

УДК 551.463.5

© Е. А. Аглова*^{1,2}, Д. И. Глуховец^{1,2}, 2022

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Россия, Москва, Нахимовский проспект, 36.

²Московский физико-технический институт (НИУ), 141707, Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

*aglova.ea@phystech.edu

ПРИМЕРЫ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИКИ ВОД НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *A* В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ БАРЕНЦЕВА И НОРВЕЖСКОГО МОРЕЙ

Статья поступила в редакцию 04.03.2022, после доработки 27.10.2022, принята в печать 11.11.2022

Аннотация

Продемонстрировано влияние динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей, полученное на ходу судна с помощью проточного измерительного комплекса в августе 2020 г. В качестве параметра, характеризующего динамику водных масс, выбрана дивергенция поля течений, рассчитанная по данным реанализа. Применение метода скользящих корреляций позволило выделить участки маршрута с положительной и отрицательной корреляциями значений дивергенции и интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*. Показано, что положительная корреляция формируется в результате вертикального движения вод поверхностного слоя, отрицательная — может являться следствием адвекции водных масс и суточного хода значений фотосинтетически активной радиации. Часть полученных результатов подтверждается спутниковыми данными о пространственном распределении концентрации хлорофилла *a*.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, флуоресценция, дивергенция поля течений, поверхностный слой, спутниковые данные, фотосинтетически активная радиация, Баренцево море, Норвежское море

© Е. А. Аглова^{1,2*}, Д. И. Глуховец^{1,2}, 2022

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141707, Russia

*aglova.ea@phystech.edu

EXAMPLES OF THE WATER DYNAMICS INFLUENCE ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL *A* FLUORESCENCE INTENSITY IN THE SURFACE LAYER OF THE BARENTS AND NORWEGIAN SEAS

Received 04.03.2022, Revised 27.10.2022, Accepted 11.11.2022

Abstract

The influence of water dynamics on the spatial distribution of chlorophyll *a* fluorescence intensity in the surface layer of the Barents and Norwegian Seas, obtained during the 80-th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” using the flow-through measuring complex in August 2020, was demonstrated. The divergence of the current velocity field, calculated according to reanalysis data, was chosen as a parameter describing the dynamics of water masses. The application of the current sliding correlations method allowed us to identify areas of the track with positive and negative correlations between the values of divergence and chlorophyll *a* fluorescence intensity. It is shown that a positive correlation is formed as a result of the vertical movement of the water surface layer, a negative one — may be a consequence of the water masses advection and the daily changes of the values of photosynthetically active radiation. The part of obtained results is confirmed by satellite data on the spatial distribution of chlorophyll *a* concentration.

Keywords: chlorophyll *a*, seawater fluorescence, divergence of the current velocity field, surface layer, satellite data, photosynthetically active radiation, Barents Sea, Norwegian Sea

Ссылка для цитирования: Аглова Е.А., Глуховец Д.И. Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a* в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 4. С. 54–62. doi:10.48612/fpg/dvzv-rrk5-5p2b

For citation: Aglova E.A., Glukhovets D.I. Examples of the Water Dynamics Influence on the Spatial Distribution of Chlorophyll *a* Fluorescence Intensity in the Surface Layer of the Barents and Norwegian Seas. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 4, 54–62. doi:10.48612/fpg/dvzv-rrk5-5p2b

1. Введение

Движение водных масс оказывает воздействие на распределение биооптических характеристик морской воды [1–3]. Возникающие процессы апвеллинга, адвекции и вертикального перемешивания перераспределяют в толще морской воды фитопланктон и необходимые для его развития минеральные элементы [4, 5]. В результате течения оказывают влияние на пространственно-временное распределение биооптических характеристик поверхностного слоя морской воды, в частности, на интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* (Хл), характеризующую биомассу фитопланктона. Пространственное распределение биооптических характеристик, связанных с фитопланктоном, может быть эффективно исследовано оптическими методами, например, флуоресцентными [6–8]. Цель работы — демонстрация примеров связи пространственного распределения интенсивности флуоресценции Хл (I_f) в поверхностном слое морской воды с влияющими на это распределение значениями дивергенции поля поверхностных течений в Баренцевом и Норвежском морях, а также анализ механизма возникновения зарегистрированных примеров. Отметим, что на большинстве участков маршрута судна такой связи обнаружить не удалось. Это может быть следствием целого ряда причин, наиболее вероятной из которых следует считать однородность пространственного распределения биооптических характеристик на этих участках. В таком случае перемешивание вод не может привести к изменчивости концентрации Хл. Кроме того, на значения I_f помимо концентрации этого пигмента может влиять ряд факторов, например, видовой состав фитопланктона, физиологическое состояние клеток и адаптация к минеральному питанию и световому режиму [9]. В данной работе рассматривается влияние светового режима, анализ влияния остальных факторов представляет собой предмет для отдельного исследования.

