

УДК 551.463.5

© Ю. А. Гольдин¹, А. В. Шатравин¹, В. А. Левченко², Ю. И. Венцукт¹, Б. А. Гуреев¹, О. В. Копелевич¹¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва²Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный
goldin@ocean.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ МОРСКОЙ ВОДЫ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Представлены результаты исследования пространственного распределения интенсивности флуоресценции растворенного в морской воде органического вещества и хлорофилла-*a* в западной части Черного моря. Исследования выполнялись в ряде био-оптических рейсов, маршрут которых проходил как в прибрежных акваториях, в том числе в районах, подверженных влиянию стока р. Дунай, так и в открытых районах моря. Измерения пространственного распределения интенсивности флуоресценции проводились с использованием специально разработанного двухканального проточного флуориметра на сверхярких светодиодах. Возбуждение флуоресценции в проточном флуориметре осуществляется в УФ (373 нм) и зеленой (521 нм) областях спектра. Для калибровки данных измерений, в частности, для учета вклада флуоресценции растворенного органического вещества при определении интенсивности флуоресценции хлорофилла-*a*, используется двухканальный лазерный спектрометр, работающий на пробах. Выделены квазиоднородные районы и районы с высокой пространственной изменчивостью интенсивности флуоресценции. Высокая пространственная изменчивость зарегистрирована в прибрежных районах, особенно вблизи устья р. Дунай. В открытых районах моря распределение квазиоднородно. В то же время, вертикальные профили флуоресценции имеют высокую изменчивость на всей исследованной акватории. В приповерхностном слое морской воды в районах с квазиоднородным распределением зарегистрирована суточная изменчивость интенсивности флуоресценции.

Ключевые слова: флуоресценция, хлорофилл, растворенное органическое вещество, проточный флуориметр, пространственная изменчивость.

Yu. A. Goldin¹, A. V. Shatravin¹, V. A. Levchenko², Yu. I. Ventscut¹, B. A. Gureev¹, O. V. Kopelevich¹

¹P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia
goldin@ocean.ru

SPATIAL VARIABILITY OF SEAWATER FLUORESCENCE INTENSITY IN THE WESTERN BLACK SEA

Spatial distribution of dissolved organic matter and chlorophyll-*a* fluorescence intensity in the Western Black Sea is studied in the article. The measurements were carried out during a number of international bio-optical cruises. Their routes passed through the open sea and the coastal areas, including areas exposed to the river runoff of the Danube. The measurements of the spatial distribution of fluorescence intensity were carried out with use of a custom developed flow-through fluorometer with super flux LEDs. UV (373 nm) and green (521 nm) light is used to excite fluorescence in the flow-through fluorometer. A two-channel laser spectrometer is utilized for the purpose of calibration of the obtained data. The calibration allows for determining of the chlorophyll-*a* fluorescence intensity taking into account the contribution of the DOM fluorescence. The spectrometer operates on samples of seawater. High spatial variability was registered in coastal areas, especially close to the Danube estuary. In open-sea areas the distribution of the measured sea water characteristics was quasi-uniform. Vertical profiles of the fluorescence intensity show high variability in the whole surveyed water area. Daily changeability of the fluorescence intensity was registered in the surface layer of seawater.

Key words: fluorescence, chlorophyll, DOM, flow-through fluorometer, spatial variability.

Пространственная изменчивость интенсивности флуоресценции морской воды — эффективный индикатор наличия неоднородностей в распределении концентрации растворенного органического вещества (РОВ) и хлорофилла *a* (Хл-*a*), обусловленных различными гидродинамическими и биологическими процессами. Характеристики пространственной изменчивости интенсивности флуоресценции в поверхностном слое морской воды дают информацию о положении и структуре фронтальных зон, поверхностных течений, апвеллингов, зон влияния речного стока, областей повышенной концентрации фитопланктона [1–10]. При проведении оперативной калибровки результаты измерений интенсивности флуоресценции позволяют оценивать концентрацию окрашенной части РОВ и Хл-*a*. Такая информация важна при проведении подспутниковых измерений в водах с высокой пространственно-временной изменчивостью гидрологических и биооптических характеристик.

Проточный флуориметр, обеспечивающий возможность проведения измерений на ходу судна, — удобный инструмент для исследований пространственной изменчивости [4, 9, 11, 12]. Он позволяет получать уникальную информацию о мезомасштабной изменчивости, которую нельзя получить при проведении измерений на отдельных станциях.

В 2011 и 2012 гг. в западной части Черного моря был выполнен ряд биооптических рейсов, в которых проводились гидрологические, биологические и оптические подспутниковые измерения. Работы выполнялись во время рейсов румынского НИС «Mare Negrum» (30.06–05.07.2011) и НИС «Akademik» Болгарской академии наук (08–12.07.2011, 12–22.07.2011, 31.08–15.09.2012). Район работ охватывал как прибрежные акватории, в частности акватории, прилегающие к устью р. Дунай и подверженные сильному влиянию речного стока, так и открытые районы моря. В указанных рейсах по всему маршруту судна с помощью проточного флуориметра выполнялись измерения интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-*a* в поверхностном слое морской воды. Кроме того, измерения интенсивности флуоресценции выполнялись на пробах, отобранных с разных горизонтов на станциях. Полученные данные позволяют оценить параметры горизонтального и вертикального пространственных распределений исследуемых характеристик.

В работе представлена общая характеристика исследованной акватории, выделяются квази-однородные и районы с высокой пространственной изменчивостью. В дальнейшем будет выполнено сопоставление данных измерений интенсивности флуоресценции с данными о концентрации Хл-*a* и РОВ, полученными стандартными методами, а также со спутниковыми данными.

Аппаратура. Для проведения исследований был использован специально разработанный измерительный комплекс. В его состав входят: проточный флуориметр на сверхярких светодиодах ПФД-2, проточный кондуктометр «Эксперт-002-2-6», проточный измеритель температуры морской воды, буксируемая система забора морской воды, приемник GPS типа «GlobalSat MR-350», лазерный спектрометр с возбуждением на двух длинах волн и программное обеспечение для регистрации, визуализации и долговременного хранения данных измерений.

