

УДК 551.465

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОЛЕННОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ В ГЕЛЕНДЖИКСКОМ РАЙОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2016 г. О. И. Подымов¹, А. Г. Зацепин²¹Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: huravela@yahoo.com

Поступила в редакцию 13.10.2014 г.

После доработки 21.05.2015 г.

Приведены результаты анализа данных по изменчивости солености вод прибрежной зоны Черного моря в верхнем слое, включая термоклин, в теплый период года (апрель–ноябрь). Использованные для анализа данные получены при регулярном проведении STD-зондирования на станциях девяти-мильного разреза (МНИС “Ашамба”) на траверзе Голубой Бухты (г. Геленджик) в 2010–2013 гг. Показана связь аномалий солености с береговым стоком, осадками и ветровым воздействием. Установлено, что вклад термической стратификации в плотностную практически всегда превышает вклад соленостной и возрастает от апреля к ноябрю.

DOI: 10.7868/S0030157416020167

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных элементов программы черноморских исследований ИО РАН, проводимых на базе его Южного отделения (ЮО ИО РАН) на протяжении ряда лет в теплый сезон года (апрель–ноябрь), является регулярное выполнение

комплексного мониторинга состояния прибрежной морской экосистемы на судовом разрезе. Этот разрез, состоящий из 7 станций, осуществляемых с борта МНИС “Ашамба”, показан на рис. 1. На всех станциях разреза выполняются STD-зондирования зондом SBE 19 plus от по-

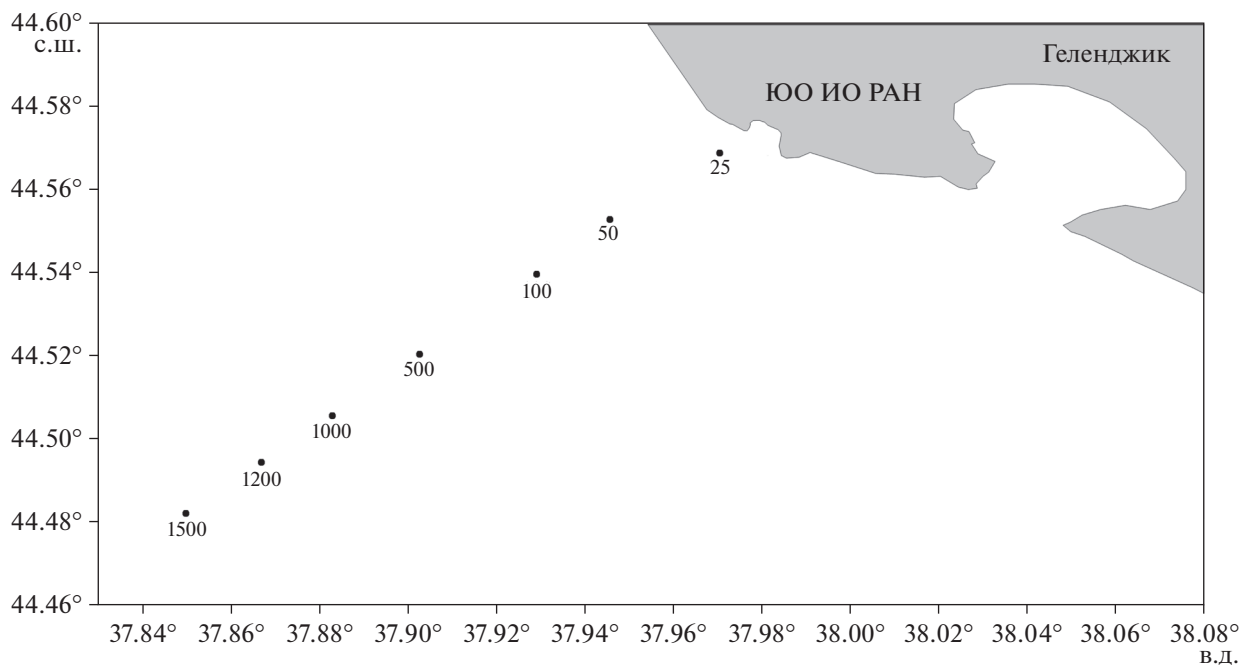


Рис. 1. Станции (точки) комплексного судового мониторинга состояния прибрежной черноморской морской экосистемы на девятимильном разрезе на траверзе Голубой бухты. Числами указана глубина места в точке каждой станции.

верхности до дна или до глубины 350 м в области континентального склона, с измерением профилей температуры, солёности и плотности морской воды. На трех станциях (с глубинами 25, 50 и 500 м) производится отбор проб воды на химический анализ и определение содержания хлорофилла, а также выполняются сетные ловы зоопланктона. Судовой разрез обычно выполняется раз в две недели, но не реже, чем один раз в месяц.

Данные, получаемые на станциях судового разреза, позволяют изучить внутрисезонную, сезонную и межгодовую изменчивость ключевых параметров прибрежной черноморской экосистемы, а также выявить закономерности изменения значений этих параметров в поперечном берегу направления.

В настоящей работе основное внимание уделяется анализу изменчивости солёности в верхнем слое моря, включая сезонный термоклин. Известно, что солёность в верхнем слое моря подвержена значительной сезонной изменчивости, обусловленной, прежде всего, весенним паводком, во время которого в прибрежную зону моря попадает большой объем пресной воды. Даже для кавказского побережья Черного моря, характеризующегося сравнительно небольшим пресноводным стоком [1–4], паводковые процессы приводят к существенному изменению солёности в прибрежной зоне моря. Попадая в море, речные воды еще на мелководье в значительной степени перемешиваются с морскими водами и распространяются от устьев рек в виде плюмов различной формы. Толщина плюмов изменяется от десятков сантиметров до нескольких метров, а их солёность понижена на значения от десятых долей до единиц промилле по сравнению с солёностью морской воды [4, 9]. Однако в период весеннего паводка происходит общее опреснение прибрежных вод в результате более активного формирования плюмов и последующего вертикального перемешивания с нижележащими морскими водами. При этом, по-видимому, образуется вдольбереговой “пояс” опресненных вод, характеристики которого изменяются год от года и нуждаются в изучении. Данная статья вносит определенный вклад в копилку знаний об этих характеристиках.

Следует отметить, что интенсивные осадки, периодически выпадающие на черноморское побережье, в том числе и вне паводкового сезона, также могут вносить существенный вклад в опреснение прибрежных вод. Примером таких осадков является катастрофический ливень 6–7 июля 2012 г., вызвавший крупные наводнения в Краснодарском крае, в том числе, в районе г. Геленджика. Некоторые гидрофизические проявления этого наводнения в прибрежной зоне моря были описаны в [6]. В данной статье этим вопросам также уделяется определенное внимание.

Опреснение поверхностных вод за счет стока речных вод или выпадения осадков на поверхность моря вносит существенный положительный вклад в поток плавучести, который препятствует волно-ветровому перемешиванию и ограничивает толщину верхнего квазигомогенного слоя (ВКС) и глубину залегания термоклина. Очевидно, что основной вертикальный поток плавучести в Черном море связан с приходом солнечной радиации, и солнечный прогрев является главным фактором формирования сезонного термоклина и сезонной плотностной стратификации вод. Однако следует оценить и вклад факторов, вызывающих изменение солёности, в сезонную плотностную стратификацию и их динамику в сезонном цикле. Такие оценки представлены в данной статье.

