

СТРУКТУРА ВЫНОСА Р. ШАХЕ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ, ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ И КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Хлебников Д.В., Иванов А.Ю., Коновалов Б.В.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: dx@ocean.ru*

Статья поступила в редакцию 27.03.2019, одобрена к печати 11.09.2019

Представлены результаты исследований гидрофизической и биооптической структуры выноса реки Шахе, проведенных на полигоне на НИС «Ашамба» 1–2 июня 2018 г. во время экспедиции ИО РАН «Черное море–2018». Использовалась информация, синхронно полученная при помощи средств дистанционного зондирования (спутниковые радиолокационные и оптические данные), инфракрасного пирометра, STD-зонда в составе проточной системы на борту судна. Одновременно отбирались пробы морской воды из поверхностного слоя моря с последующим лабораторным анализом их биооптических и геохимических характеристик. Гидрофизические характеристики выноса р. Шахе, измеренные как дистанционно, так и контактно, дали тождественные результаты, что дает возможность дальнейшего использования комплекса данной аппаратуры на борту НИС для исследования выносов рек в прибрежной зоне Черного моря. При этом портативные пирометры позволяют получить значительно лучшее пространственное разрешение по температуре по сравнению со спутниковыми датчиками, а данные космических съемок – обнаруживать выносы рек в море и определять их границы и структуру.

Ключевые слова: Черное море, выносы малых рек, субмезомасштабная структура, инфракрасный пирометр, температура приповерхностного слоя моря, гидробиологические характеристики, космические снимки

Введение

Области выносов рек, формирующиеся благодаря пресноводному стоку малых рек кавказского побережья Черного моря, представляют собой субмезомасштабные или мелкомасштабные динамические структуры (Завьялов и др., 2014; Иванов и др., 2018).

Хорошо известно, что выносы рек обладают собственной внутренней динамикой и структурой, поставляют в море вещество материкового происхождения, активно взаимодействуют с прибрежной циркуляцией и мелководным рельефом дна, трансформируются и, в конце концов, исчезают, смешиваясь с окружающими водами. Выносы рек изучались с помощью измерений *in situ*, численного моделирования и с привлечением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В России особое внимание в последнее время уделяется выносам малых и средних рек черноморского кавказского побережья (Завьялов и др., 2014).

Однако, несмотря на значительный объем уже проведенных ранее исследований (см., например, обобщающие работы Завьялова и др. (2014), Лавровой и др. (2011), с использованием методов дистанционного зондирования океана (например, с помощью оптических и радиолокационных датчиков европейских ИСЗ серии Sentinel и др.) и контактных измерений, проведение новых экспедиционных исследований на шельфе Черного моря представляет значительный научный и практический интерес. Так, одной из нерешенных до сих пор задач является задача интерпретации данных ДЗЗ, в частности, неоднозначность сигнатур, возникающих на оптических снимках, и сликовых образований на радиолокационных изображениях (РЛИ) прибрежной зоны моря, которые могут быть обусловлены как температурными контрастами, вынос реки–окружающее море, так и наличием на поверхности моря пленок антропогенного или биогенного происхождения (Хлебников и др., 2017).

В работе Иванова и др. (2018) было показано, что выносы рек кавказского побережья имеют характерную структуру, которая, помимо всего прочего, отчетливо проявляется в поле температуры поверхности моря (ТПМ) и соответственно хорошо видна в термических каналах спутниковых инфракрасных (ИК) радиометров. В связи с этим одной из задач подобных исследований являются детальные измерения ТПМ в выносах рек не только с помощью спутниковых датчиков (главным образом, радиометра TIRS на ИСЗ Landsat-8), но и альтернативно, например, с помощью методов неконтактной подспутниковой ИК-радиометрии. Кроме того, тестирование таких измерительных средств, какими являются современные пирометры (своего рода дистанционными датчиками судового базирования), представляет очевидный научно-технический интерес. Здесь заметим, что радиометрические методы измерений для решения подобных задач стали применяться еще в 90-х гг. прошлого века. Именно тогда специально сконструированные ИК-радиометры были использованы для проведения судовых и самолетных измерений ТПМ, а также разрабатывались методики их применения (Бычкова и др., 1988; Лебедев и др., 1994; Лебедев, Станичный, 2002).

С другой стороны, вполне хорошо известна проблема того, что ИК-датчики измеряют температуру тонкого скин-слоя, а контактные – температуру полуметрового приповерхностного слоя моря. Кроме того, при интерпретации инфракрасных данных необходимо учитывать и то, что дистанционные измерения происходят на некоторой площадке, а традиционные, контактные, проводятся фактически в точке, – это также может быть источником рассогласования в показаниях приборов. Наконец, в настоящее время основная часть информации о ТПМ получается с помощью спутниковых систем ИК-диапазона. В связи с этим аналогичные проблемы стоят и перед спутниковыми методами ДЗЗ, из-за чего алгоритмы восстановления температуры верхнего слоя по данным ИК-радиометров постоянно совершенствуются (Donlon et al., 2002; Minnett et al., 2019). Применение судовой ИК-пирометрии в дополнение к спутниковым методам дает возможность исследовать мелкомасштабную изменчивость ТПМ, вызываемую различными факторами (Федоров, Гинзбург, 1988).

