshchuk P.V., Isaev A.V. Features of Currents in the Eastern Part of the Gulf of Finland Based on the Results of Instrumental Measurements in July 2010 58

The paper presents the results of current velocity measurements which were carried out below the thermocline in the eastern part of the Gulf of Finland in the second half of July 2010. It was found that the structure of water circulation in the region is generally cyclonic in nature. Comparison of calculated geostrophic velocities with instrumental measurements showed a qualitative agreement only for the direction of currents. The measured modules of current velocity exceeded its values calculated by the dynamic method by two to eight times.

Key words: water circulation, instrumental measurements of current velocity, dynamic method for calculation of current velocity, the eastern part of the Gulf of Finland.

Didenkulova I., Viška M., Kurennoy D. Change of the Coast Profile under the Joint Effect of Ship and Wind Waves 66

Coast dynamics resulting from the interplay of long vessel wakes and short background wind waves is studied experimentally in tideless conditions of Gulf of Finland. An attempt of qualitative study of impact of each wave system on a coast is made. Special attention is paid to two parameters: the change of sillage volume and the change of the coast profile shape, which is defined as an exponent in the power approximation of the coast. The analysis of these parameters and their variability for ship and wind waves demonstrate peculiarities of the ship wave and wind wave effect on the coast.

Key words: beach profile change, statistical moments, probability distributions, wind waves, ship waves, the Baltic Sea.

Sukhorukov A.L. Application of Method of Statistic Testing in the Task of Load Lifting from Deep Depth in Conditions of Random Sea State 79

Nowadays, with account of depletion of hydrocarbon raw materials onshore there is a tendency to develop deep oil and gas fields. In course of development of the fields, significant amount of various lowering-and-hoisting operations are fulfilled. The task of determination of the forces in load lifting from deep depth in the conditions of random sea state is solved on the basis of statistic testing method (Monte Carlo method). Mathematical model took into account non-linearities caused by jerking and non-linearities of forces of the load hydrodynamic resistance. Comparison of the results with relevant solutions of linear tasks has been made.

Key words: load lifting, sea state, line, wave process, offshore operation, jerking.

УДК 532.516; 532.526

© Э.М. Владимирова, В.Г. Иванов, Д.В. Иванов, А.Д. Литвин, Н.А. Скопин, 2011
ФГУП ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Санкт-Петербург
skopins@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ЧЕРНОГО МОРЯ В ДИАПАЗОНЕ МЕЗОМАСШТАБОВ

Представлены результаты натурных исследований скорости и температуры в верхнем слое Черного моря в августе 2005 г. Получена информация, отражающая динамику и структуру этих полей. Показано существование внутренних волн, локализованных в пространстве замкнутых областей равной температуры и скорости в диапазоне мезомасштабов. Оценены энергетические и геометрические параметры структур различной природы в районе сезонного термоклина.

Ключевые слова: сезонный термоклин, мезомасштабная структура, внутренние волны, флуктуации температуры, вихри.

При создании и эксплуатации различных средств освоения морской среды возникает проблема выбора оптимальных и одновременно безопасных режимов их работы – традиционно эта задача решалась методами теории корабля, в которых морская среда представляется как однородная по своим гидрофизическим характеристикам.

Однако, как показывают результаты океанологических исследований последних десятилетий, характеристики морской среды в реальных условиях обладают существенной пространственно-временной неоднородностью. Это необходимо учитывать при проектировании и обосновании режимов функционирования надводной и подводной морской техники, а также сооружений как гражданского, так и оборонного назначения и обеспечения их эксплуатационной и экологической безопасности [1–4].

Важнейшими гидрофизическими параметрами, определяющими динамику и гидрологический режим океана, являются поля температуры, солёности, плотности и скорости различного типа течений, включая движения жидкости волнового и турбулентного характера.

Экспериментальные исследования мезомасштабной структуры морской среды (горизонтальные масштабы неоднородностей в диапазоне десятки–сотни метров, вертикальные масштабы от 1 м) представляются в настоящее время весьма актуальными [5].

Особый интерес представляют процессы, происходящие в масштабах тонкой вертикальной структуры с дискретностью по глубине порядка 1 м и менее. Результаты таких исследований, в частности, необходимы при разработке и верификации расчетных моделей гидрофизических полей морских акваторий [6], а также при решении экологических задач – разработка расчетных схем распространения осадков вблизи сооружений, оценка возможных путей распространения нефтяных и газовых пятен и т.п.

В данной работе использована классификация мезомасштабных явлений изменчивости гидрофизических полей в морских акваториях, приведенная в монографии [7]; такая же классификация использована в работах [5, 8].

Эта классификация, по мнению авторов [7], соответствует морским акваториям в отличие от открытого Мирового океана. В соответствии с данной классификацией короткопериодные внутренние волны включены в состав мезомасштабных явлений.

Очевидно, что представительность и достоверность экспериментальных данных в диапазоне мезомасштабов определяются главным образом количеством задействованных глубинных горизонтов, расстоянием между этими горизонтами, а также достаточным пространственным разрешением в горизонтальной плоскости.

Заполненность исследуемого пространства большим количеством точек измерения на близко расположенных смежных горизонтах позволяет получать информацию уже не в виде текущих измерений на горизонтах, а в виде пространственно-временных картин, отражающих изменения полей скорости и температуры сразу во всем охватываемом слое среды. Однако получение таких данных представляет собой весьма сложную в техническом отношении и трудоемкую задачу.

Использование данных, получаемых с гидрологических станций, которые расположены с большим шагом по пространству, не позволяет обеспечить необходимое пространственное разрешение для исследования мезомасштабной структуры гидрофизических полей [5].

В работах [5, 9, 10] приведено описание устройств, предназначенных для исследований мезомасштабной термохалинной структуры в верхнем слое морской среды. В [9] для вертикального перемещения СТД-зонда используется быстроходная кабельная лебедка, при этом пространственное разрешение по горизонту составляет 100 м и более. В [10] использован мультizonдовый сканирующий комплекс «Термохалотрал». Это устройство позволяет получать информацию о термохалинной структуре одновременно на пяти глубинных горизонтах с шагом вдоль разреза 60 м.

Для получения более детальной информации о мезомасштабной структуре как скалярных, так и векторных гидрофизических полей необходимо дальнейшее совершенствование измерительной техники, методов проведения комплексных измерений и анализа экспериментальных данных.