И, наконец, важной характеристикой параметров морской среды является их межгодовая изменчивость. В данной работе проанализирована изменчивость поверхностной солёности вод на протяжении всех четырех лет наблюдений, и сделана попытка установить зависимость этой величины, а также толщины и структуры ВКС от общего количества осадков, выпадающих на побережье в первое полугодие, и интенсивности ветрового воздействия на морскую поверхность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Как уже указывалось выше, профили температуры, солёности и условной плотности были получены при помощи STD-зонда SBE-19 plus. Регулярные STD-зондирования на станциях мониторингового разреза производились с частотой в среднем раз в две недели в период: с 29 апреля по 7 декабря 2010 г., с 17 марта по 14 декабря 2011 г., с 4 апреля по 26 ноября 2012 г., с 29 апреля по 5 ноября 2013 г. Всего за четырехлетний период по мониторинговому разрезу было сделано 75 выходов МНИС “Ашамба” и получено более 400 профилей вышеуказанных гидрофизических характеристик. Первичные STD-данные были отфильтрованы и осреднены с вертикальным шагом 1 метр.

Метеорологические данные о ветре и осадках были получены с метеостанции г. Геленджика. В таблицах метеопараметров представляются: даты наблюдений (месяц, день и стандартные метеорологические сроки через 3 ч по Гринвичу), направление ветра, и средние и максимальные значения скорости ветра (м/с) и суточные осадки (мм/сут). Средняя скорость ветра определяется за 10 мин, максимальная скорость – максимальный порыв ветра между сроками наблюдений за 3 ч.

Мониторинговый 9-мильный разрез на траверзе Голубой бухты (г. Геленджик) включал в себя 7 станций с глубинами 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 метров (рис. 1). Точка с глубиной 100 м располагалась на бровке шельфа, и реальная глубина станции в каждом отдельном рейсе из-за

дрейфа судна могла меняться от 70 до 110 м. Также нужно отметить, что в некоторых случаях при плохих погодных условиях работы велись только до точки с глубиной 500 м. Иногда в дополнение к станциям в “стандартных” точках на разрезе выполнялись одна или несколько станций в других точках. Поскольку мониторинговый разрез оканчивался точкой станции с глубиной места 1500 м, а расстояние между соседними точками станций составляло 1.0–1.5 мили, район исследований охватывал достаточно подробно как шельфовую зону, подверженную собственным модам изменчивости, так и часть континентального склона, находящуюся под сильным влиянием Основного черноморского течения (ОЧТ) и мезомасштабных вихрей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

За весь рассматриваемый период наблюдений (2010–2013 гг.) были проанализированы профили солености, температуры и условной плотности в слое от поверхности до 50 метров глубины, начиная с момента формирования ВКС в апреле вплоть до ноября–декабря, когда нижняя поверхность ВКС опускалась глубже 30–40 м. Также, за весь период наблюдений, был рассмотрен временной ход солености приповерхностного слоя (СПС), определяемой как средняя соленость в верхнем 5-метровом слое. Было установлено, что минимальные значения СПС наблюдаются, как правило, в мае–июне, а иногда – и в июле, обусловленные совместным влиянием паводковых вод в апреле–июне и повышенного уровня осадков в мае–июле, вызывающих спорадическую активность берегового стока.

Абсолютное минимальное значение СПС (15.84 psu) было зарегистрировано 4 июля 2011 г. в точке станции над глубиной 1200 м. На остальных точках станций в этот день также было зарегистрировано минимальное значение солености в приповерхностном слое (рис. 2). Максимальное значение поверхностной солености (18.19 psu) было получено 28 сентября 2012 г. в точке станции с глубиной 1000 м. Средняя соленость в верхних пяти метрах за весь период наблюдений по всем точкам составила 17.54 psu.

Внутригодовые тренды СПС имеют схожий характер (рис. 2) во всех точках наблюдения, однако на близких к берегу станциях (до 5 миль от берега, или до глубины 500 метров) короткопериодные колебания солености выражены сильнее, чем на станциях, удаленных от берега (6–9 миль, глубина 1000–1500 м), видимо, по причине более сильного влияния изменчивого берегового стока.

Средние за 2010–2013 гг. значения СПС в точках выполнения станций на мониторинговом разрезе и их среднеквадратические отклонения (СКО) представлены на рис. 3. Для расчета этих

значений использовались только данные тех выходов МНИС “Ашамба”, в которых были сделаны все семь станций мониторингового разреза. На графике приведены данные как с учетом периода аномально низкой солености в 2011 г. (13 мая–18 июля), так и без него. Как видно из рисунка, тренд распределения не изменяется. Наиболее низкие значения солености наблюдаются на ближайшей к берегу станции (25 м глубины), ее значения растут до третьей станции (75–100 м глубины – бровка шельфа) и далее сильно не изменяются. При этом средние значения солености на ближайшей к берегу станции и на точке с максимальной средней соленостью различаются менее чем на 0.1 psu. Вместе с тем, СКО в каждой точке существенно больше этой величины (0.25–0.45 psu). Поэтому можно говорить о том, что, начиная с глубины 25 м, средние значения СПС поперек шельфа – континентального склона изменяются мало в теплый сезон года, тогда как временная изменчивость этой величины достаточно велика. Причины, по которым наблюдается столь однородное распределение СПС в поперечном берегу направлении, нуждаются в дополнительном исследовании.

Аномально низкие значения СПС были зарегистрированы в период с 13 мая по 18 июля 2011 г., т.е. на протяжении более двух месяцев (рис. 2). Данная аномалия СПС совпала с длительным периодом ветрового затишья (средняя скорость ветра в этот период равнялась 0.15 м/с, штормов не наблюдалось). Сильные осадки, длившиеся с начала 2011 г. (среднемесячные суммы осадков с января по июнь были 48.5 мм при среднем значении этой величины за все четыре года – 26 мм) и вплоть до середины июля, вкуче с очень слабым ветровым перемешиванием, привели к сильному опреснению воды как в приповерхностном слое, так и в ВКС в целом. Любопытным фактом является то, что минимум значений СПС в этот период наблюдался не у берега, а на станциях с глубинами 1000–1500 м, где соленость упала ниже 16 psu, при этом абсолютный минимум (15.84 psu) был зарегистрирован на станции с глубиной 1200 м.

Традиционно толщина ВКС определяется по профилю температуры, и его нижней границей, или подошвой, считается горизонт, с которого происходит резкое уменьшение температуры (увеличение амплитуды ее отрицательного градиента). Ниже располагается сезонный термоклин. Можно ожидать, что при сильном опреснении приповерхностного слоя и слабом ветро-волновом перемешивании галоклин может располагаться близко к поверхности и не совпадать с сезонным термоклином. Тогда ВКС будет иметь двуслойную структуру, причем перепад плотности между верхним и нижним его слоями должен определяться, главным образом, перепадом солености (температура между этими слоями также может изменяться, в т.ч. и в суточном цикле).



Рис. 2. Средние значения СПС на семи мониторинговых станциях (глубины 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 м) за весь период наблюдений (2010–2013 гг.). За нуль по оси абсцисс принято начало 2010 г., пунктиром обозначены переходы к следующим годам.

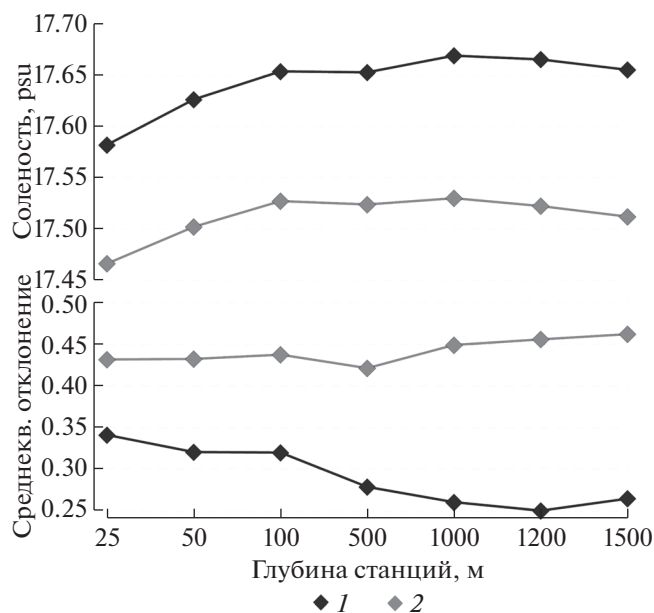


Рис. 3. Средние за 2010–2013 гг. значения СПС в точках выполнения станций на мониторинговом разрезе и их среднеквадратические отклонения. 1 – без учета периода аномальной солёности, 2 – с учетом периода аномальной солёности.