Одна из попыток комплексного исследования выносов малых рек была принята в экспедиции ИО РАН «Черное море–2018», состоявшейся 29 мая–3 июня 2018 г. в Лазаревском районе г. Сочи на НИС «Ашамба». В настоящей статье представлены результаты этого исследования, их совместный анализ, а также рассмотрены некоторые методические аспекты применения инфракрасных пирометров в практической работе.

Дистанционные и контактные методы изучения гидрофизической и гидробиологической структуры выноса р. Шахе

Одновременное использование различных методов исследования субмезомасштабных и мелкомасштабных структур речных выносов в море является одним из путей решения обозначенной выше проблемы. С этой целью в экспедиции «Черное море–2018» использовался судовой комплекс аппаратуры для дистанционных и контактных измерений, описанный ниже. Помимо всего прочего, в экспедиции отработывалась методика совместного дистанционного сбора экспериментальных данных о полях температуры поверхности и приповерхностного слоя моря, а также приводного ветра с борта НИС. Эксперимент был проведен 01 и 02 июня 2018 г. на полигоне в прибрежной зоне, в выносе р. Шахе у пос. Головинка. Шахе – вторая по размеру стока река среди малых рек российского побережья Черного моря со среднегодовым значением расхода в 37 м³/с (Джаошвили, 2002). Для дистанционных измерений ТПМ использовался портативный ИК-пирометр «Кельвин АРТО 350Ц» российского производства (компания «Евромикс», www.zaouromix.ru), калиброванный *in-situ* по температуре морской воды, измеренной с помощью STD-зонда YSI 6600. Для эффективной интерпретации сигнатур прибрежных фронтов, сликовых и термических образований, вызванных влиянием контрастов температуры выноса реки–открытое море (Федоров, Гинзбург, 1988) и выявленных на РЛИ Sentinel-1 (Иванов и др., 2018), необходимо также учитывать скорость и направление ветра над морем (Askari et al., 1991; Beal et al., 1997). В экспедиции для измерения силы и направления ветра использовалась метеостанция РВ200 фирмы AirMar.

С целью исследования гидробиологических характеристик вод в выносе Шахе из поверхностного слоя моря отбирались пробы для последующего лабораторного анализа на взвешенное органическое вещество, взвешенное минеральное вещество, хлорофилл и пигментный индекс фитопланктона.

Судовые измерения и отбор проб в прибрежной части моря (рис. 1–4) проводились одновременно с пролетами над полигоном европейских ИСЗ Sentinel-1В и Sentinel-2А. Ниже на рис. 5 и 6 приводятся оптический снимок сканера MSI на ИСЗ Sentinel-2А и РЛИ Sentinel-1В исследуемого района.

Дистанционные и контактные измерения температуры поверхностного слоя моря с борта НИС «Ашамба»

Дистанционные измерения ТПМ с частотой 1 Гц проводились с помощью выносного датчика пирометра, укрепленного на выносной штанге на носу НИС и направленного на не возмущенную судном зону моря по ходу судна. Пространственное разрешение исходных данных по температуре составляло порядка 5 м. Одновременно температура и соленость в приповерхностном слое измерялись вдоль курса НИС с помощью STD-зонда, включенного в проточную зондирующую систему, состоящую из специального контейнера емкостью 30 л и водяного насоса производительностью около 1 л/с, расположенную на палубе. Глубина отбора проб – 0.5 м. Частота опроса датчиков STD-зонда составляла 1 Гц. Пространственное разрешение экспериментальных данных по температуре и солености – около 50 м. Также одновременно измерялись гидрометеорологические условия.

Сравнение показаний пирометра с данными STD-зонда на полигоне в районе выноса р. Шахе

Результаты измерений температуры поверхностного слоя моря, полученные 01 и 02 июня 2018 г. портативным пирометром с борта НИС «Ашамба» на полигоне в районе выноса р. Шахе, в сравнении с данными STD-зонда, представлены на рис. 1 и 2. (Здесь заметим, что при обработке данных выбросы, обусловленные солнечными бликами, особенно многочисленными 02 июня, отбраковывались интерактивно при выходе получаемых на данном временном участке измерений за доверительные интервалы).

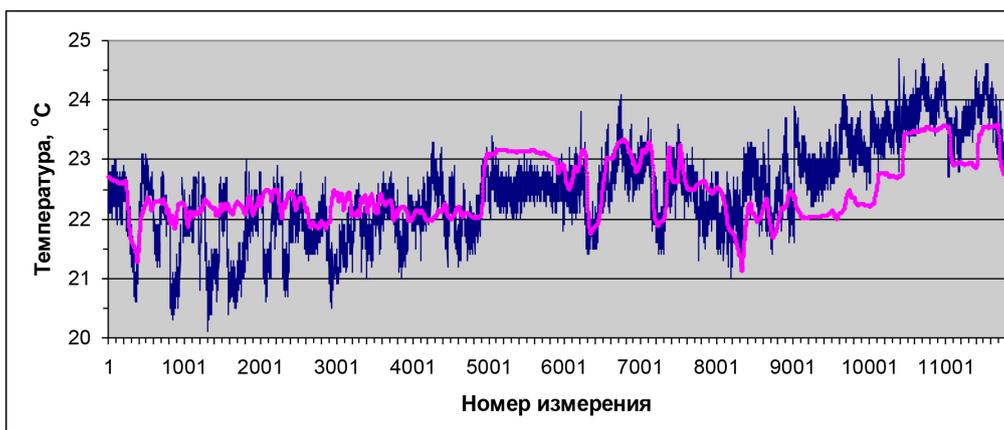


Рис. 1. Результаты измерений STD-зондом (розовый цвет) и ИК-пирометром (синий цвет) температуры воды поверхностного слоя моря в выносе р. Шахе 01 июня 2018 г. (с 11:12 до 14:37 местного времени (м.в.)).



