

УДК 574.583,574.52,504.746,551.35

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ БАРЕНЦЕВА МОРЯ *IN SITU* С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКТОМЕТРА LISST-DEEP

© 2020 г. А. С. Лохов¹, *, М. Д. Кравчишина¹, **, А. А. Кловиткин¹, А. И. Коченкова¹¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: a.s.lohov@yandex.ru

**e-mail: kravchishina@ocean.ru

Поступила в редакцию 13.05.2020 г.

После доработки 21.05.2020 г.

Принята к публикации 22.06.2020 г.

Гранулометрический состав и концентрация морской взвеси являются ключевыми характеристиками седиментогенеза. Однако изучение гранулометрического состава взвешенных частиц до сих пор не имеет широкого распространения в практике судовых океанологических исследований. В статье описан опыт применения лазерного дифрактометра LISST-Deer с целью исследования характеристик морской взвеси. Обсуждаются первые данные *in situ* изучения гранулометрического состава и объемной концентрации взвешенных частиц Баренцева моря, полученные в ходе 75-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” в июне 2019 г. (получено 42 вертикальных профиля). Выполнена оценка степени адекватности отображения информации о составе полидисперсной системы баренцевоморской водной толщи, содержащей частицы широкого диапазона размеров, разного состава и формы. Проведен регрессионный и корреляционный анализы данных LISST-Deer с измерениями нефелометрического датчика WET Labs, кондуктометрического прибора – счетчика Коултера (Multisizer 3) и концентрацией взвеси, полученной методом фильтрации. Все четыре метода продемонстрировали надежные положительные связи между полученными характеристиками взвеси Баренцева моря, для которых коэффициенты корреляции и детерминации варьировались от 0.6 до 0.8. Показано, что лазерный дифрактометр позволяет получать гораздо более детальные вертикальные распределения характеристик морской взвеси (особенно для эвфотической зоны) по сравнению с возможностями разрешения (измерение только оптически значимых классов размеров частиц) нефелометрического датчика. Обнаружена надежная корреляционная связь между данными LISST-Deer и концентрацией кислорода в водной толще, которая возрастает для крупноалевритовой и песчаной фракций взвеси. Установлена достоверная корреляционная зависимость между данными LISST-Deer и составом взвеси: содержанием органического углерода и концентрацией пигментов фитопланктона. Взаимосвязь между этими параметрами дает основания косвенно судить о составе взвешенных частиц по результатам измерений лазерного дифрактометра.

Ключевые слова: взвесь, гранулометрический состав, объемная концентрация, лазерный анализатор частиц, LISST-Deer, счетчик Коултера, нефелометр.

DOI: 10.31857/S0030157420050159

ВВЕДЕНИЕ

В полидисперсной гетерогенной системе морской воды, помимо газов, растворенных и коллоидных компонентов, выделяют частицы микронного и субмикронного размера. Первые исследования этих частиц (взвеси) с геологическими целями были выполнены А.П. Лисицыным в 50-х годах прошлого века [10, 11]. С того времени изучение гранулометрического состава морской взвеси стало одной из фундаментальных задач океанологии. Для геохимиков и седиментологов взвесь представляет интерес как материал для образования донных осадков и как одна из форм существования химических элементов в морской

воде. Исследование микрочастиц и их агрегатов необходимо для понимания и количественного моделирования биогеохимических процессов в океане [18].

По происхождению частицы морской взвеси бывают: терригенными, биогенными хемогенными, вулканогенными, космогенными и антропогенными [10, 12]. Чаще всего их делят на два типа: минеральные и биогенные. Выделяют частицы автотонные (продуцируемые в самом водоеме – фитопланктон и детрит) и аллотонные (поступающие с суши). Средняя концентрация таких частиц в океане составляет около 0.5 мг/л и только в ряде шельфовых морей может превышать 1 мг/л [8].

Обобщение данных по измерению показателя ослабления света (маркер концентрации микро-частиц) на трансокеанских разрезах, собранных в ходе многочисленных океанографических программ за последние 40 лет [21], продемонстрировало вариабельность концентрации частиц в эвфотическом слое, очень низкие значения концентрации в большей части промежуточной водной толщи, а также значительные колебания концентраций от очень низких до очень высоких значений вблизи морского дна. Выделены наиболее биогеохимические активные взвесенесущие слои – это верхний деятельный слой и пограничная зона вода – донный осадок [8].

Распределение химических элементов во взвеси, так же как и в донных осадках, подчиняется правилам фракций [3]. Крупность частиц предопределяет распределение вещества в динамической системе моря; она существенно влияет на распределение химических элементов, компонентов и загрязнений в морской среде. Гранулометрический состав частиц во многом определяет свойства (оптические, акустические, физико-химические и др.) дисперсионной среды – морской воды. Отсюда возникает важность знания гранулометрического состава взвеси.

Вместе с тем, несмотря на многолетний опыт исследования взвешенных частиц в морской воде, изучение гранулометрического состава взвеси остается одним из наиболее уязвимых вопросов [6]. Ни один из существующих методов не дает полного представления о распределении частиц по размерам в природных водах [29]. Поэтому в практике океанологических исследований важно комбинировать несколько инструментов, базирующихся на разных физических принципах изучения характеристик частиц в морской воде.

Распределение частиц в толще воды традиционно изучается с помощью оптических измерений рассеяния света или ослабления луча искусственного света, обратного рассеяния акустического сигнала, путем отбора проб воды для фильтрации или кондуктометрического анализа объема частиц, а также путем фильтрации воды *in situ* [16, 21, 25, 26]. Дисперсная фаза чаще всего оценивается либо численно (по числу частиц в единице объема), либо по массе (абсолютно сухая масса взвеси в единице объема), либо по объему (объем частиц в единице объема воды).

Первыми для изучения дисперсности взвеси стали применяться оптические методы, которые позволяют оценить распределение “оптически значимых классов размеров частиц” [19]. Различные инструменты визуализации и анализа частиц, как правило, используются для изучения агрегатов морской взвеси. Эти приборы зачастую объединяют цифровые изображения, проточную цитометрию и микроскопию в единый инстру-

мент, который помогает быстро и легко измерять размер и форму частиц в жидкой среде [31].

В начале 50-х гг. прошлого века был разработан кондуктометрический метод, или так называемый “принцип Коултера”, основанный на измерении влияния включений частиц, взвешенных в некотором объеме электролита, на электрическое сопротивление этого объема. Прибор, основанный на этом принципе, получил название счетчика Коултера. Теперь его применяют в качестве эталона при проверке приборов других типов (международный стандарт ISO 13319). Это единственный инструмент, позволяющий непосредственно измерять объем частиц и определять даже ничтожные их концентрации, недоступные многим другим методам [27].

Лазерный метод анализа размеров частиц разрабатывался во второй половине XX века. В настоящее время этот метод стал наиболее перспективным для измерения не только размеров и концентрации, но и формы частиц в различных дисперсионных средах. По способу реализации лазерные технологии относятся к интегрально-оптическим методам и базируются на теориях лазерной дифракции Фраунгофера и рассеяния света сферической частицей Ми.

LISST-Deep (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry) компании Sequoia Scientific, Inc. (США) – это коммерчески доступный прибор, который измеряет светорассеяние в суспензии частиц на малых прямых углах и использует эти данные для оценки гранулометрического состава [16]. Основой инверсии является оптическая дифракция на сферических частицах, значительно превышающих длину волны света, что считается эквивалентным дифракции на щели равного размера (дифракция Фраунгофера). Было показано, что прибор позволяет получать разумные оценки распределения частиц по размерам для суспензий частиц морских осадков, культур фитопланктона и морской взвеси [20, 22, 24, 29].

Главным образом, генезис взвеси предопределяет крупность ее частиц. Поэтому новые возможности получения массовой информации о гранулометрическом составе взвеси позволят в дальнейшем оперативно оценивать генезис частиц и судить о закономерностях их распределения в водной толще.

Данные о гранулометрическом составе взвеси Баренцева моря весьма скудны [13]. Одной из задач 75-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” было изучение концентрации и гранулометрического состава взвеси Баренцева моря в раннелетний сезон. Для решения поставленной задачи в экспедиции впервые было выполнено зондирование водной толщи моря от поверхности до дна лазерным анализатором частиц LISST-Deep.