Именно такая структура ВКС обычно наблюдается в области речного плюма [1, 9]. Чтобы проверить, всегда ли в точках станций галоклин совпадал с сезонным термоклином, т.е. что ВКС имел однослойную структуру, были построены все профили солёности и температуры на всех точках станций мониторингового разреза за весь период измерений. При этом была вычислена его толщина с использованием следующего критерия: нижним горизонтом ВКС считался тот, сразу ниже которого градиент температуры превышал $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$. Было обнаружено, что галоклин почти всегда совпадал с термоклином. Обратные случаи наблюдались только в мае 2011 г., когда галоклин сформировался до появления термоклина, и после наводнения в июле 2012 г.

График значений толщины ВКС как функции времени в период 2010–2013 гг. для точек всех 7-ми станций мониторингового разреза представлен на рис. 4. Видно, что, как и в случае с временным изменением СПС, изменения толщины ВКС весьма близки между собой на всех мониторинговых станциях. По этой причине в дальнейшем на графиках будем приводить характеристики значений таких параметров, как глубины начала галоклина и сезонного термоклина, только для точки станции мониторингового разреза с глубиной 500 м.

Анализ данных для этой точки станции показал, что в 2010 г. галоклин сформировался вместе со слабым термоклином ко второй половине мая и просуществовал до конца теплого сезона, не разделяясь с термоклином. Таким образом, двухслойная структура ВКС не наблюдалась, а минимум СПС в 2010 г. (около 17.0 psu) был зарегистрирован 5 июля, и, видимо, был связан с очень большим количеством осадков, выпавших в предыдущие 20 дней (216 мм).

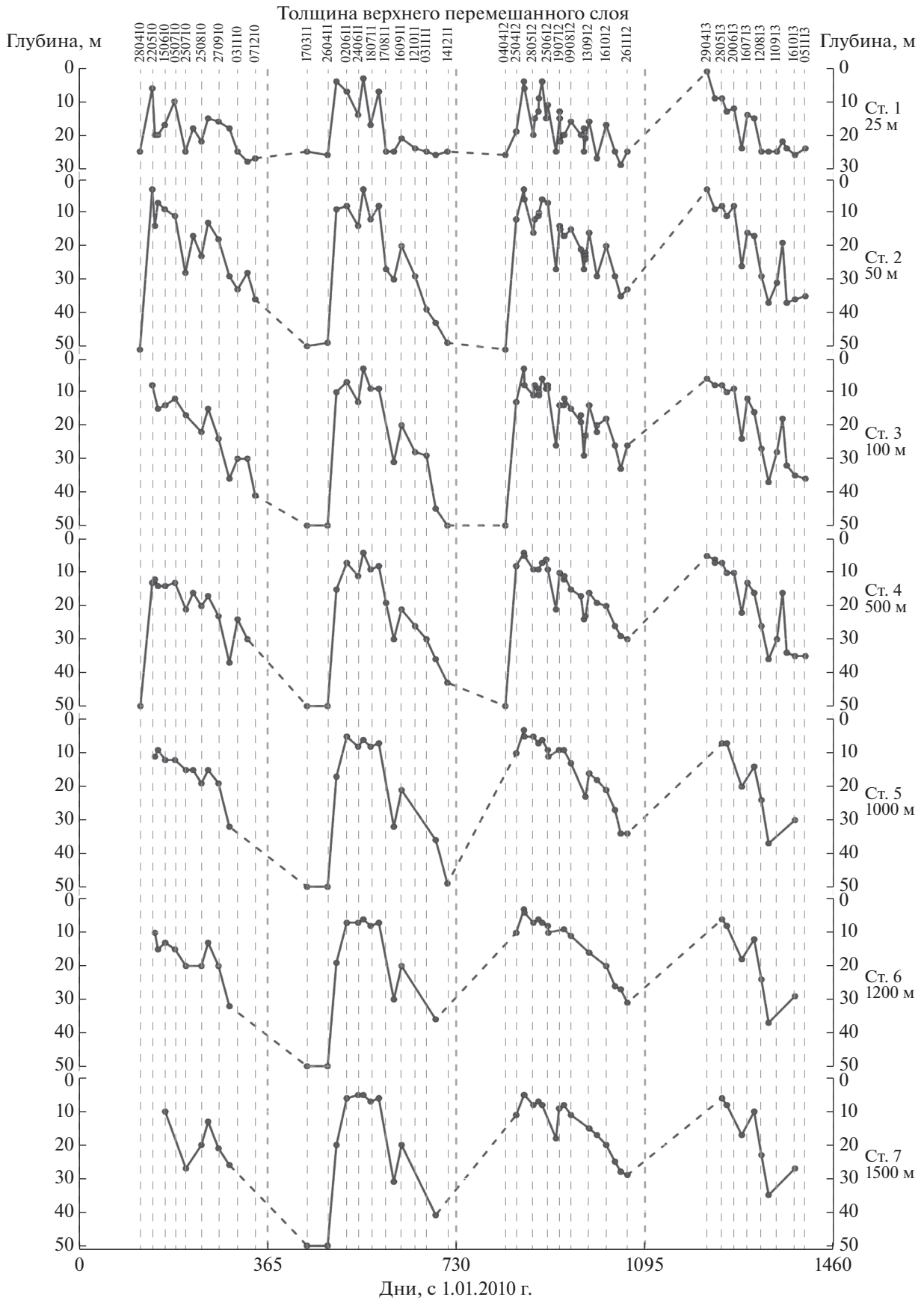
13 мая 2011 г. на глубине 3–4 м от поверхности моря наблюдался резкий галоклин с перепадом солёности около 0.2 psu (рис. 5а). При этом слабый, едва начавший формирование термоклин наблюдался на глубине 12–17 м (изменение температуры между этими горизонтами составило около 3°C). С ним совпадал второй галоклин, перепад солёности в котором составлял 0.8 psu. Таким образом, ВКС имел двухслойную “плюмовую” структуру. Спустя три недели такая структура уже не наблюдалась, прогрев верхнего слоя увеличился на 6 градусов, а термо- и галоклин совпадали между собой.

Обращает на себя внимание феноменальное уменьшение значений СПС в начале лета 2011 г. (рис. 2), которое едва ли может быть связано с “местными” осадками – падение солёности было слишком значительное и произошло менее чем за 17 дней (интервал времени между повторным выполнением мониторингового разреза в мае 2011 г.), в течение которых по данным метеостанции г. Геленджика существенных осадков не наблюдалось. Суммарные осадки в июне–июле 2011 г. были невелики (наименьшие, в среднем, значения в эти два месяца за весь период наблюдения). Таяние и сток зимних осадков в районе Геленджика также не могут быть существенными факторами, т.к., например, сумма осадков с января по апрель в 2010 г. была выше, чем в 2011 г. (370 и 334 мм соответственно), однако подобных аномалий солёности в 2010 г. отмечено не было.

Однако, если учесть количество осадков только за период с апреля по июнь, то тут 2011 г. оказывается впереди остальных с большим отрывом (209 мм в 2011 г. по сравнению с 61, 106 и 16 мм в 2010, 2012 и 2013 гг. соответственно). И как раз с конца апреля началось уже отмеченное ранее длительное ветровое затишье.