2. Аппаратура и методика

В работе использованы результаты непрерывных судовых измерений биооптических характеристик вдоль маршрута судна. Измерения выполнены в ходе 80-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Баренцевом и Норвежском морях в августе 2020 г. [10]. Величина интенсивности флуоресценции Хл получена с помощью проточного двухканального флуориметра ПФД-2М, входящего в состав судового измерительного комплекса [11]. Глубина водозабора составляла 2–3 м, пространственное разрешение — около 50 м. После калибровки показания прибора приводятся к абсолютным (рамановским) единицам (R.U.), что позволяет сравнивать полученные результаты с данными других флуориметрических измерений.

В рейсе также проводилась непрерывная попутная регистрация падающего на поверхность морской воды потока фотосинтетически активной радиации (ФАР), измеряемая датчиком LI-COR.

Расчет значений дивергенции поля течений в поверхностном слое производился с помощью данных, полученных на сайте океанографического реанализа CMEMS (англ. Copernicus Marine Environment Monitoring Service), портал системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus, <https://resources.marine.copernicus.eu>, продукт ARCTIC_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_002_001_a с пространственным разрешением 12,5 км и временным — 1 ч. В основе данных использованного продукта лежит модель HYCOM [12] с еженедельной ассимиляцией данных с применением фильтра Калмана [13].

К сожалению, в рейсе, данные которого анализируются в статье, судовой ADCP не работал, и мы не можем подтвердить качество данных реанализа судовыми измерениями. Приведенное в отчете научно-исследовательской лаборатории ВМС США за 2020 г. сравнение данных этой модели с результатами прямых определений скорости течений, полученными с помощью буев, показало, что отклонения средних значений скорости течений в верхнем слое океана не превосходят 10% [14]. Проверка точности данных используемой модели в исследуемом регионе была проведена нами в июне 2021 г. в 1-м этапе 83-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», где выполнялись попутные измерения скорости течений. Их результаты показали согласие с данными реанализа в области разделения Норвежского течения на Нордкапское и Шпицбергенское¹.

Значения дивергенции поля течений в поверхностном слое усреднялись за сутки (± 12 часов к моменту судового измерения проточным комплексом) для исключения вклада приливов и отливов, содержащихся в используемом продукте. Из-за существенного различия пространственного разрешения данных реанализа и результатов судовых непрерывных измерений каждому значению дивергенции соответствует ряд значений интенсивности флуоресценции Хл. Для дальнейшей обработки использованы медианные значения

¹ <https://www.ocean.ru/index.php/vse-novosti/item/2152-pervyj-etap-83-go-rejsa-nis-akademik-mstislav-keldysh>

этих рядов. Использование ежечасного реанализа при средней скорости движения судна 9 узлов приводит к удвоению числа анализируемых для каждой точки участка данных (в большинстве случаев судно проходит каждый пиксель реанализа более чем за час, что соответствует двум последовательным временным слоям значений дивергенции). Среднее количество точек на каждом участке $N = 20$.

Данные судовой метеостанции, полученные в рейсе, показали преобладание ветров СЗ направления со скоростью 9–12 м/с, реже фиксировались ветра СВ направления со скоростью 7–10 м/с. Максимальная скорость ветра составила 14 м/с, минимальная — 3 м/с. Отметим, что результаты реанализа СМЕМС учитывают ветровое перемешивание.

Для поиска участков маршрута с наибольшими значениями коэффициентов корреляции между значениями дивергенции поля течений и измеренной на ходу судна интенсивностью флуоресценции Хл проведены расчеты методом скользящей корреляции с выбранным масштабом 120 км [15]. Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$R(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y},$$

где $\text{cov}(x, y)$ — ковариация величин x и y , σ — среднеквадратичное отклонение.

Выбор масштаба для проведения расчетов обусловлен размерами проявлений исследуемых объектов — фронтальных зон и мезомасштабных вихрей. Значимость найденных коэффициентов корреляции R определялась по уровню $p = 0,01$. Для исключения влияния ошибок, обусловленных слабой изменчивостью интенсивности флуоресценции Хл на квазиоднородных участках маршрута, использовался критерий $|\Delta I_{\text{fl}}| > 0,1 \text{ R.U.}$ Применение этого критерия позволяет исключить из рассмотрения участки, где влияние динамики слабо влияет на пространственное распределение I_{fl} .

Пространственные распределения концентрации Хл (стандартный продукт chlor_a [16]) получены по данным спутниковых сканеров цвета MODIS/Aqua (5 августа 2020 г., 12:10 UTC) и MODIS/Terra (16 августа 2020 г., 11:35 UTC). Пространственное разрешение данных — 1 км.

