

Гидрологические условия в западной части Черного моря в ноябре 2015 года (по материалам 81-го рейса НИС «Профессор Водяницкий»)

© 2016 Ю.В. Артамонов, Д.В. Алексеев, С.И. Кондратьев,
Е.А. Скрипалева, С.А. Шутов, В.Н. Лобачев, Р.О. Шаповалов,
А.В. Федирко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: sea-ant@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.03.2016 г. После доработки 04.05.2016 г.

Приведены результаты гидрологических исследований, выполненных в ноябре 2015 г. у берегов Крыма и в северо-западной части Западного циклонического круговорота Черного моря. Показано, что Основное Черноморское течение было представлено прибрежной ветвью над свалом глубин и южной ветвью, проходящей через центральную часть основного полигона. Над прибрежным шельфом было зафиксировано подповерхностное противотечение юго-восточного направления. На всей акватории исследования температура в поверхностном слое была выше климатической нормы. Высокие положительные аномалии фактической температуры прослеживались у берегов Крыма в области максимальных межгодовых вариаций и в южной части района работ – в области повышения синоптической изменчивости и понижения – межгодовой. Положительные аномалии температуры в ядре холодного промежуточного слоя в ноябре 2015 г. относительно климатической нормы согласуются с общей тенденцией повышения температуры поверхности моря на многолетнем масштабе.

Ключевые слова: Черное море, термохалинные поля, Основное Черноморское течение, холодный промежуточный слой, Западный циклонический круговорот, разрез Херсонес – Босфор, пространственно-временная изменчивость.

Введение. Исследования в 81-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» проводились в рамках проектов Морского гидрофизического института «Фундаментальная океанология» и «Климат» и программы Института океанологии им. П.П. Ширшова (Москва) согласно договору № 07-09 от 7 сентября 2015 г. между ИО РАН и МГИ. Основной задачей экспедиции было исследование биогеохимических, оптических и седиментационных процессов, протекающих в Черном море. Цель океанографических работ заключалась в оценке гидрологических условий, на фоне которых формировались особенности биогеохимических и оптических характеристик морской воды.

Работы проводились 3 – 10 ноября 2015 г. на Вековом разрезе Херсонес – Босфор и в северо-западной части Западного циклонического круговорота (ЗЦК) Черного моря. Район исследований имеет гидрологические особенности, проявляющиеся в сезонной и межгодовой изменчивости полей температуры, солености и геострофической скорости [1 – 6]. На основе данных контактных и спутниковых измерений показано, что здесь отмечается максимум сезонной изменчивости зональной скорости Основного Черноморского течения (ОЧТ). К югу от Крымского п-ова наблюдается минимум сезонных вариаций температуры поверхности моря (ТПМ). У берегов Крыма в период наибольшего усиления ОЧТ в конце зимы – начале весны четко выражен

«язык» теплых вод, приносимых из восточных районов Черного моря, что сглаживает внутригодовые температурные контрасты [3, 4]. К востоку от 33° в. д. вдоль побережья Крыма заметно уменьшается амплитуда сезонных колебаний солености поверхности моря (СПМ) [4]. В районе исследований ближе к Крымскому побережью отмечается увеличение вклада межгодовых вариаций в общую изменчивость поля ТПМ [4]. Обобщение результатов контактных гидрологических измерений на разрезе Херсонес – Босфор за 2007 – 2013 гг. выявило повышение температуры в холодном промежуточном слое (ХПС), что согласуется с общим потеплением верхних слоев Черного моря и подтверждается распределениями межгодовых аномалий ТПМ по спутниковым данным [6 – 8].

Таким образом, обобщение результатов предшествующих исследований показывает, что работы в 81-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» проводились в районе с довольно сложными на сезонном масштабе гидрологическими условиями, на которые оказывали влияние синоптические и межгодовые вариации.

В настоящей работе представлены результаты анализа структуры гидрологических полей на Вековом разрезе Херсонес – Босфор и в северо-западной части ЗЦК в ноябре 2015 г. Фактические распределения термохалинных характеристик в период съемки сопоставлялись с климатическими полями по данным массивов гидрологических и спутниковых измерений. Для интерпретации особенностей наблюдаемой термохалинной структуры вод привлекались данные инструментальных измерений течений, выполненных в рейсе квазисинхронно с гидрологическими наблюдениями.

Материалы и методика. Схема расположения и номера станций 81-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» показаны на рис. 1, а. На каждой станции от поверхности до дна с помощью комплекса *Sea-Bird 911 plus* измерялись температура и соленость морской воды. На всех станциях в верхнем 200-метровом слое измерялись три компонента скорости течений с помощью акустического измерителя *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*.

Для интерпретации особенностей структуры вод, полученных в ходе экспедиции, анализировались климатические гидрологические условия в районе исследований и оценивались уровни их синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости. С этой целью использовались данные климатического массива гидрологических измерений БОД МГИ [9] и массива спутниковых измерений *MyOcean Pathfinder V5.2 (PFV52) AVHRR* с высоким пространственно-временным разрешением, содержащего среднесуточные значения ТПМ в узлах регулярной сетки $0,04 \times 0,04^\circ$ с января 1982 г. по январь 2016 г. [10]. Согласно [11], временной период более 30 лет является достаточным для получения статистически значимых климатических норм и позволяет оценить тенденции межгодовой изменчивости, а среднесуточное осреднение дает возможность оценить уровень синоптической изменчивости.

По спутниковым данным [10] в каждом узле сетки для всего Черного моря рассчитывались синоптические, сезонные и межгодовые среднеквадратические отклонения (СКО) ТПМ. Синоптические СКО ТПМ вычислялись по среднесуточным рядам ТПМ для каждого месяца каждого года и далее ос-

реднялись за все 397 мес ($СКО_{\text{син}}$). Для расчета сезонных СКО по среднесуточным значениям ТПМ были получены временные ряды ее среднемесячных значений, по которым рассчитывались СКО ТПМ для каждого года, которые в свою очередь затем осреднялись за 33 года ($СКО_{\text{сез}}$). Межгодовые СКО рассчитывались по временным рядам из 33 среднемесячных значений ТПМ для января, февраля и т. д., которые затем осреднялись за все 12 мес ($СКО_{\text{меж}}$).