Тем не менее, столь резкое и длительное снижение солёности в СПС летом 2011 г. (рис. 2) едва ли можно объяснить исключительно локальным речным стоком, который в этом районе черноморского побережья незначителен. Скорее всего, имела место адвекция опресненной воды посредством вдольберегового течения из района Туапсе–

Рис. 4. Толщина верхнего квазиоднородного слоя на семи мониторинговых станциях (глубины 25, 50, 100, 500, 1000, 1200 и 1500 м) за весь период наблюдений (2010–2013 гг.).



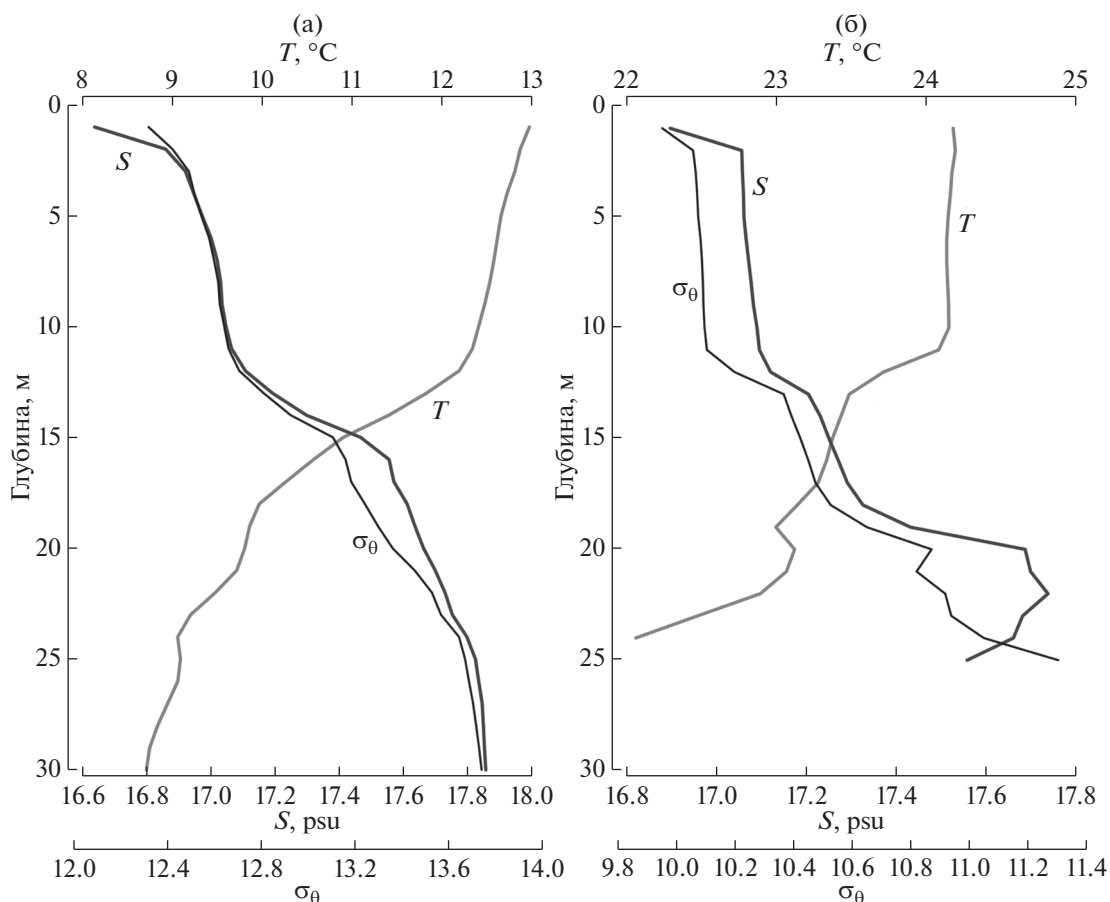


Рис. 5. Профили температуры, солёности и условной плотности в верхних 30 метрах на станции с глубиной 500 м 13.05.2011 г. (а) и на станции с глубиной 50 м 11.07.2012 г. (б).

Сочи или даже абхазско-грузинского побережья, где речной сток в море гораздо значительнее [2, 4]. Как видно из рис. 3, июньский минимум СПС был наиболее сильным на удаленных от берега точках с глубиной 100 м и более. Такое поперечное берегу распределение солёности подтверждает гипотезу об адвективном характере формирования солёностной аномалии.

В 2012 г. формирование термо- и галоклина происходило одновременно, и они совпадали по глубине. Сильный галоклин в 2012 г. сформировался к концу мая в течение 17 дней, и он мог быть обусловлен сильными местными осадками (71 мм в течение предшествующей недели). Горизонт значения солёности 18 psu заглубился с 10–15 м до 25 м и ниже, но в дальнейшем снова поднялся к 15–20 м, обострив галоклин. При этом перепад солёности в нем достигал 1.5 psu. А сама солёность в верхних 10 метрах за эти 17 дней уменьшилась на 0.2–1.0 psu, причем, чем ближе к берегу, тем ниже были ее значения.

В 2012 г. во второй половине мая и в июле, после катастрофического ливня, когда за сутки выпало 270 мм осадков, наиболее сильно был выра-

жен феномен солёностного фронта, возникающего между прибрежными опресненными водами и более солёными водами открытого моря. До ливневого события этот солёностный фронт, прослеживаемый по изолинии солёности 17.5 psu, был весьма слабо выражен 10 мая и не распространялся дальше 4 миль от берега; толщина слоя опресненных береговым стоком вод у берега не превышала 6 м, а само опреснение не превышало 0.2 psu (рис. 6а). Через две с половиной недели, 28 мая, ситуация кардинально изменилась. После дождливого периода опреснение прибрежных вод возросло, и СПС в точке станции на глубине 25 м понизилась на 0.6 psu по сравнению с предыдущим периодом наблюдения. Объем опресненных вод многократно вырос, и эти воды, скопившиеся у берега, “опустили” термоклин на глубину порядка 20 м, тогда как на расстоянии 6 миль от берега термо-галоклин залегал на глубине 10 м (рис. 6б). Перепад солёности (плотности) между прибрежными водами и водами открытого моря и наклон изопикн, связанный с солёностным фронтом, свидетельствует о существовании вдольберегового геострофического