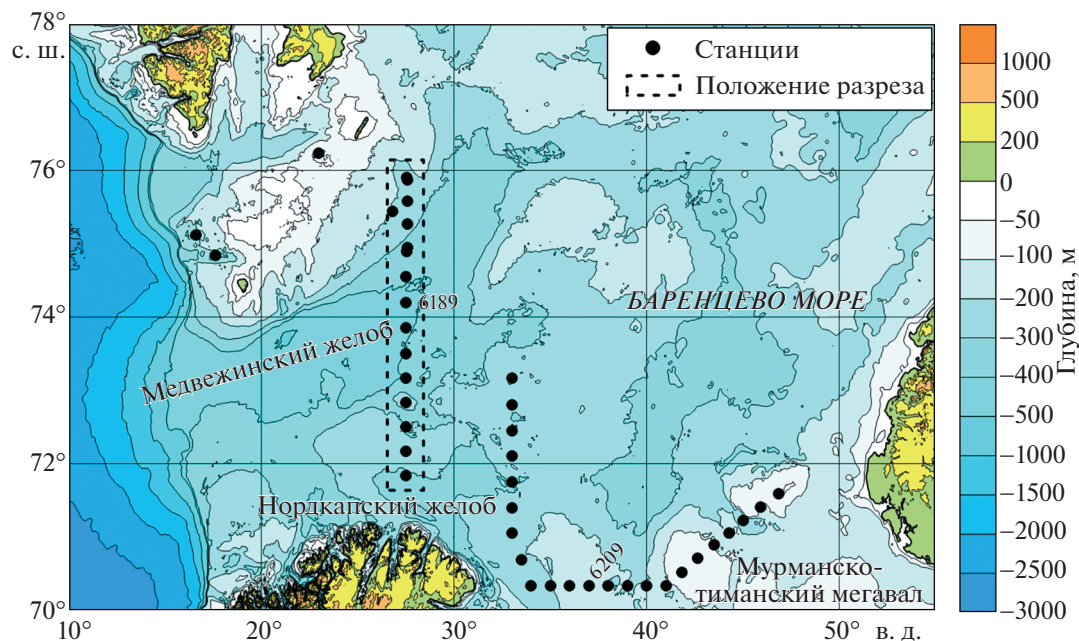


Рис. 1. Картограмма района работ в Баренцевом море. Для построения карты использована батиметрия GEBCO.

Целью настоящей работы была оценка степени адекватности отображения информации о составе полидисперсной системы баренцевоморской водной толщи, содержащей частицы широкого диапазона размеров, разного состава и формы. Для достижения поставленной цели мы провели, во-первых, статистический анализ данных лазерного дифрактометра с измерениями, выполненными с помощью кондуктометрического анализатора частиц, нефелометрического датчика, а также с данными классического метода фильтрации проб воды под вакуумом через мембранные фильтры. Во-вторых, выполнили анализ взаимосвязи данных лазерного дифрактометра с некоторыми характеристиками водной толщи и составом взвешенных частиц. Количественная оценка разных методов изучения дисперсной системы (взвеси) и выявление качественной взаимосвязи с характеристиками дисперсионной среды (морской воды) позволяет судить о степени адекватности полученных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На 42-х океанологических станциях выполнено зондирование водной толщи с помощью анализатора частиц LISST-Deep (Sequoia Scientific Inc., США) в 75-м рейсе НИС “Мстислав Келдыш”, июнь 2019 г. (рис. 1) [4]. Для всех изученных станций (глубина моря до 500 м) были получены приемлемые профили распределения частиц.

Гидрологические измерения и отбор проб воды. Для отбора проб воды использовался зондирующий

комплекс SBE 911plus с кассетным пробоотборником SBE 32, включающим в себя 10-литровые батометры Нискина (24 шт.). CTD-зонд SBE9plus был оснащен датчиками температуры, электропроводности, давления, мутности (turbidity, T) WETLabs ECO NTU, флуоресценции WETLabs ECO-AFL и кислорода. Для определения положения зонда вблизи дна использовался альтиметр фирмы Benthos, который был подключен к зонду (точность определения расстояния составляла 0.1 м). Было отобрано 126 батометрических проб, в 73-х из них была определена массовая концентрация взвеси методом вакуумной фильтрации.

Зондирующее устройство LISST-Deep компании Sequoia Scientific, Inc. — прибор, позволяющий непосредственно измерять базовые характеристики морской взвеси, а именно гранулометрический состав и объемную концентрацию (V_{LD} , мкл/л), *in situ* в водной толще при глубине моря вплоть до 3000 м (табл. 1). LISST-Deep оценивает распределение по классам размеров частиц, используя прямое рассеяние лазерного луча, измеренное серией из 32-х кольцевых детекторов, охватывающих приблизительный угловой диапазон 0.08° – 13.5° в морской воде при длине пути прохождения лазера в 5 см. Дополнительный фотодиодный детектор при 0° (угол приема равен 0.027°) регистрирует прошедший свет и позволяет рассчитать коэффициент ослабления луча частицами [29]. Угловое оптическое рассеяние используется для расчета объемной концентрации частиц V_{LD} в 32-х классах размеров с помощью ал-

Таблица 1. Основные рабочие характеристики LISST-Deer и CC [14, 28]

Характеристики	Показатели
LISST-Deer	
Назначение	Зондирующее устройство, измерение <i>in situ</i>
Измеряемые величины	Гранулометрический состав, объемная концентрация, глубина, температура, прозрачность, функция оптического объемного рассеяния
Лазер	Красный 670 нм твердотельный диодный
Длина пути прохождения лазера через морскую воду	5 см
Диаметр частиц	1.25–250 мкм с дискретностью 32 интервала по десятичной логарифмической шкале
Скорость замера	1 измерение в секунду (1 Гц)
Калибровка	Заводская
Рабочая глубина	До 3000 м
Счетчик Коултера	
Назначение	Лабораторный прибор, измерения в дискретных пробах
Измеряемые величины	Гранулометрический состав, объемная концентрация
Принцип Коултера	Измерение импульсов, возникающих в электрическом поле при прохождении частицы через апертуру
Диаметр частиц	2–60 мкм, но диапазон может быть шире (зависит от апертуры и выбирается пользователем, но при увеличении диапазона существенно увеличивается время анализа); данные импульса оцифровываются и могут быть обработаны для получения до 300 каналов размера для любого выбранного диапазона
Скорость замера	~5 мин на пробу
Калибровка	Выполняется пользователем регулярно

горитма инверсии, который использует ядро матрицы, полученное из решений Ми для рассеяния на однородных сферах [16].

Лазерный дифрактометр дополнительно оснащен датчиком температуры и датчиком грубой оценки давления (точность до 0.8 м). Поэтому LISST-Deer устанавливался горизонтально на зондирующем комплексе SBE 911plus и синхронизировался с CTD-зондом SBE 9plus (SeaBird Electronics, США) с помощью SeaBird кабеля для более точного сопоставления с данными CTD (рис. 2). Для расчета результатов анализа LISST-Deer используются заводские калибровочные коэффициенты. Калибровка прибора в полевых условиях не требуется. 32 класса размеров частиц (фракции) логарифмически распределены по всему измеренному диапазону (1.25–250 мкм), что обеспечивает достаточно высокое разрешение (табл. 1).

Обслуживание LISST-Deer главным образом заключается в минимизации влияния различных загрязнений линз на результаты измерений. Для этого принимались следующие меры: перед каждым измерением линзы промывались мыльным раствором и тщательно ополаскивались дистиллированной водой. Помимо этого, проводилась

запись файла фонового рассеивания (background scattering file), которая заключалась в измерении показателей дистиллированной воды при помощи специальной кюветы. Эта процедура позволяет исключить влияние текущего состояния линз (их микроповреждений и возможных загрязнений) на результаты измерений. После каждого зондирования водной толщи прибор ополаскивается пресной водой, чтобы исключить влияние морской соли.