Измерения пространственного распределения интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-*a* производятся с использованием двухканального проточного флуориметра на сверхярких светодиодах ПФД-2. При проведении съемки проточный флуориметр работает непрерывно в автоматическом режиме и позволяет проводить измерения с движущегося судна с требуемой пространственной дискретностью. Прибор позволяет получать пространственное распределение интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-*a* в относительных единицах на фиксированных длинах волн, соответствующих максимумам линий флуоресценции. Конструкция ПФД-2 обеспечивает также возможность проведения измерений на пробах морской воды, что позволяет получать данные о вертикальных распределениях интенсивности флуоресценции.

Флуориметр ПФД-2 разработан в лаборатории оптики океана ИО РАН. Две идентичные по конструкции проточные кюветы, изготовленные из титана, соединены последовательно. Для ввода и вывода оптического излучения на боковых гранях каждой из кювет под углом 90° к направлению водяного потока расположены три круглых иллюминатора ($\varnothing = 12$ мм). Иллюминаторы выполнены из кварцевого стекла типа КИ-1, обладающего низким уровнем собственной флуоресценции.

В качестве источника возбуждающего излучения в ПФД-2 использованы сверхяркие светодиоды. В канале измерения интенсивности флуоресценции РОВ в качестве источника возбуждающего излучения использован ультрафиолетовый светодиод типа HPL-H77GV1BA, работающий

в непрерывном режиме. Светодиод имеет следующие характеристики: длина волны излучения $\lambda_{11} = 373$ нм, ширина полосы по уровню 0.5 от максимума 15 нм, мощность излучения 25 мВт при токе 350 мА, расходимость пучка $2\gamma_1 = 25^\circ$.

В канале измерения интенсивности флуоресценции Хл-*a* в качестве источника возбуждающего излучения использован зеленый светодиод типа LXHLNM98, работающий в непрерывном режиме. Его характеристики: длина волны излучения $\lambda_{21} = 521$ нм, ширина полосы по уровню 0.5 от максимума 28 нм, мощность излучения 53 мВт при токе 350 мА, расходимость пучка $2\gamma_2 = 10^\circ$.

Питание каждого светодиода осуществляется индивидуальным стабилизированным источником тока. Особенность сверхярких светодиодов — наличие, наряду с основной линией излучения, побочных полос меньшей интенсивности. Для выделения излучения основной линии перед входными иллюминаторами кювет установлены светофильтры из цветного оптического стекла.

Контроль уровня возбуждающего излучения осуществляется с помощью фотоприемников, выполненных на основе микросхем типа ОРТ-210 со встроенным фотодиодом. Контрольные фотоприемники установлены за выходным иллюминатором, расположенным напротив входного. Перед контрольными фотодиодами установлены диафрагмы диаметром 1 мм. Кроме того, в канале измерения флуоресценции хлорофилла перед фотодиодом установлен нейтральный светофильтр из оптического стекла НС-9 толщиной 2 мм, что обеспечивает работу контрольного канала в линейном режиме.

Для регистрации излучения флуоресценции используются малогабаритные фотоэлектронные умножители с мультищелочным фотокатодом типа ФЭУ-147-1. Спектральные характеристики чувствительности фотоприемных каналов обеспечивают полное подавление рассеянного излучения на несмещенной длине волны. Они формируются за счет установки непосредственно перед фотокатодами ФЭУ светофильтров из цветного оптического стекла. Кроме того, в обоих каналах между выходным иллюминатором кюветы и фотоприемником установлены диафрагмы, обеспечивающие ослабление светового сигнала до необходимого уровня и локализацию зоны обзора. Максимум полосы регистрации излучения в канале измерения флуоресценции РОВ $\lambda_{12} = 480$ нм, в канале измерения интенсивности флуоресценции Хл-*a* — $\lambda_{22} = 685$ нм. Используемый в канале измерения интенсивности флуоресценции Хл-*a* фильтр практически полностью подавляет излучение с длинами волн короче 675 нм.

Питание ФЭУ осуществляется от малогабаритных высоковольтных источников производства фирмы «Traco Power» типа МНВ12-2.0К1000N. Они обеспечивают на выходе стабилизированное напряжение, регулируемое в пределах 0–2 кВ при токе 1 мА. Изменение чувствительности производится путем изменения напряжения питания ФЭУ. Электрические сигналы с нагрузки ФЭУ после инвертирования и дополнительного усиления поступают на вход многоканального десятиразрядного аналого-цифрового преобразователя, а затем в персональный компьютер для оперативной обработки, регистрации, визуализации и долговременного хранения. Кроме того, для оперативного контроля уровней выходных сигналов используется дисплей, расположенный на передней панели прибора. Сигналы на него поступают также с выхода АЦП.

Проточный кондуктометр «Эксперт-002-2-6» (разработка ОАО «Эконикс-Эксперт», Москва, Россия) предназначен для измерения проводимости и температуры воды и расчета по этим параметрам ее солености. Измерение температуры заборной воды производится с использованием специального проточного измерителя температуры, установленного в непосредственной близости от устройства водозабора. Такое расположение измерителя устраняет погрешность, вызванную изменением температуры воды при ее распространении по относительно длинным шлангам. Диапазон измерения температуры от -2 до $+40^\circ\text{C}$, погрешность измерения 0.2°C . Непрерывное поступление воды в проточные кюветы флуориметра ПФД-2, кондуктометра «Эксперт-002-2-6Пр» и измерителя температуры обеспечивается буксируемая водозаборная система. Для заглубления водозаборника на ходу судна используется специально разработанный гидродинамический заглубитель. Для забора воды использован самовсасывающий водяной насос эжекторного типа Grundfos JP-5. Все элементы всасывающей камеры насоса выполнены из нержавеющей стали и пластмассы. Насос устанавливается на палубе непосредственно у борта судна. Вода подается к проточным датчикам по системе полихлорвиниловых шлангов.

