

УДК 551.465

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ У УСТЬЕВ МАЛЫХ РЕК РОССИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2014 г. П. О. Завьялов¹, П. Н. Маккавеев¹, Б. В. Коновалов¹, А. А. Осадчиев¹,
П. В. Хлебопашев¹, В. В. Пелевин¹, А. Б. Грабовский¹, А. С. Ижицкий¹, И. В. Гончаренко¹,
Д. М. Соловьев², А. А. Полухин¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
e-mail: peter@ocean.ru

²Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, Украина

Поступила в редакцию 27.06.2013 г., после доработки 18.01.2014 г.

В статье представлены данные многолетних контактных и спутниковых наблюдений в шельфовых акваториях, примыкающих к устьям малых рек российского побережья Черного моря (Мезыб, Пшада, Вулан, Туапсе, Битха, Сочи, Кудепста, Мзымта). Для каждого из этих районов приведены количественные характеристики отклика гидрофизических и гидрохимических полей на шельфе на воздействие материкового речного стока. В контексте антропогенных и терригенных воздействий рассматриваются некоторые показатели качества вод, такие как концентрации нитратного и нитритного форм азота, фосфора, кремния, растворенного кислорода, величины общей щелочности и рН, а также минеральной и органической взвеси и хлорофилла “а”. Особое внимание в статье уделено плюму р. Мзымта в акватории г. Сочи, где измерения выполнялись неоднократно в условиях весенних паводков в период с 2007 по 2012 гг. Рассмотрена межгодовая изменчивость показателей качества вод, а также сезонная и короткопериодная изменчивость площади и конфигурации плюма, несущего взвесь и продукты антропогенного загрязнения.

DOI: 10.7868/S0030157414030150

1. ВВЕДЕНИЕ

С материковым речным стоком связаны значительные потоки пресной воды, плавучести, тепла и импульса в океан. В целом по Мировому океану суммарный среднеголетний объем стока рек оценивается в 39000 км^3 в год [12], что эквивалентно примерно 12 Св и составляет около четверти приходной части водного баланса океана (остальные три четверти обеспечивают атмосферные осадки на его зеркало). Однако, для отдельных шельфовых районов океана, а также внутренних и окраинных морей относительная роль материкового стока может быть на порядок выше, чем для всего океана. Так, например, для Черного моря годовой речной сток (338 км^3 в год) превышает атмосферные осадки (238 км^3 в год) и приближается к величине испарения (396 км^3 в год) [2]. Опресненные воды материкового происхождения во многих случаях формируют стратификацию приповерхностного слоя на обширных акваториях.

Материковый сток является также основным источником поступления в море взвешенных и растворенных терригенных веществ, биогенных элементов, а также продуктов антропогенного загрязне-

ния. Так, по официальным данным [7] в моря России с речным стоком поступает ежегодно: аммонийного азота – 200 тыс. тонн, фосфора – 60 тыс. тонн, металлов (Fe, Zn, Cu) – 50 тыс. тонн, нефтепродуктов – 30 тыс. тонн, фенолов – 1 тыс. тонн.

Попадая из реки в море, материковые воды образуют там прилегающие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной солоностью и температурой, отличной от окружающей, а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворенной органики. Такие структуры в современной литературе принято называть “плюмами” (от английского “plume”). Пространственные масштабы плюмов могут достигать порядка десятков, а для крупных рек – и сотен километров, но при этом они во многих случаях сохраняют резко очерченную границу (шириной порядка нескольких метров и даже сантиметров) с окружающими морскими водами. Речные плюмы практически всегда приурочены к поверхности, поскольку характеризуются пониженной плотностью воды, но по вертикали они могут охватывать более или менее значительный слой в зависимости от мощности стока и интенсивности перемешивания. Из наблюдений – особенно

спутниковых — известно, что для речных плюмов характерно большое разнообразие морфологических форм и типов динамического поведения. Они обладают собственным инерционным движением, взаимодействуют с особенностями донной топографии и вихревыми образованиями на шельфе, переносятся ветром и фоновой прибрежной циркуляцией и лишь после этого, смешиваясь в конце концов с окружающими водами, доставляют в море терригенные вещества и сигнал антропогенных воздействий. Таким образом, именно в динамике плюмов лежит ключ к пониманию механизмов распространения материкового стока в океане и его взаимодействия с морскими водами. Вместе с этим, закономерности поведения плюмов больших и малых рек в различных условиях изучены недостаточно (подробный обзор на эту тему дан в работе [15]).

Будучи внутренней, почти замкнутой морской акваторией, Черное море является особенно подверженным влиянию пресноводного материкового стока. Общее число впадающих в него больших и малых рек приближается к 1000, но лишь 10 из них относятся к категории крупных (т.е. обладающих площадью водосборного бассейна свыше 10 000 км²). Среднегодовое значение суммарного годового объема стока в Черное море оценивается большинством авторов примерно в 350 км³, причем более 80% этого объема приходится на вышеупомянутые 10 крупных рек, в первую очередь Дунай (200 км³), Днепр (44 км³), Риони (13 км³) и Днестр (9 км³) [4]. Стоком этих рек, особенно Дуная, посвящена достаточно обширная литература. Однако на большинстве из многочисленных малых и средних рек Черного моря, суммарный вклад которых в водный баланс моря весьма значителен, систематические наблюдения за расходами не ведутся. При этом на долю малых и средних рек приходится от 40 до 120 км³ годового объема стока.

В пределах России в море впадают малые реки числом более 20, а также несколько средних: Пшава, Вулан, Туапсе, Псезуапсе, Сочи. Для каждой из этих средних рек характерен среднегодовой расход порядка 10–15 м³/с и годовой объем стока порядка 0.3–0.5 км³. Особняком стоят более крупные Шахе (37 м³/с, 1.2 км³) и Мзымта (49 м³/с, 1.6 км³), впадающие в море в восточной части российского побережья. Общий среднегодовой объем стока в Черное море с территории России — около 7 км³ в год [8]. Этот объем составляет лишь около 2% от суммарного пресноводного стока в Черное море. Возможно, именно по этой причине влиянию стока малых и средних российских рек в Черное море ранее в литературе уделялось сравнительно мало внимания, хотя отдельные публикации на эту тему, конечно, имели место (например, монография [11], статья [1] и др.).

Однако этот сток, являясь относительно незначительным компонентом водного баланса для моря в целом, оказывает, тем не менее, заметное влияние на систему суша—море в региональных масштабах, биопродуктивность российского черноморского шельфа, а также на качество вод и уровень терригенного и антропогенного загрязнения в этом районе.

Вопрос загрязнения прибрежных вод материковым стоком стоит для российского сектора Черного моря достаточно остро, особенно в акваториях крупных городов, таких как Анапа, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Сочи [11]. В первую очередь это относится к крупнейшему курорту страны и будущей столице Олимпийских игр 2014 г., городу Сочи. Известно [3], что этот район подвержен значительному загрязнению. Ежегодно в водные объекты региона, в том числе непосредственно в море, сбрасывается около 90 млн тонн загрязненных сточных вод. Из них лишь 15% являются чистыми или нормативно-очищенными. Одним из источников загрязнения являются промышленные предприятия числом более 20, расположенные вдоль рек Мзымта и Сочи. В результате в воде рек г. Сочи концентрация нефтепродуктов превышает ПДК в 16 раз, а тяжелых металлов (Cu, Fe, Zn и др.) — в 3–5 раз [3]. Вода рек в черте г. Сочи классифицируется как грязная (V класс загрязнения). Вдобавок канализационные сточные воды частично сбрасывались здесь прямо в море на глубине менее 10 м и удалении около 1 км от берега на траверсе района Хоста. Дополнительным источником загрязнения в последние годы стали строительные работы, интенсивно ведущиеся на ряде участков береговой линии в связи с предстоящей олимпиадой, и особенно — строительство новых портовых сооружений в Адлере у устья р. Мзымта (при этом производился отбор гравия и грунта непосредственно в русле реки), а также в районе центрального морского вокзала вблизи устья р. Сочи.

Всеми названными выше обстоятельствами определяется актуальность изучения процессов распространения материкового речного стока на российском черноморском шельфе. Представляют интерес количественные оценки масштабов влияния стока на гидрохимические и гидрофизические показатели состояния вод в прибрежной зоне, характеристик изменчивости этого влияния в различных временных масштабах, а также закономерности динамики речных плюмов в различных условиях атмосферного воздействия.