3. Результаты

Карта течений вод поверхностного слоя морской воды и рассчитанные значения дивергенции поля течений, построенные по данным реанализа, показаны на рис. 1. Данные усреднены за период проведения судовых измерений (5–23 августа 2020 г.). Наибольшая неоднородность структуры течений наблюдается в областях разделения Норвежского Атлантического течения на Нордкапское и Шпицбергенское (севернее резкого свала глубин в районе 70–71°с.ш., 17–18°в.д.) и Полярного фронта [17]. В области 70°с.ш., 3°в.д. отчетливо проявляется конвективная структура в Лофотенской котловине [18]. Динамика вод включает в себя вертикальные движения водных масс, что приводит к изменениям пространственного распределения биогеохимических характеристик. Эти проявления могут быть зарегистрированы в пространственных распределениях интенсивности флуоресценции в поверхностном слое.

Результаты расчетов скользящих корреляций между значениями дивергенции поля течений и измеренной на ходу судна интенсивностью флуоресценции Хл с масштабом 120 км представлены на рис. 2. Высокие абсолютные значения корреляции зарегистрированы в областях неоднородного поля течений юго-западнее Шпицбергена. Вариации в пороговых значениях R , значимых по уровню $p = 0,01$, в различных областях рисунка обусловлены попаданием разного числа точек в выбранный масштаб обработки данных. Важно отметить, что при использованном в работе подходе на значения коэффициентов корреляции на отдельных участках влияет изменчивость значений дивергенции, а не их абсолютная величина и знак в данной области. Характеристика рассматриваемых в работе участков приведена в таблице.

4. Обсуждение

Предполагая вклад изменчивости плотности морской воды по сравнению со скоростью течений малым, можно записать упрощенное уравнение непрерывности:

$$\text{div}V = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0,$$

где u, v, w — горизонтальные и вертикальная составляющие вектора скорости течений.

Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*...
 Examples of the water dynamics influence on the spatial distribution of chlorophyll *a*...

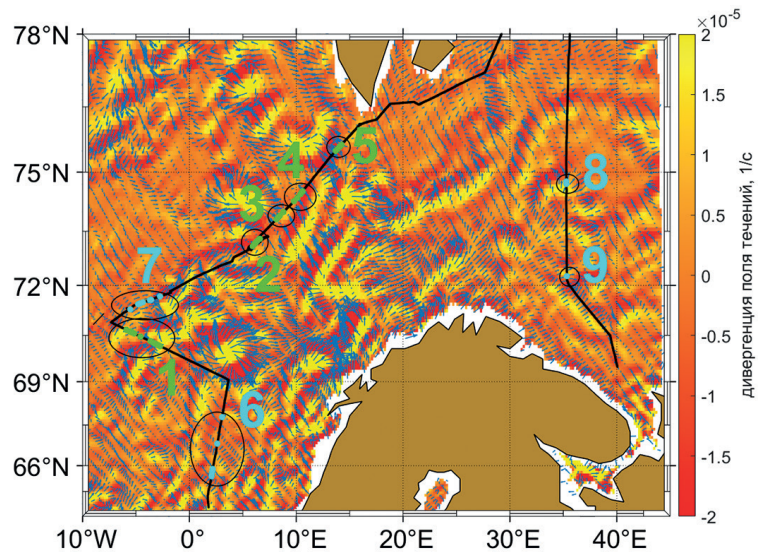


Рис. 1. Карта течений (синие стрелки, максимальная длина соответствует 0,35 м/с) и значения дивергенции поля течений (оттенки оранжевого), с наложенной частью маршрута 80-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», 5–23 августа 2020 г. (черная линия). Зеленым цветом выделены участки со значимой по уровню $p = 0,01$ положительной корреляцией между значениями интенсивности флуоресценции Хл и дивергенции, голубым — с отрицательным коэффициентом корреляции. Цифрами приведена нумерация данных участков

Fig. 1. The map of currents (blue arrows, the maximum length corresponds to 0.35 m/s) and the values of divergence of the currents field (shades of orange), with the added part of the route of 80-th cruise of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”, August 5–23, 2020 (black line). Areas with a significant positive correlation between the values of the Chl fluorescence intensity and divergence are highlighted in green, the negative correlation areas are highlighted in cyan. The numbers indicate the numbering of these areas