В этих целях к настоящему времени в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова разработаны измерительные комплексы, объединяемые специально созданным программным обеспечением. В состав комплексов входят: многоточечные многогоризонтные системы преобразователей температуры с высокой разрешающей способностью, профилограф скоростей течений ADCP, гидрологические зонды СТД, система GPS [1].

Методические вопросы установки на исследовательском судне измерительных комплексов, методики проведения экспериментов, а также методы статистической обработки и анализа получаемых данных описаны в работах [1–4, 11–16]

Цель настоящей работы – исследовать динамику и мезомасштабные структурные особенности гидрофизических полей морской среды на горизонтах залегания сезонного термоклина и прилегающих к нему слоев воды, а также оценить вклад движений различной природы в формирование структуры этой области.

На основании натурных измерений в акватории Черного моря в районе г. Феодосия в августе 2005 г. была получена информация в виде пространственно-временных картин полей температуры и скорости одновременно во всем верхнем слое моря (4–40 м).

Предварительные результаты этих исследований изложены в работах [1–4].



Рис. 1. Судно СР-59 у пирса в базе г. Феодосия.

Оборудование, аппаратура и условия проведения натурных экспериментов. Измерительная и регистрирующая аппаратура была установлена на борту судна типа СР, представленного на рис. 1.

В состав измерительных комплексов, использованных в натурных условиях, входят: многогоризонтные системы преобразователей средней и флуктуационной температуры с высокой разрешающей способностью, акустический доплеровский профилограф скоростей течений ADCP-BB-DR 300 фирмы RD-Instruments (США), гидрологический зонд СТД, система GPS.

Система GPS обеспечивала определение текущих координат судна в реальном масштабе времени с высокой степенью точности – до 5 м, дискретность определения текущих координат судна по пространству составляла 10 м.

Гидрологический зонд марки YSI-6820 был предназначен для сбора гидрологической информации (солёности, температуры и глубины с точностью 0.001 ‰, 0.01°C и 5 см соответственно). Программное обеспечение позволяет по данным измерений температуры и электропроводимости определять распределения по глубине солёности, условной плотности и частоты Вьяйсяля–Брента с использованием соотношений UNESCO.

Четырехлучевой профилограф скоростей течений ADCP позволяет получать информацию о модуле и направлении вектора скорости, а также о значениях его трех компонент в декартовой системе координат, связанной с судном. Частота излучения ультразвука – 300 кГц, угол расхождения лучей профилографа 30°. Минимальное вертикальное разрешение – 1 м, глубина зондирования – 150 м, дискретность измерений по времени (время внутреннего осреднения мгновенных значений скорости) – 30 с. С учетом угла расхождения лучей профилографа репрезентативное горизонтальное разрешение до глубин порядка 30–40 м принимается равным 30 м. Профилограф оборудован магнитным компасом, блоками измерения крена, дифферента и введения поправок по этим параметрам, что позволяет в автоматическом режиме исключать влияние качки судна на результаты измерений. Точность определения направления течения по магнитному компасу составляет 5 градусов, точность определения скорости течения – 1 см/с.

Основные технические характеристики измерительной части буксируемой линии: длина линии – 108 м, датчиков температуры – 80, расстояние между датчиками – 1 м, диапазон измерения средних значений температур – 0–30°C, погрешность измерения – до 2–3 %, диапазон измеряемых амплитуд низкочастотных флуктуаций температуры – $\pm 1.0^\circ\text{C}$, полоса пропускания флуктуаций 0.03–3 Гц, погрешность измерения амплитуд – до 2 %. Дискретность по времени между двумя последовательными опросами всех датчиков – 2 с.

Рис. 2 демонстрирует фрагмент измерительной многогоризонтной линии. На рис. 3, 4 приведен общий вид установки на судне измерительной температурной линии и профилографа скоростей течений ADCP.



Рис. 2. Фрагмент измерительной линии.



Рис. 3. Внешний вид температурной линии, установленной на судне.

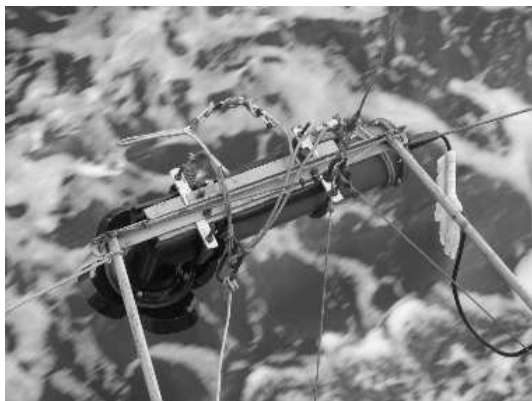


Рис. 4. Внешний вид профилографа скоростей течений ADCP.



Рис. 5. Состояние морской поверхности.

Натурные измерения, результаты которых представлены в данной работе, выполнены в режиме дрейфа исследовательского судна. Режим выбран с целью достижения минимального пространственного разрешения получаемых данных по полям скорости и температуры.

К настоящему времени обработано и проанализировано 15 режимов измерений общей длительностью 14 ч 50 мин, которые получены в условиях, характеризующихся слабым поверхностным волнением, – до 1–1.5 бал. Пример состояния свободной поверхности в этих условиях приведен на рис. 5. Глубины в районе измерений составляли величины порядка 600 м.

Оценки скоростей дрейфа исследовательского судна по выбранному массиву полученных данных показали, что средняя скорость дрейфа составляет приблизительно 0.2–0.25 м/с. С учетом этого пространственное разрешение для измерений температуры равно 1 м по вертикали и 0.4–0.5 м по горизонтали. Для измерений поля скорости – пространственное разрешение – 1 м по вертикали и 30 м по горизонтали. Дискретность измерений поля скорости по горизонту – 6–8 м.

Анализ структуры гидрофизических полей в зоне сезонного термоклина. Обработка экспериментальных данных имела целью получить распределения по времени и глубинам характеристик поля температуры и составляющих вектора скорости течения, вычислить компоненты ротора скорости и составляющих тензора скоростей деформаций.

При обработке и анализе поля температуры для выделения средней и флуктуационной составляющих применены методы статистического анализа нестационарных случайных процессов [17]. Выполнены: предварительное оценивание, вычисление скользящего среднего, центрирование, исключение трендов, определение среднеквадратичных значений флуктуаций температуры, вычисление коэффициентов автокорреляции и спектральной плотности мощности флуктуаций температуры.

При анализе поля скорости применены специально разработанные методика и программное обеспечение обработки экспериментальных данных. Это позволило определить текущие значения координат судна и скорости его дрейфа по данным системы GPS с последующим сглаживанием по методу скользящего среднего, исключить скорость дрейфа из показаний профилографа ADCP, а также оценить пространственные масштабы неоднородностей гидрофизических полей.

