

УДК 551.465

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХЛОРОФИЛЛА “а”, РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И ВЗВЕСИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КАРСКОГО МОРЯ В СЕНТЯБРЕ 2011 г. ПО ЛИДАРНЫМ ДАННЫМ

© 2017 г. В. В. Пелевин, П. О. Завьялов, Н. А. Беляев, Б. В. Коновалов, М. Д. Кравчишина, С. А. Мошаров

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

*e-mail: vvpelevin@gmail.com*

Поступила в редакцию 18.06.2015 г.

После доработки 29.06.2016 г.

В статье представлены результаты дистанционного лазерного зондирования верхнего слоя моря флуоресцентным лидаром УФЛ-9 в Карском море в непрерывном автоматическом режиме с борта движущегося судна в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2011 г. Приводятся описание прибора, подход к интерпретации данных о флуоресценции морской воды, а также некоторые методические аспекты калибровки и проведения измерений. Представлены результаты калибровки лидара на основе данных лабораторного анализа отобранных в ходе рейса проб воды с поверхности. Построены карты пространственного распределения в верхнем квазиоднородном слое моря концентраций хлорофилла “а”, общего органического углерода и взвеси. Сделаны оценки масштабов пространственных неоднородностей указанных выше параметров, показаны некоторые связи характера пятнистости верхнего слоя моря с атмосферным форсингом и влиянием пресноводного стока.

DOI: 10.7868/S0030157417010130

### ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование верхнего слоя моря флуоресцентным лидаром с борта движущегося судна позволяет получать данные о пространственном распределении таких важных параметров водной среды, как хлорофилл фитопланктона, окрашенное органическое вещество (ООВ), или иначе “желтое вещество” (в англоязычной литературе – CDOM, “chromophoric dissolved organic matter”, или “yellow substance”), а также общая взвесь в режиме реального времени [9, 12, 19–22].

В условиях опреснения приповерхностного слоя материковым стоком и повышенной вертикальной стратификации плотности, обычно максимальные концентрации терригенных веществ на шельфах морей имеет самый верхний, часто очень тонкий и наиболее пресный слой воды. Такая ситуация типична и для бассейна Карского моря, находящегося под влиянием мощного континентального стока рек Обь и Енисей, выносящих в бассейн Карского моря большие массы минеральной взвеси, веществ органического происхождения и биогенных элементов. Для карских вод характерно наличие мощных фронтальных

зон, часто достаточно узких (от десятков и сотен метров до десятков сантиметров), большое разнообразие мезомасштабных и субмезомасштабных структур, а также значительное распространение речных плюмов по поверхности моря (см., например, [6]).

Зондирование лидаром происходит через поверхность моря, поэтому свой вклад во флуоресценцию вносит даже самый тонкий поверхностный слой [20]. Это недоступно для любых других экспрессных методов измерений, использующих забор морской воды с некоторого горизонта на ходу судна. Кроме того, лидар взаимодействует с невозмущенной водной средой, при этом отсутствуют нежелательные отставания измерений от реального времени, неизбежные при решении задачи доставки заборной воды в лабораторию, отсутствуют также потенциально возможные искусственные эффекты сглаживания высокочастотной изменчивости. Далее, если сравнить лазерное зондирование с другими дистанционными средствами измерений, следует отметить очевидное преимущество активных зондирующих методов перед пассивными (например, радиометрами надводного или спутникового базирования) в части более высокой чувствительно-

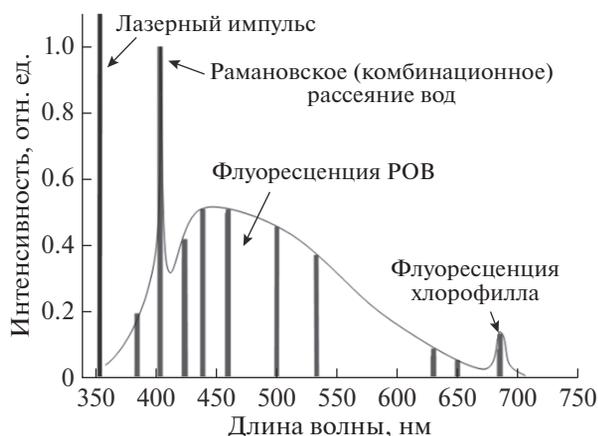


Рис. 1. Флуорограмма морской воды и спектральные каналы флуоресцентного лидара УФЛ-9.

сти и точности получаемых данных о водной среде, а также независимости от солнечной освещенности. Несмотря на широкий охват и регулярность спутниковых наблюдений, они пока не имеют сравнимых с лидарами характеристик всепогодности и высокого пространственного разрешения, что затрудняет изучение на их основе субмезомасштабной изменчивости верхнего слоя моря, особенно в северных морях. Поэтому благодаря высокому пространственному разрешению, широкому динамическому диапазону чувствительности и измерению трех разных параметров одновременно, флуоресцентный лидар УФЛ-9 дает большие возможности при исследовании субмезомасштабных (1–10 км) и мелкомасштабных (1–1000 м) явлений в верхнем слое моря [1, 13, 35].

На протяжении последних 30–40 лет пятнистость свойств океана исследовалась с помощью аппаратуры на движущихся носителях (суда, самолеты, спутники), а результаты измерений использовались для расчета пространственных спектров концентраций примесей и характеристик среды (см., например, [17, 24, 25]). В литературе описаны многочисленные исследования пространственной изменчивости планктонных сообществ [7, 8, 23, 28], большинство работ посвящены распределению зоопланктона, причем в масштабах более 1 км (например, [25]). В публикациях превалирует мнение, что мелкомасштабная изменчивость или пятнистость присуща в первую очередь зоопланктону, в то время как фитопланктон изменчив скорее в субмезомасштабе [37]. Однако встречаются наблюдения мелкомасштабной изменчивости концентраций фитопланктона в поверхностном слое морей и внутренних водоемов [18], а также микромасштабной изменчивости количества зоопланктона [27]. Исследования

пятнистости органических веществ [3, 33] и взвеси [31, 32, 36] в малых пространственных масштабах встречаются редко, по-видимому, из-за нехватки инструментальных средств для проведения подобных исследований.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе 59-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” выполнялось квазинепрерывное дистанционное зондирование поверхностного слоя моря с помощью флуоресцентного лидара УФЛ-9, установленного в носовой части судна на высоте 8.3 м над поверхностью моря. Лидары серии УФЛ были разработаны в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН в 2001–2009 гг. и на протяжении последних лет успешно применялись более чем в 35 различных экспедициях Института в пресных, солоноватых, соленых и ультрагалинных водоемах. Они предназначены для измерения концентраций хлорофилла “а” (хл “а”), ООВ, а также общей концентрации взвешенного вещества в верхнем слое моря [1]. Толщина зондируемого слоя, в котором измеряются концентрации и который мы условно считаем перемешанным, зависит от степени прозрачности воды и варьируется от первых десятков метров в открытом море до десятков сантиметров в мутных прибрежных водах, насыщенных минеральной взвесью и органическими соединениями.