С целью исследования этого круга вопросов в 2006 г. в рамках ежегодных комплексных экспедиционных работ Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) на Черном море была начата программа “Малые реки Черного моря”. Описанию основных результатов этой про-

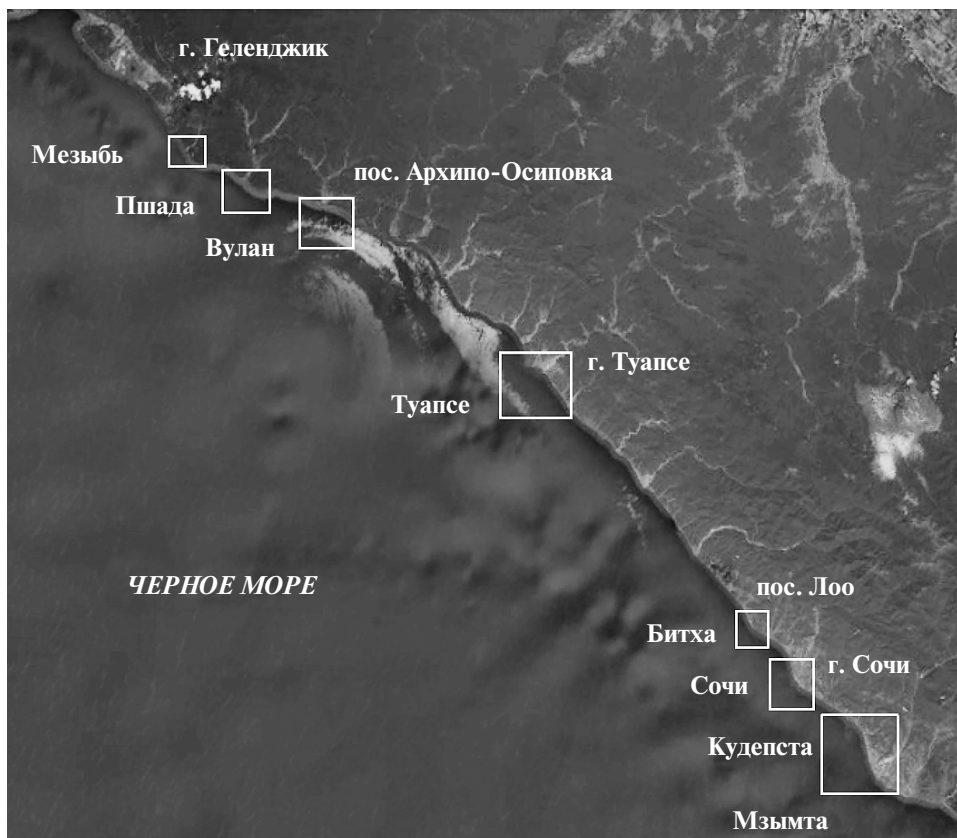


Рис. 1. Схема расположения измерительных полигонов в акваториях, прилежащих к устьям рек в российском секторе Черного моря.

граммы, полученных к настоящему времени, и посвящена данная работа.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной статье использованы материалы следующих экспедиционных исследований:

1) Измерения с борта бота БРП-74 “Ашамба”, выполненные на трех полигонах в приустьевых районах рек Пшада (пос. Криницы), Вулан (пос. Архипо-Осиповка) и Мезыбь (пос. Дивноморское) – 1–9 июня 2006 г.;

2) Измерения в 119-м рейсе НИС “Акванавт” на 6 полигонах в приустьевых районах рек Мзымта (г. Сочи), Сочи (г. Сочи), Мезыбь (пос. Дивноморское), Туапсе (г. Туапсе), Вулан (пос. Архипо-Осиповка), Пшада (пос. Криницы) – 2–5 мая 2007 г.;

3) Измерения с борта БРП-74 “Ашамба” на полигоне в бухте Вулан (пос. Архипо-Осиповка) в приустьевой области р. Вулан – 7–13 ноября 2008 г.;

4) Измерения с борта БРП-74 “Ашамба” на полигоне в прибрежной зоне между устьевыми областями р. Кудепста и р. Мзымта (все – г. Сочи) – 20–27 мая 2009 г.;

5) Измерения с борта бота “Гранит-1” на полигоне в прибрежной зоне между устьевыми областями р. Кудепста и р. Мзымта (все – г. Сочи) – 25–30 мая 2010 г.;

6) Измерения с борта БРП-74 “Ашамба” на полигоне в прибрежной зоне между устьевыми областями р. Кудепста и р. Мзымта (все – г. Сочи) – 25–31 мая 2011 г.;

7) Измерения с борта БРП-74 “Ашамба” в приустьевых районах рек Мзымта, Кудепста, Сочи и Битха (все – г. Сочи) – 15–19 мая 2012 г.

8) Измерения в районе городов Сочи, Адлер, Архипо-Осиповка – 28 ноября–6 декабря 2012 г.

Как видно из этого перечня, все экспедиции, исключая осенние работы 2008 г. в бухте Вулан и работ конца 2012 г., осуществлялись в один и тот же период года – май или первые дни июня, который в этом районе обычно соответствует паводковому стоку рек.

Расположение отдельных районов работ показано на рис. 1.

Измерения на некоторых из полигонов были выполнены лишь однократно (Туапсе – 4 мая 2007 г., Битха – 19 мая 2012 г.), на некоторых – дважды в разные годы (Мезыбь – 4 июня 2006 г. и

4 мая 2007 г., Пшада — 2 июня 2006 г. и 3 мая 2007 г., Сочи — 3 мая 2007 г., 17 мая 2012 г.), а на полигонах Вулан (2008 г.) и Мзымта/Кудепста (2009–2012 гг.) съемки во время работ повторялись ежедневно или даже два раза в день, так что в общей сложности выполнены 9 съемок полигона Вулан и 17 съемок полигона Мзымта/Кудепста.

Измерения в каждом из районов были организованы в виде 3–5 поперечных берегу разрезов длиной от 1.5 до 4 км (в зависимости от наблюдавшихся размеров речного плюма), обычно — от изобаты 5 м до изобаты 30, 40 или 50 м, при расстоянии между соседними разрезами 1–3 км. На каждом из разрезов выполнялись 3 (в отдельных случаях 2) станции для вертикального зондирования и отбора проб воды. Непрерывные наблюдения параметров поверхностного слоя проводились и при движении судна на разрезах и переходах между ними.

На борту судна и на берегу использовалось следующее измерительное оборудование:

1) Проточная зондирующая система, состоящая из подающего забортную воду центробежного насоса производительностью около 1 л/с и уложенного в специальный контейнер емкостью 30 л на палубе STD-зонда SBE911 или SBE19plus. Затем данные осреднялись по 10-секундным интервалам. Эта же проточная система питала и датчики гидрохимических измерений (см. далее);

2) По ходу судна вода подавалась также в проточную ячейку, где находились датчики кислорода, температуры и электрод для измерения pH. Запись измеряемых параметров и координат судна проводилась каждые 10–30 с (в прибрежной зоне чаще, в мористой части полигона реже). Для регистрации гидрохимических параметров по ходу судна применялся 4-х канальный иономер “Эконикс Эксперт 001” и амперометрический датчик растворенного кислорода ДКПТ-02.4 производства НПП “Эконикс Эксперт” (Россия);

3) Ультрафиолетовый флуоресцентный лидар УФЛ-8 или УФЛ-9, установленный на баке катера или судна, обеспечивал экспрессные определения концентрации хлорофилла, взвеси и растворенной органики на ходу катера с частотой 4 Гц, то есть при скорости хода 5 узлов — с пространственным разрешением менее 1 м. Технические характеристики лидара и способы пересчета из оптических единиц в весовые изложены в статье [1];

4) Помимо STD-зонда, задействованного в проточной системе, в измерениях использовался другой STD-зонд (SBE19plus или Idronaut) для получения вертикальных профилей температуры, солености и плотности на отдельных станциях;

5) Отбор проб воды для последующего анализа гидрохимических параметров и фильтрации на хлорофилл и взвесь осуществлялся на поверхности, в придонном слое и на нижней границе верхнего квазиоднородного слоя 5-литровым батометром Нискина. Отбор проб проводился в соответствии с [5]. Сразу после отбора пробу переливали в посуду для хранения проб по [6], в зависимости от определяемого компонента. Определения проводились по стандартным методикам, принятым в системе учреждений Академии наук [14] и рыбного хозяйства [13]. Определения проводилось во временной лаборатории, организуемой на берегу, не позднее, чем через 12 часов со времени отбора. Кроме того, проводилась подготовка проб для определения содержания растворенных и взвешенных металлов и органического углерода, которые анализировались позднее в стационарных лабораториях ИО РАН;

6) Для определения компонентов сестона пробы воды отфильтровывались на стекловолокнистые фильтры Whatman GF/F диаметром 47 мм (с размерами пор 0.7 мкм). Фильтр с осадком использовался для определения концентрации хлорофилла и регистрации цвета сестона, т.е. спектра поглощения в видимой области, и расчета парциальных показателей поглощения его компонентами. Хлорофилл определялся по стандартной спектрофотометрической методике с экстрагированием пигментов водным ацетоном. Концентрации фитопланктона, детрита и минеральной взвеси определялись в оптических единицах на спектрофотометре СФ-14 с интегрирующей сферой. Для общей взвеси производился пересчет оптических единиц в весовые по эмпирической формуле, приведенной в работе [9];

7) На полигонах Мзымта/Кудепста и Вулан в период измерений устанавливались заякоренные станции (рис. 2), каждая из которых оснащалась придонным измерителем скорости течения типа SeaHorse [16], а станция, ближайшая к устью — еще и акустическим измерителем скорости течения Aquadopp в приповерхностном слое на глубине 3 м. Скорости и направления течений фиксировались с 10-минутными осреднениями. Анализ этих данных по скорости течений в приустьевых районах посвящена статья [10];

8) В руслах рек Мзымта и Вулан, на глубине 1.5–2.5 м на дистанции 50–100 м от устья в период измерений устанавливался измеритель скорости течения Aquadopp или SeaHorse. Прибор регистрировал 10-минутные осреднения скорости течения реки для последующей оценки изменчивости объема стока;

На полигонах Мзымта–Кудепста и Вулан на берегу устанавливалась портативная метеостан-