Данное программное обеспечение позволило выполнить анализ динамики и структуры изменений полей температуры и скорости одновременно во всем верхнем слое Черного моря в данной акватории.

Поле средней и флуктуационной температуры. Состояние гидрологии водного района характеризовалось наличием резкого сезонного термоклина с перепадом температур порядка 14–15 °С. Термоклин располагался в диапазоне глубин 12–20 м. Под термином «сезонный термоклин» принимается слой жидкости с максимальными значениями вертикального градиента температуры.

В ряде случаев в этом же диапазоне глубин наблюдался халоклин интенсивностью 1.5–2 ‰. Условная плотность имела изменения в области сезонного термоклина порядка 11–14 кг/м³. Максимальные значения частоты Вэйсяля–Брента: $Nv.b. = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$ [1/с], имели величины порядка $Nv.b. = 0.1$ [1/с] на горизонтах залегания сезонного термоклина (здесь g [м²/с] – ускорение свободного падения, ρ [кг/м³] – плотность жидкости, z [м] – вертикальная координата).

На рис. 6 приведен пример вертикальных профилей солености, температуры, условной плотности и частоты Вэйсяля–Брента, полученных с использованием гидрологического зонда во время проведения измерений. В данном примере оценка толщины термоклина составляет 8–10 м.

Ниже приведены результаты обработки экспериментальных значений по полям температуры и скорости, соответствующие одному из циклов измерений.

На рис. 7, а приведен пример пространственно-временного распределения средних значений температуры в диапазоне глубин 4–50 м и соответствующий ему вертикальный профиль температуры, полученные с помощью температурной линии. Осреднение проводилось по 30 точкам измерения процесса с дискретностью 2 с, что соответствовало времени осреднения, равному одной минуте. По вертикальной оси отложена глубина (в м), по первой горизонтальной оси – текущее время в мин, отсчитываемое с момента начала режима измерений, по нижней горизонтальной оси – соответствующее расстояние (в м), пройденное судном с учетом скорости его дрейфа. Прямоугольная метка с левой стороны рис. 7, а соответствует диапазону глубин залегания сезонного термоклина. Шкала значений t , °С приведена с правой стороны поля изотерм (такие же обозначения приняты на рис. 8, 11, 12).

Распределение средней температуры по глубине, приведенное в правой части рис. 7, а, получено по результатам измерений температурной линии с шагом по глубине 1 м. Как следует из рисунка, изменение температуры с глубиной, зарегистрированное температурной линией, качественно соответствует данным, полученным с помощью

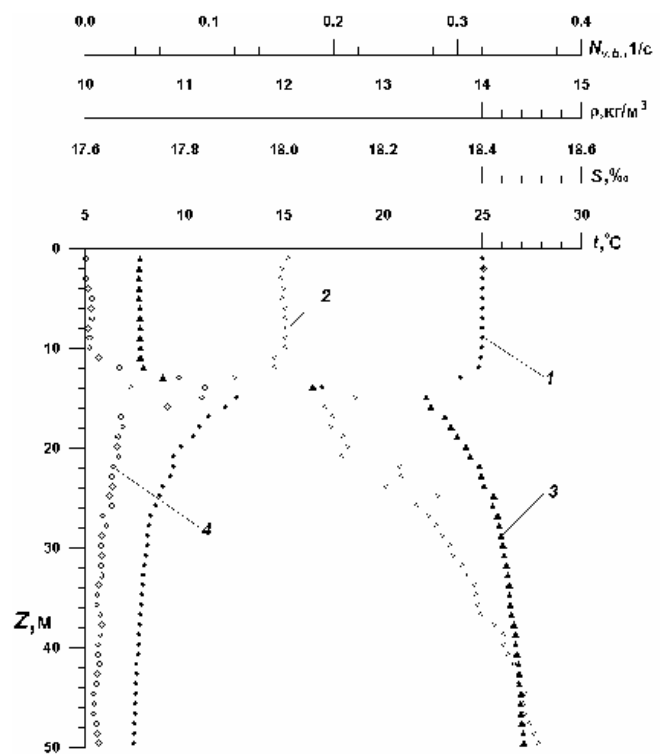


Рис. 6. Изменение гидрологических параметров с глубиной.

1 – t , °С; 2 – S , ‰; 3 – ρ ; 4 – $Nv.b.$

гидрологического зонда (рис. 6). При этом как в области залегания сезонного термоклина, так и на глубинных горизонтах имеют место внутренние волны различной длины и амплитуды. На рис. 7, б представлен выделенный участок записи температурных данных в диапазоне глубин 14–20 м.