Измерение содержания хл “а” и ООВ производится на основе анализа сигналов флуоресценции среды, для определения количества взвеси используется сигнал обратного упругого рассеяния лазерного импульса на частицах взвеси. Все данные нормируются на сигнал комбинационного рассеяния воды [30, 35]. Спектр принимаемого сигнала и спектральные каналы лидара УФЛ-9 представлены на рис. 1. Измерения проводятся с частотой 2 Гц в автоматическом режиме. Основные технические характеристики лидара УФЛ-9 приведены в табл. 1. Теория и методика флуоресцентного и упругого лазерного зондирования в водах широкого диапазона тропности применительно к лидарам серии УФЛ опубликованы в [13, 14, 34, 35].

Кроме этого, в ходе рейса выполнялось непрерывное зондирование термохалинного состояния поверхностного слоя моря по ходу судна с помощью проточной СТД-системы. Отбор воды осуществлялся с помощью всасывающего центробежного насоса Grundfos JP-6 мощностью 1.5 кВт через гибкий витой шланг длиной 9 м, выведенный за борт с рабочей палубы. На ходу судна заборный конец шланга удерживался системой свинцовых грузов и растяжек на глубине около 1 м ниже поверхности воды. Фактическая произво-

**Таблица 1.** Основные параметры ультрафиолетового флуоресцентного лидара УФЛ-9

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Длины волн возбуждения        | 355, 532 нм  |
| Спектральные каналы приемника | 355, 385, 404, 424, 440, 460, 499, 532, 620, 651, 685 нм   |
| Частота зондирования          | 2 Гц   |
| Длительность импульса         | 6 нс   |
| Энергия в импульсе            | 1.5 мДж (355 нм), 3 мДж (532 нм)   |
| Телескопическая система       | кеплеровского типа, регулируемый диапазон дальности до объекта – 1.5–25 м  |
| Апертура объектива            | 140 мм   |
| Источник питания              | 220 В, 50 Гц, 120 Вт   |
| Вес, габариты                 | 35 кг, 800 × 550 × 250 мм  |
| Фотоприемники                 | ФЭУ с мультищелочным катодом   |
| Спектральная селекция         | 4-канальная оптическая система с интерференционными с/ф  |
| Частота дискретизации АЦП     | 50 МГц   |
| Разрядность АЦП               | 10 бит   |
| Программное обеспечение       | Windows XP, GPS-привязка, онлайн отображение профиля и постпроцессинг данных в соответствии с требуемыми параметрами обработки для картирования района работ |

длительность насоса – до 0.8 л/с. Вода подавалась в укрепленный на палубе специальный закрытый контейнер объемом 70 л с установленным в нем STD-зондом SeaBird SBE911. Данные зондирования передавались по кабелю на компьютер в лаборатории вместе с данными судовой системы GPS. Время обновления воды в баке составляло около 100 с, что при скорости судна 10 узлов соответствует пространственному масштабу “сглаживания” данных около 500 м.

На протяжении экспедиции ведром с поверхности отбирались пробы воды на станциях и на ходу судна, с точной синхронизацией по времени с лидарными измерениями. Для более точного взаимного сопоставления результатов создавалась интегральная проба объемом 50 л для распределения между аналитическими лабораториями.

Массовую концентрацию взвеси (мг/л) определяли стандартным методом фильтрации под вакуумом 400 мбар с помощью мембранных ядерных фильтров (Ø47 мм, диаметр пор 0.45 мкм). Концентрацию определяли взвешиванием фильтров с точностью до ±0.01 мг, соотнося с объемом отфильтрованной воды. Подробнее методика описана в [11].

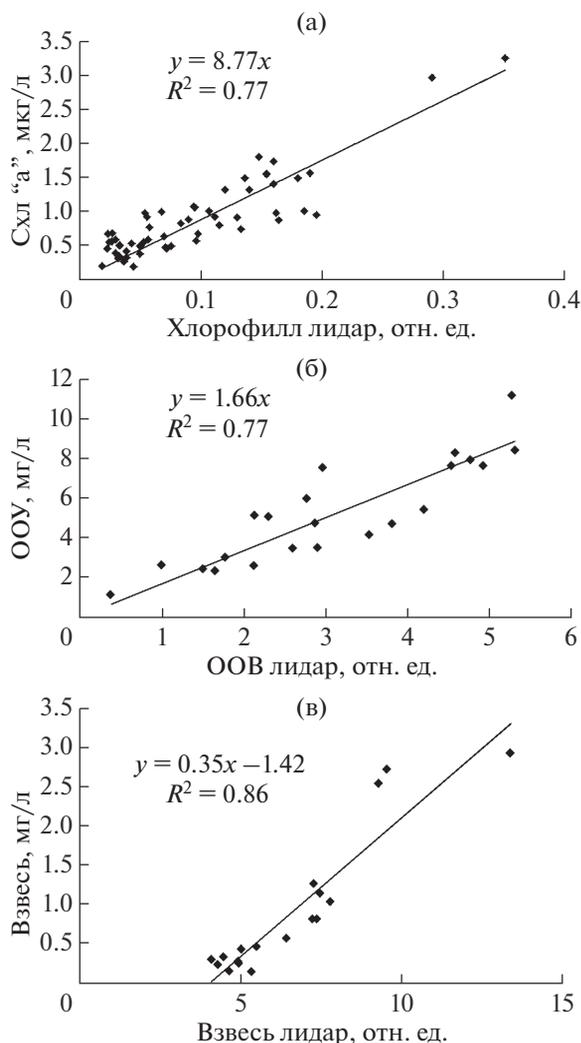
Органический углерод во взвешенной и растворенной формах определялся на анализаторе TOC-Vcph фирмы Shimadzu с приставкой SSM-5000A по методике, подробно изложенной в работе [2]. Данные о пространственных распределениях органического углерода в Карском море приведены там же. Пробы воды фильтровались через предварительно прокаленные при 430°C

фильтры Whatman GF/F с условным диаметром пор 0.5–0.7 мкм. Средний объем профильтрованной воды на каждой станции составлял ~10 л. Фильтрат для определения растворенного органического углерода подкислялся до pH = 2 и хранился в холодильнике, фильтр с собранным веществом замораживался и хранился при –20°C до последующих анализов.