Недостатком LISST-Deer является отсутствие возможности получать данные в режиме реального времени при зондировании параллельно с CTD из-за различия в форматах транслируемых данных с SeaBird. Вся получаемая информация сохраняется на внутренней памяти прибора, а для ее визуализации необходимо выгрузить файлы после подъема устройства на палубу и подключения прибора к компьютеру напрямую.

Счетчик Коултера. С помощью анализатора частиц Multisizer™ 3 (Coulter Counter®, Beckman Coulter, США) изучались характеристики взвеси в пробах воды, отобранных с помощью зондирующего комплекса SBE 911p. В качестве электролита и бланка для счетчика Коултера (CC) использовали многократно фильтрованную через

мембранные фильтры (диаметр 47 мм, размер пор 0.2 мкм) баренцевоморскую воду. Диапазон размера частиц определяется диаметром апертуры, используемой для измерения. При этом диапазон изученных размеров составляет приблизительно 2–60% от диаметра апертуры. Для проб природной морской воды обычно используется трубка с диаметром апертуры 100 мкм [7, 29]. Соответствующая апертурная трубка калибровалась с использованием стандартов сферических микрочастиц в соответствии с процедурой фирмы производителя. Так, СС калибровали на борту судна при помощи стандарта Vackman Coulter – суспензии полистирольных латексных частиц с номинальным размером 5 мкм (Coulter® CC Size Standard L5). Размеры микросфер были сертифицированы производителем и имеют сертификат NIST traceable. Изучались частицы диаметром от 2 до 60 мкм и их объемная концентрация (V_{CC} , мкл/л). Дискретность измерения на СС составляла 300 интервалов, то есть она гораздо более высокая, чем у LISST-Deer.

С помощью СС пробы морской воды анализировались в судовой лаборатории после достижения ими комнатной температуры. Для каждой пробы проводилось минимум три повторных измерения фиксированного объема воды (от 1 до 2 мл в зависимости от концентрации частиц). Пробы с очень низкой концентрацией частиц часто проверяли путем увеличения числа повторов и измеряемого объема воды с дальнейшим усреднением результатов. Измерения бланка – фильтрованной морской воды, всегда проводились не менее трех раз перед началом каждой сессии измерений и усреднялись. Результаты определения размеров частиц в пробах морской воды корректировались на бланк и усреднялись для получения окончательного результата.

Физический смысл гранулометрического состава по LISST-Deer и СС. Измерение распределения частиц по размерам представляет собой набор значений количества частиц на единицу объема в каждом классе размеров, $N(D)$, где D – это диаметр частицы, эквивалентной объему сферы для средней точки каждого отдельного класса. Поэтому при изучении природной морской взвеси принимается допущение о сферической форме ее частиц, что может вызывать возражения при определении точного смысла объема, измеренного и рассчитанного по встроенному алгоритму фирм-производителей как LISST-Deer, так и СС. Однако ни один из существующих методов гранулометрического анализа до сих пор нельзя назвать универсальным [29].

Деление на фракции изученных распределений частиц по размерам проводится авторами согласно классификации Безрукова и Лисицына для морских донных осадков [1], принятой в



Рис. 2. LISST-Deer в судовой лаборатории в составе зондирующего комплекса SBE911plus/SBE 32/SBE32.

ИО РАН и лежащей в основе всех карт типов донных осадков в Атласе океанов ГУНК МО СССР 1974–1980 гг.

Метод вакуумной фильтрации. Массовую концентрацию взвеси (M_c , мг/л) определяли стандартным методом фильтрации под вакуумом 400 мбар через предварительно взвешенные (точность 0.01 мг) мембранные ядерные фильтры (размер пор 0.45 мкм, диаметр фильтра 47 мм). Объем профильтрованной морской воды варьировал от 5 до 10 л. Подробнее о методике см. [25].

Изучение взвесеобразующих компонентов. Для определения концентрации фитопигментов, взве-

шенного общего ($C_{\text{общ}}$) и органического ($C_{\text{орг}}$) углерода взвесь фильтровали под вакуумом 200 мбар через стекловолоконистые фильтры GF/F фирмы Whatman, предварительно прокаленные при $t = 450^\circ\text{C}$ (эффективный размер пор 0.7 мкм, диаметр фильтра 47 мм). Концентрацию $C_{\text{орг}}$ (72 пробы) и $C_{\text{общ}}$ (56 проб) определяли методом высокотемпературного сжигания с регистрацией выделявшегося CO_2 автоматическим кулонометрическим методом до и после подкисления 1 н HCl на отечественном анализаторе углерода АН 7560, точность метода 5–10%.

Определения концентрации хлорофилла “а” (хл “а”) и феофитина “а” (фео “а”) (73 пробы) проводились флуориметрическим методом с подкислением и экстрагированием в 90%-м ацетоне на флуориметре Trilogy 1.1 (Turner Designs, США) в судовой лаборатории по методике [17]. Калибровка прибора выполнена при помощи стандарта – порошка хл “а” С6144–1MG “Sigma” согласно методике производителя.

Определение валовых форм Si и Al во взвеси (69 проб) проводилось фотометрическим методом по методике ГЕОХИ РАН [2] с дополнениями А.Б. Исаевой (ИО РАН) для работы с малыми навесками вещества (точность 2–5%). Содержание биогенного кремнезема ($\text{SiO}_{2\text{био}}$) и терригенного вещества определяли методом терригенной матрицы на основании среднего состава земной коры [30].

Статистический анализ. Регрессионный анализ был проведен для установления зависимостей между выбранными переменными – характеристиками взвеси, полученными с помощью трех разных инструментов (LISST-Deer, CC и нефелометра) и метода вакуумной фильтрации. Их поиск выполнялся при помощи метода наименьших квадратов, с использованием стандартного набора математических функций. Сравнимые характеристики в ряде случаев распределялись по закону, отличному от нормального, что может снижать информативность оценок качества регрессий с использованием коэффициента детерминации R^2 . Тем не менее, они необходимы для отражения картины распределения показателей.

Корреляционный анализ применялся для выявления связей между изученными характеристиками взвеси, параметрами водной толщи и взвесеобразующими компонентами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение данных LISST-Deer и CC в лабораторных условиях. Для непосредственного сравнения двух приборов проведены эксперименты с “чистыми” монодисперсными суспензиями частиц (полистирольными латексными микросферами L20 компании Beckman Coulter) с номи-

нальным диаметром 20 мкм, приготовленными в лаборатории с использованием фильтрованной морской воды (согласно методике подготовки электролита для CC). Приготовленные хорошо перемешанные суспензии частиц анализировали одновременно на двух приборах. Так медианный диаметр (Md) микросфер латекса, измеренный с помощью CC, составил 20.24 мкм, а с помощью LISST-Deer – 21.09 мкм. В данном случае частицы размером 20 мкм попадают в интервал размерного диапазона LISST-Deer от 19.2 до 22.7 мкм, поэтому погрешность измеренного Md не превышает погрешности самого размерного диапазона.

По данным других исследований [29], Md стандарта частиц L20, измеренный с помощью CC и другой модели лазерного дифрактометра LISST-100X (отличающегося от LISST-Deer допустимой глубиной погружения) составил 20.08 и 18.82 мкм соответственно. Наши измерения и данные цитируемых авторов показали несущественную погрешность определения размера частиц двумя независимыми методами, которая составляла около 5%.

Согласно данным [22], серия лазерных дифрактометров Sequoia Scientific Inc. демонстрирует высокую точность и хорошую воспроизводимость результатов: погрешность определения объема частиц составляет ~10%, возрастающая по мере увеличения их крупности.

Регрессионный и корреляционный анализы характеристик взвеси, полученных с помощью LISST-Deer и других методов. В табл. 2 дано описание изученных характеристик взвеси, полученных с помощью трех разных инструментов (LISST-Deer, CC и нефелометра) и традиционного метода вакуумной фильтрации.

В работе проведен регрессионный анализ взаимосвязи между объемной концентрацией взвеси, измеренной на LISST-Deer (V_{LD}) и показателями, измеренными другими методами. Результаты анализа представлены на рис. 3. Так, между V_{LD} и объемной концентрацией взвеси по данным CC (V_{CC}) удалось получить полиномиальную зависимость с коэффициентом детерминации 0.70, тогда как коэффициент корреляции между этими параметрами составил 0.84 (рис. 3а). Размерный диапазон LISST-Deer в данном случае был приведен к диапазону CC (от 2 до 60 мкм). Объемные концентрации, измеренные на CC, в среднем превышают концентрации LISST-Deer в 2 раза при $V_{\text{LD}} > 0.5$ мкл/л.