В канале подачи заборной воды установлена специальная камера, обеспечивающая удаление воздушных пузырьков из заборной воды до ее поступления в измерительные кюветы.

Водозаборная система обеспечивает забор воды с горизонта ~1 м на ходу судна при любой скорости движения. Скорость (расход) протока при проведении измерений составляет (3–5) л/мин. На всем пути к проточным кюветам заборная вода не имеет контактов с элементами, которые могли бы внести загрязнения или оказать химическое воздействие.

Для оценки влияния воздействия проточной системы на исследуемые флуорофоры был выполнен ряд контрольных измерений на пробах, отобранных в соответствующие моменты времени с поверхности в районе носовой части судна, где влияние судна минимально. Измерения проводились в разных условиях (воды различной продуктивности, разное время суток, различный уровень волнения). Во всех случаях зарегистрированное расхождение значений интенсивности флуоресценции при измерениях в проточном режиме и на пробах не выходило за пределы погрешности измерений.

Приемник GPS GlobalSat MR-350 обеспечивает непрерывное получение данных о координатах, скорости и курсе судна.

Данные измерений с флуориметра ПФД-2, кондуктометра «Эксперт-002-2-6» и приемника GPS подаются на три USB порта ПК и оперативно отображаются на экране монитора. Все данные измерений вместе с информацией о положении, скорости и курсе судна сохраняются в текстовом формате с помощью специально разработанной программы PLF-4.

Для калибровки данных измерений интенсивности флуоресценции (в частности, учета вклада флуоресценции РОВ при определении интенсивности флуоресценции Хл-*a*) используется двухканальный проточный лазерный спектрометр ЛС-2 (разработка лаборатории оптики океана ИО РАН). В качестве источников возбуждающего излучения в спектрометре используются 2 малогабаритных непрерывных полупроводниковых лазера, генерирующих излучение на длинах волн $\lambda_1 = 401$ нм (ширина полосы по уровню 0,5 от максимума $\Delta\lambda_{0,5} = 9.5$ нм и $\lambda_2 = 532$ нм ($\Delta\lambda_{0,5} = 8.7$ нм)). Возбуждаемое тонким узконаправленным лазерным пучком излучение флуоресценции морской воды и комбинационного рассеяния на молекулах воды собирается оптической системой, оптическая ось которой располагается ортогонально оптическим осям лазерных пучков. Для подавления рассеянного излучения на несмещенной частоте перед входной линзой оптической системы помещается стеклянный фильтр ЖС-11 толщиной 3 мм (для $\lambda_1 = 401$ нм), либо специальный интерференционный фильтр (для $\lambda_2 = 532$ нм). Принятое излучение по гибкому световоду Ocean Optics FA2206 диаметром 1 мм и длиной 25 см поступает на вход малогабаритного спектрометра Ocean Optics USB4000 с входной щелью 200 мкм. Спектральный диапазон регистрации 200–850 нм.

Питание спектрометра и передача данных в ПК осуществляется по USB кабелю. Для управления спектрометром, а также для обработки и регистрации спектров используется специальная программа Ocean Optics SpectraSuit.

Спектрометр ЛС-2 позволяет получать полные спектры флуоресценции РОВ и Хл-*a*, возбуждаемой лазерным излучением фиолетового и зеленого участков спектра и соответствующие линии комбинационного рассеяния (КР) на молекулах воды. При последующей обработке устраняется взаимное влияние излучений флуоресценции Хл-*a*, РОВ и КР, обусловленное перекрытием их линий, определяются интенсивности излучений флуоресценции и КР и производится нормировка интенсивностей флуоресценции хлорофилла-*a* и РОВ на интенсивность соответствующей линии КР. Нормированные на КР значения интенсивности флуоресценции измеряются в Рамановских единицах (Raman Units — RU).

Измерения интенсивности флуоресценции Хл-*a* и РОВ, солености и температуры выполняются непрерывно по маршруту движения судна. Интервал усреднения по времени в зависимости от условий съемки может меняться в диапазоне 1–30 с. В большинстве ситуаций он устанавливается равным 15 с.

Для проведения нормировки данных измерений интенсивности флуоресценции, выполненных проточным флуориметром, по данным спектральных измерений из водозаборной системы регулярно отбираются пробы морской воды. Кроме того, спектральные измерения выполняются на пробах, отобранных с разных горизонтов на станциях.

В ПФД-2 и ЛС-2 флуоресценция Хл-*a* возбуждается светом зеленой области спектра. Используемая длина волны возбуждающего излучения обеспечивает близость линий флуоресценции Хл-*a* и КР, что важно для процедуры нормировки. Так как поглощение Хл в зеленой области спектра минимально, возбуждение молекул Хл-*a* в данном случае происходит в основном за счет

переноса возбуждения на них со вспомогательных пигментов. Качественный и количественный состав вспомогательных пигментов может существенно варьироваться. Это необходимо учитывать при анализе данных измерений и их сопоставлении с другими данными.

Система спектральной селекции ПФД-2 обеспечивает регистрацию только линии флуоресценции Хл-*a*. Более коротковолновая линия флуоресценции фикоэритрина полностью подавляется. В то же время, ЛС-2 обеспечивает регистрации обеих линий.

Результаты и обсуждение. Исследования пространственного распределения интенсивности флуоресценции Хл-*a* и РОВ были выполнены в летний период (июль 2011 г. и начало сентября 2012 г.) в западной части Черного моря в румынских и болгарских водах.

Анализ полученных данных показывает, что высокая пространственная изменчивость интенсивности флуоресценции типична для прибрежных областей исследованной акватории и района эстуария реки Дунай. Резких фронтов в распределении интенсивности флуоресценции в открытых водах зарегистрировано не было. Распределения интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-*a*, а также поверхностной температуры морской воды вдоль всего маршрута рейса НИС «Mare Nigrum», выполненного с 30.06 по 05.07.2011 г., показаны на рис. 1.