Рис. 2. Результаты измерений STD-зондом (розовый цвет) и ИК-пирометром (синий цвет) температуры воды поверхностного слоя моря в выносе р. Шахе 02 июня 2018 г. с 12:19 до 16:25 м.в. (данные прорежены с целью удаления многочисленных выбросов, обусловленных бликами).

По данным измерений на полигоне 01.06.2018, усредненная поправка пирометра на погрешность измерений в сравнении с STD-зондом в проточной системе равна 1.8°C (пирометр занижал температуру в среднем на 1.8°C), дисперсия поправки равна 0.4, коэффициент корреляции данных по температуре пирометра с данными STD-зонда равен 0.6.

По данным измерений 02.06.2018, средняя поправка пирометра на погрешность измерений с STD-зондом в проточной системе равна 1.9°C (пирометр занижал температуру в среднем на 1.9°C), дисперсия поправки равна 0.2, коэффициент корреляции данных по температуре пирометра с данными STD-зонда по температуре равен 0,65. В итоге данные измерений портативным ИК-пирометром после соответствующей калибровки стали достаточно хорошо соответствовать данным STD-зонда.

Дистанционные и *in situ* измерения гидрофизических полей поверхностного слоя Черного моря на полигоне в районе выноса р. Шахе

Гидрофизические поля субмезомасштабной структуры приповерхностного слоя прибрежных вод на полигоне в районе выноса р. Шахе определялись положением выноса этой реки. В первый день экспедиции 1 июня вынос, судя по данным измерений, занимал большую площадь (около 3 км^2) к северу и северо-западу от устья реки (рис. 3а, б). Вдольбереговая протяженность составляла 3 км, а поперечная – 1 км, минимальные измеренные значения температуры в 100 м от речного устья были равны 21°C , а солёности – 12 psu.

Во второй день измерений, 02 июня форма и площадь плюма визуально существенно изменились. Приустьевая солёность в нем повысилась до 14 psu (рис. 4). Однако вынос реки не распространялся в обе стороны относительно речного устья, а напротив, был вытянут на 1–1.3 км в направлении вдоль берега (рис. 3в, г, 5). Южная граница выноса была четко выражена и характеризовалась большими перепада-

ми солености и температуры: от 14 psu и 21.5°C в приустьевой зоне выноса до 18 psu и 22,5°C в море на расстоянии около 100 м от берега.