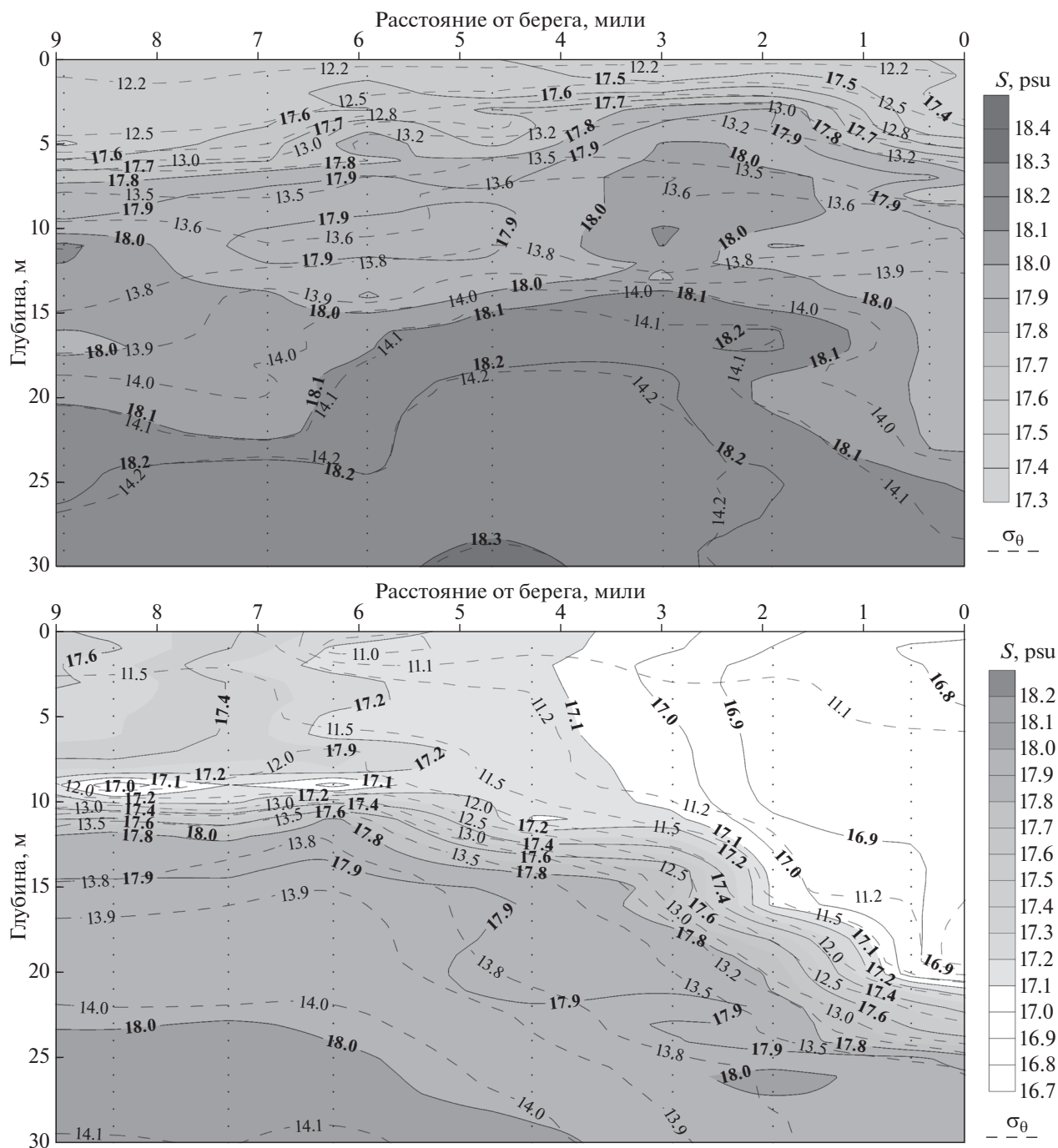


Рис. 6. Распределение солёности и условной плотности на мониторинговом разрезе в верхних 30 м 10.05 (вверху) и 28.05 (внизу) 2012 г.

течения опресненных вод северо-западного направления. Это течение затухает в области термогалоклина, и обусловленный этим затуханием интегральный экмановский перенос должен быть направлен в сторону открытого моря. О его существовании свидетельствует наличие слоя более пресных вод в термоклине с мористой стороны солёностного фронта (рис. 6в). На вертикальных профилях солёности этот тонкий слой более

пресных вод проявляется в виде инверсии солёности, однако в поле плотности инверсия отсутствует, так как дефицит солёности балансируется устойчивым вертикальным распределением температуры.

Еще через месяц, 26 июня, картина несколько меняется. Объем опресненной воды у берега уменьшается, а ее солёность возрастает (рис. 7а). При этом вертикальная протяженность области

термо-галоклина в прибрежной зоне увеличивается, она приобретает тонкую структуру [8], в качестве которой выступают “вкрапленные” слои (линзы) как более пресной, так и более соленой воды, сохраняющие вертикальную устойчивость в поле плотности за счет возросшего устойчивого температурного градиента. Такая сложная термохалинная структура формируется, по-видимому, из-за наличия в зоне релаксирующего фронта разнонаправленных движений (к берегу и от берега).

Как уже указывалось выше, 6–7 июля 2012 г. произошел катастрофический ливень, вызвавший наводнение в ряде районов Краснодарского края, включая Геленджикский район. По данным метеостанции г. Геленджика, в эти дни выпала пятимесячная норма осадков. Большой объем пресной воды, практически моментально выплеснувшийся в прибрежную зону моря, привел к образованию вдоль побережья протяженного пояса мутных опресненных вод. По оценкам, приведенным в [5], различие в солёности между прибрежными и морскими водами составляло от 1.0 до 2.7 psu, а ширина зоны опреснения приблизительно равнялась 10 км, или 6 миль. Благодаря геострофическому приспособлению в этом поясе возникло интенсивное вдольбереговое течение, которое за несколько суток транспортировало большую часть опресненных вод из Геленджикского в Анапско-Керченский район Черного моря [6].

По данным термокосы, установленной на гидрофизическом полигоне ИО РАН [6] в 2012 г. в точке с глубиной места 42 м, во время катастрофического ливня произошло заглубление верхней части термоклина (слоя “скачка”) и увеличение толщины верхнего слоя до глубины 25 м при типичной глубине 10–15 метров. Возможно, это было связано также с воздействием ветра южных румбов, вызывающих даунвеллинг в прибрежной зоне моря. К сожалению, наводнение, вызванное разливом реки Ашамбы и частичным затоплением территории ЮО ИО РАН, на несколько суток лишило возможности проводить судовые исследования реакции прибрежной зоны моря на аномальный пресноводный сток. Первый выход в море МНИС “Ашамба” с выполнением мониторингового разреза состоялся только 11 июля 2012 г., когда последствия обильного сброса пресной воды в море были уже не столь ярко выражены в морской среде (рис. 7б). Тем не менее, на этом рисунке виден “остаточный” слой опресненных вод толщиной 16–18 м у берега и выклинивающийся к поверхности моря на расстоянии 6–8 миль от берега. Солёность вод в этом слое составляет

17.1–17.4 psu, что на 0.4–0.7 psu меньше, чем с морской стороны. У берега, вблизи поверхности, виден свежобразованный тонкий (около 3 м) слой более сильного опреснения до 16.5 psu, связанный с продолжающимся повышенным речным стоком в море.