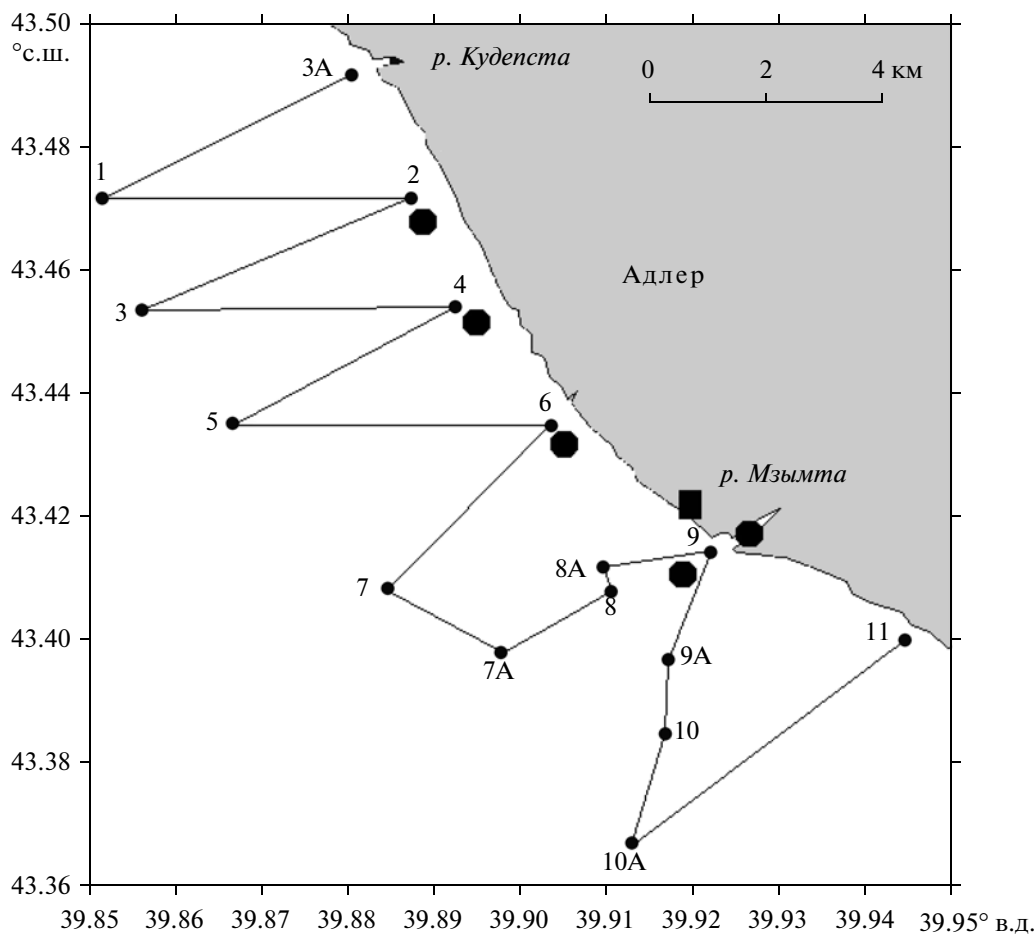


Рис. 2. Схема организации измерений на полигоне Мзымта–Кудепста 21–27.05.2009 г. Сплошная линия – траектория движения судна, точки – гидрологические станции, большие кружки – заякоренные станции с измерителями течений, квадратик – портативная метеостанция.

ция HeavyWeather. Станция устанавливалась на высоте 8–10 м над уровнем воды вблизи устья реки, по возможности, на открытом месте вдали от возвышений рельефа, высоких деревьев и сооружений. В течение всего периода измерений регистрировались 10-минутные осреднения скорости и направления ветра, а также всех основных метеоэлементов.

На рис. 2 в качестве примера приведена схема измерений на полигоне Мзымта–Кудепста 21–27 мая 2009 г. В остальных экспедициях измерения были организованы аналогичным образом.

В работе используются также карты распределения концентрации взвеси для района Мзымта–Кудепста, построенные по данным спутникового сканера цвета MERIS-EnviSat после их обработки алгоритмом MERIS Case-2 Regional [17]. Были отобраны 78 снимков района, ограниченного координатами 43°20′–43°40′ с.ш. и 39°30′–40°10′ в.д. Изображения были получены в разные дни за пе-

риод с 18 мая 2010 г. по 5 апреля 2011 г. в условиях малой облачности, и на них четко очерчен плюм р. Мзымта, характеризующийся высоким содержанием взвеси в поверхностном слое (рис. 3).

3. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛИЯНИЯ РЕЧНОГО СТОКА

В периоды исследований в районах, примыкающих к речным устьям, в приповерхностном слое толщиной 1–4 м наблюдались четко различимые мезомасштабные структуры (“плюмы”). Они, как правило, имели хорошо определенную (особенно с наветренной стороны) внешнюю границу и отличались пониженными, по отношению к фоновым значениям в окружающих морских водах, соленостью и плотностью. Речные плюмы характеризовались также повышенным (иногда на порядок и более) содержанием минеральной и органической взвеси, растворенных органических веществ и хлорофилла фитопланктона. В гидрохимическом отношении они отличались сравнительно высо-

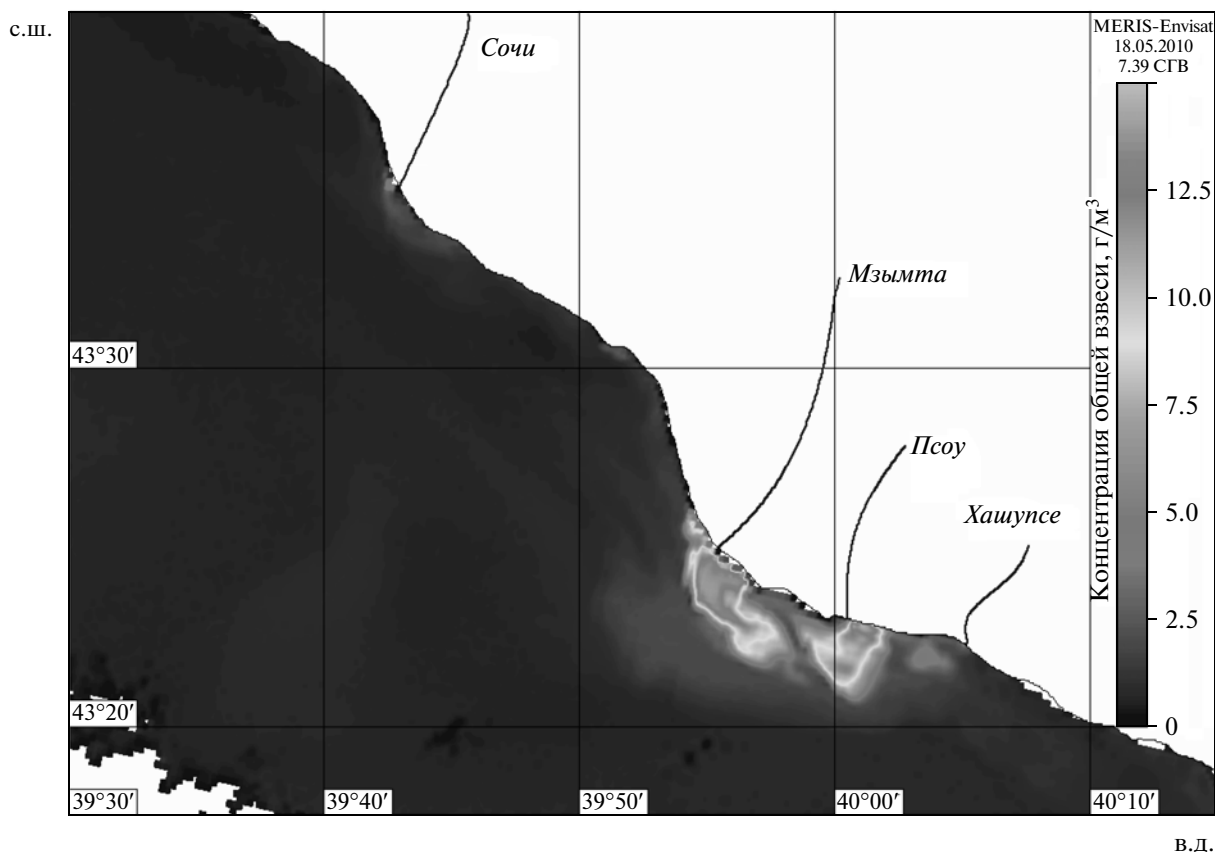


Рис. 3. Пример спутникового снимка MERIS-Envisat для концентрации взвеси в поверхностном слое (черно-белое воспроизведение цветного изображения). Хорошо видны плюмы рек Мзымта и Псоу.

кими значениями рН и общей щелочности, а также повышенными концентрациями кремния и других биогенных веществ. На рис. 4 и 5 в качестве типичных примеров показаны распределение солёности на поверхности, а также вертикальные профили солёности, температуры и плотности в плюме р. Мзымта (29–30 мая 2011 г.). Видно, что в данном случае величина опреснения морской воды в плюме на глубине 1 м превышала 5 епс, а толщина опресненного приповерхностного слоя составляла около 3.8 м.

На рис. 6 представлено сглаженное распределение концентрации минеральной взвеси в поверхностном слое, характерное для внутреннего шельфа между устьями р. Мзымта и р. Кудепста. Как видно, в плюме р. Мзымта содержание взвеси превышает фоновые морские значения в 6 раз и более, в плюме р. Кудепста — в 2–3 раза.