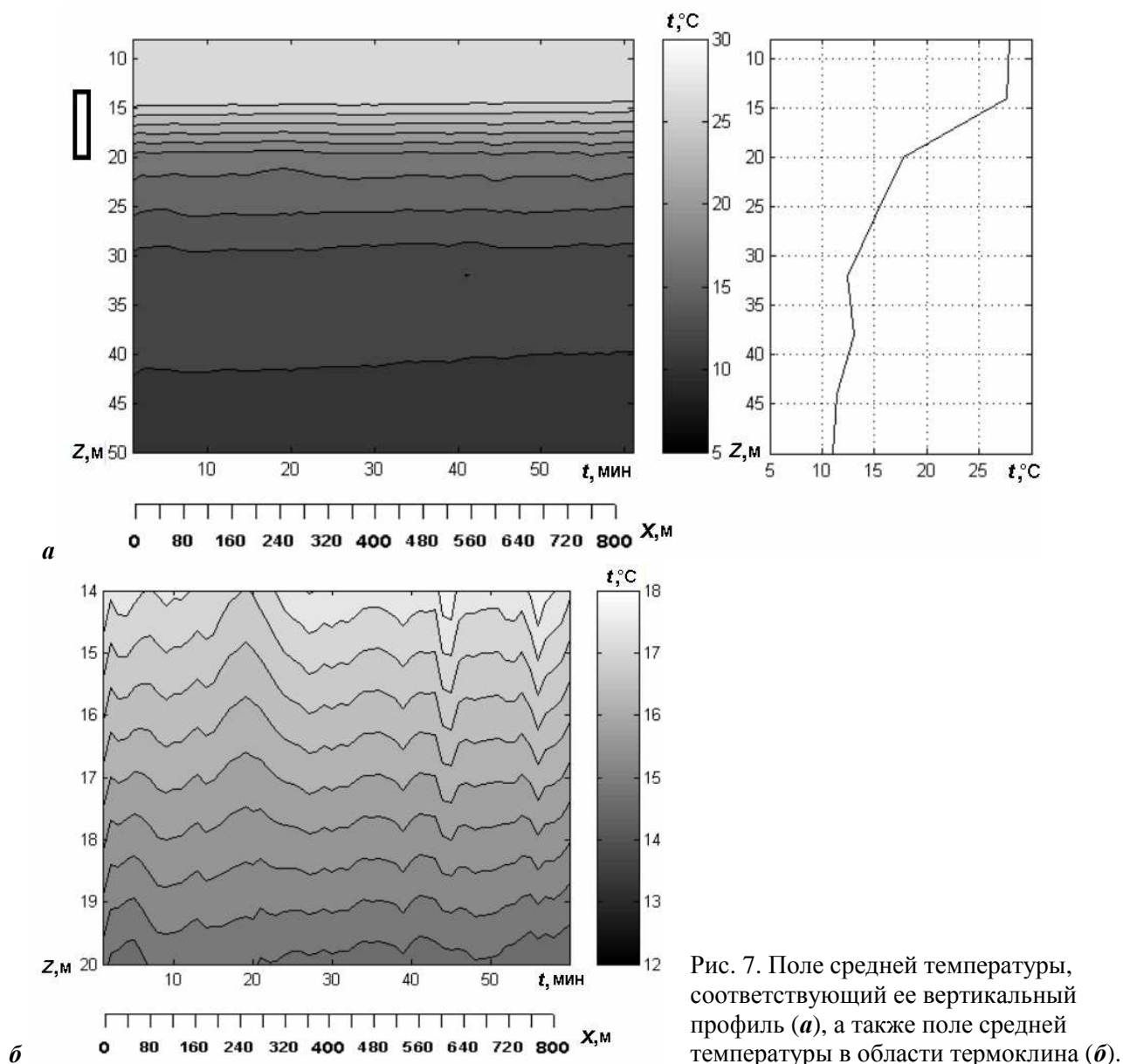


Рис. 7. Поле средней температуры, соответствующий ее вертикальный профиль (а), а также поле средней температуры в области термоклина (б).

На рис. 8 представлен пример пространственно-временного распределения среднеквадратичных значений флуктуаций температуры $\sigma = \sqrt{t'^2}$ в диапазоне глубин 4–20 м; здесь осреднение велось по 30 точкам измерений, что соответствовало времени осреднения, равному 60 с, применен метод скользящего среднего. Шкала среднеквадратичных значений флуктуаций t , °C приведена с правой стороны. В данном примере средняя скорость дрейфа за период измерений составляла: $Ug = 0.22$ м/с, что соответствовало пространственному разрешению по горизонту $\Delta X_t = 0.44$ м и $\Delta X_u = 6.6$ м для измерений полей температуры и скорости соответственно.

Видно, что в области залегания сезонного термоклина существуют локализованные в пространстве области равных повышенных среднеквадратичных значений флуктуаций температуры (от 0.3 до 0.4°C).

Анализ данных, приведенных на рис. 8, показывает, что горизонтальные размеры этих областей лежат в диапазоне мезомасштабов (10–150 м), а их вертикальные размеры – 2–4 м.

Для более детального анализа поля флуктуаций температуры целесообразно рассмотреть трехмерное представление их среднеквадратичных значений, приведенное на рис. 9.

Как следует из данных, приведенных на этом рисунке, в диапазоне глубин залегания термоклина имеется резкое повышение уровня σ по сравнению с другими горизонтами.

На рис. 10 приведен пример нормированной на дисперсию автокорреляционной функции (коэффициент автокорреляции) флуктуаций температуры в области залегания сезонного термоклина (глуб. 14 м). Длительность временной выборки составляла 1 ч, что соответствует массиву данных в 1800 точек.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что наименьший масштаб автокорреляции (первое пересечение нуля) также имеет величину $\tau_{\min} \cong 50$ с – наименьший линейный масштаб $L_{\min} = Ug \cdot \tau_{\min} \cong 10$ м. Соответственно наибольший линейный масштаб (вхождение коэффициента автокорреляции в диапазон ± 0.02) составляет величину порядка 200 м. Короткопериодные колебания коэффициента автокорреляции имеют период $\tau_k \cong 140$ с.

Нормированная на дисперсию спектральная плотность мощности флуктуаций температуры, определенная для того же пространственно-временного интервала, (рис. 11) демонстрирует наличие трех основных составляющих спектра, характерных для следующих типов течений, а именно: 1) короткопериодных внутренних волн, характеризующихся зависимостью спектральной плотности мощности от частоты по степенному закону «–2» [7]; 2) двухмерной плоской турбулентности (закон «–3») [14, 18]; 3) переходной зоны, что свидетельствует о наличии области спектра, в которой осуществляется порождение пульсационной энергии за счет сдвигов средней скорости течений, а также ее перенос от короткопериодных многомодовых внутренних волн к возмущениям вихревого и турбулентного характера.

Приведенные данные дают представление о сложной многомасштабной волно-вихревой структуре поля температуры.

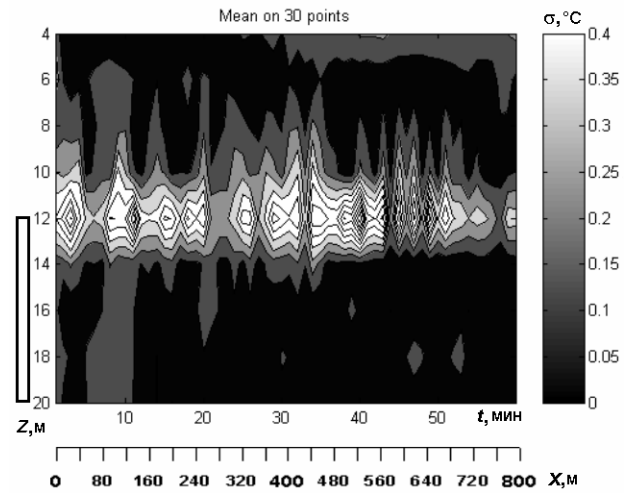


Рис. 8. Поле среднеквадратичных значений флуктуаций температуры.