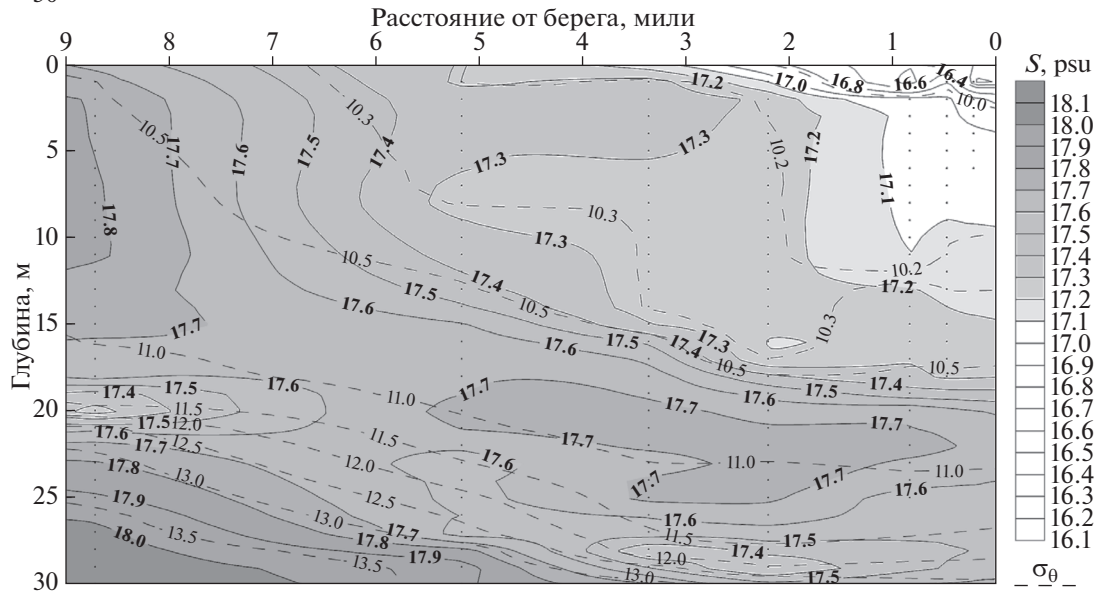
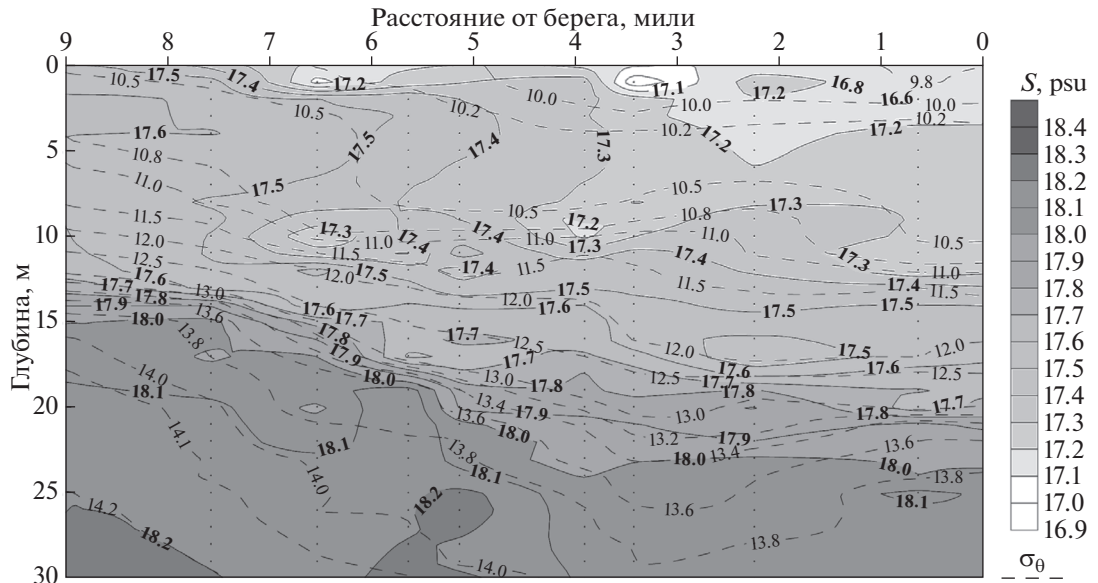
Интересным фактом является наличие следов опреснения (0.2–0.4 psu) в термоклизе в виде инверсий солёности (рис. 7б). Инверсии солёности являются гидростатически устойчивыми благодаря значительному вертикальному градиенту температуры. Гипотетически, они образовались в период сильного паводка, когда толщина слоя опреснения была максимальной и его нижняя граница достигала верхней части термоклина. Затем опресненная вода в верхнем слое в значительной степени “утекла” вдоль берега на северо-запад, нижняя граница опресненного слоя поднялась на 10 м, но остатки первоначального опреснения “застряли” в малоподвижном и устойчиво стратифицированном термоклизе.

Еще через неделю, 18 июля, приповерхностный опресненный слой у берега практически исчез, а фронт, разделяющий воды опресненного пояса и морские, придвинулся к берегу на расстояние 2–3 мили (рис. 7в). Вырождение прибрежного пояса опреснения, сопровождающееся процессами вертикального перемешивания и горизонтального обмена, характеризуется ярко выраженным формированием небольших (толщиной 2–4 м) внутритермоклинных линз различной солёности. Следует отметить, что в июле 2012 г. в прибрежной зоне опреснения наблюдается двуслойная структура ВКС. При этом наблюдаются два галоклина: первый расположен на глубине 15–20 м и связан с нижней границей пояса опресненных вод, второй располагается на глубине 25–30 м и совпадает с сезонным термоклином (рис. 7б, 7в).

К концу лета 2012 г. поле солёности в верхнем слое сглаживается. Средняя солёность в ВКС увеличивается, однако в прибрежной зоне пояс вод пониженной солёности над термоклином наблюдается вплоть до поздней осени.

2013 г. характеризовался небольшим количеством осадков с начала года (215 мм) и совершенно ничтожным их объемом в апреле–мае (16 мм). Зато много осадков выпало в сентябре–начале октября (104 мм за две недели с 22 сентября по 5 октября), по причине чего 16 октября был отмечен минимум поверхностной солёности (17.35 psu), сравнимый с июльским минимумом (17.25 psu). Вследствие слабого берегового стока, весной 2013 г. галоклин был относительно слабо выражен, и поверхностная солёность всю весну оставалась довольно высокой. Да и в летние месяцы небольшие

Рис. 7. Распределение солёности и условной плотности на мониторинговом разрезе в верхних 30 м за 10 дней до наводнения (25.06.2012 г., сверху), четыре дня после наводнения (11.07.2012 г., посередине) и 11 дней после наводнения (18.07.2012 г., внизу).



колебания поверхностной солёности не характеризовались ярко выраженным сигналом сезонного опреснения.

Подытоживая вышесказанное, отметим, что совместный анализ профилей температуры и солёности показал, что “весенний” галоклин, как правило, формируется вместе с термоклином и на одной и той же глубине. Однако в самой прибрежной зоне наблюдаются ситуации, когда ВКС имеет двуслойную структуру, характеризующую наличием тонкого (2–4 м толщиной) приповерхностного сильно опресненного слоя, возможно, связанного с распространением речных плюмов [1, 9]. Исключением из правил был период аномального опреснения верхнего слоя весной–летом 2011, когда в мае месяце термоклин только начал формироваться, а сильный галоклин уже существовал, а также июль 2012 г., когда после катастрофического ливня сформировалась ярко выраженная двуслойная структура ВКС с двумя галоклинами и термоклинами, причем верхний термо-галоклин располагался на глубине 15–20 м (рис. 5б).

ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И СУММАРНЫХ ОСАДКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВКС И ЕГО СЕЗОННОГО ОПРЕСНЕНИЯ

Как следует из рис. 8, характерная толщина ВКС и ее временной ход не изменяются кардинально от года к году, с некоторой поправкой на межгодовые вариации метеословесий. При этом формирование ВКС и сезонного термоклина начинается в апреле–мае, когда происходит весеннее увеличение потока солнечной радиации, и море вступает в стадию прогрева. Примерно в то же время начинает формироваться и аномалия солёности в прибрежной зоне, которая зависит как от величины пресноводного стока, так и от толщины ВКС, поскольку поступающая с берега пресная вода со временем более или менее однородно размещается до термоклина благодаря генерируемой ветром турбулентности.

В условиях солнечного прогрева и поступления пресных вод с берега турбулентная энергия, генерируемая ветром, расходуется на работу против сил Архимеда (плавучести). Этой энергии хватает на формирование ВКС определенной толщины h , которая определяется масштабом плавучести [7]:

$$h = CU_*^3/B. \quad (1)$$

Здесь C – коэффициент (меньше единицы), $U_* = (\tau/\rho_w)^{0.5}$ – динамическая скорость трения в воде, где $\tau = \rho_a C_d U_a^2$ – напряжение трения ветра на поверхности моря, ρ_w, ρ_a – плотность воды и воздуха соответственно, $C_d \approx 10^{-3}$ – коэффициент со-

противления водной поверхности, U_a – скорость ветра на высоте 10 м, B – приток плавучести, обусловленный приходом солнечной радиации и притоком паводковых вод.

Из (1) следует, что начальная толщина ВКС должна быть очень чувствительна к вариациям скорости ветра в связи с кубической зависимостью от последней. Проведенные нами расчеты (рис. 8) показали, что процесс формирования ВКС непосредственно связан с параметром U_*^3 : во все годы наблюдения начальное образование термоклина происходило в апреле–мае, в период ветрового затишья. После того как термоклин сформировался, происходит рост перепада температуры в нем, который продолжается до июля–августа. В этот период толщина ВКС подвержена изменчивости, связанной с вариацией ветровых условий и динамики вод, но в среднем она сохраняет приблизительно постоянное значение (рис. 8). При наличии обильного берегового стока в этот период в ВКС и в особенности в приповерхностном слое моря происходит уменьшение солёности.