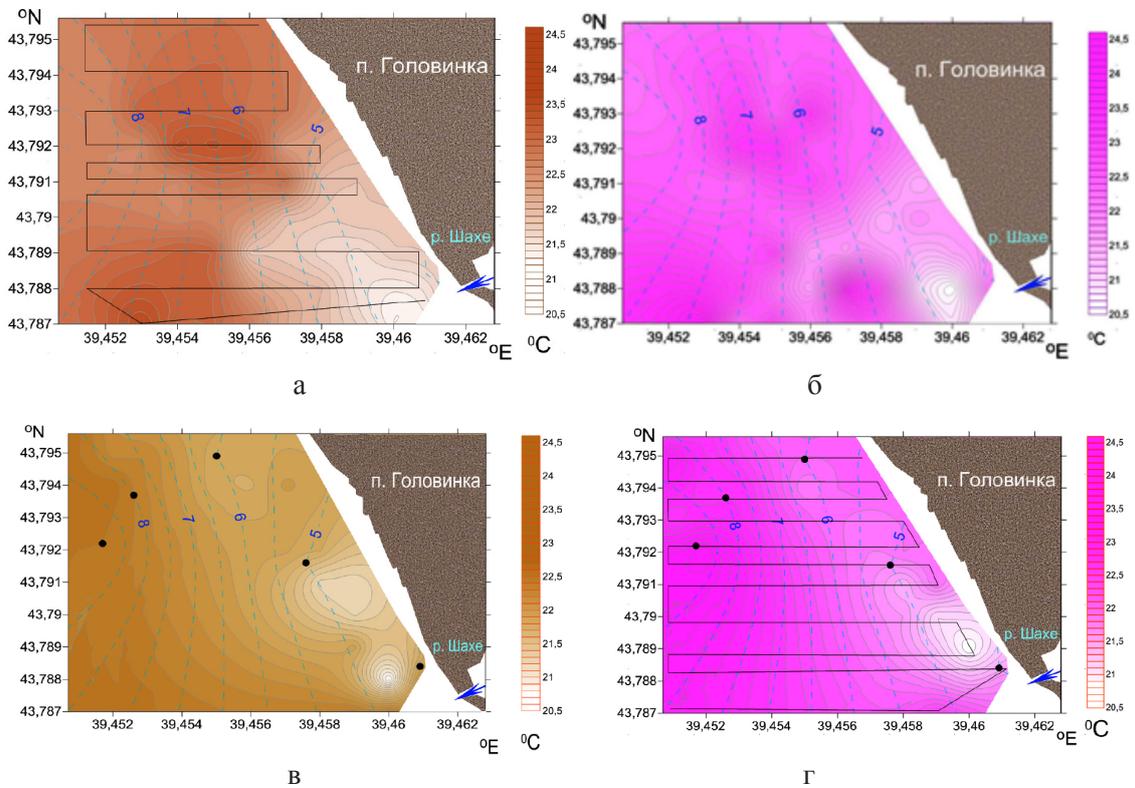


Рис. 3. Поле температур поверхностного слоя моря в районе выноса р. Шахе, измеренное 01.06.2018 СТД-зондом (глубина 0.5 м) – а; ИК-пирометром – б. То же самое – для 02.06.2018: СТД-зонд – в; ИК-пирометр – г. Голубые пунктирные линии с цифрами – изобаты. Черными точками показаны места отбора проб. Сплошная линия – маршрут НИС.

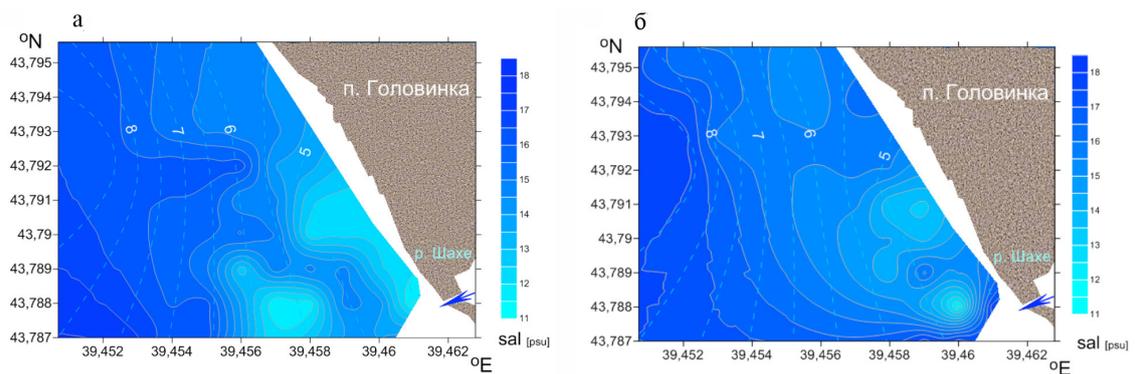


Рис. 4. Распределение солености (psu) на поверхности моря на полигоне 01.06.2018 – а и 02.06.2018 – б по данным измерений. Голубые пунктирные линии с цифрами – изобаты.

Снимки полигона из космоса со спутников Sentinel были получены 01.06 и 02.06.2018 и представлены на рис. 5 и 6. На оптическом снимке Sentinel-2A (рис. 5), полученном квазисинхронно с измерениями СТД-зондом и ИК-пирометром, отчетливо прослеживается вынос реки из-за повышенного рассеяния света на минеральной взвеси в стоке реки (рис. 7б), причем положение подковообразного фронта,



Рис. 5. Фрагмент оптического снимка спутника Sentinel-2A от 02.06.2018 в 08:10 UTC (комpositное изображение в естественных цветах, оригинальное разрешение 20 м). В центре снимка белой точкой отобразилось НИС «Ашамба». Вынос р. Шахе, оконтуренный фронтом, направлен на северо-запад от устья реки © ESA.

блокирующего южное направление, однозначно указывает на то, что речные воды распространялись на северо-запад (см. также распределение солёности и взвеси на рис. 4, 7а, в). На РЛИ Sentinel-1A от 01.06.2018 видимых признаков выноса на поверхности моря не обнаружено, а на РЛИ Sentinel-1B от 02.06.2018 в центре кадра хорошо виден оконтуренный подковообразным фронтом вынос р. Шахе (расположен к западу от устья в виде узкой светлой полосы, рис. 6).

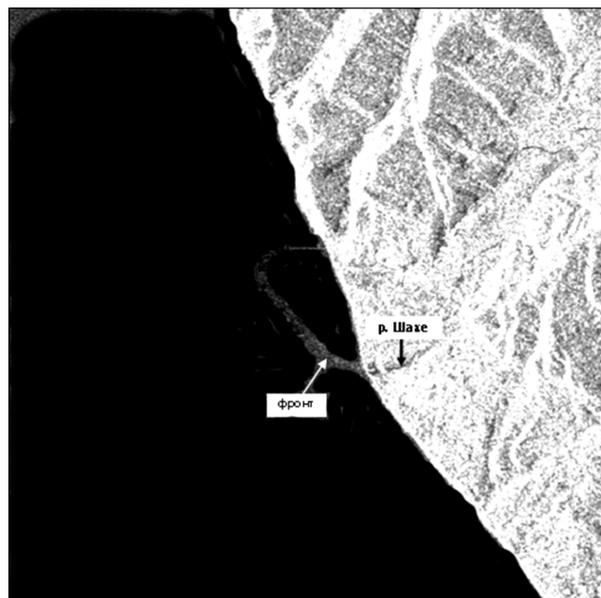


Рис. 6. Фрагмент радиолокационного изображения спутника Sentinel-1B (режим съемки IW, разрешение 5 x 20 м) от 02.06.2018 (15:10 UTC). В центре РЛИ виден фронт, оконтуривающий вынос р. Шахе (расположен слева от выноса) © ESA.