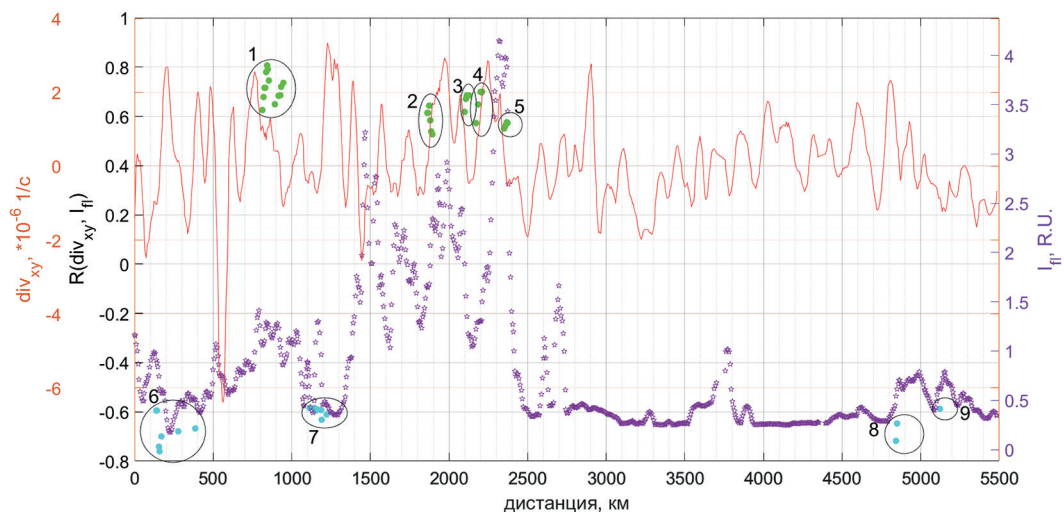


Рис. 2. Изменение медианных значений интенсивности флуоресценции Хл (фиолетовым) и значения дивергенции поля течений (коричневым) вдоль трека судна. Кружками выделены положения участков со значимыми по уровню $p = 0,01$ коэффициентами корреляции R между значением дивергенции поля течений и интенсивностью флуоресценции Хл (зеленые — с положительным значением R , голубые — с отрицательным R)

Fig. 2. Change in median values of the Chl fluorescence intensity (purple) and the value of divergence of the currents field (brown) along the R/V track. The circles highlight the positions of the route tracks with significant (p -value = 0.01) correlation coefficients (R) between the value of the divergence of the current field and the Chl fluorescence intensity (green — with a positive value of R , blue — with a negative R)

Характеристика рассматриваемых участков. Среднее количество точек на каждом участке $N = 20$

Characteristics of the considered route tracks. The average number of points in each plot is $N = 20$

Номер участка	R	Доверит. интервал	Изменение I_{Π}	Изменение $divV_{xy}$	$ \Delta div , *10^{-6}$	Знак div	Причина
1	0,7	(0,24, 0,9)	↓	↓	3,6	+	Уменьшение скорости подъёма
2	0,6	(0,07, 0,87)	↑	↑	3,6	+	Увеличение скорости подъёма
3	0,65	(0,15, 0,89)	↓	↓	2,3	+	Уменьшение скорости подъёма
4	0,63	(0,12, 0,88)	↑	↑	3,2	+	Увеличение скорости подъёма
5	0,57	(0,02, 0,85)	↓	↓	2,5	+	Уменьшение скорости подъёма
6	-0,7	(-0,90, -0,25)	↓↑	↑↓	4,8	+	Адвекция
7	-0,6	(-0,87, -0,07)	↓	↑	4,1	-	Дневной ход ФАР
8	-0,7	(-0,90, -0,25)	↑	↓	2,6	+	Не связана с верт. динамикой
9	-0,59	(-0,86, -0,05)	↑	↓	0,4	-	Не связана с верт. динамикой

Величина $divV_{xy} = \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy}$ рассчитывается из данных реанализа, а компонента $\frac{dw}{dz} = -divV_{xy}$ отвечает за выполнение закона сохранения массы. С учетом вертикального направления оси z и граничного условия $w(0) = 0$ получаем, что отрицательные значения $divV_{xy}$ соответствуют опусканию поверхностных вод, а положительные значения — подъему к поверхности вод из нижележащих слоев.

Положительная корреляция формируется как при непосредственном увеличении концентрации фитопланктона, так и поступлении биогенных элементов, необходимых для его развития, вследствие увеличения интенсивности апвеллинга (рис. 1,2, табл. 1, участки 2 и 4). Аналогично, положительная корреляция может наблюдаться при уменьшении скорости подъема вод с одновременным уменьшением интенсивности флуоресценции Хл (участки 1, 3 и 5).

Объяснить причины отрицательной корреляции исследуемых характеристик в рамках такой простой модели не удастся. Как будет показано ниже, полученные в результате расчета значения отрицательной корреляции связаны не с влиянием подъема или опускания вод на интенсивность флуоресценции Хл в поверхностном слое морской воды, а с другими факторами. Фактически такая ситуация эквивалентна случаю отсутствия статистической связи, то есть незначимым или низким значениям $R(divV_{xy}, I_{\Pi})$. Для поиска и анализа приводящих к случаю отрицательной корреляции факторов использовались данные о направлении течений, спутниковые данные о концентрации Хл и результаты судовых измерений потока ФАР.