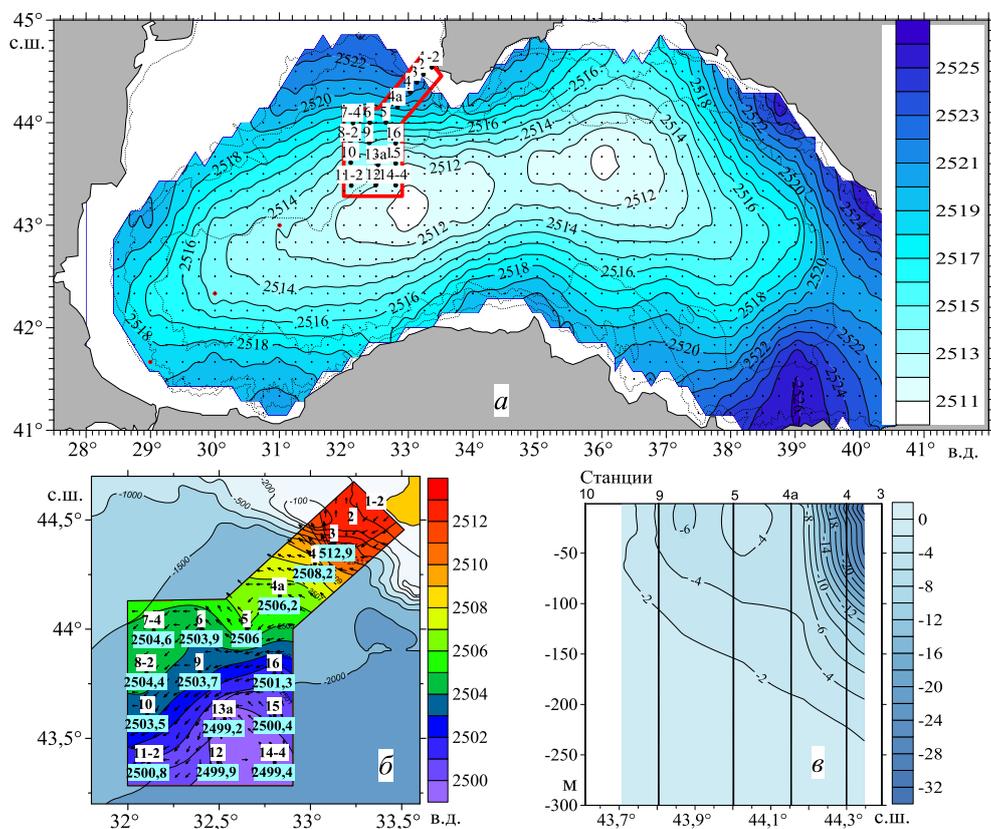


Рис. 1. Климатическая динамическая топография (0/300) для ноября (район проведения работ выделен красным цветом, черными точками показано положение гидрологических станций) – а; динамическая топография (0/300) и векторы геострофических потоков на поверхности в период съемки 3 – 10 ноября 2015 г. – б; геострофические скорости (см/с) в период съемки по нормали к разрезу Херсонес – Босфор, проходящему через ст. 3, 4, 4а, 5, 9, 10, – в

Для определения фазы низкочастотной изменчивости ТПМ, на которую приходился период проведения экспедиционных измерений, по данным [10] были рассчитаны аномалии средних месячных ТПМ как разности между величинами ТПМ для конкретного месяца каждого года и ее средними климатическими значениями за этот месяц.

Интерпретация особенностей фактической термохалинной структуры вод проводилась с привлечением ежесуточных спутниковых карт ТПМ для всего Черного моря, инструментальных измерений течений и результатов геострофических расчетов по данным съемки, а также распределений векторов модельных геострофических течений [12] в период выполнения съемки.

Основные результаты. Циркуляция вод в районе исследований в ноябре 2015 г. Результаты геострофических расчетов (рис. 1, б, в) и инструментальные измерения течений (рис. 2) показывают, что над свалом глубин на разрезе Херсонес – Босфор прослеживался интенсивный поток северо-западного направления, который можно рассматривать как прибрежную ветвь Основного Черноморского течения. По геострофическим расчетам эта ветвь наблюдалась в слое 0 – 150 м с максимумом скорости (30 см/с) у поверхности (рис. 1, в). По данным инструментальных измерений, наиболее высокие скорости прибрежной ветви ОЧТ прослеживались в верхнем 50-метровом слое. Максимальное значение полного вектора скорости на горизонте 7 м достигало 58 см/с (рис. 2, а), максимум скорости зональной составляющей составлял 20 см/с (рис. 2, ж), меридиональной – 50 см/с (рис. 2, з). С глубиной интенсивность прибрежной ветви ОЧТ ослабевала, и на горизонте 150 м величина вектора скорости уменьшалась до 12,5 см/с (рис. 2, е).

У северного края разреза Херсонес – Босфор над прибрежным шельфом наблюдалось противотечение юго-восточного направления. Этот поток хорошо прослеживался на горизонте 75 м, где величина полного вектора скорости составляла 28 см/с (рис. 2, с). Ядро противотечения располагалось между горизонтами 70 и 80 м с максимумом зональной скорости ~15 см/с, меридиональной – 25 см/с (рис. 2, ж, з).

В центральной части основного полигона прослеживалось усиление потоков юго-западного направления, которое можно интерпретировать как проявление южной ветви ОЧТ (рис. 1, б, в; 2). На разрезе Херсонес – Босфор, проходящем через основной полигон, максимум зональной составляющей инструментально измеренной скорости южной ветви ОЧТ (35 см/с) наблюдался на глубинах 10 – 30 м, меридиональной (15 см/с) – на глубине 70 м (рис. 2, ж, з). По геострофическим расчетам, южная ветвь ОЧТ проявлялась слабо и скорости по нормали к разрезу не превышали 6 см/с (рис. 1, в).

Инструментальные измерения течений показали существенную пространственную изменчивость южной ветви ОЧТ в зависимости от глубины (рис. 2, а – е). В верхнем слое 7 – 75 м эта ветвь пересекала центральную часть полигона, следуя в юго-западном направлении, причем максимальные скорости отмечались непосредственно у юго-западной границы полигона. На верхнем горизонте измерений (7 м) максимум вектора скорости составлял почти 35 см/с, на горизонте 25 м скорость увеличивалась до 41 см/с, а на горизонтах 50 и 75 м снова ослабевала до 33 и 25 см/с соответственно. На горизонте 100 м при дальнейшем ослаблении скорости наблюдалась бифуркация южной ветви ОЧТ. Одна часть потока следовала на запад в зональном направлении, другая его часть по-прежнему была ориентирована на юго-запад. Максимумы векторов скорости в обеих ветвях достигали 15 см/с (рис. 2, д). На горизонте 125 м бимодальная структура потока ОЧТ сохранялась, но скорости обеих ветвей ослабевали и не превышали 8 – 8,5 см/с. На горизонте 150 м южная ветвь ОЧТ снова представляла собой единый квазизональный поток западного направления, при этом наблюдалось некоторое усиление ее интенсивности. Максимум скорости (до 10 см/с) прослеживался у западной границы полигона (рис. 2, е).