Судя по полученным результатам, отдельные события увеличения толщины ВКС связаны с пиками U_*^3 (рис. 8). Однако влияние изменчивости U_*^3 на поверхностную солёность малозаметно. Очевидно, что большее влияние на этот параметр оказывает величина берегового стока, связанная с количеством осадков, выпавших на водосборы рек.

Для оценки влияния осадков на величину опреснения прибрежных вод будем использовать интегральную сумму осадков ΣQ_p , выпадающих в прибрежной зоне в период с начала января месяца до даты проведения наблюдений в текущем году. Данный подход использует предположение, что зимние осадки оседают на горах в виде снега, а потом с апреля по июнь попадают в море с речным стоком и далеко не сразу размещаются по вертикали или уходят из прибрежной (шельфово-склоновой) зоны благодаря водообмену с глубоководной частью моря.

Поскольку сезонный солёностный тренд в СПС по всем станциям был примерно одинаков (рис. 2), расчет, как и ранее, проводился только для средней точки разреза с глубиной 500 м. Интегральная сумма осадков рассчитывалась как общая сумма осадков с начала года до дня выполнения очередного мониторингового разреза. Также были рассчитаны отношение суммы осадков ΣQ_p к толщине ВКС h и отношение $\Delta S/S_{10}$, где ΔS – разница между средней поверхностной солёностью S_0 и солёностью S_{10} на изотерме 10°C . Была рассчитана корреляция между $\Sigma Q_p/h$ и $\Delta S/S_{10}$ для каждого года в период наблюдений. Результаты расчетов представлены на рис. 9.

В 2010 и 2011 гг. корреляции параметров $\Delta S/S_{10}$ и $\Sigma Q_p/h$ получились очень хорошими и положи-

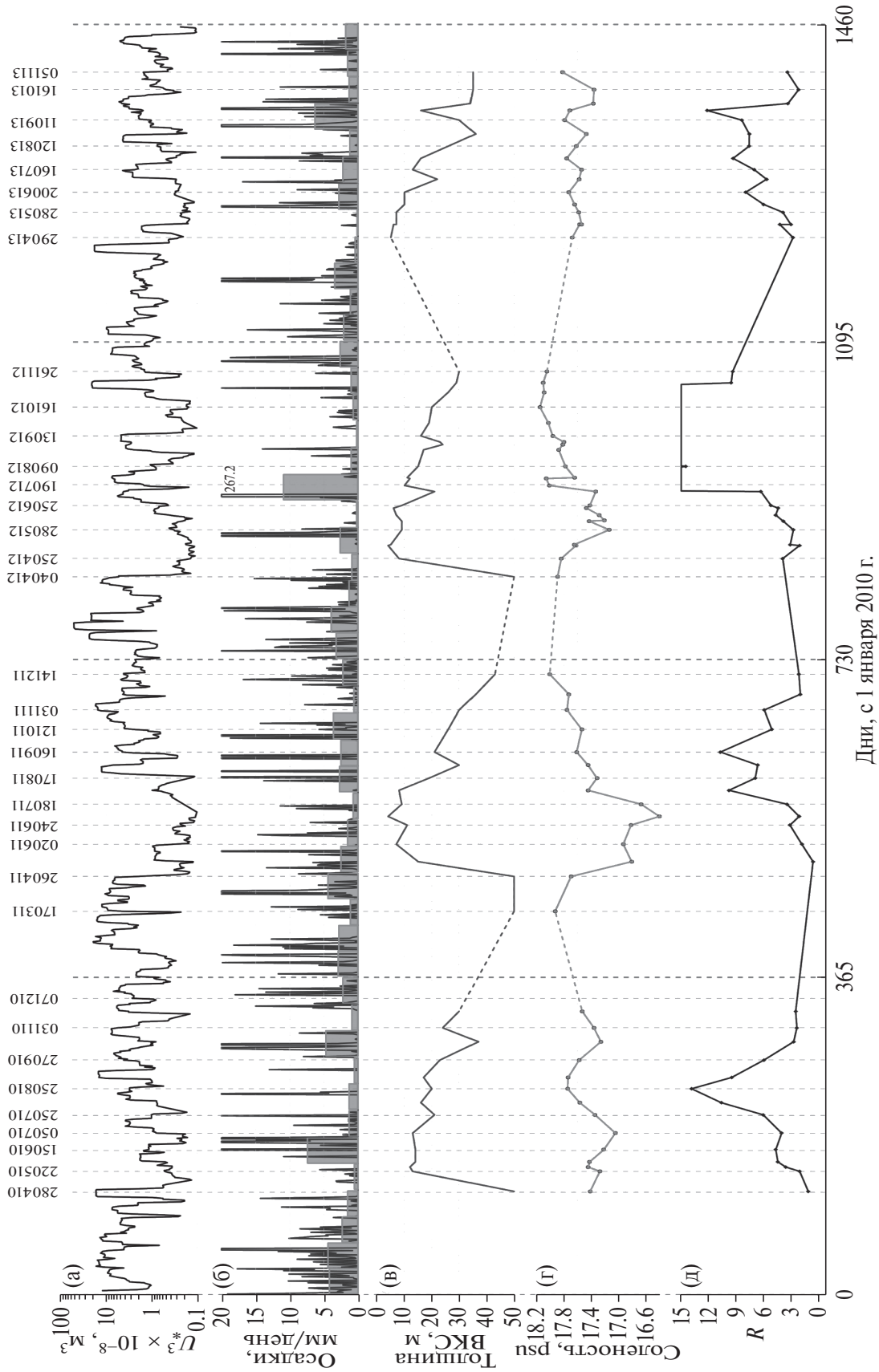


Рис. 8. Характеристика ветрового воздействия (U^*) (скользящее среднее с окном в 9 дней) (а), осадки суточные (черная линия) и среднемесячные (серая гистограмма) (б), толщина ВКС (в), солёность (г) и плотностное соотношение R (д) на станции с глубиной 500 м за весь период наблюдений (2010–2013 гг.).

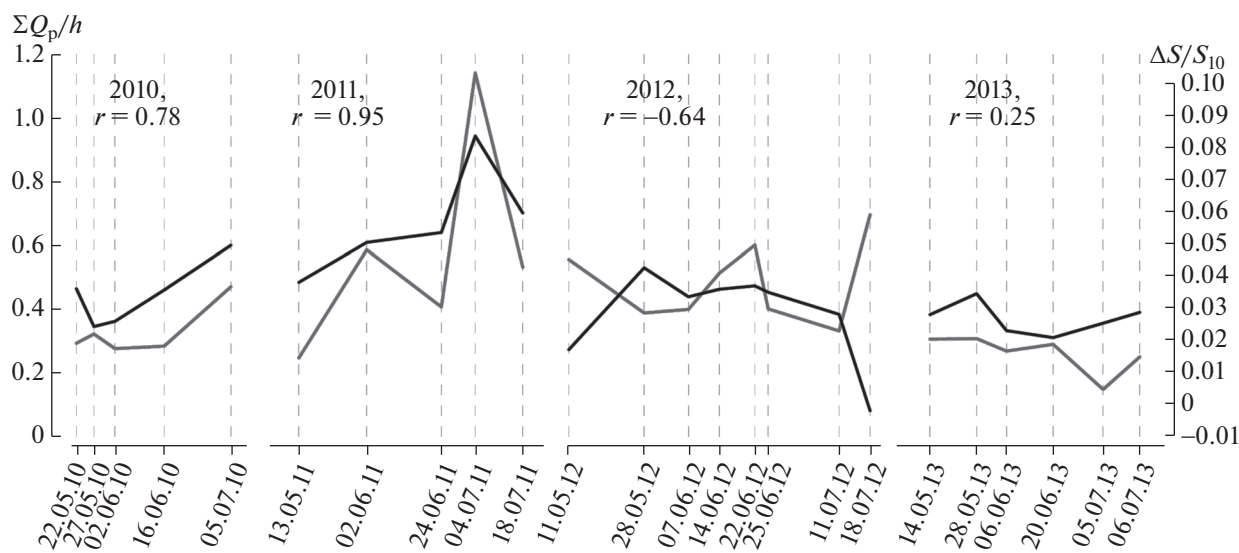


Рис. 9. Значения отношений $\Sigma Q_p/h \times 10^3$ (черный цвет) и $\Delta S/S_{10}$ (серый цвет) за период 2010–2013 гг. и коэффициент корреляции между ними. На горизонтальной оси указаны даты (число–месяц–год).