Значимая отрицательная корреляция зарегистрирована на четырех участках маршрута. Рассмотрим подробнее первые два (6, 7). Для этих областей построены карты поверхностных течений, усредненных за сутки до проведения судовых измерений (рис. 3). Следует отметить, что для участка 6 удалось подобрать спутниковые данные, соответствующие дню проведения судовых измерений. Для 7-го из-за плотной облачности разница составила неделю. В области 6-го участка с отрицательной корреляцией направление течений в поверхностном слое северо-западное. Спутниковые данные о пространственном распределении концентрации Хл показывают, что к юго-востоку от исследуемого участка маршрута концентрация Хл имеет высокую изменчивость. Важно отметить, что на этом участке при наиболее интенсивном вертикальном движении вод наблюдаются наименьшие значения I_{Π} (рис. 2, около 200 км). По-видимому, интенсивное вертикальное движение блокирует горизонтальный перенос вод, характеризуемых более высокими значениями I_{Π} . Это и формирует регистрируемую отрицательную корреляцию.

В области 7-го участка со значимой отрицательной корреляцией наблюдается интенсивная вихревая динамика (рис. 3, справа). Это не позволяет использовать для анализа спутниковые данные, полученные с недельным интервалом от времени судовых измерений.

В качестве еще одного фактора, способного повлиять на связь динамики вод и интенсивности флуоресценции Хл, рассмотрен световой режим. Для анализа влияния светового режима на интенсивность флуоресценции Хл использовались данные попутных непрерывных измерений потока ФАР. Фитопланктон может адаптироваться к различным условиям освещения [9], что в ряде случаев приводит к увеличению интенсивности флуоресценции Хл в темное время суток и наоборот. Для оценки влияния этого фактора построена широтная зависимость значений ФАР и интенсивности флуоресценции Хл вдоль трека судна на 7 участке (рис. 4). Данный участок выделен на графике вертикальными линиями. Уменьшение сигнала

Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*...
 Examples of the water dynamics influence on the spatial distribution of chlorophyll *a*...

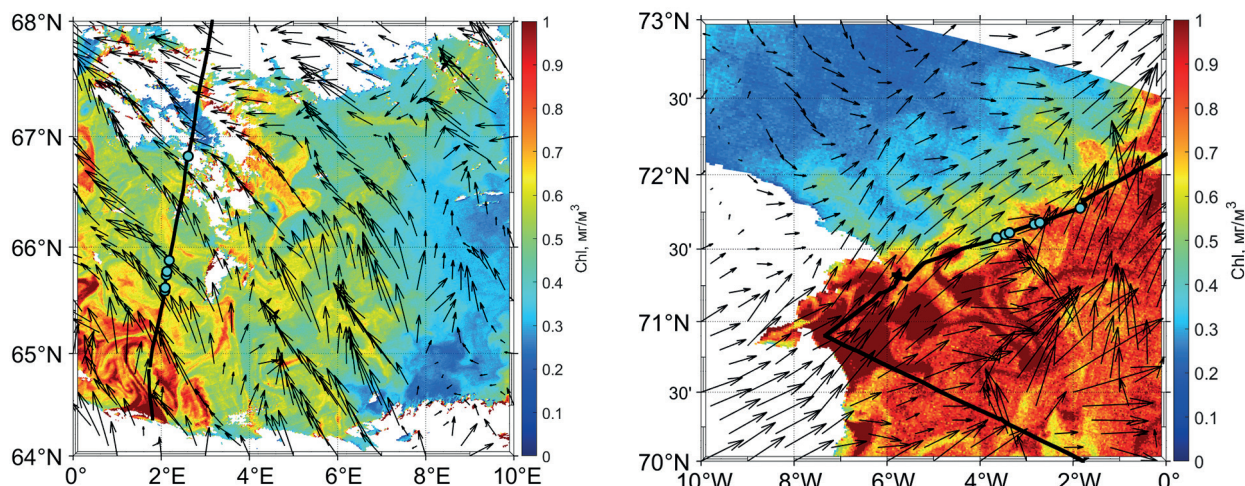


Рис. 3. Карта течений по данным реанализа (черные стрелки), усредненная за сутки до судовых измерений и пространственное распределение концентрации Хл (цветом) по данным MODIS (слева: MODIS/Aqua 5 августа 2020 г., 12:10 UTC, справа: MODIS/Terra 16 августа 2020 г., 11:35 UTC). Голубыми кружками обозначены участки со значимыми отрицательными значениями *R*, белые области соответствуют отсутствию данных вследствие облачности или выходу за границу области съёмки. Слева: участок трека 6 (05.08.2020), справа: участок трека 7 (09.08.2020). Максимальная длина стрелок соответствует 0,4 м/с

Fig. 3. Current map according to reanalysis data (black arrows) averaged a day before shipboard measurements and satellite concentration of Chl (in color) according to MODIS data (left: MODIS/Aqua, August 5, 2020, 12:10 UTC; right: MODIS/Terra, August 16, 2020, 11:35 UTC). Cyan circles indicate areas with significant negative *R* values, white areas correspond to the lack of data due to clouds or places being out of image. Left: area of track 6 (5.08.2020), right: area of track 7 (09.08.2020). The maximum length of the arrows corresponds to 0.4 m/s