Для определения концентрации хл “а” пробы воды фильтровались через стекловолоконные фильтры GF/F при разряжении не более 0.3 атм., которые затем помещались в 90% ацетон и при температуре +4°C в темноте выдерживались в течение 24 ч. Полученный экстракт анализировался с помощью флуориметра МЕГА-25, и рассчитывалась концентрация хл “а” [15, 29]. Также проводились анализы по стандартной спектрофотометрической методике [5] в лаборатории ИО РАН, для чего сразу после отбора пробы были отфильтрованы через стекловолоконные фильтры GF/F, высушены и заморожены для последующей транспортировки. Объем профильтрованной воды (в зависимости от мутности) менялся от 5 до 8.25 л. Анализ взвеси, осажженной на фильтры, и расчет суммарных концентраций минеральной и органической фракций проведен по методикам, описанным в [10].

#### КАЛИБРОВКА ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Верификацию лидарных измерений необходимо проводить для каждой акватории или сезона работ, в целях получения карт пространственного распределения этих параметров в абсолютных,



**Рис. 2.** Калибровка лидара по данным лабораторных измерений проб воды на хл “а” (а), ООУ (б) и массовую концентрацию взвеси (в).

весовых единицах. Принимаемые лидаром сигналы флуоресценции и обратного рассеяния зависят, помимо концентраций веществ в воде, также от множества факторов — для флуоресценции хлорофилла это видовой состав фитопланктона, его фаза сукцессии и физиологическое состояние, абиотические факторы водной среды; для органических веществ это их молекулярный состав; для минеральной взвеси — ее гранулометрический и химический состав.

Данные лидара калибровались по результатам стандартизированных лабораторных измерений концентраций хл “а” (мкг/л), общего органического углерода (ООУ) (мг/л), равного сумме взвешенного и растворенного, и массовой концентрации взвеси (мг/л). Полученные уравнения регрессии представлены на рис. 2. Необходимо отметить, что для сопоставления с сигналом флу-

оресценции при 440 нм, находящимся вблизи спектрального максимума флуоресценции органики, из контактных измерений нами были использованы данные об ООУ как наиболее полные и репрезентативные среди анализов органических веществ, проводившихся в экспедиции. Любая органика, взвешенная или растворенная, флуоресцирует при возбуждении лазерным импульсом, следовательно, именно ООУ наиболее подходит для поиска корреляционных связей с сигналом флуоресценции.

Для хл “а”, ООУ и взвеси получены коэффициенты корреляции ( $R^2$ ), равные 0.77, 0.77 и 0.86 соответственно. Относительно невысокая корреляция измеренного лидаром сигнала флуоресценции органики и полученного на пробах ООУ обусловлена тем, что лазерное излучение поглощается только окрашенной частью органического вещества, находящегося в верхнем квазиродном слое (ВКС). Так как маршрут рейса проходил в открытых и прибрежных водах, находящихся под влиянием материкового стока различного генезиса, воды разного типа могли содержать органические вещества различного молекулярного состава. Также они находились в растворенном, коллоидном и взвешенном виде [4, 32] и, строго говоря, различные компоненты органики вносили разный вклад в принимаемый лидаром сигнал флуоресценции. Для фитопланктона также можно отметить непостоянство видового состава вследствие смешения вод разного типа по маршруту рейса [6]. Для взвеси коэффициент корреляции данных лидара и измерений на пробах выше, что обычно наблюдается авторами и в других соленых и пресных акваториях и отражает менее сложный физический механизм формирования сигнала упруго рассеянного назад лазерного импульса по сравнению с флуоресцентным сигналом. В целом, учитывая масштаб акватории и продолжительность экспедиции, корреляция данных лидара и контактных измерений удовлетворительная.

### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ БИО-ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ КАРСКОГО МОРЯ

Субмезомасштабная и мелкомасштабная изменчивость хлорофилла, растворенной органики и взвеси в диапазоне от десятков метров до первых километров, вероятно, является наименее изученной вследствие недостатка инструментальных методов для получения подобной информации, так как спутниковые данные обычно не обеспечивают требуемого пространственного разрешения, а контактными методами провести такие частые измерения невозможно.

**Таблица 2.** Распределение масштабов пятен по маршруту судна. Общее количество измерений для каждого из параметров – более 600 000 шт. Значения концентраций для хл “а”, ООУ и взвеси приводятся в мкг/л, мг/л и мг/л соответственно

|        | Средний масштаб, м | $S_r$ , % | Минимальная концентрация | Максимальная концентрация | Максимальная/минимальная | Количество пятен всего |
|--------|--------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| Хл “а” | 72                 | 96        | 0.06                     | 9                         | 150                      | 136743                 |
| ООУ    | 24                 | 53        | 0.25                     | 20                        | 80                       | 134821                 |
| Взвесь | 46                 | 150       | 1                        | 33                        | 33                       | 131800                 |