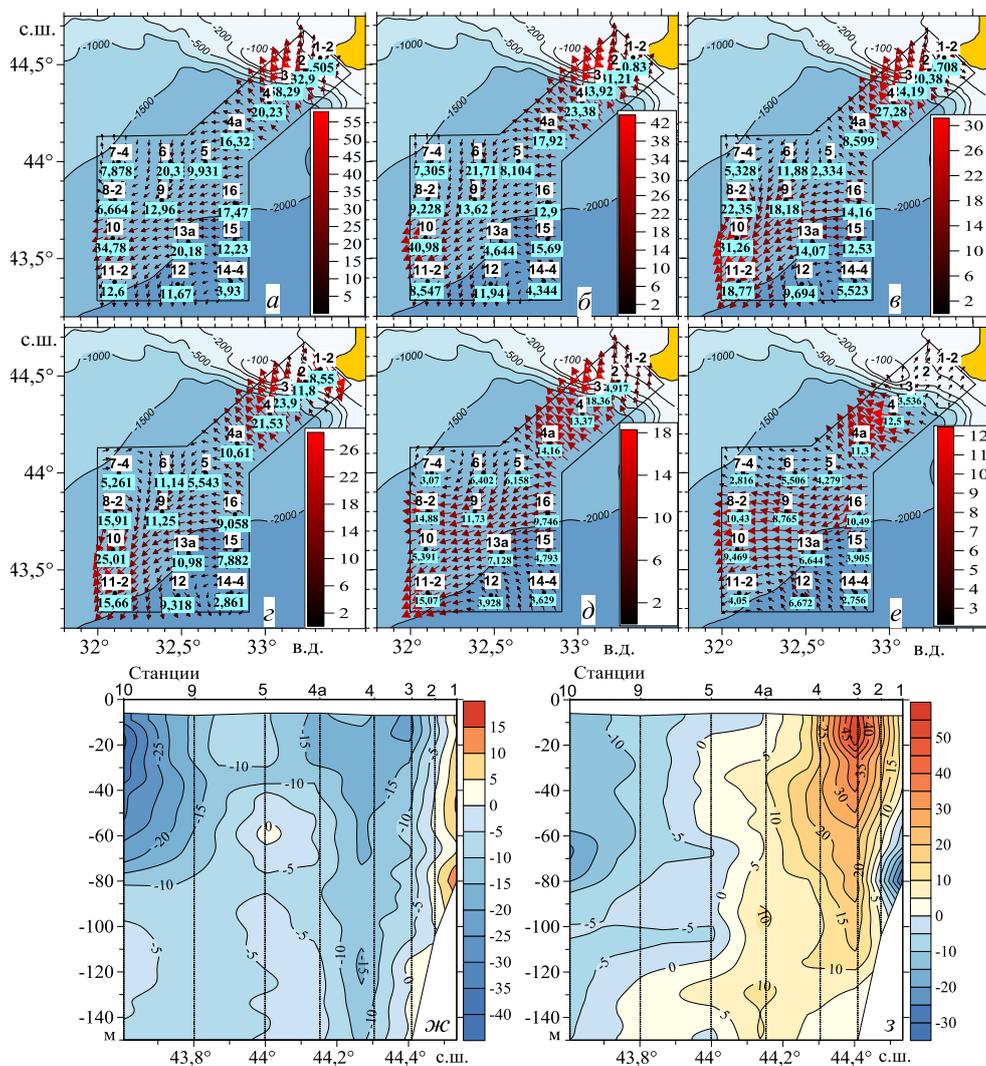


Рис. 2. Векторы течений на горизонтах 7 м (а), 25 м (б), 60 м (в), 100 м (з), 150 м (д), распределения зональной (е) и меридиональной (ж) составляющих скорости течений (см/с) на разрезе Херсонес – Босфор по данным инструментальных измерений

Кроме ветвей ОЧТ, по инструментальным измерениям в пределах полигона можно выделить и другие элементы циркуляции. На северо-западе полигона был зафиксирован антициклонический меандр, который наиболее четко прослеживался в верхнем слое 7 – 25 м и на горизонте 100 м, где он проявлялся в виде замкнутого круговорота (рис. 2, а, б, з). В юго-восточной части полигона в слое 7 – 75 м был обнаружен локальный циклонический меандр (рис. 2, а – в). У северной границы основного полигона в районе ст. 5 на глубинах 55 – 65 м отмечался слабый поток (до 5 см/с) восточного направления (рис. 2, в, ж).

Инструментальные измерения течений, выполненные в рейсе, в поверхностном слое в целом согласуются с модельными течениями [12], показан-

ными на рис. 3. В качестве отличия можно отметить, что на распределениях векторов модельных течений прибрежная ветвь ОЧТ над свалом глубин проявлялась менее четко.

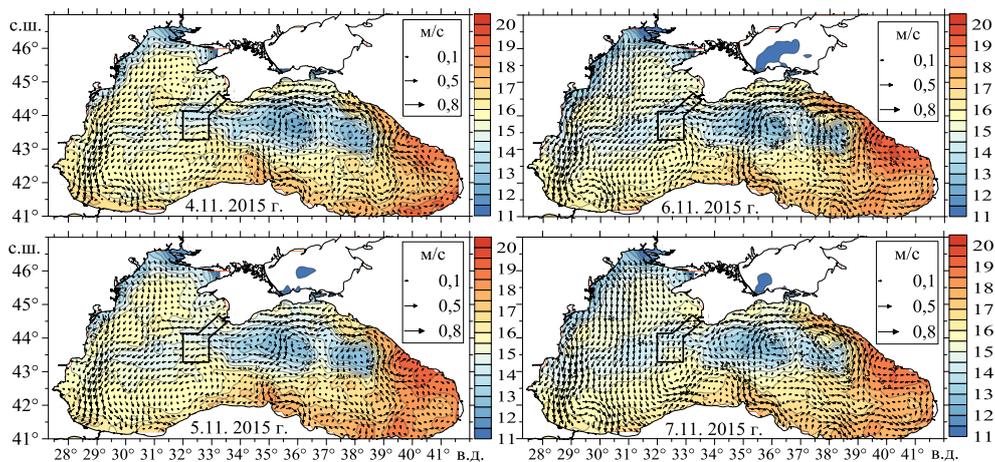


Рис. 3. Векторы модельных течений на фоне среднесуточных распределений ТПМ (°С) по спутниковым данным в период 4 – 7 ноября 2015 г.

Структура термохалинных полей в ноябре 2015 г. Основные структурные особенности термохалинных полей в верхнем деятельном слое четко проявлялись на вертикальных распределениях температуры, солёности и плотности на всех станциях полигона и на разрезе Херсонес – Босфор (рис. 4).

Верхний квазиоднородный слой (ВКС) на большинстве станций имел толщину ~20 – 30 м, на прибрежном шельфе он заглублялся до 75 м (рис. 4, а – в). На некоторых станциях наблюдалась двухступенчатая структура ВКС, при этом температура воды в верхней прослойке была на 1 – 1,5°С выше, чем в нижней. Возникновение таких ступенек связано с изменением синоптических условий в районе исследований.