В случае сравнения данных LISST-Deer и массовой концентрации взвеси (M_c) связь прослеживается менее явно (рис. 3б). Наилучшую регрессионную зависимость удалось получить для объемной концентрации песчаной и пелитовой фракций взвеси, с коэффициентом детерминации 0.64 и 0.63 соответственно. В связи с тем, что

Таблица 2. Описательная статистика по данным измерений характеристик взвеси разными методами. Обозначения: V_{LD} – объемная концентрация взвеси по LISST-Deer, мкл/л; V_{CC} – объемная концентрация взвеси по CC (Multisizer 3), мкл/л; M_c – массовая концентрация взвеси, полученная методом фильтрации, мг/л; T – мутность, NTU

Параметр	По всей выборке					В поверхностном слое 0–30 м				
	V_{LD}	V_{LD}	V_{CC}	M_c	T	V_{LD}	V_{LD}	V_{CC}	M_c	T
<i>Диапазон размеров частиц, мкм</i>	1.25–250	2–60	2–60	–	–	1.25–250	2–60	2–60	–	–
<i>Размер выборки</i>	10255	10255	126	73	8136	1271	1271	40	33	873
Минимум	0	0	0.252	0.093	0.225	0.042	0.042	0.819	0.094	0.243
Максимум	8.480	2.078	5.662	2.067	0.616	6.452	2.078	5.662	0.921	0.616
Среднее	0.490	0.201	1.601	0.340	0.302	1.630	0.594	2.361	0.316	0.354
Медиана	0.221	0.092	1.329	0.274	0.289	1.364	0.510	2.092	0.274	0.348
Стандартное отклонение	0.754	0.273	1.114	0.277	0.049	1.069	0.355	1.045	0.189	0.067
Дисперсия выборки	0.569	0.075	1.242	0.077	0.002	1.144	0.126	1.092	0.036	0.004

многие клетки фитопланктона на 90% состоят из воды, их сухая масса сравнительно мала по сравнению с влажной (“живой”) массой. Измерение объемов частиц взвеси происходит в естественных условиях (в морской воде), то есть измеряются характеристики “влажных” частиц. Поэтому нередко между массовой и объемной концентрациями отсутствует надежная корреляция с высоким коэффициентом, кроме тех случаев, когда взвесь представлена преимущественно терригенным веществом [6].

В отличие от рассмотренных выше регрессий, при сравнении с данными нефелометра (T) использовалась выборка размером 10 тыс. значений (рис. 3в). Так как измерения нефелометрического датчика более чувствительны к частицам пелитовой и мелкоалевритовой фракций, характерным для нефелоидных слоев, было выделено две различных зависимости: для измерений в придонном слое (на глубине не более 30 м от дна) и для всей остальной водной толщи (от поверхности до придонного слоя). В случае с придонными слоями коэффициент детерминации для данной зависимости составил 0.74. Для остальной водной толщи наблюдается более существенный разброс значений.

С помощью LISST-Deer получено большое количество разнообразных распределений гранулометрических составов (10249 для 42 станций) взвеси для всей водной толщи: как для нефелоидных слоев и эвфотической зоны с повышенной концентрацией частиц разного генезиса, так и для промежуточной водной толщи с очень низкими концентрациями взвешенных частиц. Результаты регрессионного анализа концентраций взвеси, измеренных различными методами, соответствуют результатам корреляционного анализа.

Корреляционный анализ характеристик взвеси, водной толщи и некоторых взвесеобразующих компонентов. Обращает на себя внимание отрицательная корреляционная зависимость объемной и массовой концентраций взвеси с плотностью воды (табл. 3). Такая взаимосвязь соответствует классическим представлениям о распределении взвеси в водной толще. Однако взаимосвязь между характеристиками взвеси и плотностью довольно слабая, что вызвано, во-первых, наличием на многих станциях ярко выраженных нефелоидных слоев; во-вторых, относительно небольшой мощностью эвфотического слоя по сравнению с мощностью промежуточного слоя с низкими концентрациями.

Надежная корреляционная зависимость между всеми характеристиками взвеси и концентрацией кислорода, очевидно, обусловлена преобладанием доли биогенных частиц в водной толще. В пользу этого предположения говорит тот факт, что наиболее высокий коэффициент корреляции обнаружен между концентрацией кислорода и объемными концентрациями крупноалевритовой и песчаной фракций (табл. 3).

Надежная взаимосвязь объемных концентраций взвеси с флуоресценцией хлорофилла (по датчику), концентрацией изученных фитопигментов и содержанием органического углерода указывает на то, что “объем взвеси” отражает, прежде всего, ее биогенную составляющую. Этот факт подкрепляется более слабой корреляционной зависимостью массовой концентрации взвеси с перечисленными выше параметрами биогенной части взвешенного вещества (табл. 3).

Вертикальное распределение характеристик взвеси в морской воде. На рис. 4 представлены примеры вертикального распределения объемной кон-

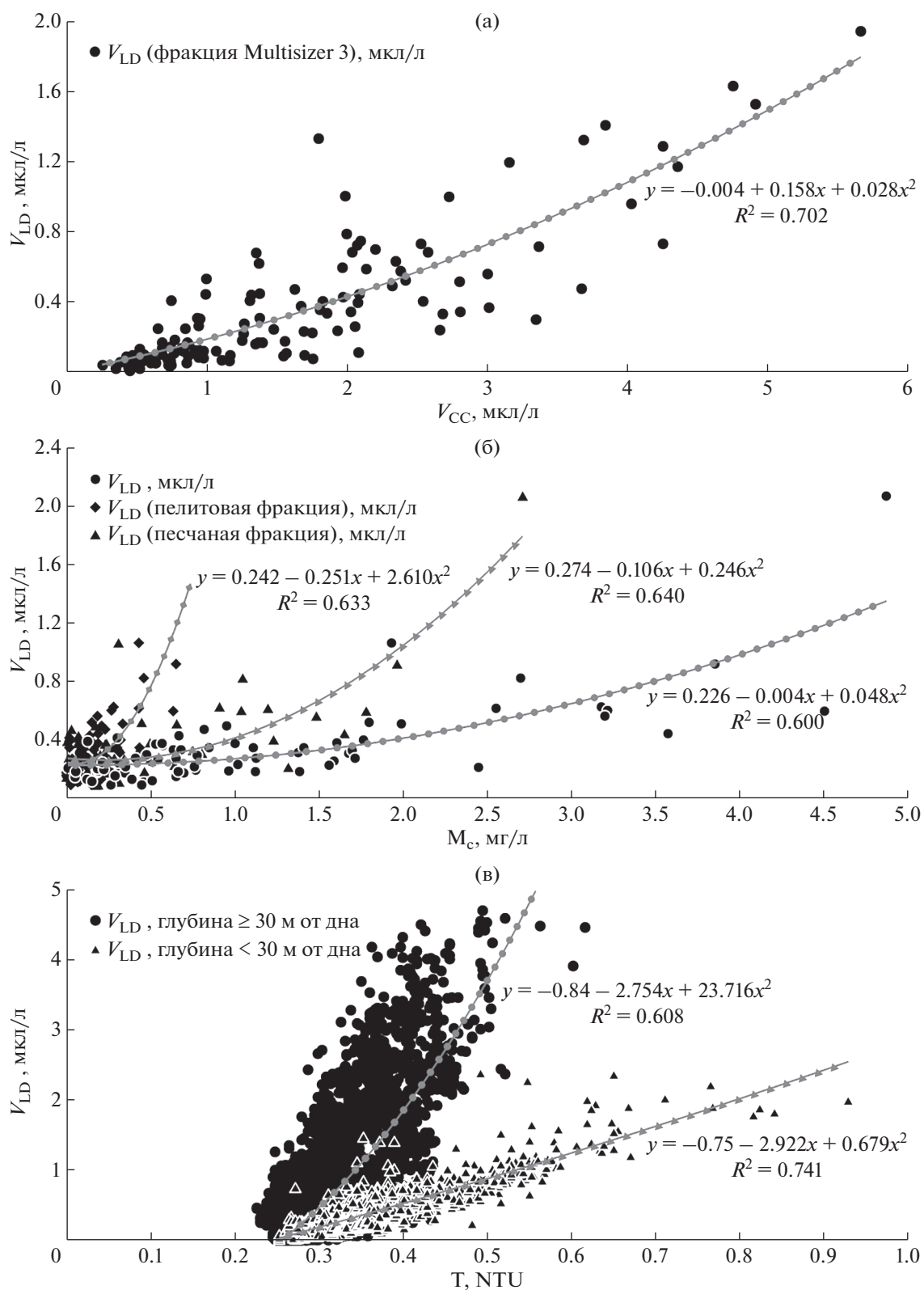


Рис. 3. Регрессионный анализ зависимостей объемной концентрации взвеси по данным LISST-Deer, V_{LD} , от объемной концентрации по данным СС, V_{CC} (а), массовой концентрации, M_c (б) и мутности, T (в).