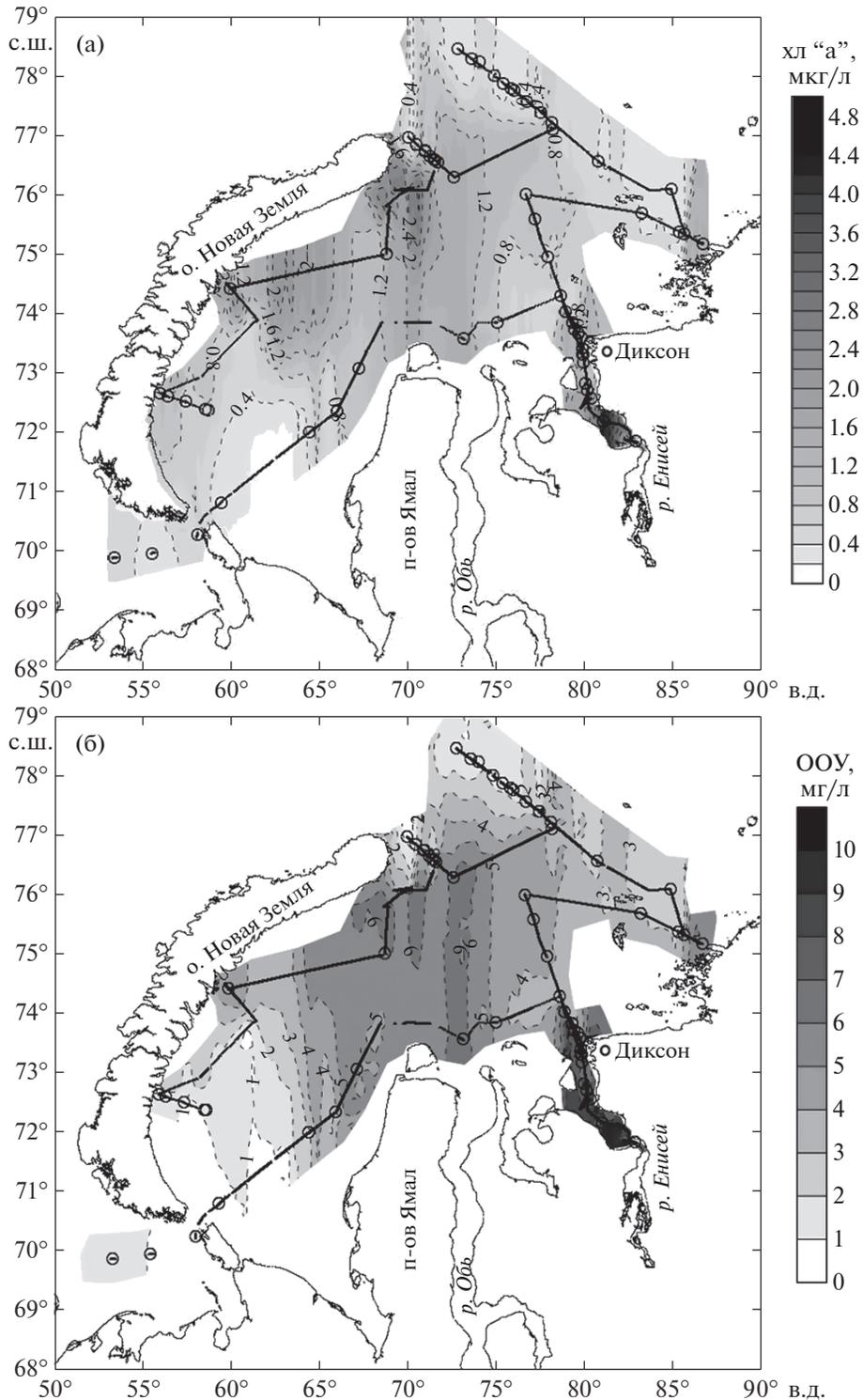
Измерения в Карском море велись в непрерывном режиме. По результатам измерений были построены пространственные распределения био-оптических параметров в разных масштабах, в том числе и для всей акватории моря (рис. 3). В целом можно отметить, что повышенные концентрации измеряемых параметров поверхностного слоя в Карском море практически всегда связаны с влиянием речного стока и приурочены к устьям рек или их плюмам. Пределы изменчивости величин в масштабах акватории, при усреднении концентраций соответственно пространственному разрешению рисунков, составили 0.1–5 мкг/л для хл “а”, 0.5–11 мг/л для ООУ и 0.1–5 мг/л для взвеси. Однако при рассмотрении мелких масштабов диапазон изменения концентраций существенно больше (см. табл. 2 и комментарии ниже).

Основное внимание в этой статье мы уделяем изменчивости в масштабах от десятков метров до километров. Мы исходим из представления о “пятнистости” распределений фитопланктона, органических веществ и взвеси в этом диапазоне масштабов, допуская отсутствие анизотропии распределения, например, филаментов на поверхности моря. Данное утверждение подкреплено собственными натурными наблюдениями с помощью флуоресцентных лидаров УФЛ-серии в десятках экспедиций в различных акваториях, а также находит подтверждение в ряде опубликованных работ (например [17, 18]). Ниже мы делаем попытку описать характеристики и некоторые статистические особенности пятнистой структуры на основе лидарных данных в малом пространственном масштабе. Ранее подобный анализ для Карского моря не проводился ввиду отсутствия данных необходимого разрешения.

В качестве критерия для определения границ отдельных “пятен” (в англоязычной литературе – “patches”) для каждой точки измерений авторами было принято первое встреченное (ближайшее) изменение соответствующей концентрации на одну десятую величины стандартного отклонения и более, рассчитанного по всему массиву данных вдоль маршрута следования судна. Критерий был выбран из качественных соображений, расчеты

производились для каждой точки ряда по каждому отдельному параметру. Статистика пятнистости приведена в табл. 2. В ней приводятся средние размеры пятен, минимальные, максимальные и средние концентрации по маршруту судна, а также относительное стандартное отклонение ( $S_r$ ) для каждой концентрации, равное отношению стандартного отклонения к среднему значению по ряду данных. При этом выбранный нами критерий равен  $0.1S_r$ .

Количество измерений каждой концентрации составило более 600 тысяч на всей акватории Карского моря. Размеры определенных таким способом пятен изменяются в диапазоне от 10 м до 10 км. Следует обратить внимание на значительную разницу между пиковыми значениями концентраций для каждого из параметров (отличие в 150 раз для хл “а”, в 80 раз для ООУ и 33 раза для взвеси). Данные значения не являются выбросами, которые можно было бы отнести к той или иной погрешности, а, напротив, представляют собой значительный массив измерений, относящийся к приустьевым областям для верхнего, и участкам открытого моря для нижнего предела изменчивости концентраций. Как говорилось выше, на картах распределения, построенных для всей акватории, подобной изменчивости не видно из-за неизбежного усреднения, однако она присутствует в малых масштабах, и каждая неоднородность подтверждается сотнями лидарных измерений. Необходимо оговориться, что опорные натурные данные, полученные на пробах для калибровки лидара, лежат в значительно более узком диапазоне концентраций, поэтому говорить о достоверности измерений в абсолютных единицах в столь широком динамическом диапазоне можно лишь допуская линейность полученных регрессий, что маловероятно. Известны такие наблюдения, как нелинейность уравнения регрессии при больших концентрациях органики [34], эффект насыщения флуоресценции [16, 22] и прочие факторы. Однако приведенные цифры могут говорить о порядке величин, а также подчеркивают важность более детального изучения мелкомасштабной пятнистости в ВКС.