Абсолютные величины аномалий перечисленных параметров в плюмах малых рек российского сектора Черного моря, а также горизонтальные и вертикальные масштабы плюмов меняются в широких пределах не только от реки к реке, но и для каждой из рек в отдельности в зависимости от интенсивности стока и других гидрометеорологиче-

ских условий, особенно направления и скорости ветра. Анализ механизмов, определяющих характеристики плюма в тех или иных условиях, выходит за рамки данной статьи (этот круг вопросов достаточно подробно исследован средствами численного моделирования, например, в работе [15]). Здесь же мы попытаемся представить обобщенную статистику этих характеристик для интересующего нас района на основе данных натуральных измерений (в этом разделе) и спутниковых наблюдений (в разделе 5). В табл. 1 приведены средние значения основных характеристик для плюмов разных российских рек Черного моря, а также связанных с ними аномалий солёности, концентрации взвеси, значений гидрохимических параметров. Для всех величин, измерявшихся более одного раза, показаны также среднеквадратические отклонения от среднего. Граница каждого исследуемого речного плюма условно задавалась линией, совпадающей с изохалиной в 16 епс, а горизонтальный масштаб плюма рассчитывался как корень из площади плюма. Вертикальный масштаб плюма определялся как расстояние от поверхности моря до нижней границы плюма (т.е. изохалины 16 епс) в реперной точке, расположенной на расстоянии около 200 м от устья реки. Под аномалиями здесь

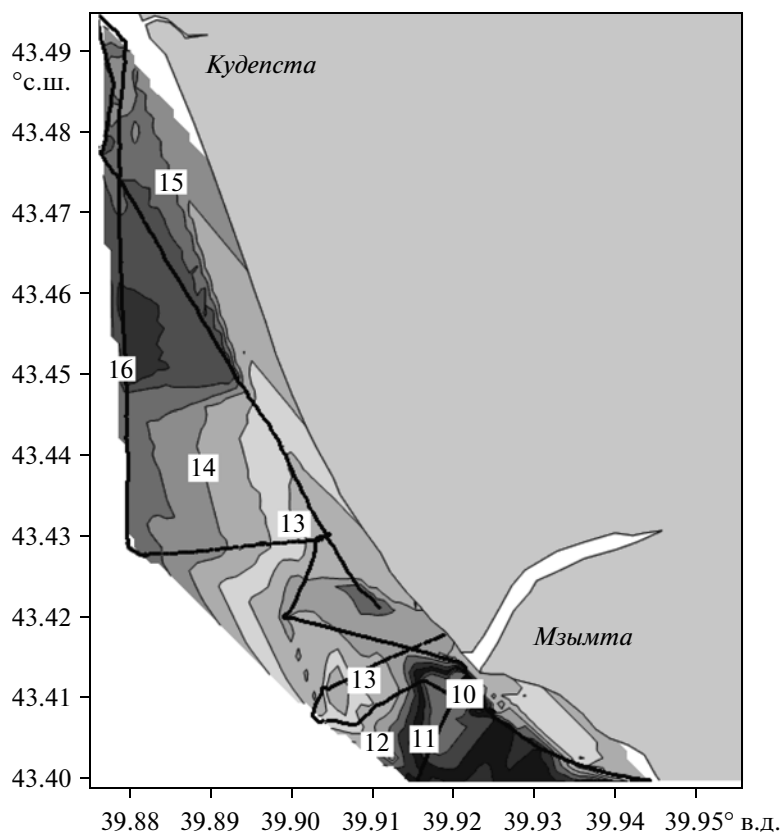


Рис. 4. Распределение солености (епс) на глубине 1 м на полигоне Мзымта–Кудепста 30.05.2011 г. Черной линией показана траектория движения судна по полигону.

и далее понимается разность между соответствующими значениями на глубине 1 м в этой реперной точке и “фоновым” за пределами плюма (как правило – на самой мористой станции приустьевого разреза).

Влияние речного стока на химический состав вод приустьевых районов моря зависит от индивидуальных особенностей состава химического стока отдельных рек. В табл. 2 приведена разница

между различными гидрохимическими показателями в поверхностных водах на станциях около устья реки и “фоновыми” значениями на мористых станциях полигонов. В приустьевых водах, как правило, повышено содержание фосфатов, кремния и различных форм азота. Величина общей щелочности и содержание растворенного неорганического углерода могут быть как повышенными, так и пониженными. Результаты работ по

Таблица 1. Некоторые характеристики плюмов рек российского сектора Черного моря по данным натурных наблюдений 2006–2012 гг.

Речной плюм	Средний расход, м ³ /с	Число съемок	Горизонтальный масштаб, км	Вертикальный масштаб, м	Аномалия солености, епс	Аномалия содержания взвеси, мг/л
Мзымта	49.5	17	3.0 ± 1.8	2.6 ± 1.2	3.1 ± 1.4	25.5 ± 17.3
Сочи	16.1	2	2.2 ± 1.2	1.9 ± 1.5	2.4 ± 1.0	3.0 ± 2.1
Туапсе	12.8	1	1.8	2.0	1.1	24.0
Пшада	9.8	2	1.3 ± 0.7	0.9 ± 0.7	0.2 ± 0.1	0.8 ± 0.3
Вулан	6.4	9	1.2 ± 0.6	0.6 ± 0.5	0.2 ± 0.1	0.9 ± 0.4
Мезыб	3.9	1	0.4	0.1	0.05	не обнаружена
Кудепста	3.4	10	0.9 ± 0.7	1.0 ± 0.8	1.1 ± 0.8	9.3 ± 8.3
Битха	0.3	1	0.08	0.4	0.1	не обнаружена

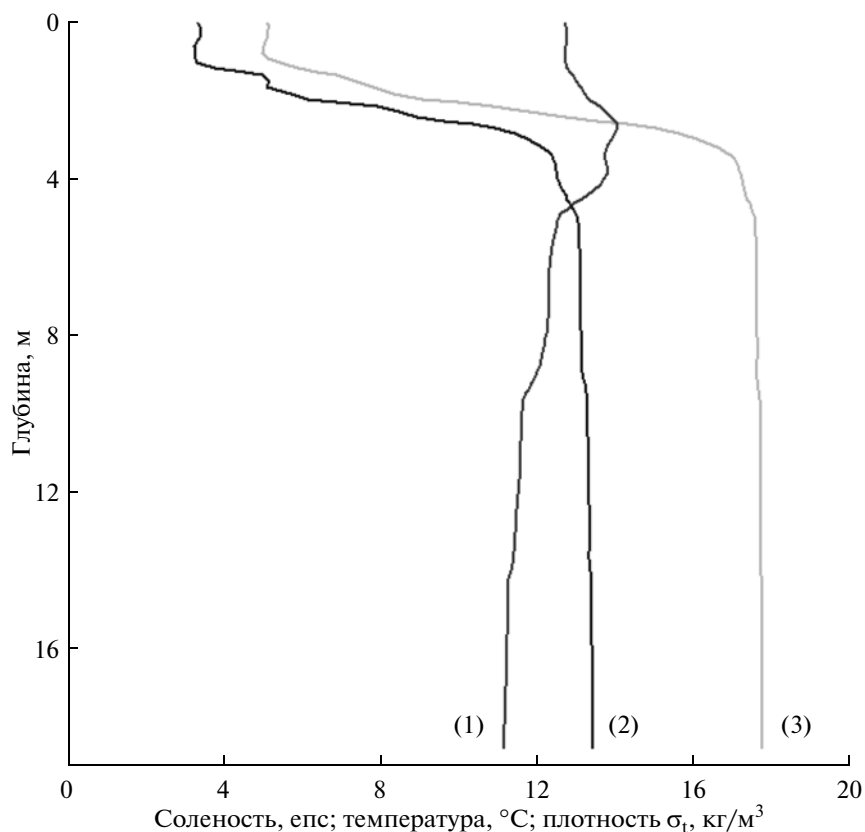


Рис. 5. Типичные вертикальные профили температуры (1), плотности σ_t (2) и солёности (3) в пломе р. Мзымта 29.05.2011 г., 220 м мористее устья реки.

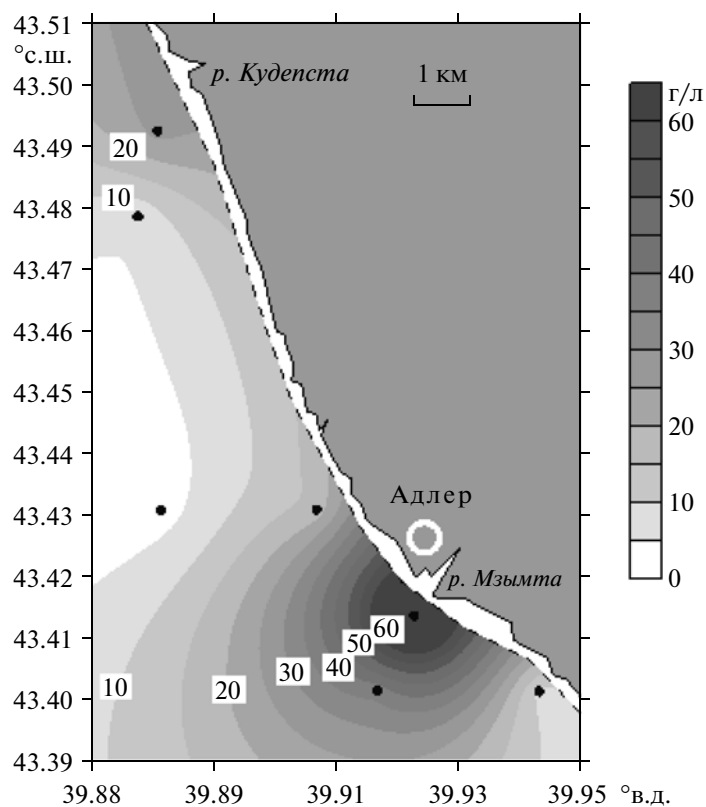


Рис. 6. Распределение концентраций минеральной взвеси, осредненное за период 27–30.05.2011 г. Черные точки соответствуют местам отбора проб воды, использовавшихся для расчета.