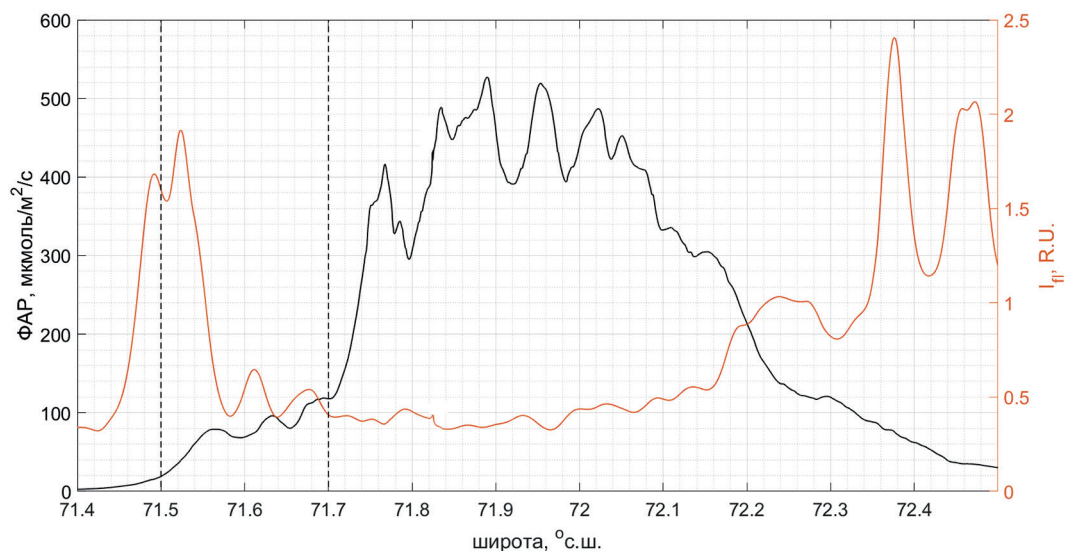


Рис. 4. Распределения значений ФАР и интенсивности флуоресценции Хл вдоль трека судна по данным судовых измерений 9 августа 2020 г. Выделенный вертикальными линиями участок соответствует области 7 с отрицательной корреляцией (рис. 2)

Fig. 4. The distributions of the PAR and Chl fluorescence intensity values along the R/V track according to shipboard measurements on August 9, 2020. The area highlighted by vertical lines corresponds to the region 7 with negative correlation (Fig. 2)

ла флуоресценции около 71,5°с.ш. соответствует увеличению уровня ФАР, зарегистрированного в начале светового дня. Кроме того, положительные значения дивергенции на этом участке указывают на подъем вод к поверхности. При этом клетки фитопланктона попадают в более освещенные слои, что дополнительно усиливает влияние фотоадаптации, способствуя еще большему подавлению уровня интенсивности

флуоресценции [19]. Таким образом, определяющей значимую отрицательную корреляцию на данном участке маршрута причиной может являться поток фотосинтетически активной радиации, влияние которой способно перекрывать противоположный вклад поверхностных течений, способствующих увеличению флуоресценции Хл. Также интересно отметить, что максимумы интенсивности флуоресценции Хл зарегистрированы в темное время суток. Для подробного анализа влияния уровня ФАР на I_{fl} требуется дополнительная информация о фитопланктоне.

Связь значений исследуемых характеристик на 8 и 9-м участках объясняется увеличением концентрации Хл вследствие адвекции водных масс.

5. Выводы

Исследованы примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции Хл в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей. Это влияние складывается из множества факторов, из которых порой сложно выделить доминирующий. В работе использовался метод скользящих корреляций, примененный к данным судовых непрерывных измерений интенсивности флуоресценции хлорофилла вдоль маршрута судна, данные реанализа, а также данные спутниковых сканеров цвета MODIS о концентрации Хл. Зарегистрированы области с положительными и отрицательными корреляциями между значениями дивергенции и интенсивностями флуоресценции Хл. Существование областей с положительной корреляцией объясняется увеличением концентрации фитопланктона в поверхностном слое вод вследствие увеличения интенсивности подъема как самих водорослей, так и необходимых для их развития биогенных элементов. При уменьшении интенсивности подъема поверхностных вод наблюдается соответствующее уменьшение интенсивности флуоресценции Хл. Отрицательная корреляция может формироваться под воздействием дополнительных факторов — адвекции водных масс, отличающихся по содержанию Хл, и суточного хода значений ФАР. Следует отметить, что на большинстве участков маршрута судна зарегистрировать влияние динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции Хл не удалось. Это может быть связано с целым рядом причин, наиболее вероятной из которых следует считать однородность пространственного распределения биооптических характеристик на большей части маршрута. При продолжении исследований целесообразно рассмотреть другие параметры — показатель ослабления морской воды и ротор поля течений.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ю.А. Гольдину, С.В. Вазюля и П.С. Веземской за полезное обсуждение, А.Н. Новигатскому за данные судовой метеостанции, а также рецензентам за внимательное прочтение статьи и ценные замечания.