Таблица 3. Корреляционная зависимость между различными показателями взвеси и данными STD-зонда. Размер выборки определяется по наименьшему значению на пересечении столбца и строки. Обозначения фракций: Пл – пелитовая, МА – мелкоалевритовая, КА – мелкоалевритовая, Пс – песчаная

Показатель	V_L , мкл/л (LISST-Deep)								V_{CC} , мкл/л (Multisizer 3)	M_c , мг/л (филтрация)
	фракция, мкм	суммарная	Пл	МА	КА	Пс	диапазон СС			
		1.25–250	1.25–10.8	10.8–47.7	47.7–92.6	92.6–250	2.05–56.3			
V_{CC} , мкл/л (Multisizer 3)	выборка	10249	10249	10249	10249	10249	10249	10249	126	73
M_c , мг/л (филтрация)	126	0.79	0.69	0.78	0.79	0.63	0.84	1.00	0.47	0.47
Мутность, NTU	73	0.73	0.72	0.52	0.57	0.71	0.68	0.47	1.00	1.00
Флуоресценция, мг/м ³	10249	0.63	0.69	0.70	0.53	0.51	0.75	0.47	0.57	0.57
Кислород, мг/л	9937	0.74	0.70	0.63	0.62	0.72	0.73	0.63	0.68	0.68
Плотность воды, кг/м ³	9937	–0.40	–0.26	–0.34	–0.49	–0.34	–0.35	–0.49	0.51	–0.04
Градиент плотности	9844	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.14	0.09	0.09
$C_{орг}$, мг/л	72	0.79	0.64	0.53	0.82	0.73	0.68	0.72	0.58	0.58
$C_{общ}$, мг/л	56	0.72	0.60	0.55	0.78	0.62	0.65	0.72	0.44	0.44
Хл “а”, мг/м ³	73	0.72	0.57	0.77	0.62	0.60	0.79	0.78	0.39	0.39
Фео “а”, мг/м ³	73	0.71	0.43	0.78	0.60	0.61	0.74	0.67	0.37	0.37
Терригенное в-во, %	69	–0.25	–0.06	0.02	–0.37	–0.30	–0.04	–0.34	0.09	0.09
SiO ₂ бю, %	69	0.29	0.10	0.55	0.25	0.15	0.43	0.27	0.04	0.04
Si/Al	66	0.41	0.13	0.31	0.47	0.38	0.30	0.23	0.10	0.10

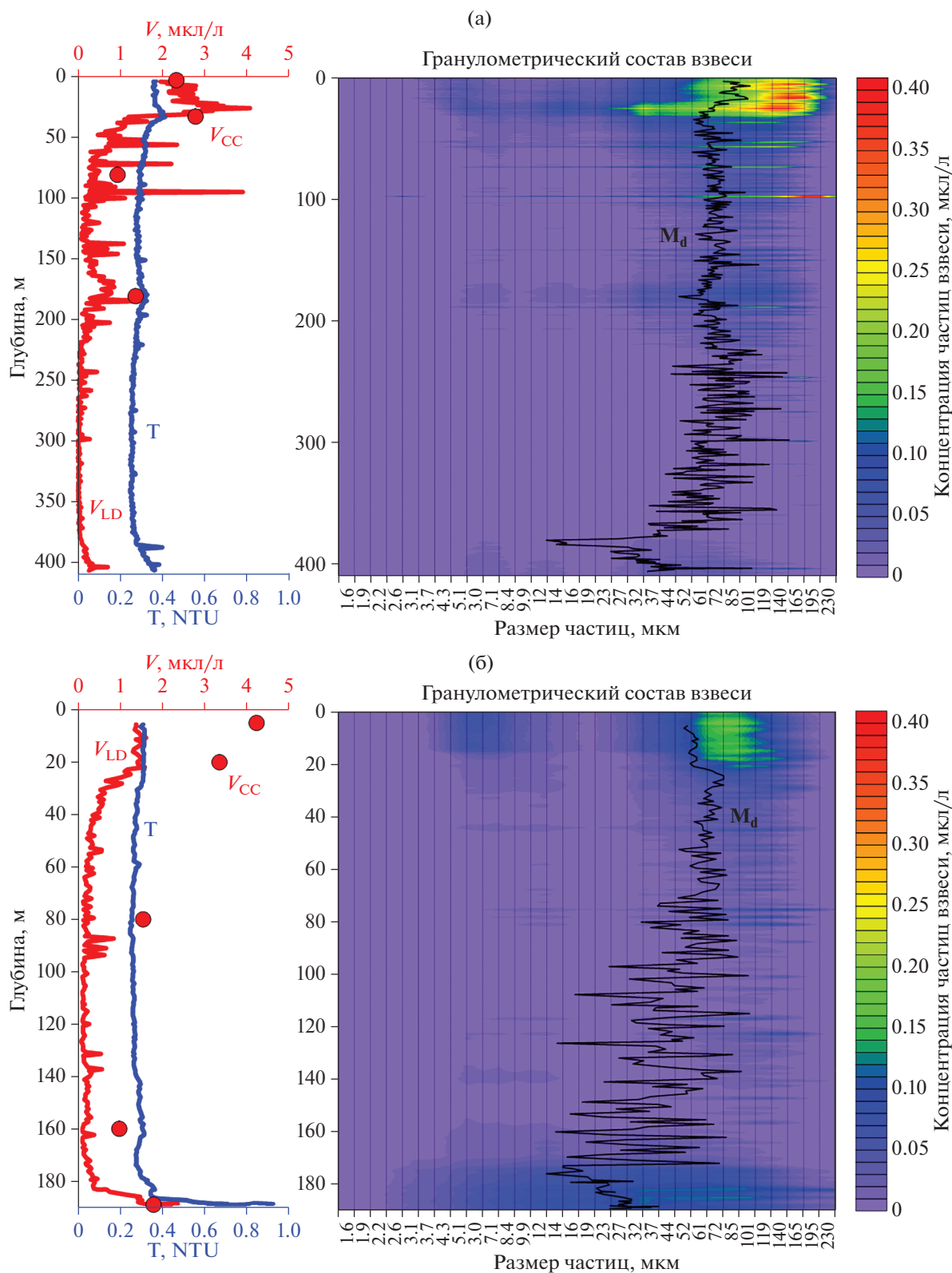


Рис. 4. Вертикальные профили мутности (T), объемной концентрации взвеси по данным LISST-Deer (V_{LD}) и счетчика Коултера (V_{CC}), а также гранулометрического состава (32 фракции по LISST-Deer) и M_d частиц на ст. 6189 (а) и ст. 6209 (б).

центрации и гранулометрического состава взвеси в водной толще на ст. 6189 в Медвежинском желобе ($74^{\circ}11.981'$ с.ш., $27^{\circ}29.983'$ в.д.) и ст. 6209 на юге Мурмано-Тиманского мегавала ($70^{\circ}19.979'$ с.ш., $38^{\circ}0.227'$ в.д.), полученных с помощью LISST-Deer, CC и нефелометра. На графике гранулометрического состава представлен вклад каждой из 32-х изученных фракций в суммарную объемную концентрацию взвеси и дана кривая медианного диаметра (M_d) частиц.