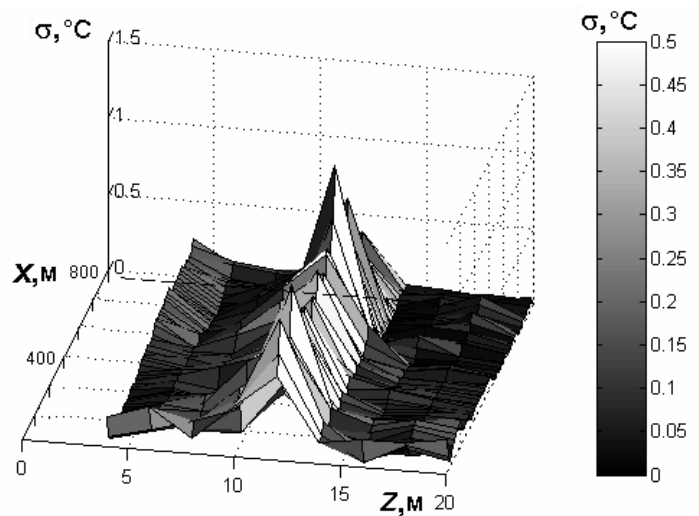


Рис. 9. Трехмерное представление поля среднеквадратичных значений флуктуаций температуры.

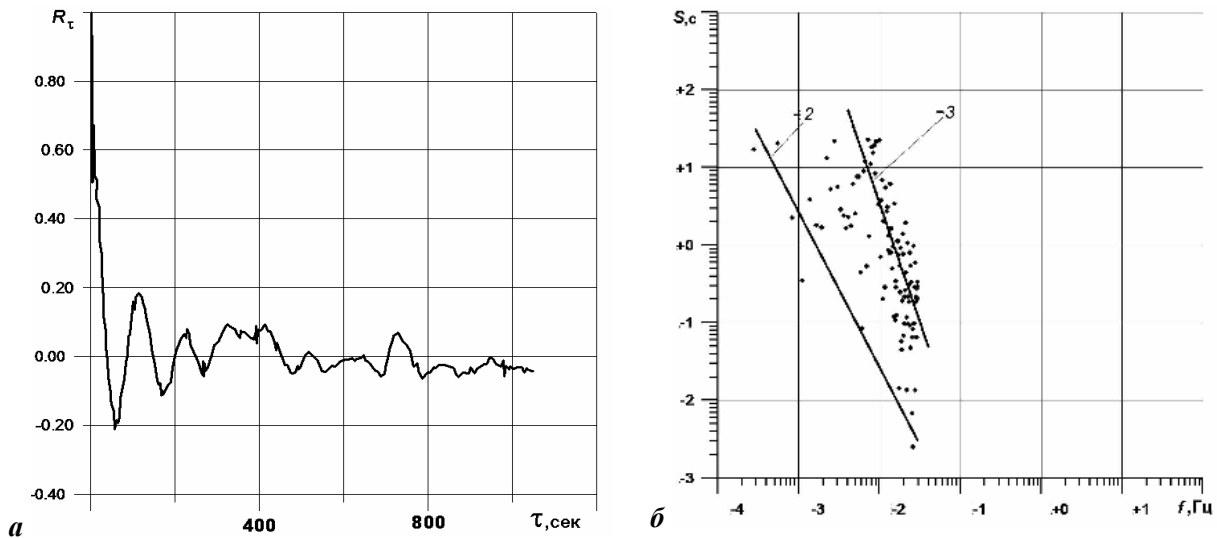


Рис. 10. Коэффициент автокорреляции (а) флуктуаций температуры в области сезонного термоклина и спектральная плотность мощности (б).

Анализ результатов измерений поля скорости. Результаты анализа экспериментальных данных по полю скорости свидетельствуют о том, что наибольшие ее значения имеют место в слоях жидкости, расположенных в районе термоклина, что подтверждается примерами панорамных картин поля скорости (рис. 11, а, б). На этих рисунках шкала значений скорости приведена справа, рядом представлены вертикальные профили горизонтальной компоненты V_y и модуля скорости V_m .

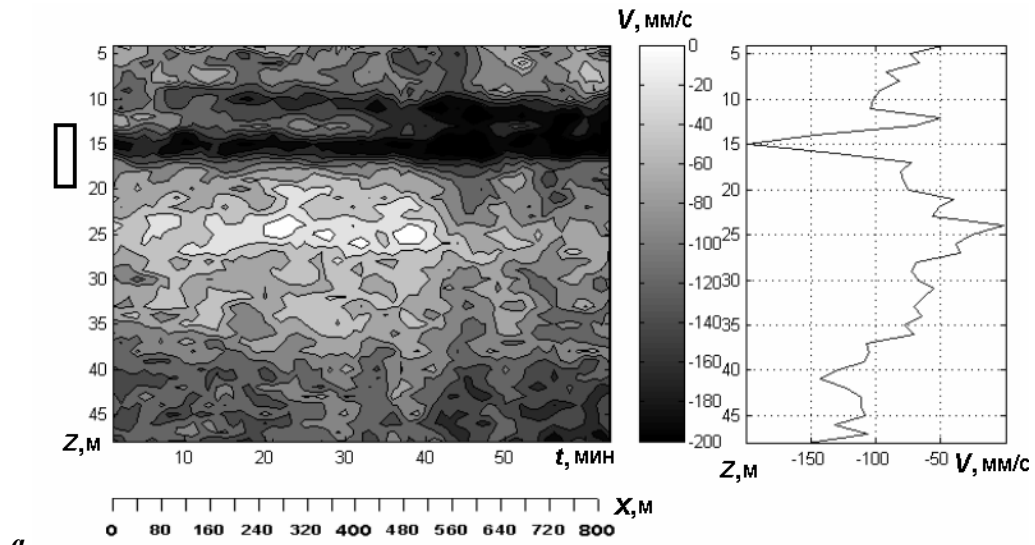
Анализ всего массива данных показал что, горизонтальная компонента скорости в области термоклина имеет наибольшие значения, порядка 200–250 мм/с, вертикальная – 20–50 мм/с, модуль скорости 250–300 мм/с.

При этом имеет место наличие существенных сдвигов в вертикальных профилях скорости и замкнутых локализованных в пространстве областей равной скорости. Горизонтальные масштабы этих структур лежат в диапазоне от 40–50 до 200–300 м. Наличие этих замкнутых областей в выделенном диапазоне пространственных масштабов может быть обусловлено существованием вихревых структур в исследованном диапазоне глубин. Источниками образования вихревых структур могут быть внутренние волны, сдвиговые течения и другие факторы. Более мелкомасштабные структуры в поле скорости в данном случае могут быть отнесены к разряду некорректных измерений.