Финансирование

Данные судовых измерений получены в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2022–0003. Обработка и анализ результатов флуоресцентных измерений выполнены при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-4561.2021.1.5; анализ влияния динамики вод — при поддержке гранта РФФИ № 21–77–10059. Гранты предоставлены через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Funding

Shipboard measurement data were obtained within the framework of the state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, theme No. FMWE-2022-0003. Processing and analysis of the results of fluorescence measurements were supported by the grant of the President of the Russian Federation МК-4561.2021.1.5; analysis of the influence of water dynamics — with the support of the Russian Science Foundation grant No. 21-77-10059. Grants provided through the Shirshov Institute of Oceanology, RAS.

Литература

1. Hunt Jr. G.L., Drinkwater K.F., Arrigo K., Berge J., Daly K.L., Danielson S., Daase M., Hop H., Isla E., Karnovsky N., Laidre K. Advection in polar and sub-polar environments: Impacts on high latitude marine ecosystems // Progress in Oceanography. 2016. Vol. 149. P. 40–81. doi:10.1016/j.pocean.2016.10.004

Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*...
Examples of the water dynamics influence on the spatial distribution of chlorophyll *a*...

2. Салюк П.А., Глуховец Д.И., Липинская Н.А., Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Пономарев В.И., Аглова Е.А., Артемьев В.А., Латушкин А.А., Майор А.Ю. Изменчивость биооптических характеристик морской поверхности в районе Фолклендского течения и Патагонского шельфа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 200–213. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213
3. Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Биооптические характеристики на крупномасштабном полигоне в северной тропической зоне атлантического океана и их связь с динамикой вод // Океанология. 2022. Т. 62, № 1. С. 32–40. doi:10.31857/S0030157422010099
4. Wassmann P., Kosobokova K.N., Slagstad D., Drinkwater K.F., Hopcroft R.R., Moore S.E., Ellingsen I., Nelson R.J., Carmack E., Popova E., Berge J. The contiguous domains of Arctic Ocean advection: trails of life and death // Progress in Oceanography. 2015. Vol. 139. P. 42–65. doi:10.1016/j.pocean.2015.06.011
5. Randelhoff A., Sundfjord A. Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing // Ocean Science. 2018. Vol. 14, N 2. P. 293–300. doi:10.5194/os-14-293-2018
6. Lorenzen C.J. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1966. Vol. 13, N 2. P. 223–227. doi:10.1016/0011-7471(66)91102-8
7. Нагорный И.Г., Салюк П.А., Майор А.Ю., Дорошенко И.М. Мобильный комплекс для оперативного исследования водных акваторий и приводной атмосферы // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 1. С. 103–106. doi:10.7868/S0032816214010182
8. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // Oceanologia. 2020. Vol. 62, N 3. P. 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
9. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic Photosynthesis. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
10. Кловиткин А.А., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Кравчишина М.Д. Исследования Европейской Арктики в 80-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2021. Т. 61, № 1. С. 156–158. doi:10.31857/S0030157421010093
11. Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А., Григорьев А.В., Артемьев В.А. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // Океанология. 2020. Т. 60, № 5. С. 814–822. doi:10.31857/S0030157420040103
12. Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates // Ocean Modelling. 2002. Vol. 4, N 1. P. 55–88.
13. Kholod A.L. Overview of the Copernicus marine environment monitoring service products available for the Arctic region // Physical Oceanography. 2017. N 2. P. 25–35.
14. Metzger E.J., Hogan P.J., Shriver J.F. et al. Validation Test Report for the Global Ocean Forecast System 3.5–1/25 degree HYCOM/CICE with Tides // Naval Research LabS Washington DC Washington United States. URL: https://www.hycom.org/attachments/366_HYCOM-NCODA_VTR_I_Memo_Report_9148.pdf (дата обращения: 04.01.2022).
15. Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. Исследование связи солёности и флуоресценции желтого вещества в Карском море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 34–39. doi:10.7868/S2073667318030048
16. O'Reilly J.E., Werdell P.J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors — OC4, OC5 and OC6 // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 229. P. 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
17. Giraudeau J., Hulot V., Hanquiez V., Devaux L., Howa H., Garlan T. A survey of the summer coccolithophore community in the western Barents Sea // Journal of Marine Systems. 2016. Vol. 158. P. 93–105. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.02.012
18. Алексеев В.А., Иванов В.В., Репина И.А., Лаврова О.Ю., Станичный С.В. Конвективные структуры в Лофотенской котловине по данным спутников и буев Арго // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 90–104. doi:10.7868/S0205961416010012
19. Мошаров С.А., Мошарова И.В. Динамика потенциальной фотосинтетической активности фитопланктона при изменении освещенности в Северной Атлантике // Вопросы современной альгологии. 2019. № 1(19). С. 35–45. doi:10.33624/2311-0147-2019-1(19)-35-45