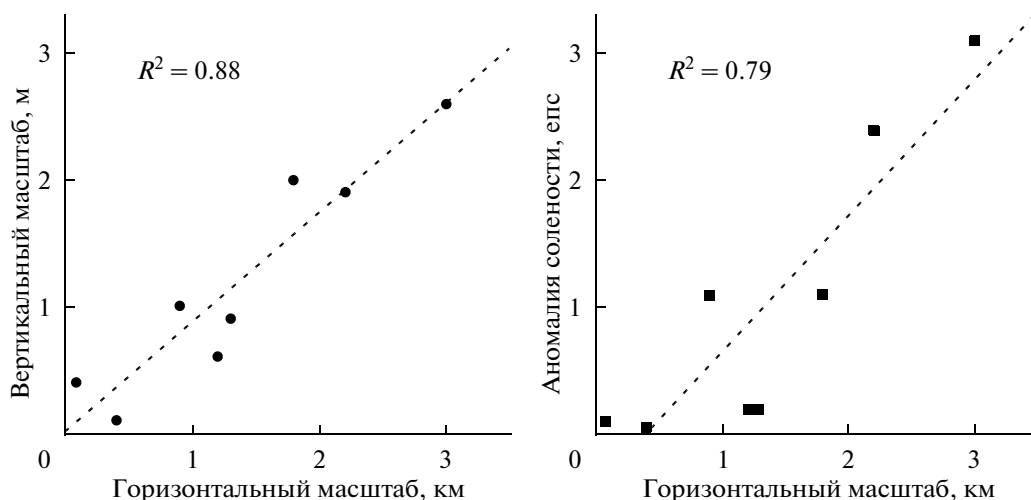


Рис. 7. Эмпирические зависимости вертикального масштаба плумов (слева) и величины аномалии солёности в них (справа) от горизонтального масштаба плума. Графики построены по данным для плумов разных рек, приведенным выше в табл. 1. R – коэффициент корреляции.

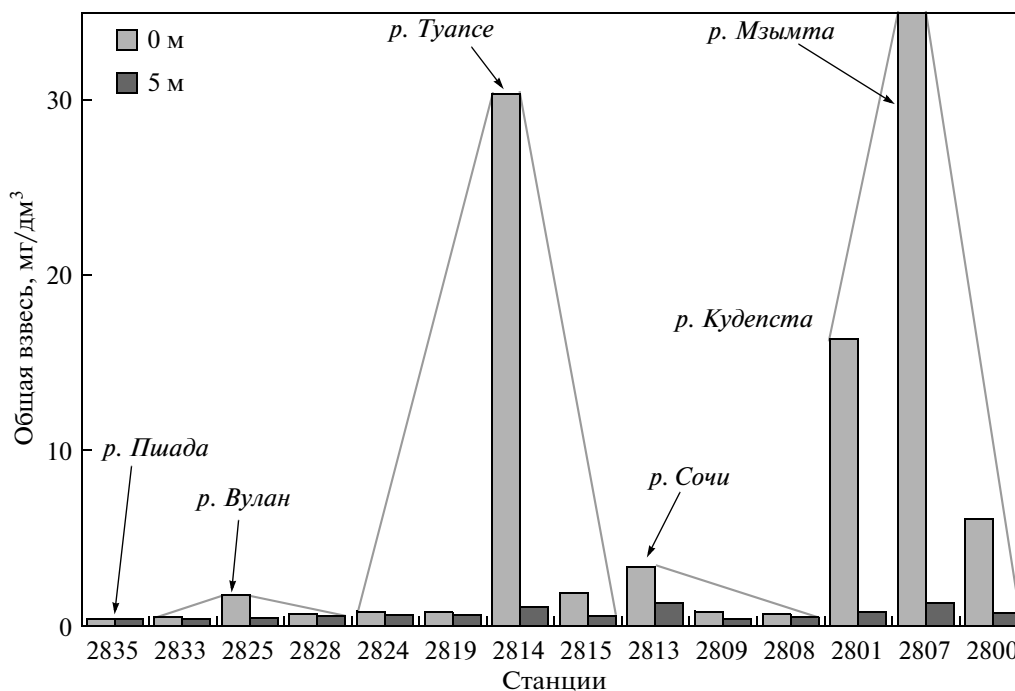


Рис. 8. Концентрации общей взвеси на глубинах 0 м (светлые столбики) и 5 м (темные столбики) в точках ближайших к берегу станций 14-ти разрезов 119-го рейса НИС “Акванавт” 2–5.05.2007 г. По оси абсцисс отложены номера станций. Номера станций возрастают с юга на север. Точки прибрежных станций приблизительно соответствовали изобате 7 м (расстояние 200–500 м от берега). Стрелками показаны станции, выполненные вблизи устьев рек Пшада, Вулан, Туапсе, Сочи, Мзымта.

казали, что воды рек Вулан, Тешевс, Пшада и Мезыбь были обогащены карбонатным углеродом, по сравнению с морской водой, и влияние речного стока хорошо прослеживается по увеличенным значениям общей щелочности, а реки района Туапсе – Сочи содержали относительно немного карбонатного углерода (за исключением

Кудепсты). Это связано с геологическими особенностями бассейна водосбора и химическим составом подземного стока. Следует учитывать, что химический состав стока меняется не только от реки к реке, но и сильно зависит от гидрометеорологических условий бассейна водосбора. При дождевых паводках, как правило, растет со-

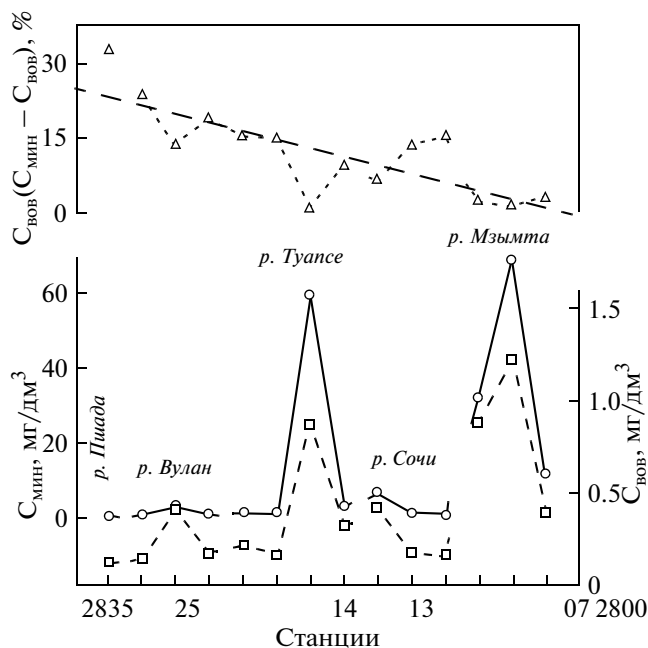


Рис. 9. Концентрации органической ($C_{\text{орг}}$, квадраты) и минеральной ($C_{\text{мин}}$, круги) взвеси (нижний рисунок) и процентное содержание органической взвеси в общем количестве (верхний рисунок). Пунктир – линейные регрессии.

держание различных форм азота и фосфатов (скорее всего из-за смыва удобрений), а содержание кремния и карбонатного углерода, напротив, снижается.

Результаты непрерывных записей содержания растворенного кислорода показали, что, приустьевым зонам исследованных рек соответствует область с повышенным содержанием кислорода и повышенной величиной рН. Можно предположить, что в приустьевом участке существует область, где биологическая активность подпитывается принесенными биогенными элементами. Однако под влиянием динамических факторов (например, нагон вод) эта область может исчезать на некоторое время. Эта зона, как правило, находится на расстоянии 1.5–2 км от устья реки, и ширина этой зоны составляет первые десятки метров.

Горизонтальные масштабы исследованных речных плюмов варьируются в широких пределах от значений порядка сотни метров до 3 км и более (в единичных случаях – и более 10 км). При этом они локализируются в верхнем слое толщиной от первых десятков сантиметров до 4 и более метров. Максимальные аномалии солёности в плюмах по отношению к окружающим поверхностным водам составляют до 5 епс.

Используя данные для плюмов разных рек, собранные в табл. 1, можно попытаться установить некоторые “осредненные” статистические связи между горизонтальной протяженностью плюма L_h ,

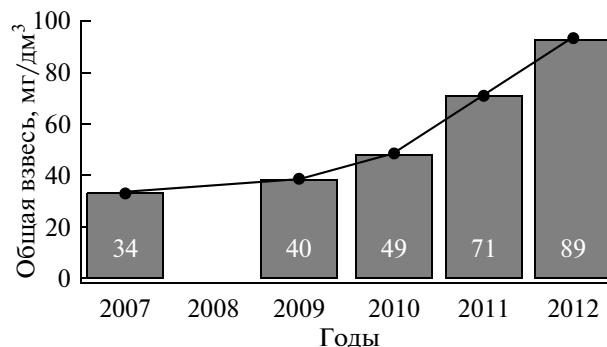


Рис. 10. Максимальные концентрации общей взвеси в области, прилегающей к устью р. Мзымта, по измерениям в экспедициях 2007 и 2009–2012 гг.