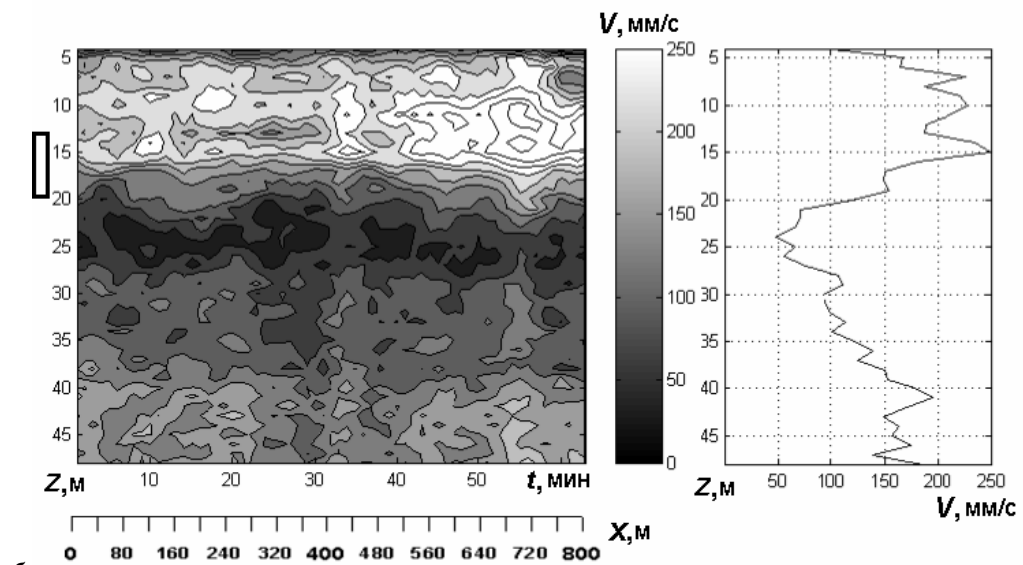
Прямым доказательством существования вихревых структур в исследованной области Черного моря могут служить результаты обработки данных натурных измерений поля скорости, где определена горизонтальная компонента ротора скорости [19]:

$\text{rot}_y V = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$ (рис. 12). На этом рисунке шкала значений горизонтальной компоненты ротора скорости приведена справа.

Оценки величин скоростей вращения элементов жидкости, лежащих в диапазоне мезомасштабов показывают, что в данном случае они находятся в следующих пределах: $-0.16 \leq \omega_y = \pi \text{rot}_y V \leq 0.16$ в рад/с; при этом абсолютные значения данной величины изменяются в широком диапазоне: $0.016 \leq |\omega_y| \leq 0.16$ в рад/с. Результаты анализа всего массива полученных экспериментальных данных дают: $0.016 \leq |\omega_y| \leq 0.3$ в рад/с.



a



б

Рис. 11. Горизонтальная компонента (*a*) и модуль (*б*) скорости.

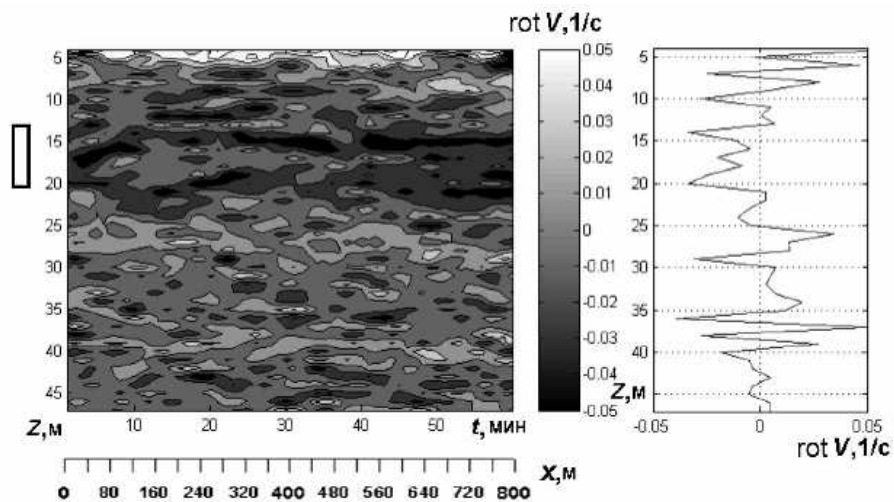


Рис. 12. Поле ротора скорости (горизонтальная компонента) и его вертикальный профиль по данным натуральных измерений (осреднение 3 мин) в диапазоне глубин 5–45 м.

Таким образом, показано, что в верхнем слое Черного моря элементы жидкости в диапазоне мезомасштабов совершают вращательные движения в горизонтальной плоскости. При этом диапазон времени, за которое происходит один оборот, лежит в пределах $21\text{с} \leq \tau \leq 393\text{с}$. Такой широкий диапазон значений τ может быть следствием существования различных источников вихреобразования, в частности внутренних волн и сдвиговых эффектов в вертикальных профилях скорости.

Результаты натурных измерений поля скорости были применены для определения деформационных составляющих движения жидкости. Компоненты тензора скоростей деформаций в потоке жидкости могут быть записаны в виде [19]

$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix}$$

где диагональные компоненты S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} равны скоростям относительных сжатий и растяжений элементов жидкости вдоль соответствующих осей координат: $S_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}$; $S_{yy} =$

$= \frac{\partial v}{\partial y}$; $S_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$. Недиagonальные компоненты тензора скоростей деформаций равны по-

ловицам скоростей сдвига элементов жидкости: $S_{xy} = S_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$; $S_{yz} = S_{zy} =$

$= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$; $S_{zx} = S_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$.

На рис. 13 приводится пример пространственно-временного распределения компонент тензора скоростей деформаций: S_{xx} (рис. 13, а); S_{zz} (рис. 13, б); S_{xz} (рис. 13, в), определенных по результатам экспериментов. Здесь u , v , w – соответственно продольная, поперечная и вертикальная компоненты скорости, измеренные с помощью профилографа, а x и z – соответственно продольная координата в системе координат, связанной с судном, и глубина. На этих рисунках шкалы значений компонент тензора скоростей деформаций в 1/с приведены справа.

Как следует из данных, представленных на рис. 13, компоненты тензора скоростей деформаций в области залегания сезонного термоклина также имеют неоднородное распределение в пространстве с наличием локализованных структур в диапазоне мезомасштабов.