Полученное распределение характеризуется достаточно высокой пространственной изменчивостью всех характеристик. Резкий пик в распределении интенсивности флуоресценции, зарегистрированный 1 июля (увеличение интенсивности флуоресценции Хл-*a* более, чем в 12 раз и интенсивности флуоресценции РОВ более, чем в 6 раз), сопровождающийся резким понижением поверхностной температуры на 3°C, соответствует пересечению речного плюма, образованного водами р. Дунай. На других участках маршрута зарегистрированы пики флуоресценции Хл-*a*, в которых величина интенсивности возрастает в 3–5 раз. Величина интенсивности флуоресценции РОВ меняется в 3–4 раза. Пример высокой временной изменчивости измеряемых характеристик морской воды представлен на рис. 2. На рисунке показан результат непрерывной регистрации интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-*a* во время ночной якорной стоянки, расположенной в непосредственной близости от устья р. Дунай. Эта станция расположена вблизи границы между

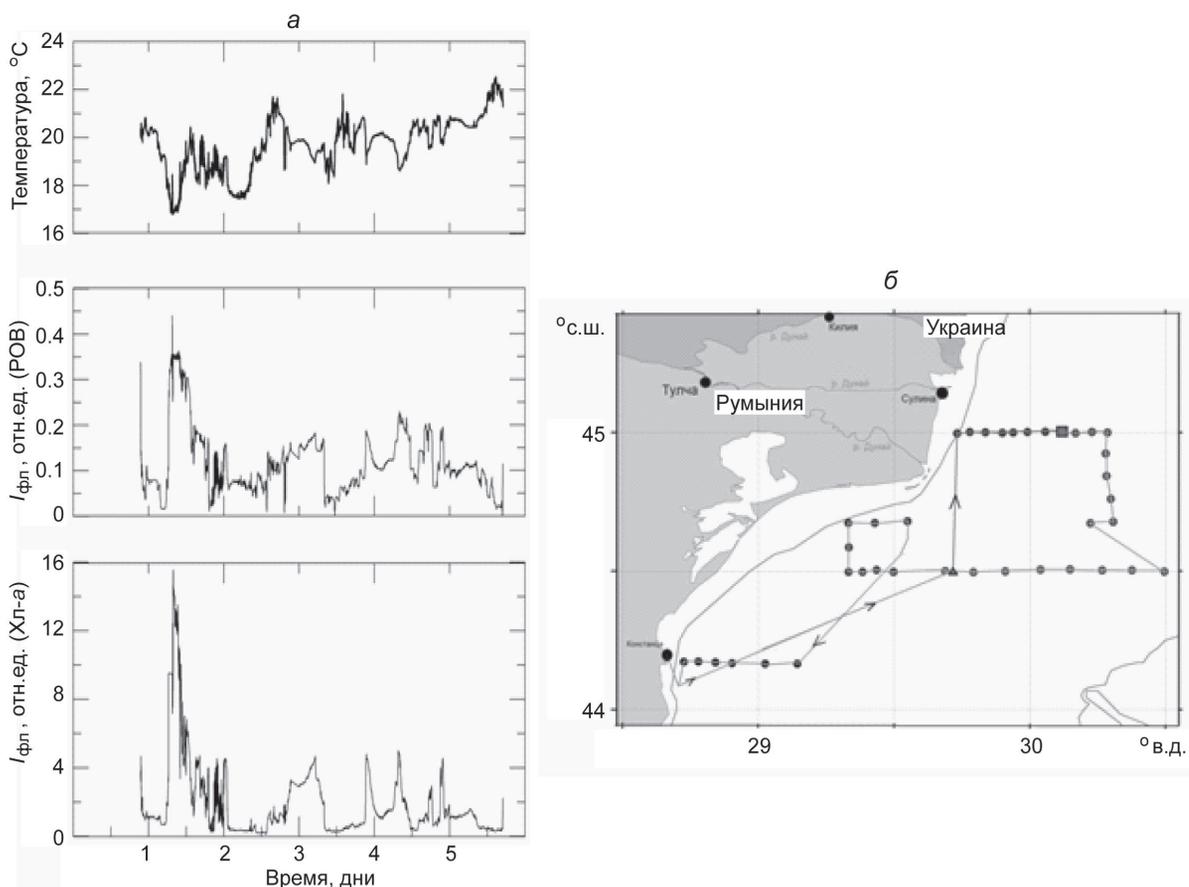


Рис. 1. Изменчивость поверхностной температуры морской воды и интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-*a* вдоль маршрута НИС «Mare Nigrum» (а) и маршрут судна (б).

двумя различными по своим характеристикам водными массами. Здесь вынос вод р. Дунай через Килийское и Сулинское гирла попадает в поверхностное течение, поворачивающееся в северо-восточном направлении. В то же время здесь в юго-западном направлении поворачивается основное (круговое) Черноморское течение. Взаимодействие этих течений вызывает турбулентность и приводит к осцилляциям положения границы. Эти осцилляции обуславливают синхронные изменения всех наблюдаемых характеристик.

Совершенно другая картина пространственного распределения была зарегистрирована в акватории, прилегающей к порту Варна, где выполнялся рейс НИС «Akademik» (08–12.07.2011 г.). Особенностью района в период проведения исследований была крайне низкая концентрация фитопланктона, подтвержденная прямыми измерениями. В отсутствие цветения фитопланктона и выноса крупных рек квазиоднородное горизонтальное пространственное распределение биооптических характеристик в поверхностном слое морской воды наблюдалось практически от самого берега. Отсутствие характерного для периода цветения фитопланктона пятнистого характера пространственного распределения позволило зарегистрировать суточную изменчивость интенсивности флуоресценции Хл-*a* в поверхностном слое воды. Пример зарегистрированной суточной изменчивости, наблюдавшейся в течение 4.5 суток, показан на рис. 3. Это распределение соответствует практически всему маршруту рейса, представленному на правом рисунке. Обрезаны только начальный и конечный участки распределения, соответствующие выходу из порта Варна и заходу в порт. На этих участках интенсивность флуоресценции Хл-*a* резко возросла в 10–12 раз.