References

1. Hunt Jr. G.L., Drinkwater K.F., Arrigo K., Berge J., Daly K.L., Danielson S., Daase M., Hop H., Isla E., Karnovsky N., Laidre K. Advection in polar and sub-polar environments: Impacts on high latitude marine ecosystems. *Progress in Oceanography*. 2016, 149, 40–81. doi: 10.1016/j.pocean.2016.10.004
2. Salyuk P.A., Glukhovets D.I., Lipinskaya N.A., Moiseeva N.A., Churilova T. Ya., Ponomarev V.I., Aglova E.A., Artemiev V.A., Latushkin A.A., Major A. Yu. Variability of the sea surface bio-optical characteristics in the region of Falkland Current and Patagonian shelf. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021, 18, 6, 200–213 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213

3. Mankovsky V.I., Mankovskaya E.V. Bio-optical characteristics in a large-scale survey area in the northern tropical zone of the Atlantic Ocean and their relationship with water dynamics. *Oceanology*. 2022, 62, 22–29. doi:10.1134/S000143702201009X
4. Wassmann P., Kosobokova K.N., Slagstad D., Drinkwater K.F., Hopcroft R.R., Moore S.E., Ellingsen I., Nelson R.J., Carmack E., Popova E., Berge J. The contiguous domains of Arctic Ocean advection: trails of life and death. *Progress in Oceanography*. 2015, 139, 42–65. doi:10.1016/j.pocean.2015.06.011
5. Randelhoff A., Sundfjord A. Short commentary on marine productivity at Arctic shelf breaks: upwelling, advection and vertical mixing. *Ocean Science*. 2018, 14, 2, 293–300. doi:10.5194/os-14-293-2018
6. Lorenzen C.J. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1966, 13, 2, 223–227. doi:10.1016/0011-7471(66)91102-8
7. Nagornyi I.G., Maior A. Yu., Salyuk P.A., Doroshenkov I.M. A mobile complex for on-line studying water areas and surface atmosphere. *Instruments and Experimental Techniques*. 2014, 1, 68–71. doi: 10.1134/S0020441214010175
8. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. V.62. N3. P. 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
9. Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic Photosynthesis. 2nd edn. Oxford: Princeton University Press, 2007. 484 p.
10. Klyuvitkin A.A., Politova N.V., Novigatsky A.N., Kravchishina M.D. Studies of the European Arctic on Cruise 80 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh. *Oceanology*. 2021, 61, 1, 139–141. doi:10.1134/S0001437021010094
11. Goldin Y.A., Glukhovets D.I., Gureev B.A., Grigoriev A.V., Artemiev V.A. Shipboard flow-through complex for measuring bio-optical and hydrological seawater characteristics. *Oceanology*. 2020, 60, 5, 713–720. doi:10.1134/S0001437020040104
12. Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic–Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*. 2002, 4, 1, 55–88.
13. Kholod A.L. Overview of the Copernicus marine environment monitoring service products available for the Arctic region. *Physical Oceanography*. 2017, 2, 25–35.
14. Metzger E.J., Hogan P.J., Shriver J.F. et al. Validation test report for the Global Ocean forecast system 3.5–1/25 degree HYCOM/CICE with Tides. *Naval Research LabS Washington DC Washington United States*. URL: https://www.hycom.org/attachments/366_HYCOM-NCODA_VTR_I_Memo_Report_9148.pdf (date of access: 04.01.2022).
15. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Research of the relationship between salinity and yellow substance fluorescence in the Kara Sea. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018, 11, 3, 34–39 (in Russian). doi:10.7868/S2073667318030048
16. O'Reilly J.E., Werdell P.J. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors — OC4, OC5 and OC6. *Remote Sensing of Environment*. 2019, 229, 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
17. Giraudeau J., Hulot V., Hanquiez V., Devaux L., Howa H., Garlan T. A survey of the summer coccolithophore community in the western Barents Sea. *Journal of Marine Systems*. 2016, 158, 93–105. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.02.012
18. Alexeev V.A., Ivanov V.V., Repina I.A., Lavrova O. Yu., Stanichny S.V. Convective structures in the Lofoten Basin based on satellite and Argo data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016, 52, 9, 1064–10. doi:10.1134/S0001433816090036
19. Mosharov S.A., Mosharova I.V. Dynamics of the potential photosynthetic activity of marine phytoplankton during illumination change in the North Atlantic. *Issues of Modern Algology*. 2019, 1(19), 35–45 (in Russian). doi:10.33624/2311-0147-2019-1(19)-35-45

Об авторах

АГЛОВА Евгения Андреевна, РИНЦ AuthorID: 1160772, e-mail: aglova.ea@phystech.edu
ГЛУХОВЕЦ Дмитрий Ильич, РИНЦ AuthorID: 924346, ORCID: 0000-0001-5641-4227,
e-mail: glukhovets@ocean.ru