тельными: 0.78 и 0.95 соответственно. В 2012 г. корреляция была обратной (хоть и высокой): -0.64 , а в 2013 г. положительной, но низкой: 0.25. Попробуем проанализировать аномальные значения коэффициентов корреляции в 2012 и 2013 гг.

Аномальный 2012 г., кроме катастрофического ливня и наводнения, был в целом отмечен специфическим режимом осадков. Так, на начало мая общее количество выпавших с января осадков было 278 мм (в 2010–2011 гг. 370 и 368 мм соответственно на этот же момент). Затем, в течение последующих двух недель, выпало еще 71 мм осадков, после чего дожди практически прекратились вплоть до катастрофического ливня 6–7 июля, когда за два дня выпала их пятимесячная норма. Возможно, что в результате достаточно редких событий выпадения интенсивных осадков сформировался геострофически сбалансированный пояс опресненных вод, отделенных от морских вод плотностным (соленостным) фронтом. Этот фронт ограничивал перемешивание между опресненными прибрежными и морскими водами, благодаря чему опреснение вод прибрежной зоны сохранялось даже в периоды отсутствия осадков. Кроме того, вдольбереговое геострофическое течение в поясе опресненных вод могло транспортировать опресненные воды из района Туапсе–Сочи или даже абхазско-грузинского побережья, где речной сток более значителен и постоянен. Однако для осуществления этого условия пояс опресненных вод должен быть квазинепрерывным вдоль всего кавказского побережья Черного моря. Если такое условие соблюдается, то степень опреснения вод в Геленджикском районе должна определяться не местными осадками, а теми, что выпали на участках побережья, расположенных к юго-востоку от Геленджика. При этом корреля-

ция с суммой местных осадков может быть даже отрицательной, как это было в 2012 г. Если такого пояса нет, и существует развитый водообмен между прибрежной и глубоководной зоной, обусловленный либо вихревыми образованиями, либо дрейфовым ветром, опресненные речные воды не могут распространиться вдоль берега далеко от источника опреснения. В этом случае должна быть высокая положительная корреляция между суммой местных осадков и сезонным понижением поверхностной солености. Однако все эти гипотезы нуждаются в дальнейшем исследовании.

В 2013 г. общий объем осадков на начало мая был в полтора раза меньше, чем в 2010–2011 гг. (214 мм), и в дальнейшем такая же тенденция сохранялась. Таким образом, первая половина года являлась засушливой. Очевидно, что в условиях слабого опреснения прибрежных вод его сигнал должен быть сильно зашумленным, из-за чего корреляция между суммой местных осадков и сезонным понижением солености не должна быть высокой, что и проявилось в 2013 г.

В качестве эксперимента расчеты корреляций были повторены для суммы осадков за 10, 30, 60 и 90 дней до момента наблюдений. Разные годы и разные интервалы осреднений дали заметный разброс корреляции, демонстрируя примеры как сильно отрицательной ($r = -0.78$) или положительной ($r = 0.85$), так и крайне слабой ($r = 0.11$) зависимости. В целом можно отметить, что ни один интервал осреднения из перечисленных не дал хоть сколько-нибудь приемлемой корреляции для всех четырех годов наблюдения одновременно.

ОТНОШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО И СОЛЕННОСТНОГО ВКЛАДОВ В ПЛОТНОСТЬ В ОБЛАСТИ СЕЗОННОГО ТЕРМО-ГАЛОКЛИНА

Как уже было сказано выше, в области сезонного термоклина практически всегда наблюдался и галоклин, хотя в ряде случаев наблюдался и более высоко расположенный галоклин, связанный либо с обильными и недавними по времени осадками, либо с адвекцией сильно опресненных вод вдоль побережья. Очевидно, что вклад солёности в перепад плотности в области термоклина должен способствовать его устойчивости по отношению к ветровому воздействию и приводить к большей изоляции ВКС от холодного промежуточного слоя, редуцируя вертикальный обмен и поступление биогенов снизу в эвфотический слой. Чтобы прояснить термический и солёностный вклады в перепад плотности в термо-галоклине, было рассчитано плотностное соотношение $R = \alpha \Delta T / \beta \Delta S$ [8]. Здесь α – коэффициент термического расширения, β – коэффициент солёностного сжатия (с учетом небольшого диапазона изменения солёности, его считали константой, $\beta \approx 7.8 \times 10^{-4} (\text{‰})^{-1}$, ΔT – перепад температуры в термоклине, равный T_0 (текущая температура в ВКС) минус 10°C (условная температура в “конце” термоклина), ΔS – соответствующий термоклину перепад солёности, $\Delta S = S_0 - S_z$, где S_0 – средняя солёность в ВКС, S_z – солёность на горизонте, где $T = 10^\circ\text{C}$.

График сезонного изменения параметра R (рис. 8) демонстрирует, что он практически всегда больше единицы и растёт со временем, начиная с весны ($R = 2-3$) и до сентября–октября ($R > 10$). Это означает, что в сезонном термогалоклине термическая стратификация в среднем значительно больше солёностной в плотностном выражении. Однако в весенний период, в апреле–мае, солёностный вклад довольно существенен, и опреснение поверхностных вод, безусловно, способствует возникновению сезонного термоклина и повышает его резистивность по отношению к событиям волно-ветрового пе-

ремешивания и ночного выхолаживания ВКС за счет оттока тепла в атмосферу.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации “Русское географическое общество”, договор № 10/2013/РГО-РФФИ (в части проведения измерений), Соглашения № 14.577.21.0110 с Минобрнауки РФ (в части обработки и анализа данных), проекта РНФ № 14-50-00095 (в части написания статьи и ее подготовки к публикации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // Геоэкология. 2008. № 4. С. 301–310.
2. Альтман Э.М., Кумыш Н.И. Многолетняя внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря // Тр. ГОИН. 1986. Вып. 176. С. 3–18.
3. Джаошвили Ш. Реки Черного моря // Европейское агентство по охране окружающей среды. Технический отчет № 71. 2002. http://reports.eea.eu.int/technical_report_2002_71/. 58 с.
4. Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
5. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2013. № 6. С. 717–732.
6. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2014. № 1. С. 16–29.
7. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 284 с.
8. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 184 с.
9. Osadchiv A.A., Zavialov P.O. Lagrangian model of a surface-advected river plume // Continental Shelf Research. 2013. doi: 10.1016/j.csr.2013.10.03

Seasonal Anomalies of Water Salinity in Gelendzhik Region of the Black Sea According to the Ship-Born Monitoring Data

O. I. Podymov, A. G. Zatsepin

Results of the analysis of data on the variability of salinity in the coastal zone upper layer (including the seasonal thermocline) of the Black Sea during the 2010–2013 warm seasons (April–November) are presented. The data used for the analysis were obtained from the regularly conducted by R/V “Ashamba” CTD-probing on a cross-section at the Blue Bay (Gelendzhik) beam. The relationship between salinity anomalies, coastal precipitation and wind forcing is analyzed. It is shown that the contribution of thermal stratification to the density stratification in the seasonal thermocline is almost always greater than the contribution of salinity stratification, and the ratio of the former to the latter increases from April to November.