Как следует из приведенного на рис. 3 распределения величина интенсивности флуоресценции Хл-*a* меняется в течение суток в ~2 раза. Максимальные значения соответствуют темному времени суток (с 22:00 до 07:00 ч), минимальные — середине светового дня (с 11:00 до 16:00 ч). Причиной суточной изменчивости флуоресценции в данном районе является, по-видимому, световая адаптация фитопланктона. Снижение интенсивности флуоресценции в светлое время суток связано в основном с развитием процессов нефотохимического тушения флуоресценции, имеющих различную природу, с характерными временами развития от нескольких секунд до часов [2, 13, 14].

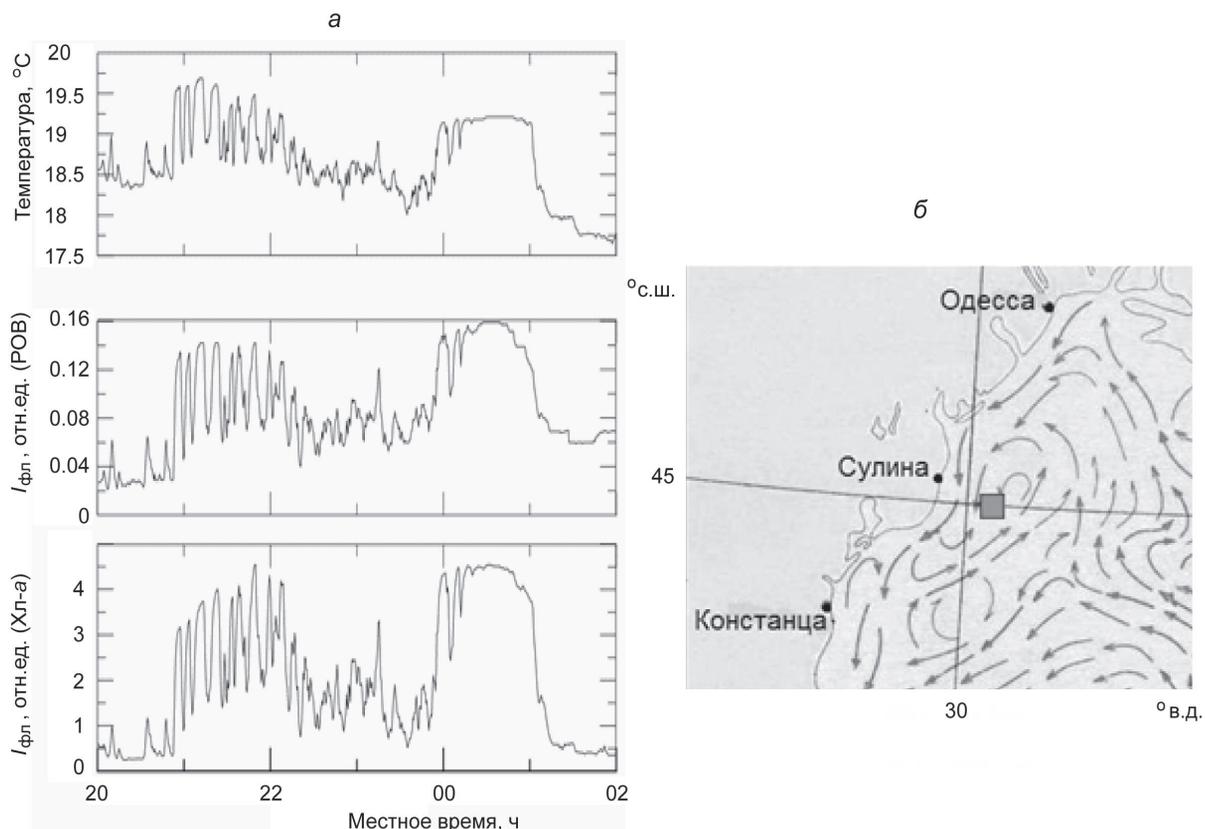


Рис. 2. Временная изменчивость поверхностной температуры воды и интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-*a* во время ночной якорной станции 1–2 июля 2011 г. вблизи дельты р. Дунай (а); положение станции (координаты станции: 45°00.50' с.ш., 30°07.18' в.д.) на карте (б).