Гидрофизические поля, измеренные 1 и 2 июня 2018 г. с использованием различных датчиков зондирования, как дистанционных, так и контактных, и характеризующие субмезомасштабную структуру выноса р. Шахе на полигоне, дают тождественные результаты, что позволяет говорить о возможности дальнейшего эффективного использования как портативных пиromетров на борту НИС, так и радиометрических и радиолокационных спутниковых средств для исследования зон смещения выносов рек с водными массами открытого моря. При этом пиromетры дают значительно лучшее пространственное разрешение по сравнению со спутниковыми датчиками по температуре, а использование всепогодной космической радиолокации позволит в любую погоду и в любое время суток обнаруживать выносы рек в море и их границы.

Измерения биооптических характеристик поверхностного слоя моря в районе выноса р. Шахе

02.06.2018 на пяти станциях в поверхностном слое моря по результатам анализа отобранных проб были определены концентрации общей взвеси $C_{\text{взв}}$, ее минеральной $C_{\text{МВБ}}$ и органической $C_{\text{ВОВ}}$ составляющих, хлорофилла- a $C_{\text{ХЛ}}$, а также рассчитаны значения пигментного индекса фитопланктона $I_{430/665}$ ($I_{430/665} = D_{430}/D_{665}$, где D_{430} и D_{665} – значения оптической плотности экстракта пигментов фитопланктона в водном ацетоне), характеризующего его возраст и продукционную активность (рис. 7).

Пробы воды объемом 5 л отбирались с поверхности моря ведром. Взвесь отфильтровывалась под давлением (при перепаде 0.2 атм) на стекловолокнистые фильтры диаметром 47 мм. Фильтры высушивались в присутствии силикагеля и хранились в морозильнике. Дальнейший анализ содержания взвеси и пигментов хлорофилла a проводился в лабораторных условиях.

Концентрация хлорофилла определялась по стандартной спектрофотометрической методике (ГОСТ 17.1.04.02-90). Методика определения суммарной концентрации взвеси и ее компонентов описана в работе Коновалова и др. (2014).

Несмотря на ограниченное количество точек отбора проб для измерения концентраций взвеси на полигоне, хорошо просматривается общая структура выноса р. Шахе (рис. 7). Можно отметить некоторые характерные особенности распределения концентраций каждого из показателей. Так, например, непосредственно вблизи устья реки наблюдались максимумы концентраций как минеральной, так и органической взвеси, которые практически монотонно и последовательно убывали по мере удаления от устья (рис. 7а, б, в).

Иначе выглядит картина распределения хлорофилла фитопланктона в области выноса р. Шахе (рис. 7г). Хлорофилл традиционно считается мерой количественного содержания фитопланктона. В отличие от взвеси, клетки фитопланктона не являются пассивной (консервативной) примесью в морской воде. В поверхностном слое их концентрация зависит от широкого комплекса условий среды обитания и не определяется гидродинамическими процессами напрямую. Совокупность био-

генных элементов и тех соединений, в которых они представлены, суточный и сезонные циклы развития конкретных видов фитопланктона, процесс его выедания растительноядным зоопланктоном, уровень и спектральный состав облученности, адаптированность водорослей к тем световым условиям, которые были до момента наблюдений, инерционность реагирования фитопланктона на изменение внешних условий – вот далеко не полный перечень факторов, формирующих упомянутую картину распределения хлорофилла.