**Рис. 3.** Пространственные распределения хл "а" (а), ООУ (б) и взвеси (в) по маршруту 59-го рейса НИС "Академик М. Келдыш", 2011 г. Непрерывной линией показана траектория судна, кружками отмечены точки отбора проб воды для калибровки лидара.

При подробном рассмотрении пятен малых масштабов (10–1000 м) было установлено, что пространственное распределение фитопланктона, а также органики и взвеси в поверхностном

слое моря может быть представлено в виде суперпозиции пятен в широком диапазоне масштабов. Распределение масштабов описывается степенным законом, как следует из рис. 4, что согласует-

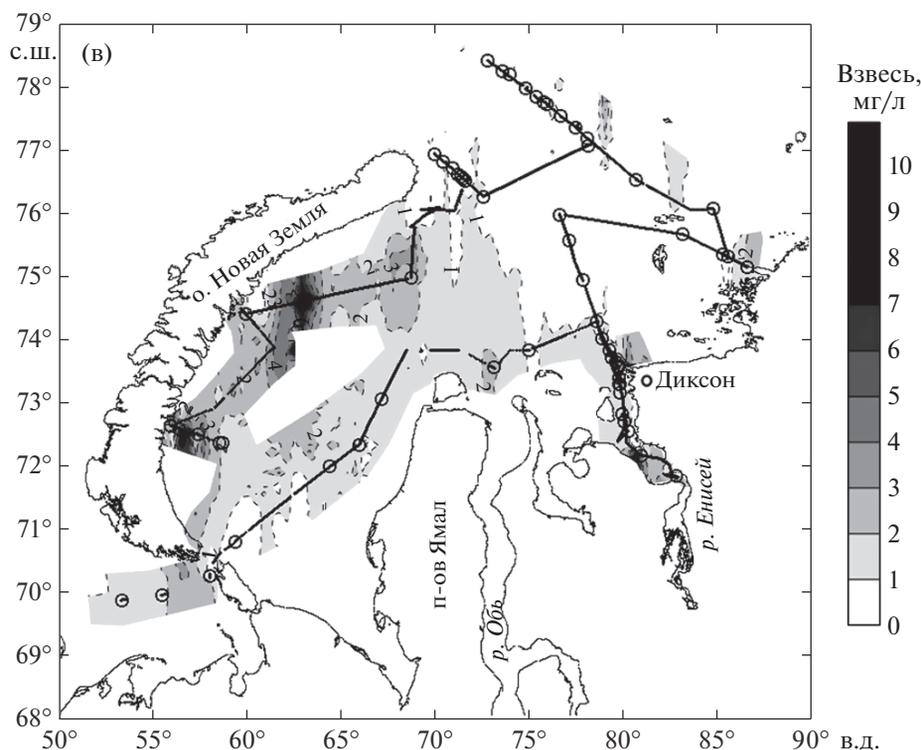
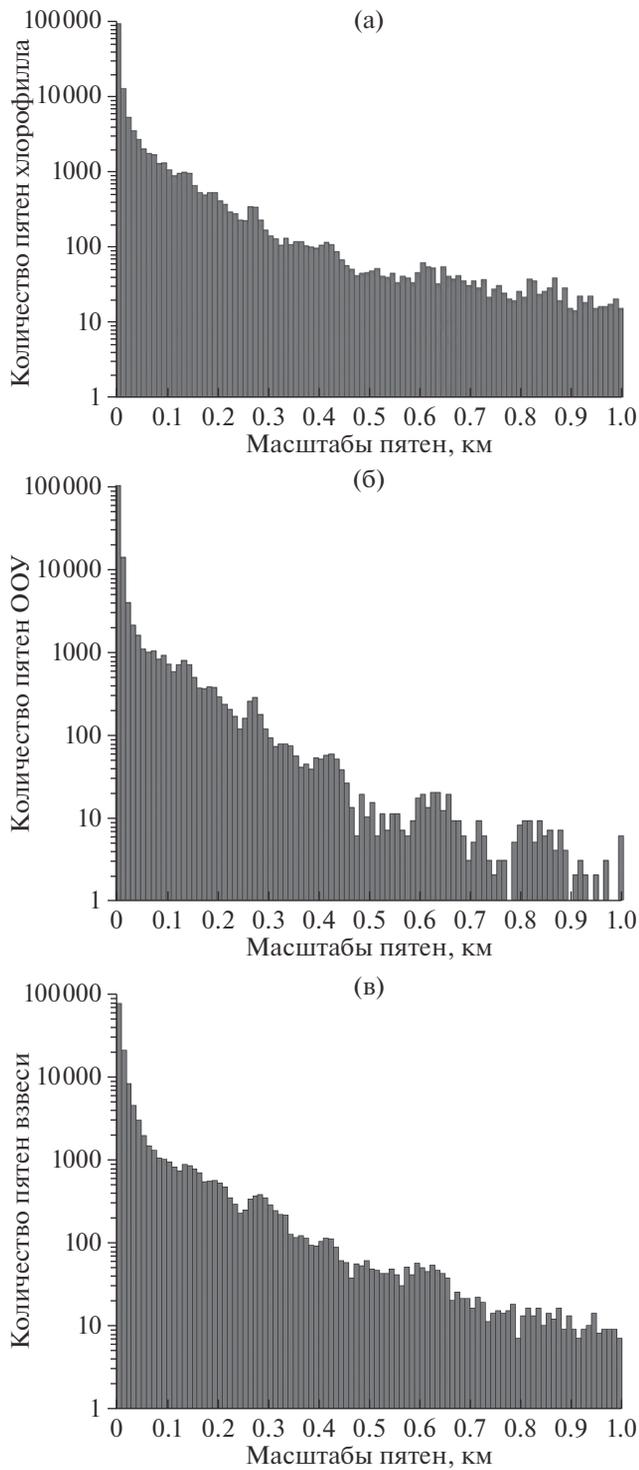


Рис. 3. (Окончание.)