Характеризуя горизонтальную структуру поля температуры в пределах ВКС (рис. 4, з), отметим, что наиболее теплые воды располагались на мелководье прибрежного шельфа у берегов Крыма (15,8°С) и в юго-восточной части района исследований (15,65°С). Минимум температуры наблюдался в северо-восточной части основного полигона (13,19°С).

Объяснить особенности фактического распределения температуры ВКС позволил анализ спутниковых данных и векторов модельных течений. Из рис. 5 видно, что время выполнения съемки в сезонном цикле ТПМ в 2015 г. приходилось на период охлаждения поверхностных вод, которое наиболее интенсивно происходило в первой половине октября. Судя по конфигурации изотермы 16°С, внутри широтной полосы 43,6 – 43,9° с. ш., пересекающей центральную часть района работ, охлаждение проходило быстрее, чем к северу и югу от нее (рис. 5). Анализ карт векторов течений для всего Черного моря показал, что эта особенность сезонной изменчивости ТПМ в значительной степени связана с циркуляцией вод. В период съемки наиболее холодные воды располагались в восточной части моря, ближе к центру Восточного циморской гидрофизический журнал № 4 2016

клонического круговорота (ВЦК). При этом в пределах ВЦК прослеживались две отдельные области вод минимальной температуры – западная, между 35 и 36,5° в. д., и восточная, между 37 и 38,5° в. д. Эти области совпадали с положением двух локальных циклонических круговоротов, которые хорошо прослеживались на картах модельных поверхностных течений (рис. 3). «Язык» относительно холодных вод из западной области распространялся вдоль ОЧТ и пересекал центральную часть района работ, что согласуется с распределением фактической температуры в период съемки.

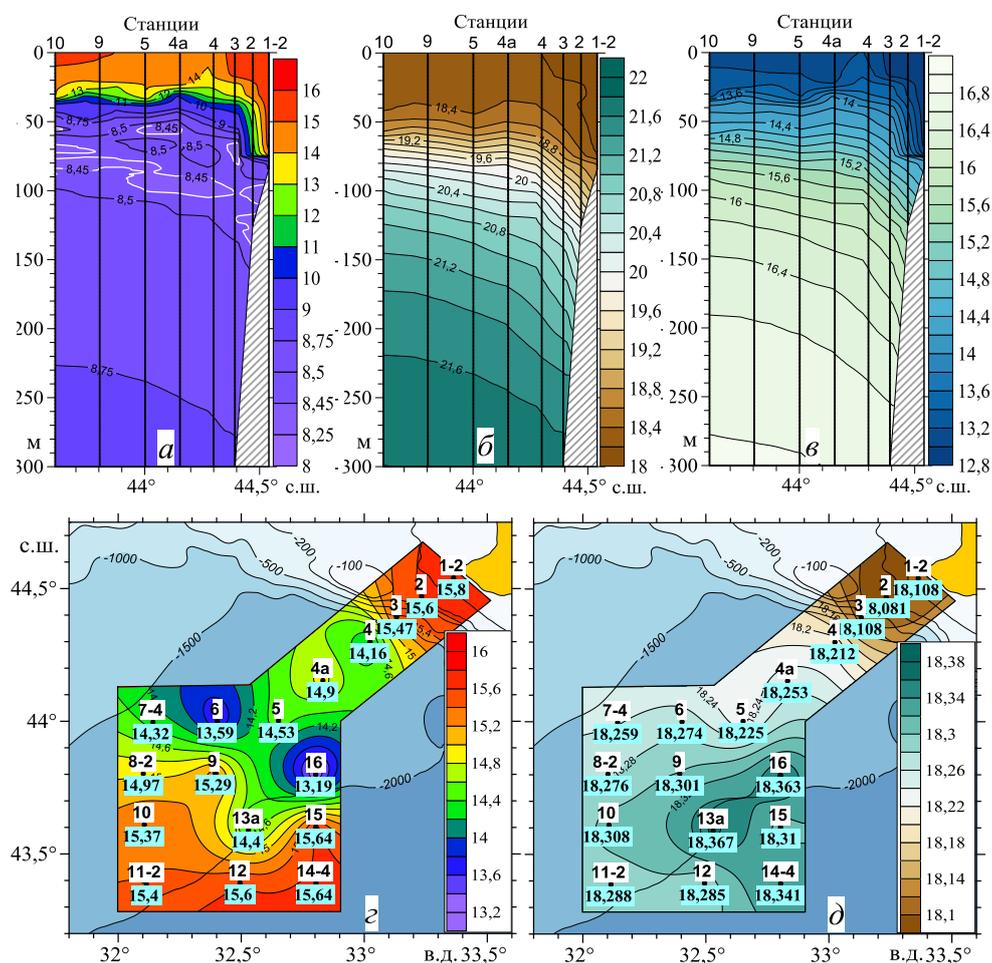


Рис. 4. Вертикальные распределения температуры (°C) (а), солёности (‰) (б) и плотности (усл. ед.) (в) на разрезе Херсонес – Босфор и распределения температуры (в) и солёности (д) на акватории съемки на горизонте 1 м в период 3 – 10 ноября 2015 г.

Более высокую температуру ВКС в северной и южной частях района исследований также можно объяснить адвекцией вод поверхностными течениями. На мелководье теплые воды поступали вдоль северной периферии ОЧТ, что подтверждается спутниковыми картами ТПМ и распределениями векторов модельных течений (рис. 3). В южную часть полигона теплые воды

проникали вдоль восточной периферии циклонического круговорота, который располагался в западной части моря ближе к Анатолийскому побережью (рис. 3).

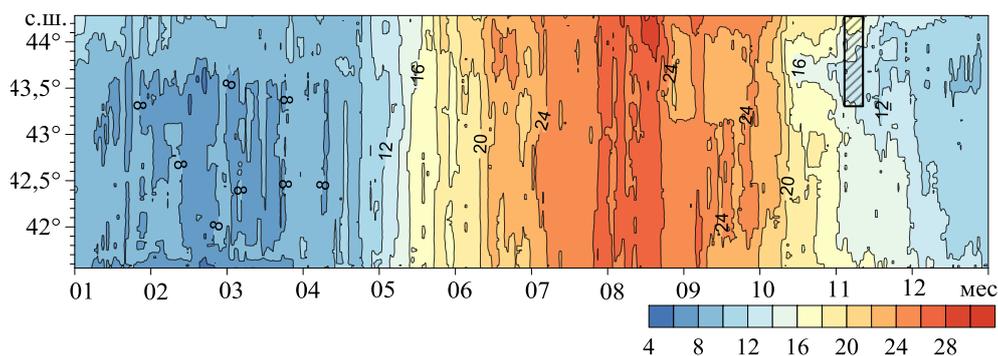


Рис. 5. Внутригодовой ход температуры (°C) в 2015 г. по среднесуточным спутниковым данным на разрезе Херсонес – Босфор. Штриховкой отмечены период и район выполнения экспедиционной съемки

Горизонтальное распределение солёности в пределах ВКС (рис. 4, д) качественно соответствовало ее климатическому распределению, согласно которому наблюдалось повышение солёности в южном направлении ближе к центру ЗЦК. Наиболее распресненные воды (18,08‰) располагались в прибрежной шельфовой зоне у берегов Крыма, самые солёные (18,37 – 18,44‰) – в глубоководных восточной и южной частях полигона. При этом область вод повышенной солёности вытягивалась в виде «языка» вдоль южной ветви ОЧТ, которая хорошо прослеживалась по распределению векторов инструментально измеренных течений (рис. 2, а, б).