При сопоставлении вертикальных распределений LISST-Deer и CC по одним и тем же горизонтам в отдельных случаях очевидны расхождения в объемных концентрациях (V_{LD} и V_{CC}). Во-первых, расхождения обусловлены оптическими принципами измерения коэффициентов преломления и поглощения лазерного луча при его попадании на частицы, что лежит в основе метода лазерной дифракции, который реализуется LISST-Deer. Основные химические и физические свойства взвеси, определяющие ее взаимодействие со светом, сильно варьируют в морской воде в зависимости от генезиса и формы частиц [32]. Во-вторых, и тот и другой методы не имеют возможности учитывать форму частиц взвеси, часто далекой от сферической. Тем не менее, при сравнении данных, полученных разными методами, по выборке 126 значений, коэффициент парной корреляции составил 0.79 (для выборки концентраций частиц диаметром 2–60 мкм, измеренной с помощью LISST-Deer, этот коэффициент составил 0.84), что демонстрирует достаточно высокую зависимость между этими числовыми рядами, несмотря на различия в анализируемом диапазоне частиц. Этот факт подтверждает данные литературы, что во взвеси по количеству абсолютно преобладают пелитовые и субколлоидные частицы, в то время как частицы диаметром крупнее 20 мкм встречаются относительно реже [23]. Именно эти тонкие фракции формируют основу взвешенной дисперсной фазы морской воды, в отличие от крупноалевритовых и песчаных фракций “морского снега” и фекальных пеллет, которые преимущественно образуют нисходящий вертикальный поток вещества и более достоверно определяются другими методами. Поэтому характерная особенность спектра взвеси в океане – это резкое увеличение числа малых частиц [15], что отражает рис. 5.

Сопоставление вертикального распределения данных LISST-Deer и интенсивности рассеяния света (нефелометрия) по датчику WETLabs демонстрирует больше расхождений, чем сравнение двух анализаторов объемов частиц, основанных на разных принципах измерения (лазерной дифракции и кондуктометрии). Главный вклад в рассеяние света в морской воде вносят частицы определенного диапазона размеров (оптически значимых классов), что справедливо как для терригенных, так и для биогенных частиц. Опти-

ческий размер частиц, при котором дисперсная система сильнее всего рассеивает свет, составляет по грубым оценкам <5 мкм для терригенных и <10 мкм для биогенных частиц [15]. Нефелометрия позволяет получать надежные данные о придонных нефелоидных слоях посредством измерения мутности, но часто не дает объективной информации о взвеси эвфотического слоя. Поэтому LISST-Deer можно считать более универсальным инструментом при исследовании взвеси всей водной толщи.

Распределение частиц на ст. 6189 обращает на себя внимание максимумом концентрации взвеси в эвфотическом слое с выраженным пиком на глубине 32 м, где M_d объемов частиц составил 67 мкм (рис. 4а). Очевидно, что основной вклад в состав взвеси этого слоя вносят биогенные частицы (фитопланктон).

Вертикальное распределение на ст. 6209 примечательно наличием выраженного придонного нефелоидного слоя мощностью ~20 м (рис. 4б). Вблизи дна (5 м от дна) концентрация достигала 2.3 мкл/л, а M_d объемов частиц – 30 мкм. В этом слое преимущественно терригенная взвесь включает также органо-минеральные агрегаты и биогенный детрит.

На рис. 5 приведены примеры дифференциальных распределений на единицу размера для объемной концентрации частиц и для числа частиц, полученных по данным LISST-Deer и CC в пробах морской воды из эвфотической зоны и из придонного нефелоидного слоя для упомянутых выше станций. Для сравнения гранулометрических составов по данным LISST-Deer и CC необходимо привести их размерные диапазоны к единому шагу. Для этого значения количественной и объемной концентраций разделены на соответствующую длину размерного интервала, равную для LISST-Deer от 0.23 до 38 мкм (32 интервала), для CC – от 0.02 до 0.68 мкм (300 интервалов). Полученные данные имеют размерности концентраций на единицу длины диаметра частиц в микрометрах. Распределение частиц по размерам в этих пробах отражает характерный гранулометрический состав морской воды. Общая тенденция заключается в том, что число частиц быстро уменьшается по мере увеличения диаметра частиц (рис. 5). При этом дифференциальные распределения числа частиц в нефелоидном слое демонстрируют более схожие данные гранулометрического состава по данным LISST-Deer и CC, чем таковые в эвфотической зоне. Однако и в той, и в другой пробе воды обнаруживается множество пиков, соответствующих локальному увеличению популяций частиц определенного диаметра. Для “хвостов” дифференциальных кривых, а также в районе 20 мкм наблюдается дефицит частиц, который отмечается по данным

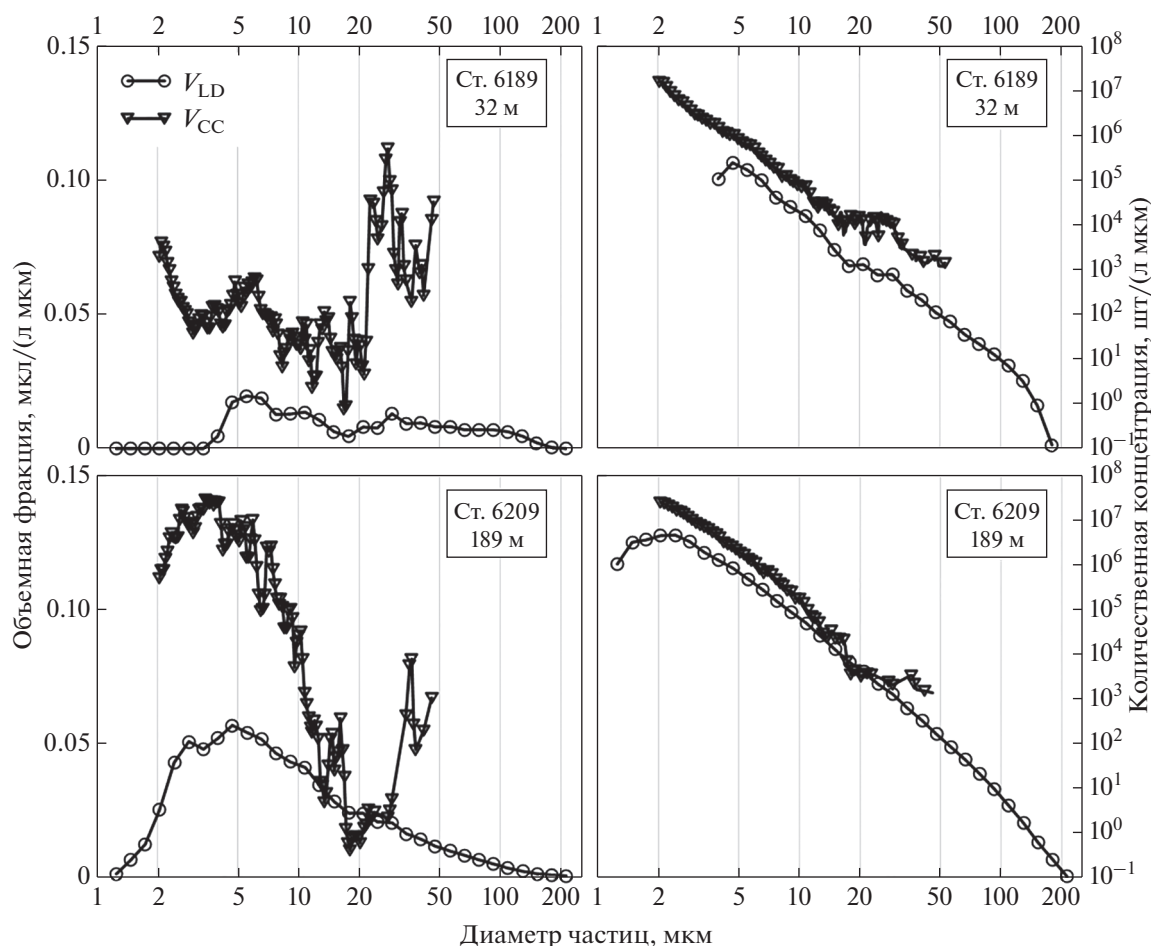


Рис. 5. Пример измерения гранулометрического состава взвеси с помощью LISST-Deer и СС в пробах воды из эвфотической зоны (ст. 6189, горизонт 32 м) и из нефелоидного слоя (ст. 6209, горизонт 189 м) Баренцева моря. Дифференциальные распределения на единицу размера даны как для объемной концентрации частиц V_{LD} и V_{CC} (слева), так и для числа частиц N_{LD} и N_{CC} (справа).