его вертикальным масштабом L_v и величиной аномалии солёности в плюме ΔS . Как видно из рис. 7, эти величины обнаруживают достаточно сильные прямые корреляции между собой. Соответствующие линейные регрессии выражаются формулами:

$$L_v \approx 0.86 L_h,$$

$$\Delta S \approx -0.47 + 1.07 L_h,$$

где L_h выражается в километрах, L_v – в метрах, а ΔS – в единицах практической солёности. Эти соотношения могут быть полезны на практике для получения оценочных значений L_h и ΔS в тех частых случаях, когда известны (например, из спутниковых данных) лишь площадь, т.е. горизонтальные размеры плюма.

На рис. 8 представлены величины концентраций общей взвеси вдоль линии, параллельной побережью, от устья р. Пшадра до точки южнее устья р. Мзымта (данные 119-го рейса НИС “Акванавт”, 2–5 мая 2007 г.). Экстремально высокие значения, как и следовало ожидать, отмечены на станциях, которые расположены ближе всего к устьям рек. Наиболее высокие концентрации взвеси наблюдаются у устья р. Мзымта, вторую позицию по этому показателю занимает р. Туапсе. Весьма значительная концентрация взвеси отмечена и вблизи устья такой сравнительно небольшой реки, как Кудепста. Вместе с этим, приустьевые морские акватории рек Сочи, Вулан и Пшадра содержат относительно мало взвеси, несмотря на довольно значительный объем пресноводного стока этих рек.

На рис. 9 показано, как на этом же разрезе меняется величина отношения между органической и минеральной составляющими взвеси на поверхности моря. Установлена тенденция его постепенного снижения с севера на юг. Реки севернее Туапсе несут большое количество органической взвеси, а сама река Туапсе и реки южнее ее – в основном, минеральную взвесь. Этот эффект, по видимому, вызван сменой климатического пояса со

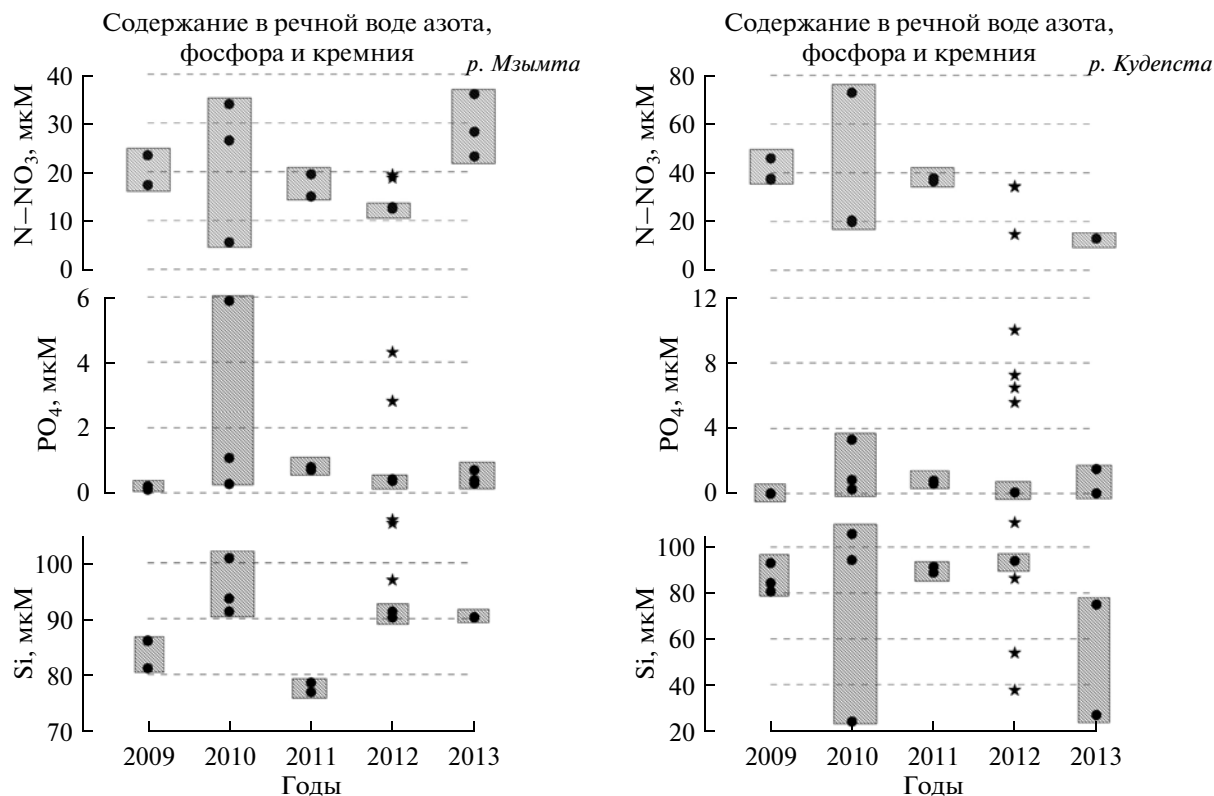


Рис. 11. Динамика содержания форм азота, фосфора и кремния в водах рек Мзымта (слева) и Кудыпта (справа). Звездочкой отмечены данные за конец ноября – начало декабря 2012 г.

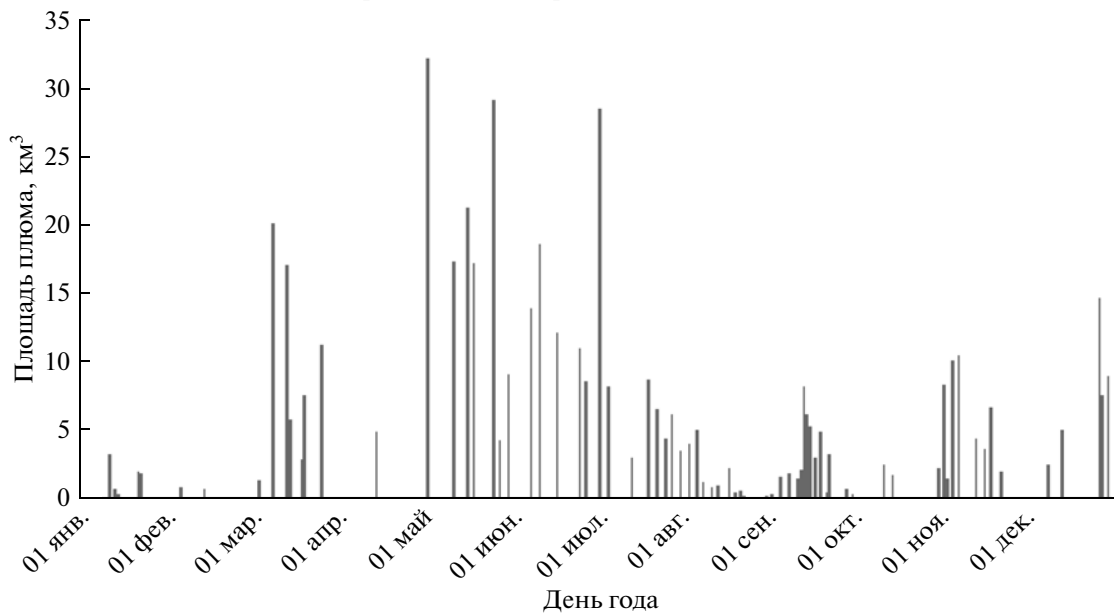


Рис. 12. Значения площади плюма р. Мзымта в течение периода спутниковых наблюдений 2010–2011 гг.

средиземноморского (севернее Туапсе) на субтропический (южнее Туапсе), сопровождаемой резким увеличением годового количества осадков. Другие возможные причины – рост средней высоты рельефа водосборных бассейнов при движении с севера на юг и изменение литологического состава слагающих их горных пород.

4. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛЮМА Р. МЗЫМТА

В этом разделе мы анализируем изменчивость приустьевых акваторий на примере наиболее хорошо обеспеченного данными района, прилегающего к устью р. Мзымта. Сначала мы обратимся к межгодовой изменчивости на основе данных натуральных наблюдений, а затем рассмотрим сезон-

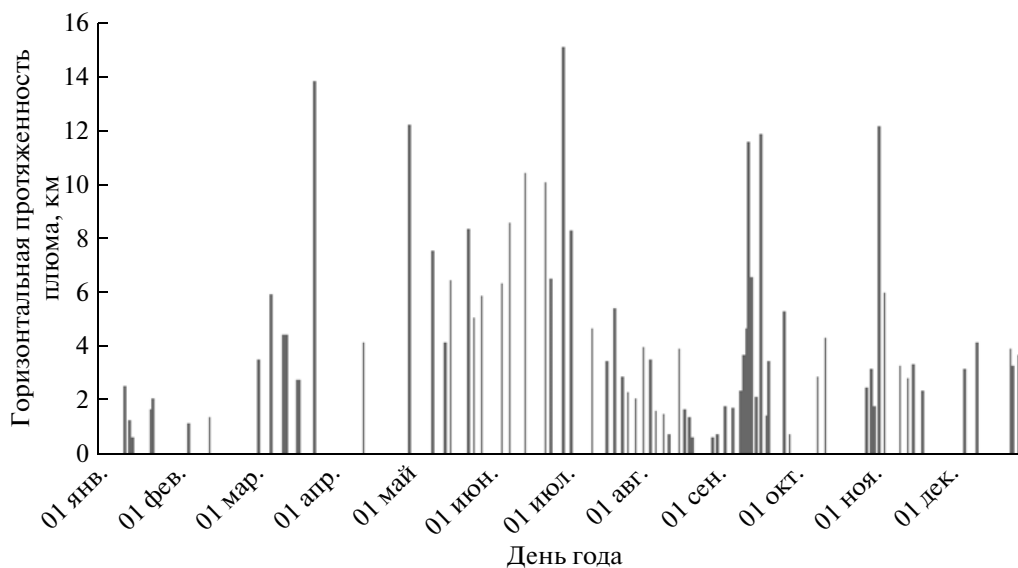


Рис. 13. Значения максимальной горизонтальной протяженности плюма р. Мзымта в течение периода спутниковых наблюдений 2010–2011 гг.