Особенности циркуляции вод отражались и в распределениях характеристик слоя скачка. Большие значения (по абсолютной величине) вертикального градиента температуры (максимум $4,21^{\circ}\text{C}/1\text{ м}$) наблюдались на юго-востоке основного полигона, т. е. на южной периферии южной ветви ОЧТ, ближе к центру ЗЦК (рис. 6, а). Здесь глубины слоя скачка были относительно невелики и составляли 25 – 28 м (рис. 6, б). В северном направлении значения градиентов температуры в слое скачка уменьшались, а глубина его залегания увеличивалась, достигая соответственно $0,8^{\circ}\text{C}/1\text{ м}$ и 42 м на ст. 6 у северной границы полигона. Локальный подъем слоя скачка до глубины 27 м наблюдался в районе ст. 4а в зоне дивергенции южной и прибрежной ветвей ОЧТ (рис. 2, б), при этом значение градиента температуры возрастало до $1,73^{\circ}\text{C}/1\text{ м}$. Ближе к свалу глубин и на шельфе, где проходила прибрежная ветвь ОЧТ, глубина слоя скачка, как и глубина ВКС, увеличивалась с юга на север от 36 м на ст. 4 до 76 м на ст. 1-2. При этом, в отличие от зоны действия южной ветви ОЧТ, величины градиентов здесь возрастали в северном направлении (рис. 6, а, б). Самые высокие значения градиента ($3,01^{\circ}\text{C}/1\text{ м}$) отмечены на ст. 1-2, где по инструментальным измерениям наблюдалось противотечение юго-восточного направления (рис. 2, г, ж, з). Обострение градиен-

тов температуры на прибрежном шельфе могло вызвать взаимодействие южной ветви ОЧТ и прибрежного противотечения.

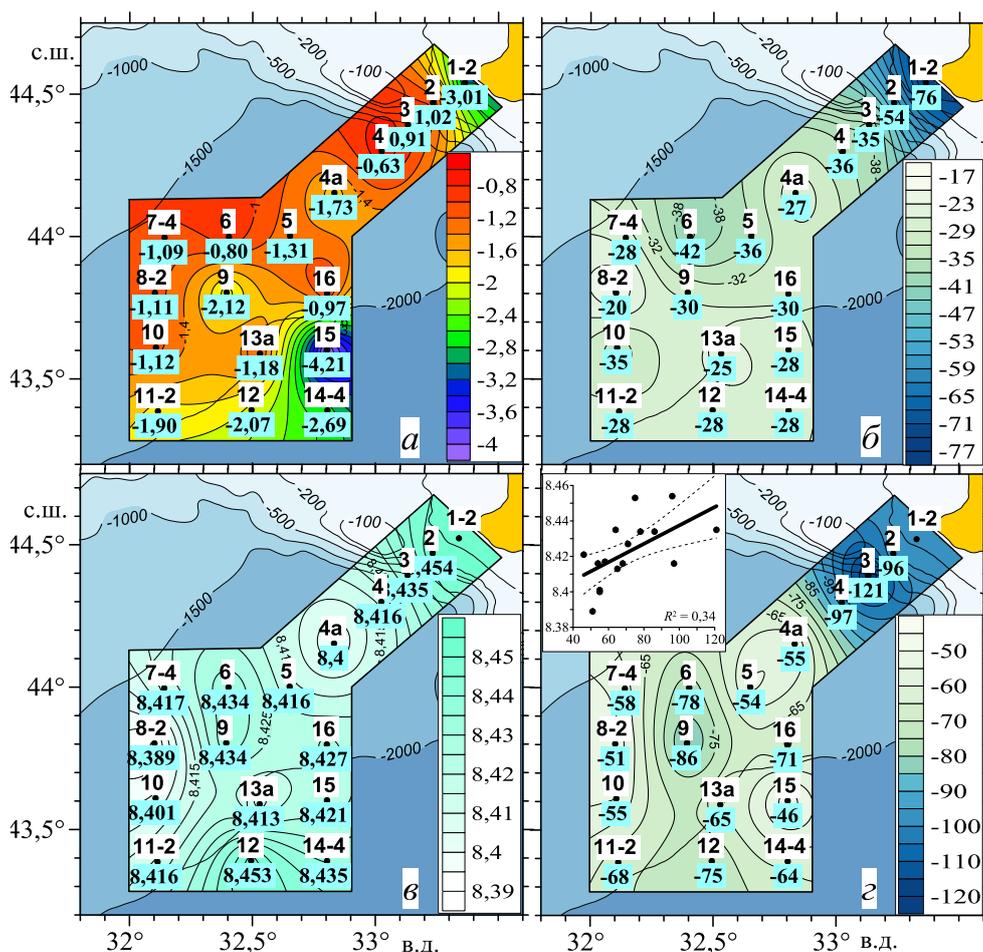


Рис. 6. Распределения величин максимального вертикального градиента температуры ($^{\circ}\text{C}/1\text{ м}$) (а) и глубины его залегания (м) (б), температуры в ядре ХПС ($^{\circ}\text{C}$) (в) и глубины его залегания (м) (г) в период съемки. Врезка на фрагменте г – график линейной связи между температурой в ядре ХПС (ось ординат) и глубиной его залегания (ось абсцисс), штриховые линии – границы 95%-ного доверительного интервала

Ниже слоя скачка располагался холодный промежуточный слой (ХПС), значения температуры в ядре которого изменялись слабо ($8,39 - 8,45^{\circ}\text{C}$) (рис. 6, в). В то же время глубина залегания ядра ХПС изменялась в широком диапазоне: от 46 м на периферии южной ветви ОЧТ в юго-восточной части полигона до 121 м над свалом глубин (рис. 6, г). В целом пространственное распределение глубины ядра ХПС носило достаточно сложный характер. Это связано с тем, что ХПС имел неоднородную вертикальную структуру, и на большинстве станций отмечались два, а на некоторых три минимума температуры. Например, на разрезе Херсонес – Босфор, пересекающем основной полигон, между ст. 4а и 5 наблюдался разрыв ХПС, при этом верхняя про-

слойка вод минимальной температуры прослеживалась в слое 50 – 60 м, нижняя – в слое 75 – 100 м (рис. 4, а). Этот эффект мог быть вызван потоком с восточной составляющей скорости, который наблюдался по данным инструментальных измерений на глубине 60 м (рис. 2, в, ж). Аналогичные разрывы ХПС прослеживались на ст. 2 и 3 (рис. 4, а), где сказывалось влияние прибрежного противотечения (рис. 2, г, ж, з).