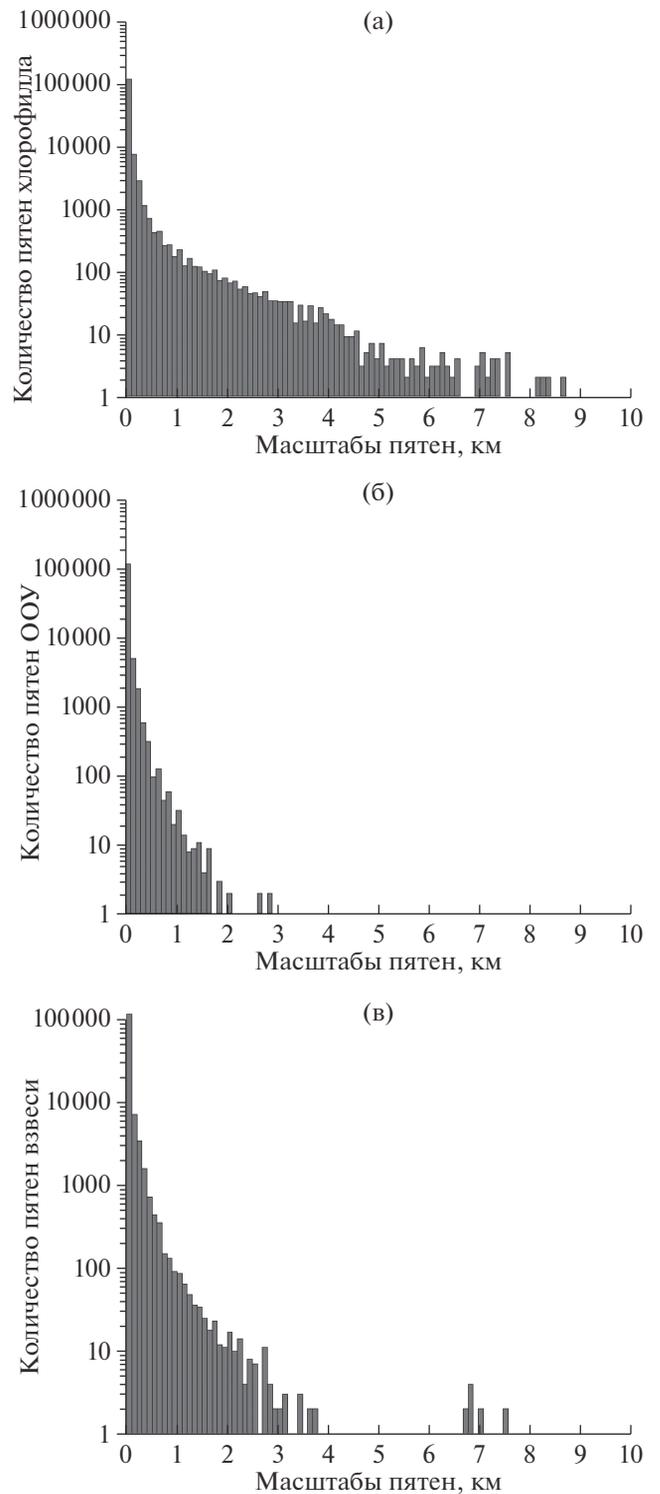
ся с выводами работы [18]. Гистограммы на рис. 4, 5 построены на основе всего массива пятен в Карском море (около 130 тысяч пятен по каждому из параметров). Как и следует из степенного характера спектрального распределения масштабов неоднородностей, для всех параметров справедливо наблюдение, что около 80% пятен составляют пятна масштабов менее среднего.

На рис. 6 показана связь масштабов пятнистости рассматриваемых параметров и солености. Она указывает на существование определенной зависимости масштаба пятен от удаленности от речных устьев и распресненных областей, что согласуется с некоторыми ранее опубликованными данными [3]. В зонах активного перемешивания, вблизи устьев рек и других источников континентального стока масштабы неоднородностей меньше, чем вдали от устьев, а также в более однородных открытых морских водах. Анализ разреза непосредственно в Енисейском заливе, к югу от Диксона, общей протяженностью 50 км показал, что в водах с соленостью менее 18‰ соотношение масштабов пятнистости изменяются относительно усредненных по всему маршруту, приведенных в табл. 2. Для данной приустьевой зоны характерны минимальные масштабы для пятен хлорофилла и органики и максимальные для взвеси.

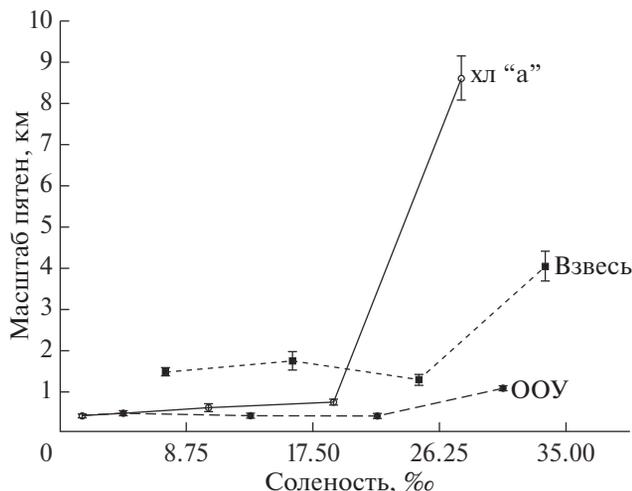
Наконец, на рис. 7 приводится зависимость масштаба пятен от напряжения трения ветра. Видно, что при слабом ветре масштабы пятен относительно большие, так как нет внешних физических воздействий, приводящих к перемешиванию вод разного типа, отличающихся по температуре, солености и содержанию примесей. При усилении ветра происходит “кусочное”, или адвективное, смешивание (в англоязычной литературе – “stirring”), крупные пятна фрагментируются, и образуются пятна меньших масштабов. Этот процесс описан в [18], причем в последней упомянутой работе приводится математическое моделирование этого явления с учетом физических и биологических факторов, влияющих на среду. Результаты моделирования приписывают наблюдаемые в природных условиях мелкомасштабные неоднородности фито- и зоопланктона адвективному смешиванию водных масс на поверхности моря. Возвращаясь к интерпретации рис. 7, мы констатируем, что при дальнейшем усилении ветра происходит окончательное перемешивание отдельных малых пятен, или фрагментов вод разного типа. Масштабы неоднородностей опять укрупняются, что при дальнейшем усилении ветра ведет к гомогенности поверхностного слоя моря. В общих чертах этот процесс соответствует классическим представлениям “stirring and mix-



**Рис. 4.** Гистограммы малых масштабов (до 1 км, шаг 10 м) пятен хл "а" (а), ООУ (б) и взвеси (в) для всего маршрута рейса в акватории Карского моря. Количество пятен представлено в логарифмическом масштабе.