ную и синоптическую изменчивость на основе спутниковых данных.

4.1. Межгодовая изменчивость. На рис. 10 показаны межгодовые изменения концентрации общей взвеси в плюме р. Мзымта по данным майских съемок 2007–2012 гг. (за исключением 2008 г., данные для которого отсутствуют). Во всех случаях эти данные относятся к точке в пределах плюма, находящейся примерно в 200 м мористее устья. Необходимо отметить отчетливую тенденцию к росту содержания взвеси, концентрация которой увеличилась более чем в 2.5 раза от 34 мг/л в 2007 г. до 89 мг/л в 2012 г. Разумеется, это не дает нам оснований категорически утверждать, что содержание взвеси систематически возрастало от года к году,

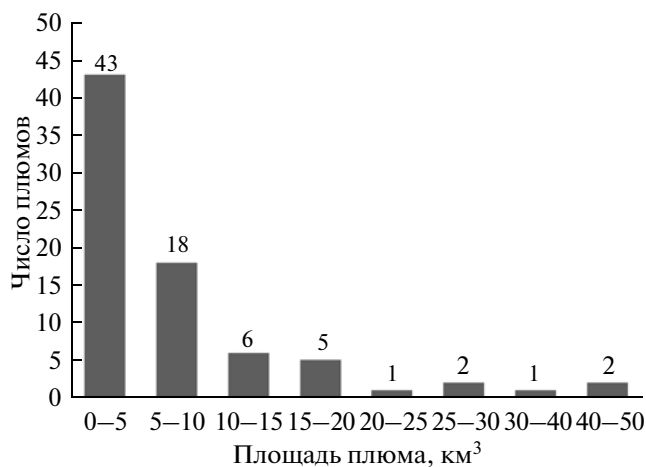


Рис. 14. Статистическое распределение значений площади плюма р. Мзымта (% случаев).

поскольку все характеристики плюмов обладают большой короткопериодной изменчивостью, а приведенные на рис. 9 данные за каждый отдельный год практически представляют собой однократные измерения. Однако обнаруженная тенденция заслуживает внимания, тем более, что она отмечена в независимых измерениях и для других показателей (см. далее). Увеличение содержания взвеси в районе впадения в море р. Мзымта в период 2007–2012 гг. может объясняться активизацией строительных работ в районе нового порта и в долине реки.

Работы в районе Большого Сочи проводились ежегодно примерно в одно время, во второй декаде мая, когда еще сохраняется относительно высокий сток рек. Во время работ неоднократно отбирались пробы речной воды. Всего с 2009 г. были проведены анализы химического состава вод 17-ти рек и ручьев. Непрерывный ряд ежегодных наблюдений был сделан только для рек Кудепста и Мзымта. Анализ данных по стоку этих рек показал, что наибольшее содержание растворенных форм азота, фосфора и кремния наблюдалось в 2010 г. (рис. 11). Можно предположить, что это связано с тем, что уже начались работы по строительству объектов сочинской олимпиады и на этот год пришелся наибольший объем земляных работ, что вызвало увеличение поступления в реки определяемых элементов, в первую очередь, большого количества кремния.

Полученные в ноябре–декабре 2012 г. значения измеряемых параметров, как и ожидалось, оказались, в основном, выше, чем в весеннюю съемку того же года, но это вполне обычное сезонное изменение химического стока.

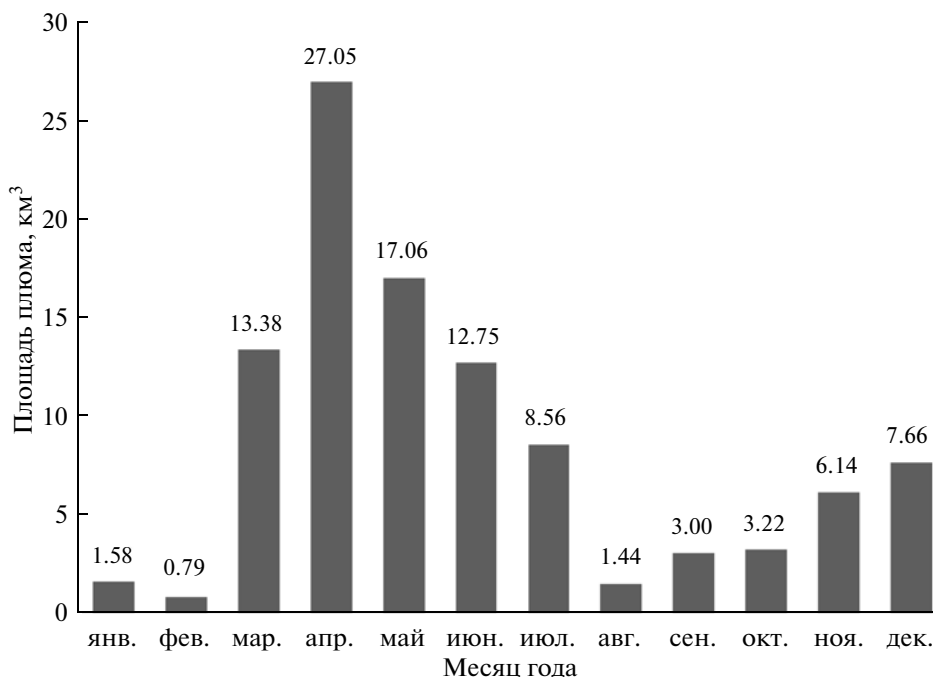


Рис. 15. Сезонное распределение значений площади плюма (км²) р. Мзымта.

4.2. Синоптическая и сезонная изменчивость. В этой части работы используются данные по характеристикам плюма р. Мзымта, полученные по данным спутникового сканера цвета MERIS-EnviSat за период с 18 мая 2010 г. по 5 апреля 2011 г. Нами были отобраны 78 спутниковых изображений поверхностной концентрации взвеси, которая является хорошим маркером опресненных вод в приустьевой зоне р. Мзымта.

Чтобы определять границы плюма р. Мзымта на основе спутниковых значений поверхностной концентрации взвеси, необходимо соотносить их с границами плюма, определяемого по значениям натурных измерений поверхностной солености. Для этого использовались три спутниковых снимка от 27 и 30 мая 2010 г. и 30 мая 2011 г., которые совпали по времени с днями экспедиционных работ. Численные значения для границ “соленостного” (16 епс) и “взвесенесущего” (5 г/м³) плумов были определены эмпирически, при них достигается наилучшее совпадение этих плумов (также см. [15]).

Итак, на каждом спутниковом изображении с помощью изолинии концентрации взвеси 5 г/м³ была зафиксирована граница области распространения плюма р. Мзымта и определена ее площадь. Общая статистика значений площади плюма р. Мзымта за исследуемый период (рис. 12–14) показывает, что в течение всего года для него характерны сравнительно небольшие размеры – почти в половине наблюдений его площадь составляет менее 5 км², и лишь в 20% случаев она превышает

10 км². Лишь в единичных изображениях отмечались значения площади плюма свыше 30 км².

На рис. 15 показано сезонное распределение средней площади плюма р. Мзымта. Как и следовало ожидать, в целом оно повторяет сезонный ход речного стока: наибольшие размеры плюма

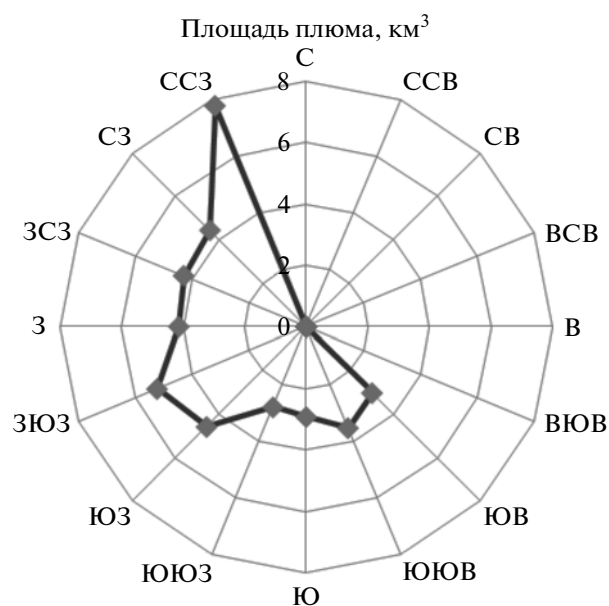


Рис. 16. Средние значения протяженности плюма р. Мзымта (км) в зависимости от направления его распространения (ориентации главной оси).