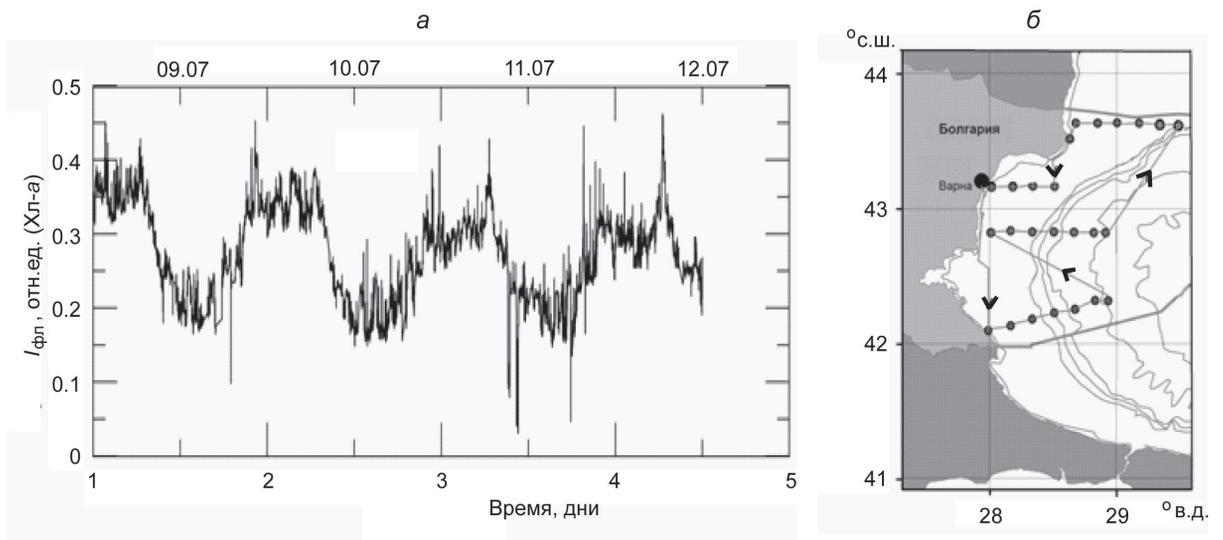


Рис. 3. Распределение интенсивности флуоресценции Хл-а на участке маршрута НИС «Академик», выполненного с 9 по 12 июля 2011 г. (а), и положение маршрута на карте (б). Направление движения показано стрелками.

Исследования 2012 г. выполнялись в рейсе НИС «Akademik» (31.08–15.09.2012 г.) в акватории, прилегающей к устью р. Дунай. Границы района, подверженного влиянию речного стока, на полученных распределениях интенсивности флуоресценции выделяются достаточно четко. Примеры таких распределений совместно с распределениями солености и температуры представлены на рис. 4, 5.

Положение разрезов (треки 1 и 2) показано на рис. 6.

На распределениях, соответствующих треку 1, область вод, подверженных влиянию речного стока, отделена от вод открытого моря резким фронтом, удаленным от берега на ~40 км. Этот фронт проявился во всех представленных характеристиках. Соленость падает с 17 до 14 PSU, температура уменьшается на ~1°C, интенсивность флуоресценции РОВ и Хл-а возрастает в ~1,5 раза. В область опресненных вод, простирающуюся до самого берега, внедряется узкая полоса вод открытого моря. За пределами границы области опресненных вод распределение всех характеристик квазиоднородно и влияние речного стока практически не проявляется.

На распределениях, соответствующих более удаленному от устья р. Дунай треку 2, граница, разделяющая опресненные воды, также проявляется в распределениях всех измерявшихся характеристик. Но здесь она существенно размыта.

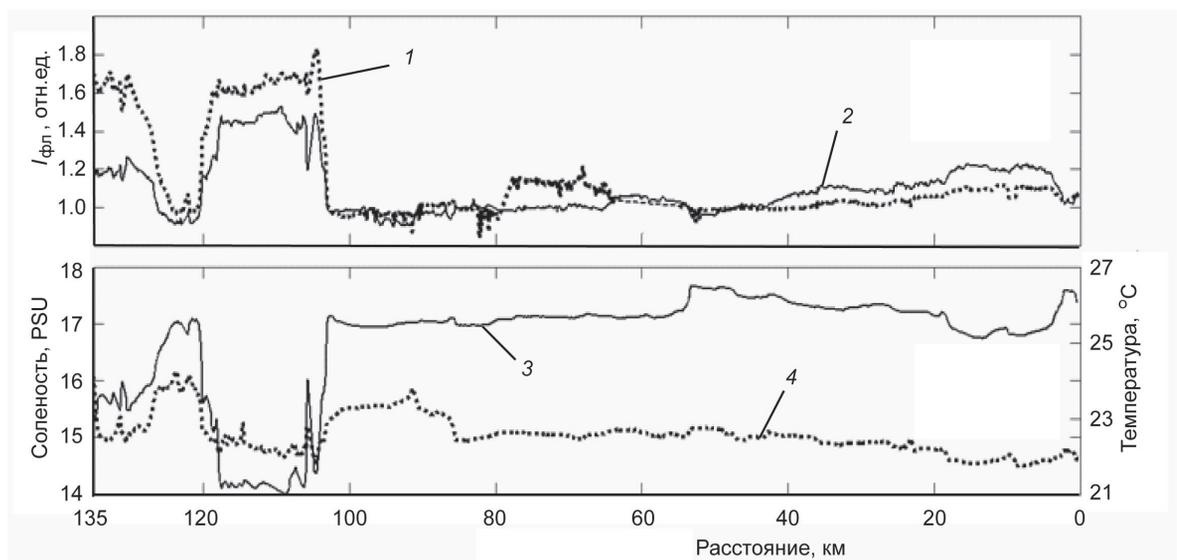


Рис. 4. Пространственное распределение интенсивности флуоресценции Хл-а (1), РОВ (2), солености (3) и температуры (4) вдоль трека 1 (см. рис. 6). Разрез выполнен 4–5 августа 2012 г.