**Рис. 5.** Гистограммы пятен в масштабе до 10 км, с шагом 100 м, хл "а" (а), ООУ (б) и взвеси (в) для всего маршрута рейса в акватории Карского моря. Количество пятен представлено в логарифмическом масштабе.



**Рис. 6.** Зависимость масштабов пятен chl “a”, OOU и взвеси от солености (на основе сокращенной выборки измерительных данных, равномерно распределенных по акватории моря).

ing” [26], однако в натуральных условиях на Карском море он наблюдается впервые.

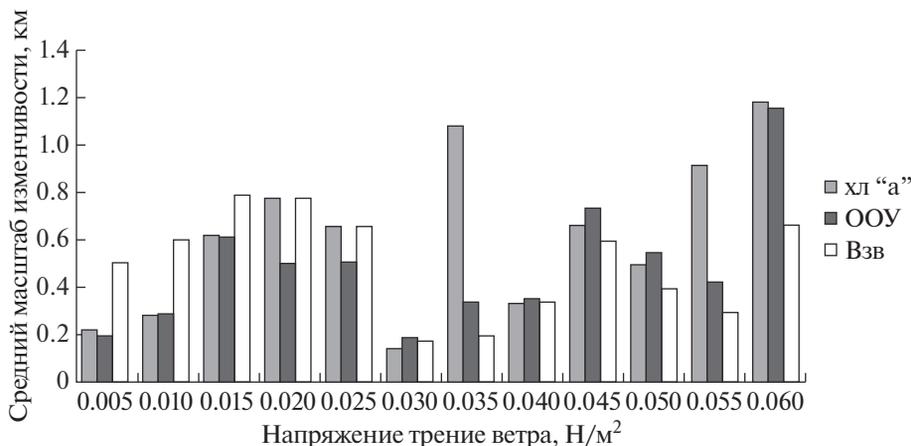
### ВЫВОДЫ

Зондирование флуоресцентным лидаром на ходу судна с относительно высокой частотой позволяет увидеть тонкие структуры изменчивости хлорофилла фитопланктона, органики и взвеси в поверхностном слое, а также оценить картину пространственного распределения этих параметров с высоким пространственным разрешением. Это дает возможность проводить работы без необходимости отбора большого количества проб

воды, собирая большие объемы данных за короткое время.

Для получения результатов в абсолютных единицах концентраций необходимо для каждой акватории во время работы проводить калибровку лидара по данным контактных измерений, что в результате позволяет построить карты распределения chl “a”, органики (например, органического углерода) и минеральной взвеси.

Анализ мелкомасштабных неоднородностей распределения концентраций в поверхностном слое подтвердил предположение о возможном представлении этого распределения в виде суперпозиции пятен в широком диапазоне пространственных масштабов от 10 м до 10 км. Средние масштабы пятнистости, полученные с применением вышеописанной методики обработки пространственных рядов концентраций chl “a”, OOU и взвеси, составляют 24–72 м для различных параметров и сильно зависят от района исследований, при этом около 80% пятен составляют пятна масштабов менее среднего. При усилении ветра масштабы пятен сначала уменьшаются, а затем снова увеличиваются до однородности приповерхностного слоя. Масштабы увеличиваются по мере удаления от источников пресноводного стока и прибрежной зоны к открытому морю. Причины такого характерного распределения масштабов требуют дальнейшего изучения. Настоящая работа, посвященная вопросам пятнистости распределения биооптических полей в поверхностном слое моря, является пилотной для коллектива авторов и будет продолжена на основе накопленного и вновь собранного материала средствами высокочастотного лидарного зондирования.



**Рис. 7.** Зависимость масштабов пятен chl “a”, OOU и взвеси от напряжения силы трения ветра (на основе сокращенной выборки измерительных данных, равномерно распределенных по акватории моря).