Таблица 2. Средние значения и пределы аномалий концентраций гидрохимических параметров

Речной плотм	O ₂ , мл/л	pH, NBS	Alk, мг-экв/л	P-PO ₄ , мкМ	P _{tot} , мкМ	Si, мкМ	N-NO ₂ , мкМ	N-NO ₃ , мкМ	N-NH ₄ , мкМ	N _{tot} , мкМ	Число съемок
р. Мзымта	0.00–1.37 0.52	0.01–0.99 0.23	0.02–2.73 1.12	0.02–3.54 1.25		0.15–88.5 40.7	0.01–2.26 0.58	0.00–22.9 9.05	0.36–2.10 1.23		15
р. Кудепста	0.07–1.87 1.02	0.01–0.89 0.26	0.07–4.69 1.10	0.00–4.10 1.11		1.84–98.5 45.9	0.03–1.84 0.63	0.04–45.2 15.43			13
р. Битха	0.07–1.26 0.66	0.00–0.23 0.11	0.02–0.38 0.20	0.01–2.27 1.14		1.67–25.8 13.7	0.02–0.04 0.03	0.01–11.87 5.94	0.17–42.7 21.44		2
р. Сочи	0.05–0.92 0.42	0.01–0.20 0.06	0.01–1.22 0.48	0.00–1.69 0.47		1.60–36.7 20.6	0.13–0.33 0.23	2.94–16.92 9.93	0.04–7.16 2.40		3
р. Вулан	0.01–1.50 0.32	0.03–0.40 0.12	0.00–0.84 0.23	0.00–0.12 0.05	0.10–18.40 7.67	0.01–0.14 0.07	0.00–0.13 0.07	0.08–4.60 1.3	0.10–2.16 0.78	5.30–14.20 9.75	6
р. Тешебс		0.42–0.89 0.65	0.76–1.17 0.96	0.00–0.12 0.06		0.14–0.55 0.34	0.02–0.21 0.11		23.2–64.0 43.6		4
р. Гуапсе	0.07	0.04	0.45	0.23		1.84			0.25		1
р. Пшада	0.48	0.36	0.05	0.02	0.04	7.45	0.19		0.12	5.95	1
р. Мезыб	0.50	0.52	0.26	0.04	0.07	21.40					1

отмечаются в паводок весной (максимальные значения приходятся на апрель), а наименьшие — в межень в августе—сентябре и особенно в январе—феврале. Однако интересно отметить, что если интенсивность стока р. Мзымта в апреле превышает интенсивность стока в феврале примерно втрое, то соответствующие значения средней площади плюма отличаются почти в 30 раз! Это еще раз говорит о том, что площадь плюма определяется отнюдь не одним лишь объемом речного стока — можно предположить, что малые размеры зимних плюмов определяются также их склонностью к более быстрой диссипации за счет более интенсивного ветрового перемешивания с одной стороны и меньшей вертикальной устойчивости колонны с другой.

Также на каждом спутниковом снимке была выделена “главная ось распространения плюма” — отрезок, соединяющий устье реки и максимально удаленную от него точку опресненной линзы. Длина и направление этой оси дали две дополнительные характеристики плюма: “протяженность” и “направление распространения” плюма. На рис. 16 представлены средние значения протяженности плюма в зависимости от направления главной оси его распространения. Как видно, наибольших размеров достигают плюмы, вытянутые вдоль берега вправо от устья на северо—северо-запад, а также простирающиеся в открытое море на юго-запад.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предпринята попытка обобщения результатов многолетних натурных и спутниковых наблюдений в районах российского черноморского шельфа, находящихся под влиянием стока малых и средних рек (Мезыб, Пшава, Вулан, Туапсе, Битха, Сочи, Кудепста, Мзымта). Для каждого из этих районов приведены количественные характеристики отклика гидрофизических и гидрохимических полей на шельфе на воздействие материкового речного стока. Горизонтальные масштабы исследованных плюмов варьируются в широких пределах от значений порядка сотни метров до 10 км и более (для крупнейшей из названных рек Мзымты среднее значение составило 3.0 км). При этом они локализируются в верхнем слое толщиной от первых десятков сантиметров до 4 и более метров, а максимальные аномалии солёности в плюмах по отношению к окружающим поверхностным водам достигают 5 епс. Предложены соотношения, устанавливающие статистические связи между горизонтальной протяженностью речного плюма, его вертикальным масштабом и величиной аномалии солёности в нем.

Исследованные речные плюмы характеризовались высокими концентрациями взвеси в морской воде. Установлено, что отношение между органической и минеральной составляющими

взвеси в районе исследования постепенно уменьшается с севера на юг: реки севернее Туапсе несут относительно большое количество органической взвеси, а сама река Туапсе и реки южнее ее — в основном, минеральную взвесь.

Межгодовая, сезонная и синоптическая изменчивость характеристик влияния речного стока исследованы на примере морской акватории устья р. Мзымта, наиболее хорошо обеспеченной данными. Здесь отмечена тенденция к возрастанию концентрации общей взвеси в период 2007—2012 гг., возможно, связанная с антропогенным воздействием. В течение года наибольшие размеры плюмов отмечаются в период паводка в апреле, а наименьшие — в межень в феврале. При этом показано, что сезонный ход развития плюмов объясняется не только годовым циклом материкового стока, но и динамическими факторами на морской акватории. Показано также, что наибольших размеров достигают плюмы, вытянутые вдоль берега вправо от устья (по отношению к наблюдателю, стоящему у устья реки лицом к морю); плюмы, простирающиеся в открытое море, характеризуются в среднем несколько меньшим горизонтальным масштабом; наименьшей же пространственной протяженностью обладают плюмы, распространяющиеся влево от устья. В данной статье, имеющей описательный характер, мы не касаемся физических механизмов обнаруженных закономерностей — некоторые из них рассматриваются в нашей статье [15].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Президиума РАН в рамках программы 23, Министерства образования и науки РФ в рамках тройственного соглашения В.25.31.0028, ГК 2042 и ГК 8338, РФФИ в рамках научных проектов № 07-05-00240 а, № 13-05-00626 а и № 13-05-96518 р_юг_а, а также проекта CLIMSEAS в рамках международного гранта.

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. Амирханов М.М., Лукашина Н.С., Трунев А.П. Природные рекреационные ресурсы, состояние окружающей среды и экономико-правовой статус прибрежных курортов. М.: Экономика, 1997. 207 с.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 429 с.
5. ГОСТ 17.1.5.05-85. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к обороту поверхностных и морских вод, льда и ат-

- мосферных осадков. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 12 с.
6. ГОСТ 17.1.5.04-81. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 7 с.
 7. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2010 году”. Минприроды РФ. 2011. 571 с. Режим доступа: <http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/da2/1fevr.rar>
 8. *Джаошвили Ш.* Реки Черного моря // Европейское агентство по охране окружающей среды. Технический отчет №71. 2002. 58 с. Режим доступа: http://www.eea.europa.eu/ru/publications/technical_report_2002_71/at_download/file
 9. *Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н.* Спектральный анализ морской взвеси – альтернатива традиционным методам ее определения при экологическом мониторинге // Сборник трудов XII международной конференции “Экосистемы, организмы, инновации”. 2010. С. 35.
 10. *Короткина О.А., Завьялов П.О., Осадчиев А.А.* Суб-мезомасштабная изменчивость полей течений и ветра в акватории г. Сочи // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 797–807.
 11. *Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В.* (Ред.). Динамические процессы береговой зоны моря. М.: Научный мир, 2003. 325 с.
 12. *Львович М.И.* Вода и жизнь. Водные ресурсы, их преобразование и охрана. М.: Мысль, 1986. 254 с.
 13. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Ред. Сапожников В.В. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.
 14. Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. М.: Институт океанологии РАН, 1992. 200 с.
 15. *Osadchiev A.A., Zavialov P.O.* Lagrangian model of a surface-advected river plume // *Cont. Shelf Res.* 2013. V. 58. P. 96–106.
 16. *Sheremet V.A.* SeaHorse Tilt Current Meter: Inexpensive Near-Bottom Current Measurements Based on Drag Principle with Coastal Applications // *Eos Trans. AGU*. 2010. V. 91. № 26. Ocean Science Meeting Supplement, Abstract PO25C-13.
 17. *Tanaka A., Kashino M., Doerffer R. et al.* Development of a Neural Network Algorithm for Retrieving Concentrations of Chlorophyll, Suspended Matter and Yellow Substance from Radiance Data of the Ocean Color and Temperature Scanner // *J. of Oceanography*. 2004. V. 60. P. 519–530.

Hydrophysical and Hydrochemical Characteristics of the Sea Areas Adjacent to the Estuaries of Small Rivers of the Russian Coast of the Black Sea

P. O. Zavialov, P. N. Makkaveev, B. V. Konovalov, A. A. Osadchiev, P. V. Khlebopashev, V. V. Pelevin, A. B. Grabovskiy, A. S. Izhitskiy, I. V. Goncharenko, D. M. Soloviev, A. A. Polukhin

This paper presents the results of long-term in situ and satellite measurements at shelf areas adjacent to the estuaries of the small rivers of the Russian coast of the Black Sea (Mezyb, Pshada, Vulcan, Tuapse, Bitkha, Sochi, Kudepsta, Mzymta). The quantitative characteristics of response of hydrophysical and hydrochemical fields at the sea shelf on the influence of the continental river discharge are presented for each of these areas. A number of indicators of water quality, such as concentrations of nitrate and nitrite forms of nitrogen, phosphorus, silica, dissolved oxygen, value of total alkalinity and pH, as well as mineral and organic suspended matter, and chlorophyll *a* are considered in context of anthropogenic and terrigenous influence. In this paper the emphasis was placed on the Mzymta River plume at the shelf area adjacent to the city of Sochi, where the measurements were repeatedly performed during the spring flooding conditions in the period from 2007 till 2012. The interannual variability of the water quality indicators, as well as seasonal and short-term variability of area and configuration of the plume that transports suspended matter and anthropogenic pollution were considered.