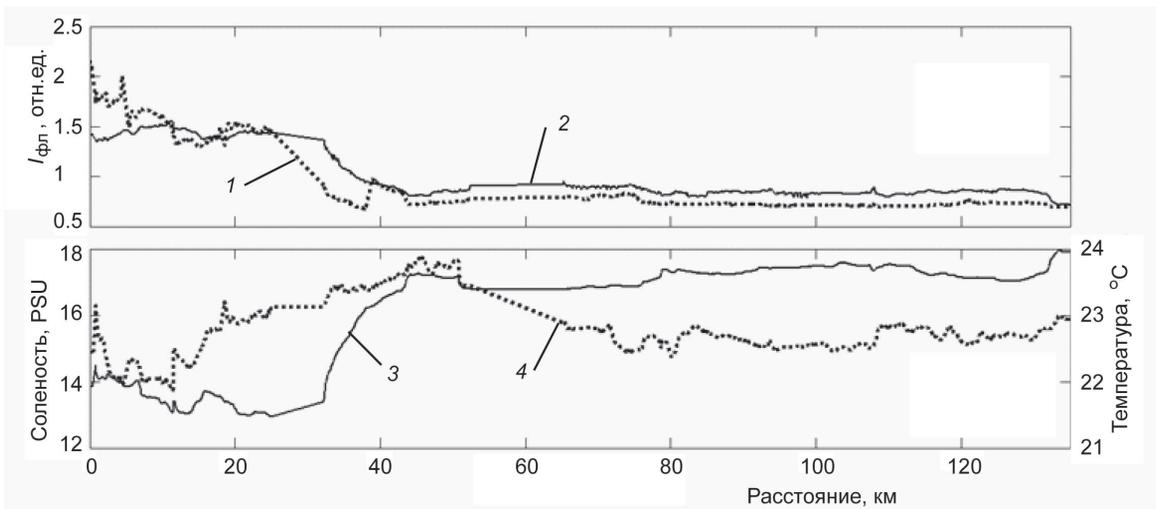


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивностей флуоресценции Хл-а (1), РОВ (2), солености (3) и температуры (4) вдоль трека 2 (см. рис. 6). Разрез выполнен 8–9 августа 2012 г.

Таким образом, данные измерений показывают, что зона влияния стока р. Дунай четко локализована, а за пределами этой зоны все горизонтальные пространственные распределения квазиоднородны.

Измерения, выполненные спектрометром на пробах морской воды, показывают высокую изменчивость интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-а в зависимости от глубины. На рис. 7 показаны примеры спектров и вертикальных профилей интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-а. Спектры получены на пробах морской воды, отобранных с четырех горизонтов на ст. K07s42 (44°34'32" с.ш. 29°20'03" в.д., 06.09.2012 г., глубина 36 м). Положение станции K07s42 показано на рис. 6.

Нормированные спектры, соответствующие длине волны возбуждающего излучения $\lambda_1 = 401$ нм, представлены на рис. 7, а. Первый пик в спектре соответствует узкой полосе комбинационного рассеяния на молекулах воды. Он наложен на широкую полосу флуоресценции РОВ (максимум при ~490 нм). Пик при $\lambda_2 = 685$ нм обусловлен флуоресценцией Хл-а, возбуждаемой фиолетовым излучением.

Нормированные спектры, соответствующие длине волны возбуждающего излучения $\lambda_1 = 532$ нм, показаны на рис. 7, в. Полоса комбинационного рассеяния (максимум при ~651 нм) и полоса флуоресценции Хл-а (максимум при ~685 нм) наложены на длинноволновое крыло широкой полосы флуоресценции РОВ.

Вертикальные профили нормированной интенсивности флуоресценции, построенные по результатам обработки соответствующих спектров, показаны на рис. 7, б, г. Отметим, что дискретные глубины отбора проб позволяют получать только относительно грубый профиль.

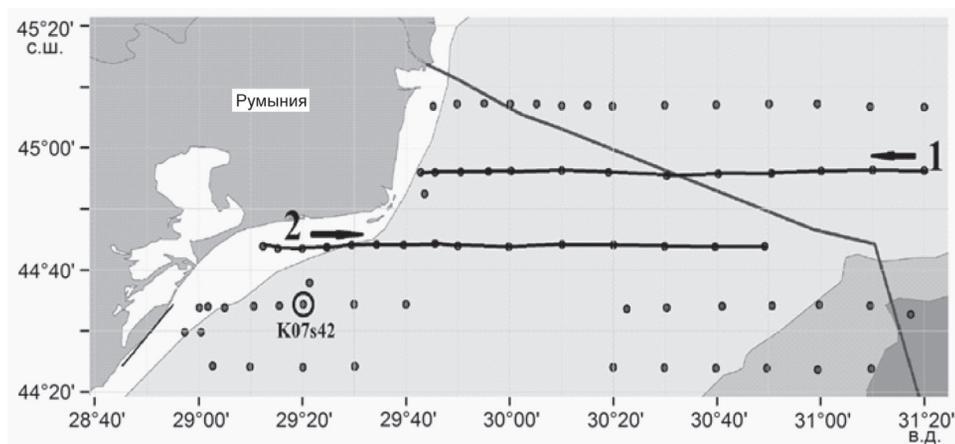


Рис. 6. Положение треков 1, 2 и станции K07s42.