LISST-Deer и СС. Для эвфотической зоны типично дифференциальное распределение объемных концентраций близкое к бимодальному. Так, на горизонте 32 м (ст. 6189) выделялись две моды: первой соответствует диаметр частиц 4–7 мкм, а второй – около 30 мкм, что указывает на присутствие двух основных популяций частиц, выделяющихся в пределах пелитовой и мелкоалевритовой фракций (рис. 5). Такой широкий разброс между размерами преобладающих частиц позволяет СС и LISST-Deer зафиксировать две популяции частиц, несмотря на значительные различия в разрешающей способности этих двух инструментов. Концентрации хл “а” для этого водного слоя были типичными для начала лета в Баренцевом море и составляли около 1 мкг/л, а доля органического вещества достигала 70%. Наличие двух популяций частиц (или бимодальность) – это характерная особенность эвфотической зоны, которая отмечалась повсеместно в морской воде [7, 9, 27, 29]. В нефелоидном слое (189 м, ст. 6209),

где доля терригенного вещества достигала 80%, а содержание $SiO_{2\text{био}}$ составляло 18% (в основном биогенный детрит) наблюдалась выраженная мода в области 4 мкм.

Пример кросшельфового разреза объемной концентрации взвеси. На рис. 6 приведен пример распределения объемных концентраций взвеси по данным LISST-Deer на кросс шельфовом разрезе по 27.5° в.д. от Медвежинского желоба до Нордкапского желоба. Разрез построен на основе обработки более чем 4-х тысяч точек измерений, что за счет усреднения данных позволяет получить достоверное отображение информации о распределении концентрации взвеси, как общей, так и по 32-м фракциям. Наибольшие концентрации взвеси (до 4 мкл/л) приурочены к верхнему децетальному слою, достигая максимальной величины вблизи Полярного фронта, что обусловлено обилием фитопланктона в этой части моря. Придонный нефелоидный слой на разрезе выражен слабо. В Баренцевом море нефелоидные слои рас-

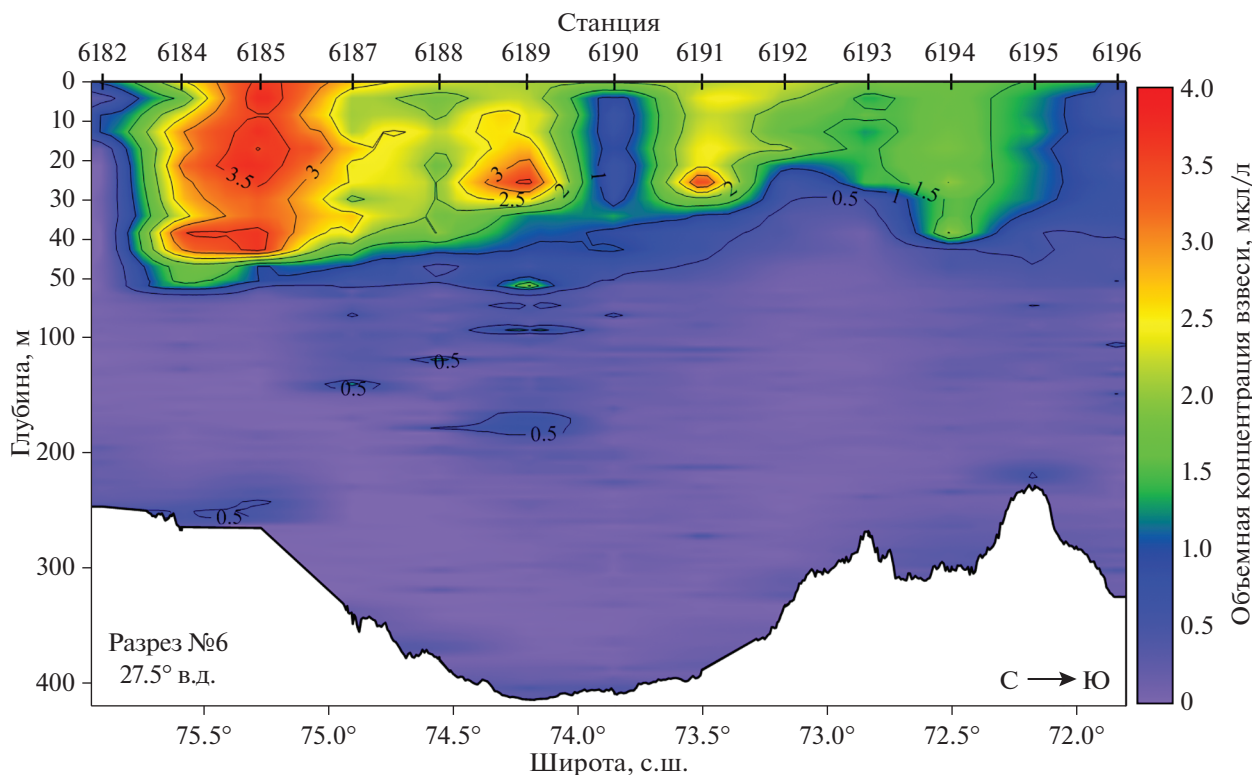


Рис. 6. Распределение объемной концентрации взвеси в юго-западной части Баренцева моря на кросс шельфовом меридиональном разрезе вдоль 27°30' в.д. по данным LISST-Deer, июнь 2019 г.

пространены существенно меньше [5], имеют небольшую мощность и низкую концентрацию взвеси по сравнению с морями Сибирской Арктики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 75-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” исследования взвеси были выполнены четырьмя независимыми методами: три инструментальных (лазерная дифракция, кондуктометрический, нефелометрический) и экспериментальный (фильтрация через мембранные фильтры под вакуумом). Нам удалось продемонстрировать практическую ценность совместных измерений различных свойств взвеси разными методами.

LISST-Deer и СС при анализе объемной концентрации взвеси в морской воде измеряют характеристики “влажных” частиц, тогда как метод мембранной фильтрации позволяет получить массу взвешенных частиц после их полного высыхания. Для биогенных частиц это может послужить причиной расхождений. Нефелометрия наиболее чувствительна к так называемым оптически значимым частицам взвеси пелитовой размерности (до 10 мкм), наиболее часто встречающимся в нефелоидных слоях. По этой причине, данный метод может существенно занижить показатели биогенной составляющей взвеси.

Принимая во внимание описанные особенности методов, их взаимный регрессионный и корреляционный анализ подтверждает наличие взаимосвязей с достаточно высокими показателями достоверности, несмотря на различия в абсолютных значениях объемных концентраций взвеси.

Корреляционный анализ позволил выявить связи рассмотренных характеристик взвеси с некоторыми характеристиками морской воды и взвесеобразующими компонентами. Так, измерения LISST-Deer, так же как и данные других инструментов, имеют связь с концентрацией кислорода и флуоресценцией хлорофилла *in situ* в водной толще, концентрацией изученных фитопигментов (хл “а” и фео “а”) и содержанием органического углерода, измеренных в дискретных пробах воды. Все это вместе со статистическим анализом данных различных методов измерения характеристик взвеси позволяет сделать вывод об адекватном отображении информации о распределении взвешенного вещества в толще Баренцева моря.

LISST-Deer имеет широкий диапазон измеряемых частиц, большую глубину погружения, достаточно высокую дискретность измерений за единицу времени, позволяет проводить измерения *in situ* в водной толще, а также имеет возможности для сопряжения с СТД, что делает этот ла-

зерный дифрактометр наиболее универсальным инструментом для изучения концентрации и гранулометрического состава взвеси. В то же время, LISST-Deer уступает СС в точности измерений концентраций и дискретности гранулометрического состава. Другим недостатком LISST-Deer является отсутствие возможности получать информацию в режиме реального времени при сопряженном зондировании с СТД.