В распределении характеристик ХПС можно отметить тенденцию к росту температуры в ядре ХПС при увеличении глубины его залегания. Между этими параметрами была выявлена значимая прямая линейная корреляция с величиной $R \sim 0,58$ (рис. 6, г, врезка). Увеличение значений температуры в слое ХПС при его заглублении можно объяснить более интенсивным вертикальным перемешиванием по сравнению с вышележащими стратифицированными слоями.

Под ХПС в слое 100 – 200 м вследствие генерального заглубления основного термоклина и галоклина в северном направлении наблюдалась тенденция к уменьшению значений температуры и солености с севера на юг. На горизонте 100 м в южной части полигона температура воды достигала 8,57°C, соленость – 20,9‰. Над свалом глубин температура понижалась до 8,43 – 8,44°C, соленость – до 19,67‰. Наиболее распресненные воды (19,04‰) располагались в прибрежной шельфовой зоне у берегов Крыма (рис. 7). Распределения температуры и солености глубже 200 м в целом соответствовали структуре вод в глубинных слоях Черного моря [1], а фактические значения термохалинных параметров были близки к климатическим нормам.

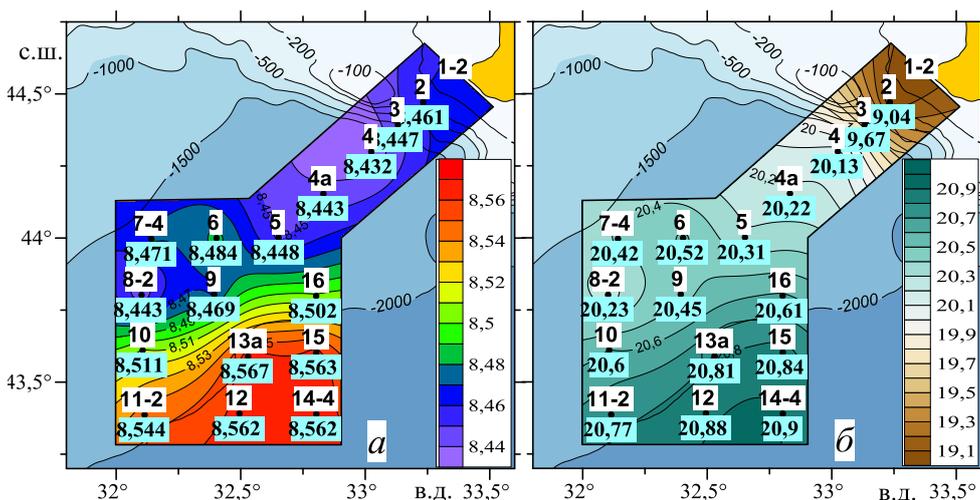


Рис. 7. Распределения температуры (°C) (а) и солености (‰) (б) на горизонте 100 м в период 3 – 10 ноября 2015 г.

Аномалии термохалинных полей в ноябре 2015 г. Распределения аномалий фактических значений температуры в период съемки относительно их среднемесячных климатических значений по данным [9] показали, что на всей акватории исследований температура в поверхностном слое была выше

климатической нормы. Максимальные аномалии наблюдались на прибрежном шельфе (до 2,75°C) и в юго-восточной части основного полигона (2,6 – 2,7°C) (рис. 8, а).

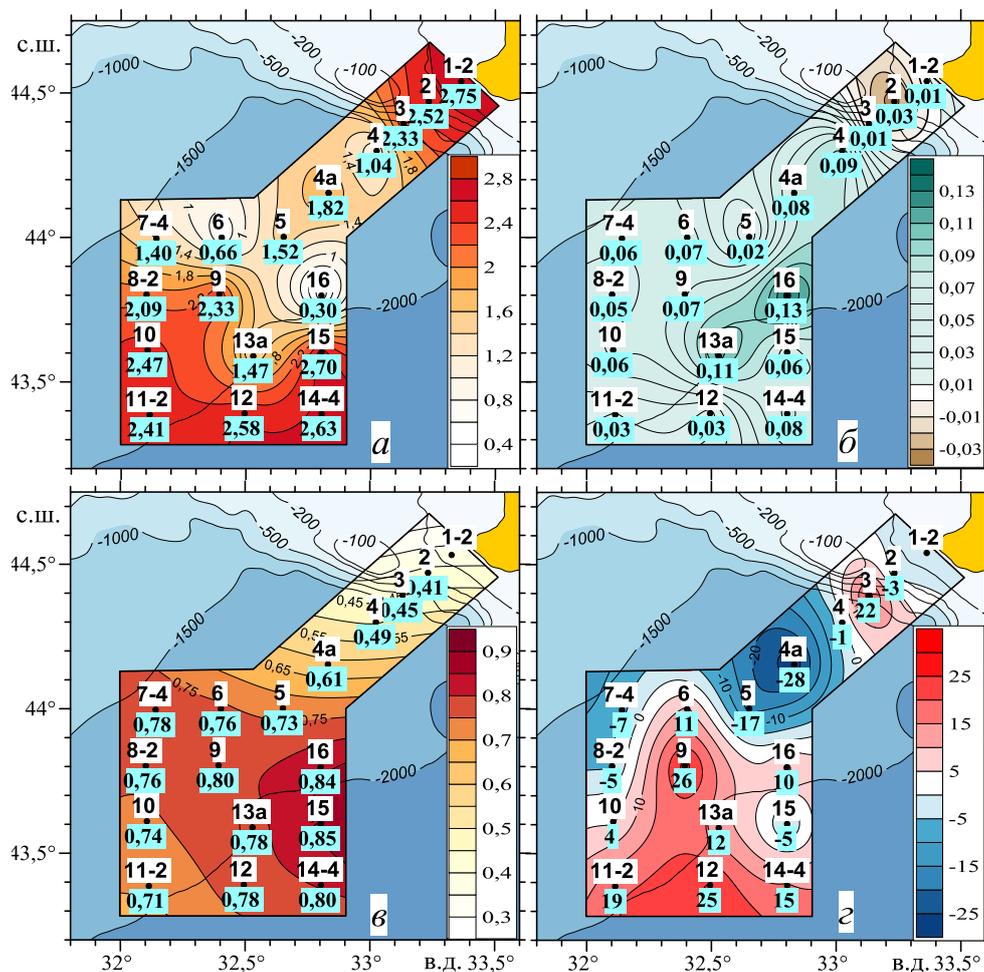


Рис. 8. Распределения аномалий: температуры (°C) (а) и солёности (‰) (б) на горизонте 1 м, температуры в ядре ХПС (°C) (в) и глубины его залегания (м) (г), полученных по данным съемки, относительно климатических норм

Солёность в период съемки на большей части акватории исследований также была выше климатической нормы. Только на шельфе, в отличие от температуры, наблюдались слабые отрицательные аномалии солёности (до 0,03‰). Наибольшие положительные аномалии СПМ (0,11 – 0,13‰) прослеживались в восточной части полигона (рис. 8, б).