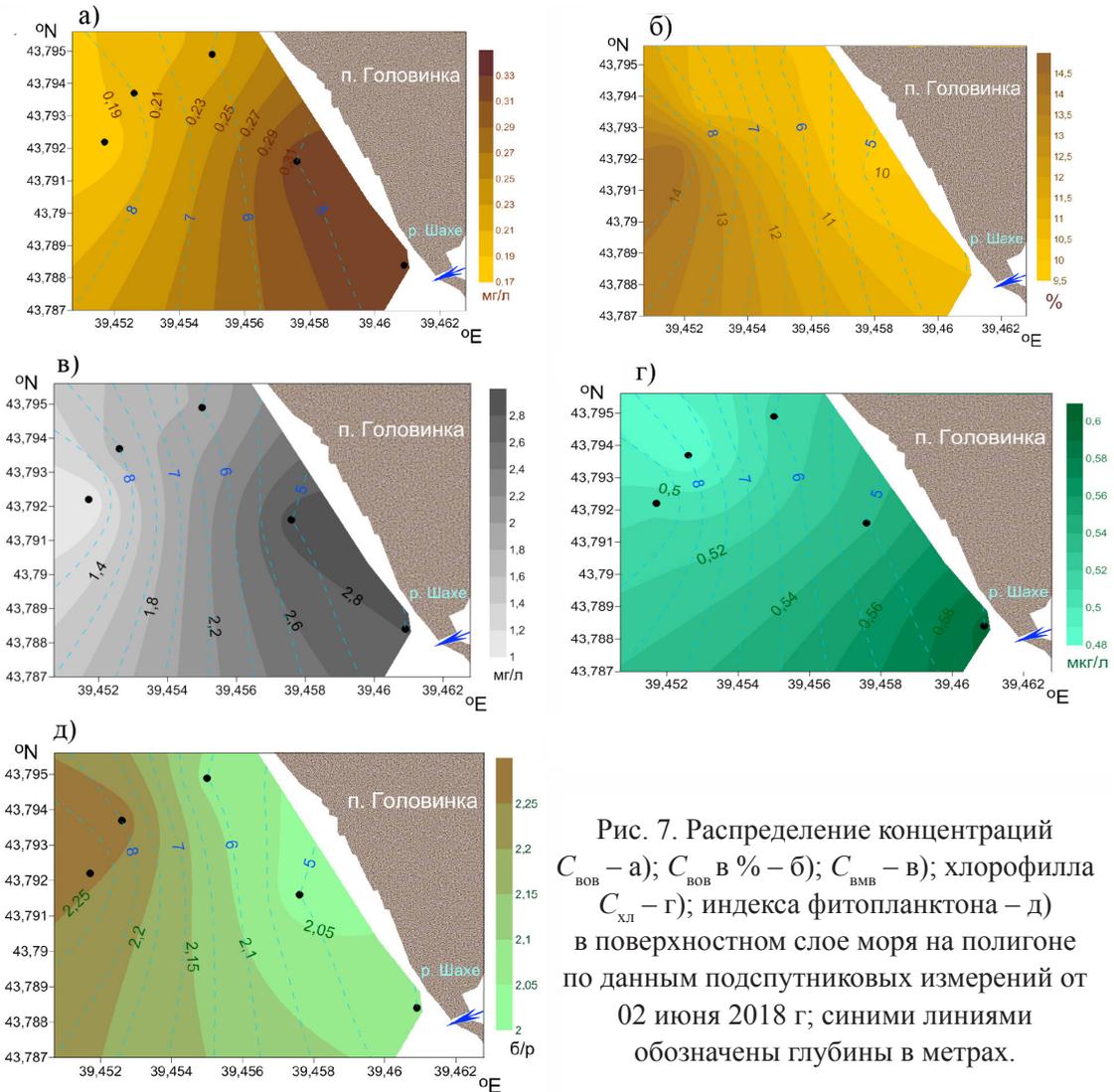


Рис. 7. Распределение концентраций $C_{\text{вov}}$ – а); $C_{\text{вov}}$ в % – б); $C_{\text{вmb}}$ – в); хлорофилла $C_{\text{хл}}$ – г); индекса фитопланктона – д) в поверхностном слое моря на полигоне по данным подспутниковых измерений от 02 июня 2018 г; синими линиями обозначены глубины в метрах.

Неудивительно поэтому отсутствие тех закономерностей в распределении хлорофилла, которые обычно характерны для консервативной примеси. В этом легко убедиться при сравнении рисунков 7а и 7б с рисунками 7г и 7д. Вблизи устья р. Шахе отмечены максимальные концентрации хлорофилла (рис. 7г). Далее в направлении на северо-запад они постепенно уменьшались. Аналогичная картина наблюдалась и в распределении пигментного индекса (рис. 7д), что свидетельствует о более молодом фитопланктоне в приустьевой зоне и о большем его количестве по сравнению с его фоновыми концентрациями.

Расположение зоны с максимальным уровнем продукционной активности фитопланктона (рис. 7d) также не было связано с распределением концентраций консервативных примесей. Более того, оно не зависело даже и от содержания хлорофилла.

Вполне очевидно, что привлечение и анализ гидробиологических характеристик позволило дополнительно охарактеризовать вынос р. Шахе, не проявившийся достаточно четко в данных дистанционного зондирования (см. рис. 5).

Заключение и выводы

В работе проведен анализ комплексных данных, полученных во время экспедиции «Черное море–2018» в выносе р. Шахе как дистанционно, из космоса и с борта НИС (пирометром), так и контактно (CTD-зондом и отборами проб). Показано хорошее соответствие между данными, полученными различными методами. В частности, гидрофизические характеристики выноса р. Шахе, измеренные как дистанционно, так и контактно, дали похожие результаты, что позволяет дальнейшее использование комплекса данной аппаратуры для исследования выносов рек в прибрежной зоне Черного моря с борта НИС.

Картина распределения пассивных примесей (органической и неорганической минеральной составляющих взвеси) отличалась от распределения количества фитопланктона и его продукционной активности. Наличие подобных расхождений типично для выносов малых рек. В данном случае положения максимальных концентраций компонентов взвеси были смещены к северо-западу от устья реки, а максимум хлорофилла и минимум пигментного индекса были расположены в непосредственной близости к этому устью. Это обстоятельство свидетельствовало о том, что в районе впадения реки доминировал пресноводный фитопланктон, количество которого уменьшалось по мере удаления от устья и смешения речных вод с морскими.