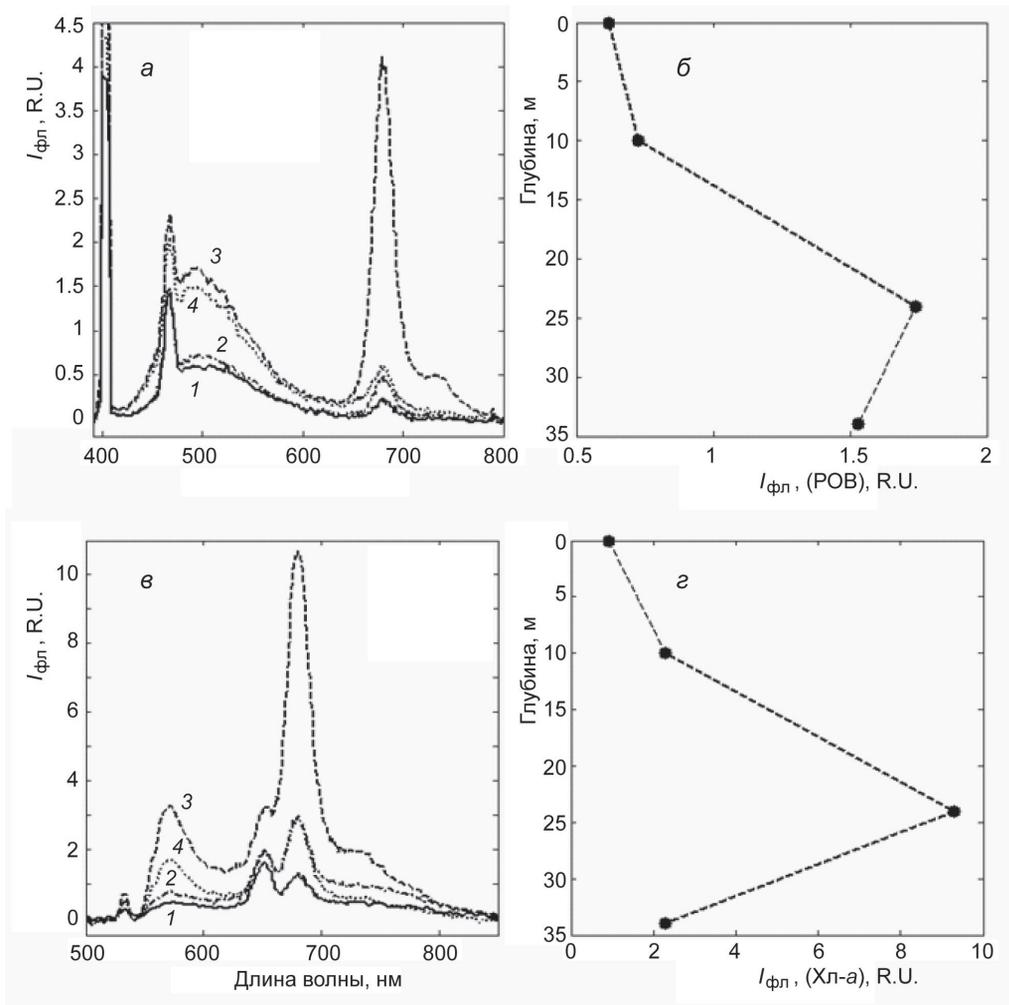


Рис. 7. Спектры, зарегистрированные при возбуждении излучением с длинами волн 401 нм (а) и 532 нм (в) и вертикальные профили нормированных на интенсивность комбинационного рассеяния интенсивностей флуоресценции РОВ (б) и Хл-а (г), полученные в результате измерений на пробах, отобранных на ст. К07s42.

В ходе выполнения ряда подспутниковых биооптических рейсов в западной части Черного моря были проведены исследования пространственного распределения интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-а. В результате исследований зарегистрирована высокая горизонтальная пространственная изменчивость в районе влияния стока р. Дунай, где были зафиксированы резкие фронты, разделяющие опресненные речным стоком воды и соленые воды открытых морских акваторий. В фиксированной точке, расположенной вблизи границы области опресненных вод, зарегистрирована сильная временная изменчивость. В районах с квазиоднородным пространственным распределением характеристик наблюдался ярко выраженный суточный ход интенсивности флуоресценции Хл-а в поверхностном слое воды. Вертикальная стратификация интенсивности флуоресценции РОВ и Хл-а зарегистрированы на всей исследованной акватории. Полученные данные о пространственно-временной изменчивости характеристик морской воды должны быть учтены при сопоставлении данных судовых и спутниковых измерений.

Авторы благодарят Джузеппе Зиборди за поддержку и внимание к этой работе.

Работа выполнена при поддержке Гранта «НАТО Science for Peace» № 982678.

Литература

1. Hoge F. F., Swift R. N. Airborne dual laser excitation and mapping of phytoplankton in a Gulf Stream warm core ring // Appl. Optics. 1983. V. 22, N. 15. P. 2272–2281.
2. Карабаев Г. С. Флуоресценция в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 200 с.

3. *Фадеев В. В., Сысоев Н. Н., Фадеева И. В., Доленко С. А., Доленко Т. А.* О возможностях использования флуоресценции гуминовых веществ для определения гидрологических структур в прибрежных морских акваториях и внутренних водоемах // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 4. С. 606–615.
4. *Гуреев Б. А., Гольдин Ю. А., Венцкут Ю. И.* Проточный лазерный флуориметр // *Комплексные исследования Мирового океана — проект «Меридиан», Атлантический океан*. М.: Наука, 2008. С. 189–195.
5. *Буренков В. И., Гладышев С. В., Гольдин Ю. А.* Изменчивость оптических характеристик на разрезе SR-2 в Южной Атлантике // *Комплексные исследования Мирового океана — проект «Меридиан», Атлантический океан*. М.: Наука, 2008. С. 173–178.
6. *Goldin Yu. A., Demidov A. B.* Spatial variability of fluorescents intensity and chlorophyll-a distributions in the Atlantic in March-April 2005 // *Proc. V Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters» (ONW'2009)*. Nizhny Novgorod, 2009. P. 193–197.
7. *Буренков В. И., Гольдин Ю. А., Артемьев В. А., Шеберстов С. В.* Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2010, Т. 50, № 5. С. 716–729.
8. *Goble P. G., Castillo C. E., Avril B.* Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon // *Deep-Sea Research II*. 1998. V. 45. P. 2195–2223.
9. *Amornthammarong N., Zhang J. Z.* Shipboard fluorometric flow analyzer for high-resolution underway measurement of ammonium in seawater // *Analytical Chemistry*. 2008. V. 80, N 4. P. 1019–1026.
10. *Checalyuk A. M., Landry M. R., Goericke R., Taylor F. G., Hafez M. A.* Laser fluorescence analysis of phytoplankton across a frontal zone in California Current ecosystem // *Journal of Plankton Research*. 2012. V. 34, N 9. P. 761–777.
11. *Карабаев Г. С., Ханаев С. А.* Лазерный проточный флуориметр // *Океанология*. 1987. Т. 27, вып. 6. С. 1007–1009.
12. *Майор А. Ю., Букин О. А., Павлов А. Н., Киселев В. Д.* Судовой лазерный флуориметр для исследования спектров флуоресценции морской воды // *Приборы и техника эксперимента*. 2001. № 4. С. 151–154.
13. *Parsons T., Takahashi M.* Biological oceanographic processes. L. Pergamon Press, 1973. 186 p.
14. *Kiefer D. A.* Chlorophyll a fluorescence marine centric diatoms: response of chloroplasts to light and nutrient stress // *Mar. Biol.* 1973. V. 23. P. 30–46.

Статья поступила в редакцию 16.07.2014 г.