При обработке экспериментальных данных частные производные в соотношениях для компонент ротора скорости и тензора скоростей деформаций были заменены соответствующими конечными приращениями.

Для более детального анализа характеристик поля скорости целесообразно рассмотреть трехмерные представления модуля скорости $|V|$, горизонтальной компоненты ротора скорости $\text{rot}_y V$ и компоненты тензора скоростей деформаций приведенные на рис. 14, а–в. Здесь по вертикальным осям отложены соответственно значения $|V|$, $\text{rot}_y V$, S_{xz} ; по горизонтальным осям – координата X и глубина Z , шкалы значений соответствующих параметров поля скорости приведены с правых сторон каждого рисунка.

Как следует из данных, приведенных на рис. 14, а, в диапазоне глубин залегания термоклина имеется резкое повышение уровня модуля скорости по сравнению с другими горизонтами.

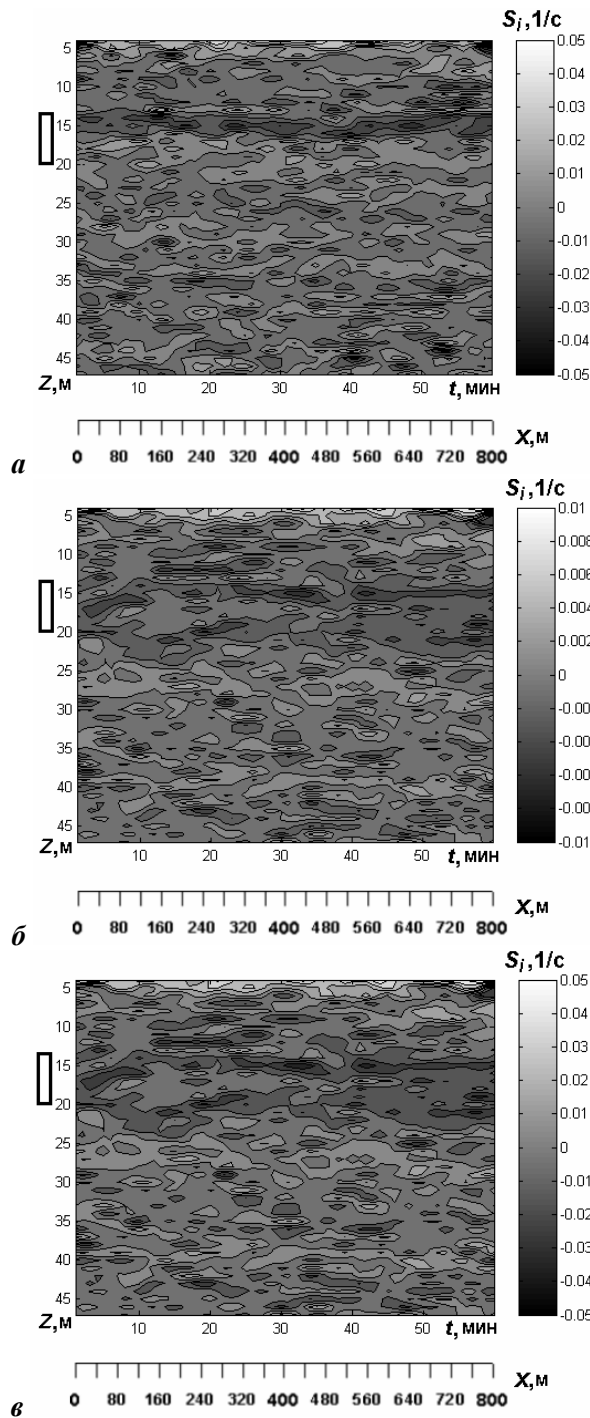


Рис. 13. Поле компонент тензора скоростей деформаций.

Трехмерное представление поля горизонтальной компоненты ротора скорости (рис. 14, б) показывает, что максимальные значения этой величины имеют место в районе верхней и нижней границ термоклина, что соответствует правой части рис. 12. Область максимальных значений $rot_x V$ совпадает с зоной максимальных вертикальных градиентов средней скорости (правые части рис. 11, а, б).

Имеет место аналогичная тенденция в трехмерном распределении компонент тензора скоростей деформаций (рис. 14, в).

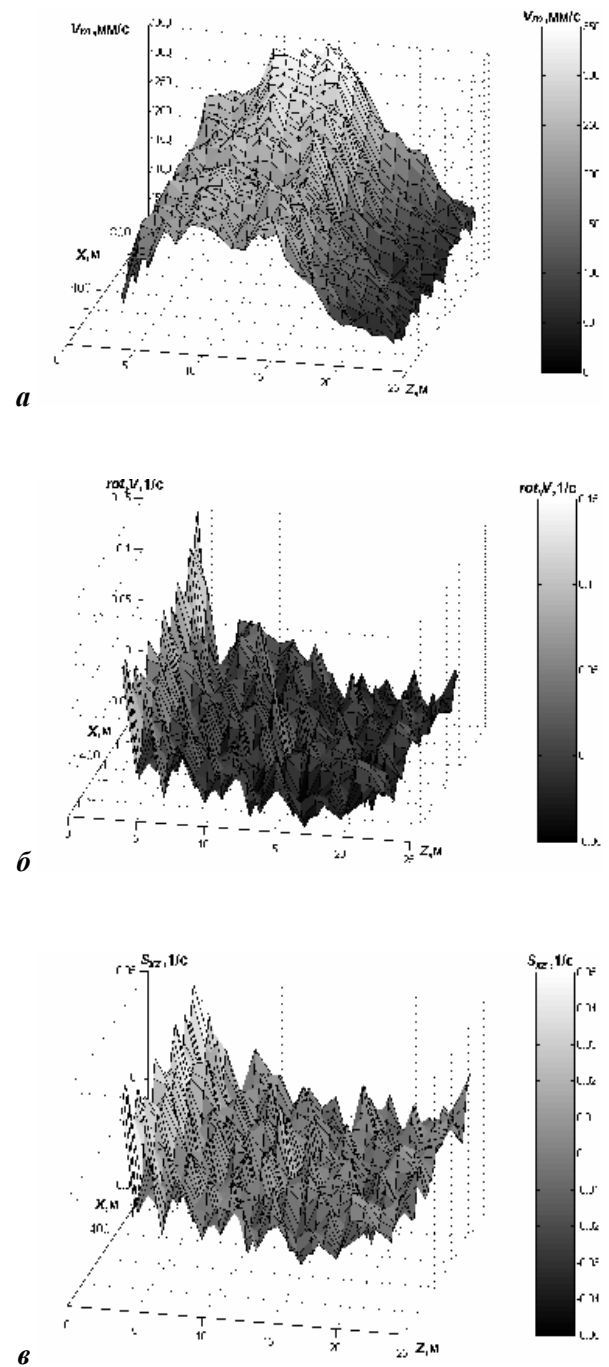


Рис. 14. Трехмерные представления полей модуля скорости (а), горизонтальной компоненты ротора скорости (б) и компоненты S_{xz} тензора скоростей деформаций (в).