Остановившись на методических особенностях применения ИК-пирометров, отметим следующее:

1. Результаты измерений ТПМ, полученные 01 и 02 июня 2018 г. портативным пирометром «Кельвин АРТО 350Ц» с борта НИС «Ашамба» на полигоне в районе выноса р. Шахе, после соответствующей калибровки хорошо согласуются с синхронными данными CTD-зонда с коэффициентом корреляции 0.6–0.65.

2. Пространственное разрешение получаемых пирометром данных о ТПМ в экспедиции составило около 5 м, что более чем в 10 раз лучше пространственного разрешения проточной системы (около 50 м).

3. При проведении необходимой калибровки по температуре пирометр может быть использован в морских экспедициях для измерения полей температуры поверхностного слоя моря в процессе изучения субмезомасштабных и мелкомасштабных структур моря.

4. Пирометр имеет напряжение питания 12 В и энергопотребление порядка 3 ВА, что позволяет использовать для его энергопитания аккумулятор небольших раз-

меров и веса. Таким образом, исключается необходимость в бортовом генераторе на 220 В, что принципиально повышает мобильность всей измерительной системы.

5. Вследствие малого веса измерительной аппаратуры, данный прибор может быть установлен на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) для дистанционного сбора экспериментальных данных о ТПМ и картирования больших пространств прибрежной акватории. При этом пространственное разрешение съемки при полете БПЛА на высоте 25 м составит около 10 м при использовании устройства стабилизации.

В итоге показано хорошее соответствие между данными, полученными различными методами. В связи этим можно утверждать, что изучение выносов рек восточного побережья Черного моря с измерением реальных гидрохимических и гидробиологических характеристик *in situ* и одновременными дистанционными, в том числе спутниковыми наблюдениями в различных диапазонах электромагнитного спектра, – один из наилучших современных методов океанографических исследований прибрежных зон. В настоящее время подобный подход позволяет обнаруживать выносы малых рек, оконтуривать их границы, исследовать динамику и пространственно-временные характеристики, а в итоге получать ряд уникальных данных об этом явлении.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и образования России (тема № 0149-2019-0003) и по гранту РНФ 18-47-06202. Экспедиционные измерения были поддержаны РНФ (грант 18-17-00156).

Литература

- Бычкова И.А., Викторов С.В., Виноградов В.В. Дистанционное определение температуры моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 223 с.
- ГОСТ 17.1.04.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Госкомитет СССР по охране природы, 1990. 16 с.
- Джаошвили Ш. Реки Черного моря. Технический отчет № 71. Европейское агентство по охране окружающей среды. 2002. 58 с. http://www.eea.europa.eu/ru/publications/technical_report_2002_71/at_download/file.
- Иванов А.Ю., Хлебников Д.В., Коновалов Б.В., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В. Особенности отображения выносов рек в Черном море в данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 191–202.
- Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
- Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 1–9.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России: М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
- Лебедев Н.Е., Савоськин В.М., Станичный С.В. Определение поверхностной температуры и перепада температуры в скин-слое с борта движущегося судна по данным ИК-измерений // Морской гидрофиз. журнал. 1994. № 2. С. 83–88.

- Лебедев Н.Е., Станичный С.В. Методики проведения самолетных измерений восходящего ИК-излучения // Морской гидрофиз. журнал. 2002. № 3. С. 61–70.
- Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана: Л.: Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
- Хлебников Д.В., Иванов А.Ю., Коновалов Б.В., Терлеева Н.В. Исследование выноса реки Мзымта в Черном море дистанционными (оптическими и радиолокационными) и спектрофотометрическими лабораторными методами // Труды IX Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод» (ONW-2017). СПб. 2017. С. 152–156..
- Askari F., Geernaert G.L., Keller W.C., Raman S. Radar imaging of thermal fronts // Int. J. Rem. Sens. 1993. Vol. 14. P. 275–294. DOI:10.1080/01431169308904337.
- Beal R.C., Kudryavtsev V.N., Thompson D.R., Grodsky S.A., Tilley D.G., Dulov V.A., Graber H.C. The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS-1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. No. C3. P. 5799–5814.
- Donlon C.J., Minnett P.J., Gentemann C., Nightingale T.J., Barton I.J., Ward B., Murray J. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research // J. Clim. 2002. Vol. 15. P. 353–369.
- Minnett P.J., Alvera-Azcárate A., Chin T.M., Corlett G.K., Gentemann C.L., Karagali I., Li X., Marsouin A., Marullo S., Maturi E., Santoleri R., Saux Picart S., Steele M., Vazquez-Cuervo J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature // Remote Sens. Environ. 2019. Vol. 233. P. 111366.