Работа была частично поддержана грантом РНФ №14-17-00681 (определение концентрации хлорофилла и анализ данных). Экспедиционные исследования поддержаны проектом РФФИ №14-05-05003Кар<sub>a</sub>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // Геоэкология. 2008. № 4. С. 301–310.
2. Беляев Н.А., Поняев М.С., Пересыткин В.И. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков Карского моря // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
3. Гольдин Ю.А., Шатравин А.В., Левченко В.А., Венцукт Ю.И., Гуреев Б.А., Копелевич О.В. Исследование пространственной изменчивости интенсивности флуоресценции морской воды в западной части Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 1. С. 17–26.
4. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.
5. ГОСТ 17.1.04.02-90. “Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а” // Госкомитет СССР по охране природы. М., 1990. 16 с.
6. Завьялов П.О., Ижицкий А.С., Осадчиев А.А., Пелевин В.В., Грабовский А.Б. Структура термохалинных и био-оптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 1–12.
7. Заворуев В.В., Левин Л.А., Рачко Г.Я. и др. Пространственно-временное распределение хлорофилла “а” в водах озера Байкал в зимний период // Гидробиол. журн. 1992. Т. 28. № 1. С. 17–24.
8. Карабашев Г.С. Особенности распределения флуоресценции и рассеяния света при интенсивном вертикальном перемешивании и подъеме вод // Океанология. 1977. Т. 17. № 2. С. 312–318.
9. Карабашев Г.С. Флуоресценция в океане. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 199 с.
10. Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А. и др. Спектральный анализ морской взвеси – альтернатива традиционным методам ее определения при экологическом мониторинге // Сборник трудов XII международной конференции “Экосистемы, организмы, инновации”. М.: МГУ, 2010. Т. 16. С. 17.
11. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Суханова И.Н. и др. Генезис и пространственное распределение концентрации взвеси в Карском море в период наибольшего сокращения арктической ледовой шапки // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 1–22.
12. Пелевин В.Н., Абрамов О.И., Карлсен Г.Г. Подспутниковый эксперимент экологии 10-ти морей Европы // Инженерная экология. 1995. № 6. С. 31–41.
13. Пелевин В.Н., Абрамов О.И., Карлсен Г.Г. и др. Лазерное зондирование поверхностных вод Атлантики и морей, омывающих Европу // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 704–709.
14. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. О классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного света // Океанология. 1977. Т. XVII. № 1. С. 50–54.
15. Погосян С.И., Гальчук С.В., Кизимирко Ю.В. Применение флуориметра “МЕГА-25” для определения количества фитопланктона и оценки состояния его фотосинтетического аппарата // Вода: химия и экология. 2009. № 6. С. 34–40.
16. Фадеев В.В., Сысоев Н.Н., Фадеева И.В. и др. 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.
17. Федоров К.Н., Кузьмина Н.П. Фронты в океане. В Сб. “Мезомасштабная изменчивость поля температуры в океане”. М.: ИО АН СССР, 1977. С. 33–53.
18. Abraham E.R. The generation of plankton patchiness by turbulent stirring // Nature. 1998. V. 391. P. 577–580.
19. Abramov O.I., Eremin V.I., Karlsen G.G. et al. Application of laser ranging to determine the pollution of sea surface by oil products // Atmos. Ocean. Phys. 1977. V. 13. P. 331–334.
20. Babichenko S., Dudelzak A., Poryvkina L. Laser remote sensing of coastal and terrestrial pollution by FLS-LI-DAR // EARSeL eProc. 2004. V. 3. P. 1–7.
21. Barth H., Reuter R., Schröder M. Measurement and simulation of substance specific contributions of phytoplankton, gelbstoff, and mineral particles to the underwater light field in coastal waters // EARSeL eProc. 2000. V. 1. P. 165–174.
22. Chekalyuk A.M., Demidov A.A., Fadeev V.V. et al. Lidar monitoring of phytoplankton and organic matter in the inner seas of Europe // EARSeL Advances in Remote Sensing. 1995. V. 3. № 3-VII. P. 131–139.
23. Demidov A.B., Mosharov S.A., Gagarin V.I. et al. Spatial Variability of the Primary Production and Chlorophyll a Concentration in the Drake Passage in the Austral Spring // Oceanology. 2011. V. 51, № 2. P. 281–294.
24. Denman K.L., Dower J.F. Patch dynamics. In: Encyclopedia of Ocean Sciences, 2001. P. 2107–2114.
25. Detmer A.E., Bathmann U.V. Distribution patterns of autotrophic pica- and nanoplankton and their relative contribution to algal biomass during spring in the Atlantic sector of the Southern Ocean // Deep-Sea Res. 1997. II. V. 44. № 1–2. P. 299–320.
26. Eckart C. An Analysis of the Stirring and Mixing Processes in Incompressible Fluids // J. Mar. Res. 1948. V. 7. P. 265–275.
27. Gallager S.M., Davis C.S., Epstein A.W. et al. High-resolution observations of plankton spatial distributions correlated with hydrography in the Great South Channel, Georges Bank // Deep-Sea Res. 1996. II. V. 43. P. 1627–1664.
28. Helbling E.W., Villafane V.E., Holm-Hansen O. Variability of phytoplankton distribution and primary production around Elephant Island, Antarctica, during 1990–1993 // Polar Biol. 1995. V. 15. P. 233–246.

29. *Holm-Hansen O., Riemann B.* Chlorophyll *a* determination: improvements in methodology // *Oikos*. 1978. V. 30. P. 438–447.
30. *Klyshko D.N., Fadeev V.V.* Remote determination of the admixture concentrations in water by the method of laser spectroscopy using Raman scattering as an internal standard // *Sov. Phys. Dokl.* 1978. V. 23. P. 55–57.
31. *Leblanc K., Quguiner B., Fiala M., et al.* Particulate Biogenic Silica and Carbon Production Rates and Particulate Matter Distribution in the Indian Sector of the Subantarctic Ocean // *Deep-Sea Res.* 2002. II. V. 49. № 16. P. 3189–3206.
32. *Nemirovskaya I.A.* Variability of Concentration and Composition of Hydrocarbons in Frontal Zones of the Kara Sea // *Oceanology*. 2015. V. 55. № 4. P. 497–507.
33. *Niewiadomska K., Claustre H., Prieur L. et al.* Submesoscale physical-biogeochemical coupling across the Ligurian current (northwestern Mediterranean) using a bio-optical glider // *Limnology and Oceanography*. 2008. V. 53. doi 10.4319/lo.2008.53.5\_part\_2.2210
34. *Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V. et al.* Ultra-violet Fluorescence LiDAR (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions // *Remote Sens.* 2013. V. 5, P. 4405–4422. <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/9/4405>.
35. *Pelevin V., Zavalov P., Konovalov B. et al.* Measurements with high spatial resolution of chlorophyll-*a*, CDOM and total suspended matter in coastal zones and inland water bodies by the portable UFL lidar // 35th EARSeL Symposium – European Remote Sensing: Progress, Challenges and Opportunities. Stockholm, Sweden, June 15-18, 2015. <http://www.earseel.org/symposia/2015-symposium-Stockholm/pdf/proceedings/Pelevin.pdf>.
36. *Thorne P.D., Hanes D.M.* A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes // *Continental Shelf Research*. 2002. V. 22. № 4. P. 603–632.
37. *Vilar J.M.G., Sole R.V., Rubi J.M.* On the origin of plankton patchiness // *Physica A – Statistical Mechanics and its Applications*. 2003. V. 317. P. 239–246.

## Spatial Variability of Chlorophyll-*a*, Dissolved Organic Matter and Suspended Matter in the Surface Layer of the Kara Sea in September 2011 as Derived from Lidar Data

V. V. Pelevin, P. O. Zavjalov, N. A. Belyaev, B. V. Konovalov, M. D. Kravchishina, S. A. Mosharov

The article presents results of remote laser sensing of the upper layer in continuous automatic mode onboard a moving ship obtained by the fluorescent LiDAR UFL-9. Investigations were conducted in the 59th cruise of the RV “Akademik Mstislav Keldysh” in the Kara Sea in 2011. The description of the LiDAR, the approach to interpretation of seawater fluorescence data, and certain methodical aspects of instrument calibration and measurement are presented. Calibration of the LiDAR is based on laboratory analysis of water samples taken during the cruise from the sea surface. Spatial distribution of chlorophyll-*a* (chl-*a*), total organic carbon (TOC) and total suspended matter (TSM) concentrations in the upper quasi-homogeneous layer are mapped and the characteristic scales of the variability are estimated. Relations between scales of spatial variability of TOC, TSM, and chl-*a* in the upper layer on the one hand and the atmospheric forcing and the influence of fresh-water runoff on the other are investigated.