Сопоставление характеристик ХПС со среднемесячными климатическими нормами показало, что температура в ядре ХПС на всей акватории исследований была выше климатической, максимальные аномалии (до 0,85°C) наблюдались на востоке полигона (рис. 8, в). Ядро ХПС залегало глубже по сравнению с климатической нормой на 22 – 26 м в районе свала глубин, цен-

тральной и южной частях полигона. Отметим, что в районе ст. 4а на разрезе Херсонес – Босфор ядро ХПС располагалось ближе к поверхности на 28 м (рис. 8, з). Подъем ХПС, как и слоя скачка в этом районе, можно объяснить дивергенцией двух ветвей ОЧТ, наблюдаемой в период съемки.

Наблюдаемые отличия термohалинной структуры вод в период съемки в ноябре 2015 г. от климатических норм, полученных по гидрологическим данным, могут быть проявлением как синоптической, так и межгодовой изменчивости. Распределения синоптического, сезонного и межгодового СКО ТПМ по спутниковым данным вдоль разреза Херсонес – Босфор (рис. 9, а) показали, что в пределах съемки отмечается заметное перераспределение разных типов изменчивости. Ближе к берегам Крыма наблюдается повышение уровня межгодовой изменчивости ТПМ при резком уменьшении уровня сезонной и синоптической изменчивости. При общем увеличении уровня синоптической изменчивости ТПМ в южном направлении в районе 44° с. ш. прослеживается ее локальный максимум, который совпадает с климатическим положением стрежня ОЧТ [3, 7]. Таким образом, к северу от климатического положения стрежня ОЧТ уровни сезонной и синоптической изменчивости уменьшаются, непосредственно в стрежне ОЧТ отмечается локальное повышение межгодовой и синоптической изменчивости, к югу от стрежня ОЧТ в центральной части ЗЦК межгодовая изменчивость уменьшается, а сезонная возрастает. Распределение аномалий ТПМ в период съемки относительно гидрологического климата показало, что в северной части разреза Херсонес – Босфор большие значения положительных аномалий наблюдаются в области максимальных межгодовых вариаций. В южной части района работ на разрезе высокие положительные аномалии ТПМ прослеживаются в области повышения синоптической изменчивости и понижения – межгодовой.

Временные ряды среднемесячных межгодовых аномалий ТПМ за весь период измерений в двух точках на разрезе Херсонес – Босфор (рис. 9, б) и их линейные тренды выявили общую тенденцию повышения ТПМ на многолетнем масштабе. Распределение аномалий ТПМ за последние годы вдоль всего разреза (рис. 9, в) показало, что в северной части разреза в ноябре 2015 г. наблюдались высокие положительные аномалии ТПМ ~1 – 1,5°C. Таким образом, положительные аномалии фактической ТПМ относительно климатической нормы в северной части разреза Херсонес – Босфор согласуются с многолетними тенденциями изменчивости ТПМ, выявленными по спутниковым данным.

В центральной части района работ наблюдались слабые отрицательные межгодовые аномалии ТПМ (до 0,5°C), а в южной – вновь положительные (до 1°C). Учитывая повышение уровня синоптической изменчивости ТПМ, полученное по спутниковым данным южнее 44° с. ш. (рис. 9, а), можно предположить, что более высокие значения ТПМ в период съемки по сравнению с климатической нормой в значительной степени обусловлены синоптической изменчивостью.

Отметим, что синоптические процессы наиболее четко выражены в поверхностном слое моря и заметно затухают с глубиной. Характеристики ХПС показывают, что изменчивость поля температуры в подповерхностном слое в большей степени согласуется с низкочастотной изменчивостью ТПМ. Положительные аномалии температуры в ядре ХПС в ноябре 2015 г. относительно климатической нормы отражают общую тенденцию повышения ТПМ на много-

голетнем масштабе. Кроме положительного линейного тренда ТПМ, в последние годы в районе работ наблюдались аномально теплые зимы. Так, по спутниковым данным, в декабре 2012, 2013 и 2014 гг. положительные межгодовые аномалии ТПМ достигали 3, 1,5 и 1,5°C соответственно (рис. 9, в). Такие высокие положительные аномалии ТПМ в зимний период способствовали увеличению теплозапаса ХПС в ноябре 2015 г.

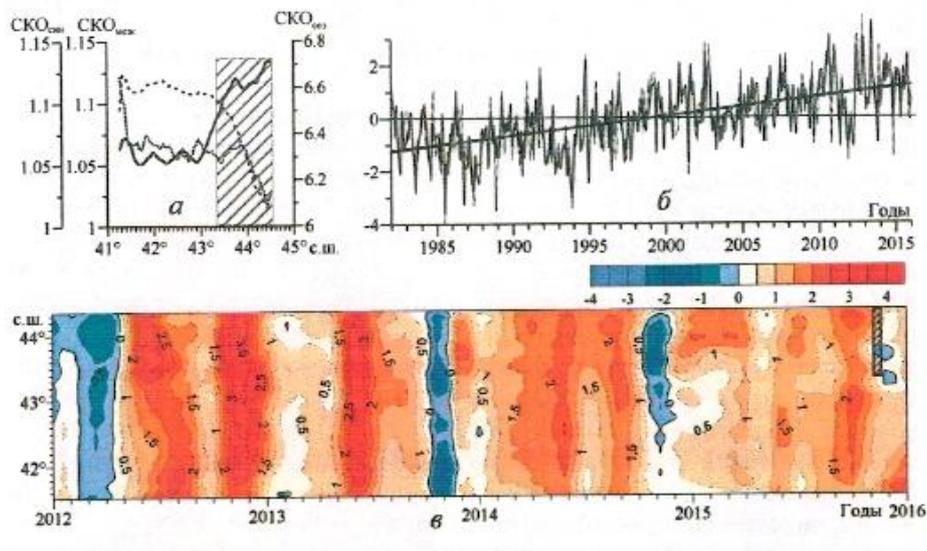


Рис. 9. Распределения величин межгодового (сплошная кривая), сезонного (штриховая кривая) и синоптического (пунктир) СКО ТПМ ($^{\circ}\text{C}$) на разрезе Херсонес – Босфор (*а*); среднемесячные межгодовые аномалии ТПМ в точках разреза с координатами $44,3^{\circ}$ с. ш. (сплошная кривая) и $43,8^{\circ}$ с. ш. (пунктир) и их линейные тренды (*б*); межгодовые аномалии ТПМ вдоль всего разреза Херсонес – Босфор (*в*) по спутниковым данным. Штриховкой отмечены период и район выполнения экспедиционной съемки

Выводы. Анализ результатов съемки в ходе 81-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» показал, что динамические процессы и термохалинные поля в ноябре 2015 г. в целом соответствовали климатической структуре вод у берегов Крыма и в северо-западной части Западного циклонического круговорота Черного моря. Вместе с тем влияние межгодовой и синоптической изменчивости формировало отличия гидрологических полей от климатической нормы.