STRUCTURE OF THE SHAKHE RIVER OUTFLOW IN THE BLACK SEA ACCORDING TO REMOTE, PYROMETRIC AND CONTACT MEASUREMENTS

Khlebnikov D.V., Ivanov A.Yu., Konvalov B.V.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovskiy prospect, Moscow, Russia, 117997
e-mail: dx@ocean.ru*

Submitted 27.03.2019, accepted 11.09.2019

The results of studies of hydrophysical and bio-optical structure of the outflow of the Shakhe River, conducted during the IO RAS expedition “Black Sea-2018” at the marine site near Golovinka on the RV “Ashamba” on 1–2 June 2018, are presented. Information synchronously obtained, both with the help of remote sensing satellites (radar and optical sensors), infrared portable pyrometer, and onboard the RV (CTD probe as part of a shipboard flow system), was used. At the same time, seawater samples were taken from the sea surface layer, followed by laboratory analysis of their bio-optic and geochemical characteristics. Hydrophysical characteristics and submesoscale structure of the Shakhe River outflow at the test site studied both remotely and contactly, gave identical results. This makes it possible to further efficiently use these instruments on board of RVs to study the river outflows in the Black Sea. At the same time, portable infrared pyrometers make it possible to obtain significantly better spatial resolution in terms of temperature compared with satellite instruments, while satellite images can detect river outflows in the sea, their boundaries and structure.

Keywords: Black Sea, river outflows, submesoscale structure, infrared pyrometer, sea surface temperature, hydrobiological characteristics, satellite images

References

- Askari F., Geernaert G.L., Keller W.C., and Raman S. Radar imaging of thermal fronts. *Int. J. Rem. Sens.*, 1993, Vol. 14, pp. 275–294, doi:10.1080/01431169308904337.
- Beal R.C., Kudryavtsev V.N., Thompson D.R., Grodsky S.A., Tilley D.G., Dulov V.A., and Graber H.C. The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS-1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream. *J. Geophys. Res.*, 1997, Vol. 102, No. C3, pp. 5799–5814.
- Bychkova I.A., Viktorov S.V., and Vinogradov V.V. Distantionnoye opredeleniye temperatury morya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 223 p.
- Donlon C.J., Minnett P.J., Gentemann C., Nightingale T.J., Barton I.J., Ward B., and Murray J. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *J. Clim.*, 2002, Vol. 15, pp. 353–369.
- Dzhaoshvili S.H. Reki Chernogo morya. Tekhnicheskiiy otchet No. 71. Evropeyskoye agentstvo po okhrane okruzhayushchey sredy, 2002, 58 p. <http://www.eea.europa.eu/ru/publications/>
- Fedorov K.N. and Ginzburg A.I. Pripoverkhnostnyy sloy okeana. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 304 p.
- GOST 17.1.04.02-90. Voda. Metodika spektrofotometricheskogo opredeleniya khlorofilla a. Goskomitet SSSR po okhrane prirody. Moscow, 1990, 16 p.
- Ivanov A.Yu., Khlebnikov D.V., Konovalov B.V., Evtushenko N.V., and Terleeva N.V. Osobennosti otobrazheniya vynosov rek v Chernom more v dannykh distantionnogo zondirovaniya. *Sovremennyye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 191–202.
- Khlebnikov D.V., Ivanov A.Yu., Konovalov B.V., and Terleeva N.V. Issledovaniye vynosa reki Mzymta v Chernom more distantionnymi (opticheskimi i radiolokatsionnymi) i spektrofotometricheskimi laboratornymi metodami. Sbornik trudov IX Vserossiyskoy konferentsii «Sovremennyye problemy optiki yestestvennykh vod» (ONW-2017), St. Petersburg, 20–22 September 2017.
- Konovalov B.V., Kravchishina M.D., Belyayev N.A., and Novigatskiy A.N. Opredeleniye kontsentratsii mineral'noy vzvesi i vzveshennogo organicheskogo veshchestva po ikh spektral'nomu pogloshcheniyu. *Okeanologiya*, 2014, Vol. 54, No. 4, pp. 1–9.
- Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., and Sheremet N.A. Kompleksnyy sputnikovyy monitoring morey Rossii. Moscow, IKI RAS, 2011, 472 p.
- Lebedev N.E., Savos'kin V.M., and Stanichny S.V. Opredeleniye poverkhnostnoy temperatury i perepada temperatury v skin-sloye s borta dvizhushchegosya sudna po dannykh IK-izmereniy. *Morskoy gidrofizicheskiiy zhurnal*, 1994, No. 2, pp. 83–88.
- Lebedev N.E. and Stanichny S.V. Metodiki provedeniya samoletnykh izmereniy voskhodyashchego IK-izlucheniya. *Morskoy gidrofizicheskiiy zhurnal*, 2002, No. 3, pp. 61–70.
- Minnett P.J., Alvera-Azcárate A., Chin T.M., Corlett G.K., Gentemann C.L., Karagali I., Li X., Marsouin A., Marullo S., Maturi E., Santoleri R., Saux Picart S., Steele M., and Vazquez-Cuervo J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sens. Environ.*, 2019, Vol. 233, p. 111366. Otchet Chernoye More-2018. Etap No. 6 ekspeditsii na NIS «Ashamba» 30.05–03.06.2018 Moscow, IO RAS, 2018, [technical_report_2002_71/at_download/file](#).
- Zavialov P.O., Makkaveyev P.N., Konovalov B.V., and Osadchiyev A.A. Gidrofizicheskiye i gidrokhimicheskiye kharakteristiki morskikh akvatoriy u ust'yev malykh rek rossiyskogo poberezh'ya Chernogo morya. *Okeanologiya*, 2014, Vol. 54, No. 3, pp. 293–308.