Таким образом, важно комбинирование различных современных методов, которые предоставляют широкие возможности для изучения морской взвеси. Применение LISST-Deer в практике океанологических исследований открывает новые возможности для получения массовой информации о пространственно-временной изменчивости концентрации морской взвеси и ее гранулометрического состава. При этом важно сочетание нескольких инструментальных и экспериментальных методов.

Благодарности. Авторы выражают свою признательность капитану Ю.Н. Горбачу и всему экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш”, С.Ю. Лукашину, Я.А. Пронину, Е.О. Золотых и Л.В. Деминой за помощь в проведении исследований; академику А.П. Лисицыну за поддержку работы и полезное обсуждение.

Источники финансирования. Экспедиционные исследования частично поддержаны Российским научным фондом (проект № 19-17-00234). Обработка данных анализаторов частиц выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-50090); материалов по составу взвеси – Российского научного фонда (проект № 20-17-00157). Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруков П.Л., Лисицын А.П. Классификация осадков современных морских водоемов // Геологические исследования в Дальневосточных морях. Тр. Ин-та океанологии. Т. XXXII. М.: АН СССР, 1960. С. 3–14.
2. Гельман Е.М., Старобина И.З. Фотометрические методы определения породообразующих элементов в рудах, горных породах и минералах. ГЕОХИ АН СССР, Центральная лаборатория, Сектор химических методов анализа. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1976. 69 с.
3. Емельянов Е.М. Седиментогенез в бассейне Атлантического океана. М: Наука, 1982. 190 с.
4. Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Немировская И.А. и др. Исследование седиментосистем Европейской Арктики в 75-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. В печати.
5. Копелевич О.В., Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Карабашев Г.С. Оптические методы в океанологии и морской геологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1. М.: Наука, 2004. С. 118–143.
6. Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009. 263 с.
7. 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. № 4. 687–708.
8. Кравчишина М.Д., Лисицын А.П. Количество, состав и свойства рассеянного осадочного вещества (взвеси) в Мировом океане // Геохимия литогенеза. Материалы Российского совещания с межд. участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. С. 141–144.
9. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П. Первые определения гранулометрического состава взвеси Белого моря // Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 3. С. 387–391.
10. Лисицын А.П. Атмосферная и водная взвесь как исходный материал для образования морских осадков // Тр. Ин-та океанологии. 1955. Т. XIII. С. 16–22.
11. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 438 с.
12. Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы “живого океана” // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
13. Политова Н.В., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Лохов А.С. Рассеянное осадочное вещество Баренцева моря // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 777–790.
14. Руководство пользователя. LISST-Deer – глубоководный анализатор размера частиц. Sequoia Scientific, Inc. Май, 2013. 98 с.
15. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 278 с.
16. Agrawal Y.C., Pottsmith H.C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport // Marine Geology. 2000. V. 168. P. 89–114.
17. Arar E.J., Collins G.B. Method 445.0. *In vitro* determination of chlorophyll “a” and pheophytin “a” in marine and freshwater algae by fluorescence. Revision 1.2. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 1997. 22 p.
18. Boyd P.W., Ellwood M.J., Tagliabue A., Twining B.S. Biotic and abiotic retention, recycling and remineralization of metals in the ocean // Nature Geosci. 2017. V. 10. P. 167–173.
19. Davies E.J., McKee D., Bowers D. et al. Optically significant particle sizes in seawater // Applied Optics. 2014. V. 53. № 6. P. 1067–1074.
20. Durrieu de Madron X., Ramondenc S., Berline L. et al. Deep sediment resuspension and thick nepheloid layer generation by open-ocean convection // J. Geophys. Res. Oceans. 2017. V. 122. P. 2291–2318.
21. Gardner W.D., Mishonov A.V., Richardson M.J. Decadal comparisons of particulate matter in repeat transects in the Atlantic, Pacific, and Indian Ocean Basins // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. P. 277–286.

22. *Gartner J.W., Cheng R.T., Wang P.-F., Richter K.* Laboratory and field evaluations of the LISST-100 instrument for suspended particle size determinations // *Marine Geology*. 2001. V. 175. № 1–4. P. 199–219.
23. *Honjo S.* Material fluxes and modes of sedimentation in the mesopelagic and bathypelagic zones // *J. of Marine Res.* 1980. V. 38. P. 53–97.
24. *Karageorgis A.P., Georgopoulos D., Kanellopoulos T.D. et al.* Spatial and seasonal variability of particulate matter optical and size properties in the Eastern Mediterranean Sea // *J. of Marine Syst.* 2012. № 105–108. P. 123–134.
25. *Kravchishina M.D., Lisitsyn A.P., Klyuvitkin A.A. et al.* Suspended Particulate Matter as a Main Source and Proxy of the Sedimentation Processes // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea Environment Part II* / A.P. Lisitsyn, L.L. Demina (eds.). *The Handbook of Environmental Chemistry*. V. 82. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. P. 13–48.
26. *Lam Ph.J., Lee J.-M., Heller M.I. et al.* Size-fractionated distributions of suspended particle concentration and major phase composition from the U.S. GEOTRACES Eastern Pacific Zonal Transect (GP16) // *Marine Chemistry*. 2018. V. 201. P. 90–107.
27. *McCave I.N.* Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean // *Deep-Sea Res.* 1984. V. 31. № 4. P. 329–352.
28. Multisizer 3 Operator's Manual (PN 8321681 Rev. B).
29. *Reynolds R.A., Stramski D., Wright V.M., Woźniak S.B.* Measurements and characterization of particle size distributions in coastal waters // *Journal of Geophysical Research*. 2010. V. 115. C08024. <https://doi.org/10.1029/2009JC005930>
30. *Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // *Treatise on geochemistry*. 2014. V. 4. P. 1–51.
31. *Syvitski J.P.M., Hutton E.W.H.* *In situ* characteristics of suspended particles as determined by the Flocc Camera Assembly FCA // *Journal of Sea Reserch*. 1996. V. 36 (1/2). P. 131–142.
32. *Woźniak B., Dera J.* *Light absorption in sea water*. Springer Science + Business Media, LLC, 2007. 454 p.

***In situ* Measurement of the Characteristics of Suspended Particles in the Barents Sea by the LISST-Deep Laser Diffractometer**

A. S. Lokhov^{a, #}, M. D. Kravchishina^{a, ##}, A. A. Klyuvitkin^a, A. I. Kochenkova^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: a.s.lohov@yandex.ru*

^{##}*e-mail: kravchishina@ocean.ru*

The key indicators of marine sediment genesis are particle size distribution (PSD) and volume concentration of suspended particulate matter (SPM). However, their studying is not widespread in ship oceanology research. Paper reviews the experience of using the LISST-Deep laser particle size analyzer for the study of marine SPM *in situ*. We present the first data on the volume concentration and PSD of SPM in the Barents Sea obtained during the 75th cruise of the RV *Akademik Mstislav Keldysh* in June 2019. We carried out the assessment of the adequacy of information display on the polydisperse system composition of the Barents Sea water body, what contain the particles of the wide particle size spectrum, different genesis and shape. The paper gives regression and correlation analysis of LISST-Deep data with Wet Labs nephelometric sensor, Coulter Counter (Multisizer 3) and SPM mass concentration measured by membrane filtration technique. All four of them demonstrated reliable correlations between characteristics of SPM of the Barents Sea. Their correlation and determination coefficients are vary from 0.6 to 0.8. Laser diffractometer produces more detailed vertical distributions of marine SPM parameters than nephelometric sensor especially for euphotic zones. We found significant correlation of LISST-Deep data with concentration of dissolved oxygen which increases for coarse-silty and sandy fractions (47.7–92.6 and 92.6–250 μm, respectively). Also there is correlation with SPM composition such parameters as organic carbon concentration and phytoplankton pigments. These correlations give some indirectly indications of SPM composition from laser diffractometer measurements.

Keywords: suspended particulate matter (SPM), particle size distribution (PSD), volume concentration, particle laser analyzer, LISST-Deep, Coulter Counter, nephelometer.