В заключение можно отметить, что результаты проведенных в настоящей работе многогоризонтных измерений полей температуры и скорости и их анализ показал, что область сезонного термоклина является динамически активной и характеризуется рядом структурных особенностей. В области сезонного термоклина наблюдаются возмущения волновой, вихревой и турбулентной природы, которые обладают повышенными значениями своих параметров. Мезомасштабная структура сезонного термоклина (диапазон горизонтальных масштабов: десятки–сотни метров) характеризуется наличием распределенных по пространству многочисленных замкнутых локализованных областей в виде «пятен» сложной конфигурации с равными величинами соответствующих характеристик гидрофизических полей. Сделаны оценки величин масштабов этих структур. Определены диапазоны среднеквадратичных значений флуктуаций температуры, средней скорости, горизонтальной компоненты ротора скорости и угловой скорости вращения, компонент тензора скоростей деформаций.

Авторам не удалось обнаружить опубликованные работы, содержащие аналогичные результаты комплексных экспериментов по одновременному определению пространственно-временных характеристик полей скорости и температуры в области сезонного термоклина Черного моря, с аналогичным высоким пространственно-временным разрешением по глубине и горизонту и последующему анализу тонкой структуры этих полей.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Сектора прикладных программ НЦ РАН за организацию натуральных экспериментов в Черном море в 2005 г., а также за содействие, оказанное ими при подготовке и проведении описанного в статье эксперимента.

Литература

1. Владимирова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Литвин А.Д., Скопин Н.А., Соловьев К.Ю., Родионов М.А. Измерительный комплекс для исследований пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей // Тр. VIII Междун. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2006). СПб., 2006.
2. Владимирова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Козлов А.А., Литвин А.Д., Скопин Н.А. Исследование особенностей гидрофизических процессов в верхнем слое морской среды в целях обеспечения безопасности функционирования морской техники // Тр. IX Междун. конф. «Нева-2007». Тез. докл. СПб., 2007.
3. Владимирова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Козлов А.А., Литвин А.Д., Скопин Н.А. Исследование особенностей гидрофизических процессов в верхнем слое морской среды и обтекание препятствий в поле внутренних волн по данным лабораторных и натуральных экспериментов. Проявление глубинных процессов на морской поверхности // Матер. третьей межведомств. конф. Н. Новгород, 2008.
4. Владимирова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Литвин А.Д., Скопин Н.А. Мезомасштабные структуры гидрофизических полей в верхнем слое морской среды по данным натуральных экспериментов // Тр. IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2008). СПб., 2008.
5. Пака В.Т. Опыт гидрофизических измерений в рамках подспутникового эксперимента // Матер. третьей межведомств. конф. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород, 2008. С.130–143.
6. Волженский М.Н., Родионов А.А., Семенов Е.В., Филатов Н.Н., Зимин А.В., Булатов М.Б. Опыт верификации оперативной модели для мониторинга гидрофизических полей Белого моря в 2004–2008 гг. // Российская академия наук. Санкт-Петербургский Научный Центр. Сб. науч. тр. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». №3(5) СПб.: Наука, 2009. С.33–41.
7. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / Под ред. Б.А.Нелепо. Л.: Гидрометеоздат, 1984.
8. Репина И.А., Смирнов А.С. Мезомасштабные структуры в приводном слое атмосферы в районе свала глубин в море Лаптевых // Матер. третьей межведомств. конф. «Проявление глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород, 2008. С.5–15.
9. Пака В.Т., Кушиков В.В. Об использовании термохалотралов в режиме буксировки // Океанология. 1989. Т.29, № 1. С.160–163.
10. Пака В.Т., Бамбозов Г.А., Голенко Н.Н., Зарубин Е.П., Маслов В.А., Подуфалов А.П. Сканирующий буксируемый мультizonдовый комплекс – термохалотрал // Океанология. 1994. Т.37, № 5. С.668–679.

11. *Gorbatsky V., Ivanov G., Ivanov D., Litvin A.* The hydrodynamic processes and diffusion of the phytoplankton in the east part of the Gulf of Finland // Proceeding of the seminar of the Gulf of Finland Year 1996, 17–18 March, Helsinki, Finland.
12. *Litvin A.D., Chumakov Y.S., Gorbatsky V.V., Argannikov A.V., Ivanov D.V.* Experimental investigation of turbulent exchange parameters of a shear flow under conditions of temperature and vertical density gradients // EUROMECH colloquium 377 «Stability and control of shear flows with strong temperature and density gradients». Book of Abstracts. Prague, Czech Republic.
13. *Litvin A.D., Chumakov Y.S., Ivanov D.V., Kuzmitsky V.A.* Investigation of wind turbulent flow interaction with near surface water currents in shallow sea area // 24th General Assembly of European Geophysical Society, The Hague, Holland, April 19–23. 1999. Book of Abstracts.
14. *Gorbatsky V.V., Ivanov D.V., Litvin A.D.* Determination of turbulent transfer parameters in a coastal sea area by application of the ADCP devices // Proc. of the IEEE conference «OCEAN'S 98» 28 September – 1 October 1998. Nice, France.
15. *Владимирова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Литвин А.Д., Скопин Н.А.* Пространственные исследования тонкой структуры полей скорости и температуры в морской среде // XLII Крыловские чтения. Тез. докл. СПб., 2006.
16. *Arzannikov A., Gorbatsky V., Ivanov D., Ivanov G., Litvin A.* Application of the combined set of the ADCP system and electromagnetic three component current meter for the turbulent currents investigations // Proc. of the IEEE Workshop «OCEAN'S-99». San Diego, USA.
17. *Bendat J., Piersol A.* Random data: analysis and measurement procedures // New-York, London, Sydney, Toronto, 1969.
18. *Powell T., Okubo A.* Turbulence, diffusion and patchiness in the sea // Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 343, 11–18, 1994.
19. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. С.56–69.

Статья поступила в редакцию 19.10.2009 г.