Основное Черноморское течение было представлено двумя ветвями. Более интенсивная прибрежная ветвь ОЧТ северо-западного направления наблюдалась над свалом глубин. Другая ветвь ОЧТ, южная, проходила в юго-западном направлении через центральную часть основного полигона. Над прибрежным шельфом было зафиксировано подповерхностное противотечение юго-восточного направления, а в юго-восточной части полигона был обнаружен локальный циклонический меандр.

Верхний квазиоднородный слой имел толщину $\sim 20 - 30$ м. На прибрежном шельфе ВКС заглублялся до $55 - 75$ м. На всей акватории исследований температура в поверхностном слое была выше климатической нормы. Мак-

симальные аномалии наблюдались на прибрежном шельфе (до 2,75°C) и в юго-восточной части основного полигона (2,6 – 2,7°C). Соленость была также преимущественно выше климатической нормы. Наибольшие положительные аномалии СПМ (0,11 – 0,13‰) прослеживались в восточной части полигона. На шельфе, в отличие от температуры, были зафиксированы слабые отрицательные аномалии солености (до 0,03‰).

Температура в ядре ХПС на всей акватории исследований была выше климатической нормы, максимальные аномалии (до 0,85°C) наблюдались на востоке полигона. Ядро ХПС залегало глубже по сравнению с климатической нормой на 22 – 26 м в районе свала глубин, центральной и южной частях полигона. В центральной части разреза Херсонес – Босфор ядро ХПС располагалось ближе к поверхности на 28 м, что связано с подъемом вод в зоне дивергенции двух ветвей ОЧТ.

Наблюдаемые отличия термохалинной структуры вод в период съемки в ноябре 2015 г. от климатических норм, полученных по гидрологическим данным, могут быть проявлением как синоптической, так и межгодовой изменчивости. У берегов Крыма высокие положительные аномалии фактической ТПМ относительно гидрологического климата наблюдались в области максимальных межгодовых вариаций. В южной части района работ положительные аномалии фактической ТПМ прослеживались в области повышения уровня синоптической изменчивости и понижения уровня – межгодовой.

Более высокая температура в ядре ХПС в ноябре 2015 г. по сравнению с климатической нормой согласуется с общей тенденцией повышения ТПМ на многолетнем масштабе. Аномально теплые зимы в районе работ в последние годы способствовали увеличению теплозапаса ХПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 209 с.
2. *Артамонов Ю.В., Белокопытов В.Н., Бабий М.В., Скрипалева Е.А.* Особенности сезонной изменчивости температуры поверхности и циркуляции вод Черного моря // Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане. Юбилейный выпуск. – Керчь: ЮгНИРО, 2008. – С. 102 – 109.
3. *Артамонов Ю.В., Белокопытов В.Н., Скрипалева Е.А.* Особенности изменчивости гидрологических и биооптических характеристик на поверхности Черного моря по данным спутниковых и контактных измерений // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / Под ред. В.Н. Еремеева, С.К. Коновалова. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – С. 88 – 115.
4. *Артамонов Ю.В., Бабий М.В., Скрипалева Е.А.* Региональные особенности межгодовой изменчивости поля температуры на поверхности Черного моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 240 – 242.
5. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А.* Об использовании спутниковых данных в исследовании сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. – 2001. – № 1. – С. 51 – 61.
6. *Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A.* Sea surface temperature variability // The Black Sea Environment. – 5. – Part Q. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – P. 255 – 276. – doi: 10.1007/698_5_090.

7. *Исследование особенностей гидрологической структуры вод Черного моря в Севастопольском регионе и прилегающих акваториях по данным синоптических съемок Морского гидрофизического института в 2007 – 2013 гг. // Отчет по гранту РФФИ № 14-45-01639, 2014. – 44 с.*
8. *Артамонов Ю.В., Дерюшкин Д.В., Кирющенко И.Г. и др. Исследования гидрологической структуры вод в северной части Черного моря в августе 2011 г. (по материалам 69-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») // Геолого-океанологические исследования континентальной окраины Крыма и прилегающей котловины Черного моря. – Киев: ОМГОР, 2012. – С. 87 – 104.*
9. *Андрющенко Е.Г., Галковская Л.К., Годин Е.А. и др. Банк океанографических данных МГИ НАН Украины: информационные ресурсы и доступ к данным. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 59 с. – <http://ocean.nodc.org.ua> (дата обращения 16.08.2013 г.).*
10. http://www.myocean.eu/interactive_catalogue/sst_bs (дата обращения 01.02.2016 г.).
11. *Монин А.С. Гидродинамика атмосферы океана и земных недр. – СПб.: Гидрометеоздат, 1999. – 524 с.*
12. http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml (дата обращения 02.03.2016 г.).

Hydrological conditions in the western part of the Black Sea in November, 2015 (by the data obtained in the 81st cruise of R/V «Professor Vodyanitsky»)

**Ju.V. Artamonov, D.V. Alexeev, S.I. Kondratyev, E.A. Skripaleva,
S.A. Shutov, V.N. Lobachyov, R.O. Shapovalov, A.V. Fedirko**

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: sea-ant@yandex.ru*

The results of the hydrological research carried out in November, 2015 nearby the Crimea coast and in the northwest part of the Black Sea Western cyclonic gyre are presented. It is shown that the Rim Current is represented by its coastal branch over the depth jump and its southern branch located over the central part of the basic polygon. The south-eastern undersurface countercurrent is observed over the coastal shelf. On the whole area under study the sea surface temperature exceeds the climatic norm. High positive anomalies of actual temperature are observed nearby the Crimea coast in the area of maximum inter-annual variations and in the southern part of the region under study where synoptic variability increases and the inter-annual one – decreases. Positive temperature anomalies in the cold intermediate layer core in November, 2015 (relative to the climatic norm) are in good agreement with general tendency of sea surface temperature growth on the multi-year scale.

Keywords: Black Sea, thermohaline fields, Rim Current, cold intermediate layer, Western cyclonic gyre, Chersonesos-Bosporus section, spatial-temporal variability.