© Стрельцова Е. А., Якимова К. С., Дорохова Е. В., Беляев Н. А., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 2, С. 83–103

УДК 550.84.08 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).6

МЕТОДЫ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗАТОРА РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И СПОРНЫЕ ВОПРОСЫ

Е. А. Стрельцова[1], К. С. Якимова[1], Е. В. Дорохова[1,2], Н. А. Беляев[1]

[1] Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: Alena.st@mail.ru;
[2] Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Россия, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14

Проведены серии экспериментальных работ по определению валового гранулометрического состава донных осадков методом лазерной дифракции. Показано, что наличие песчаной фракции может существенно искажать результаты измерений. Обоснована необходимость предварительного отделения песчаной фракции перед приборным анализом. Рассмотрены возможные варианты объединения данных ситового и лазерного анализа в единый массив и связанные с этим методические трудности. Отдельно рассмотрен пограничный случай мономодального распределения с максимумом в области 63–100 мкм, приходящимся на границу разделения двух методов. На основе обобщения накопленного опыта описан единый методологический подход к определению гранулометрического состава донных осадков.

Ключевые слова: гранулометрический состав, лазерная дифракция, ситовой анализ, донные осадки

Введение

Гранулометрический состав осадков – один из основных его физических параметров. В мировой практике широко распространены методы генетической интерпретации данных детального гранулометрического анализа, где гранулометрические распределения и их статистические параметры рассматриваются с точки зрения источников осадочного вещества, механизмов осаждения и обстановок седиментации (Лисицын, 1956; Петелин, 1967; Свальнов, 2005). Однако методы определения гранулометрического состава имеют существенные различия, а сравнение результатов возможно лишь при условии применения единого методологического подхода.

Среди существующих методов определения гранулометрического состава можно назвать прямые и косвенные. К прямым относятся методы, позволяющие выделять необходимые фракции по линейным размерам и определять их процентное содержание при помощи взвешивания или подсчета (ситовой метод, микроскопический анализ). К косвенным можно отнести методы, основанные на зависимости некоторых физических

параметров (скорость осаждения частиц, угол рассеяния света) от гранулометрического состава. По изменению этих параметров можно судить о содержании в образце тех или иных размерностей зерен (седиментационный метод, лазерная дифракция) (Свальнов, 2005; Лисицын, 1956; Здобин, Семенова, 2011). У каждого из перечисленных методов имеются ограничения.

Ситовой анализ является старейшим классическим методом определения гранулометрического состава горных пород и рыхлых отложений (Рухин, 1947; Шванов, 1969). Он заключается в сухом или мокром просеивании образца через набор сит, расположенных в порядке убывания размера отверстий, для разделения на фракции с последующим взвешиванием и расчетом процентного содержания каждой фракции. Результат выражается в весовых (массовых) процентах. Нижний диапазон размера фракции в данном методе определяется как диаметр наименьшего отверстия, через которое частицы не могут пройти. Так как разделение частиц на фракции связано с их формой, удлиненные частицы, упавшие на сито короткой стороной, попадают в более мелкую фракцию (Асташкин, 2009). Нижний предел рабочего диапазона ситового анализа составляет обычно не менее 40 мкм и ограничен в основном технологией изготовления сит и физическими свойствами мелкодисперсного осадка.

Микроскопический анализ размеров частиц является самым затратным по времени и трудоемкости способом исследования гранулометрического состава. Метод используется при определении формы, морфологии и агрегированности частиц. Его суть заключается в измерении диаметров зерен или их площадей с помощью линейки, встроенной в окуляр, при подсчете зерен. Этим методом невозможно определить количество частиц пелитовой и мелкоалевритовой фракций, размеры которых менее 10 мкм.

Седиментационный анализ объединяет группу методов определения размеров зерен, основанных на скорости оседания частиц в жидкости (Андреева, 1998). Согласно закону Стокса, вычисляется их эквивалентный диаметр. Но поскольку закон Стокса имеет ограничения, появляются верхний и нижний пределы его применимости. Нижний предел принимается равным 0,5 мкм, а верхний составляет примерно 50–70 мкм и обусловлен турбулентными явлениями за счет высокой скорости оседания частиц. Поскольку в седиментационном анализе частицы физически разделяются по размеру в объеме и во времени, становится возможным выделение отдельных размерных фракций для дальнейших исследований (Лисицын, 1956; Свальнов, 2005). Седиментационные методы исторически сыграли ключевую роль в развитии морской геологии. Но в настоящее время их доля в практике геологических исследований уменьшается в связи с повышенной трудоемкостью, необходимостью большого количества анализируемого материала, малой производительностью метода и высокими погрешностями, связанными со свойствами анализируемого материала (разность плотностей, несферичность частиц).

В последнее время для определения размеров частиц все чаще используется метод лазерной дифракции (далее – лазерный анализ) (Rasmussen, 2020; Laible et al., 2023). Метод основан на принципе отклонения лазерного луча на разные углы при отражении

от частиц разного размера. По результатам математической обработки параметров рассеяния лазерного излучения производится расчет гранулометрического состава. Диапазоны измерений могут различаться в зависимости от марки прибора. В современной практике метод лазерной дифракции является основным и наиболее востребованным методом определения гранулометрического состава. Он широко применяется в производственных областях, где строгий контроль дисперсности критически важен для обеспечения заданных свойств конечного продукта, например, в фармацевтике, производстве цемента, керамики, косметики. Но, несмотря на распространенность метода лазерной дифракции, его применимость в практике морской геологии требует методической доработки. Исследователи сталкиваются с одними и теми же проблемами, но каждый решает их по-своему. В результате появляются большие массивы данных, сравнение которых между собой вызывает затруднение. Лазерный анализ применяется в основном для пелито-алевритовых фракций, а для измерения природных полидисперсных образцов с широким размерным диапазоном и присутствием песчаных частиц существуют ограничения. Как упоминалось ранее, метод лазерной дифракции был разработан для применения в производственных областях, где редко встречаются смеси с полным диапазоном измеряемых фракций. Для однородных мелкодисперсных мономодальных смесей результат в виде объемного распределения частиц по размерам является информативным и точным. Однако при анализе полимодальных природных образцов возникают трудности, изложенные ниже.

Высокая скорость метода лазерной дифракции и хорошая воспроизводимость результатов для пелито-алевритовых фракций позволяет относительно быстро получать большие наборы гранулометрических данных. Это дало возможность массово применять генетический анализ и повысило качество палеогеографических реконструкций с использованием гранулометрических данных. Однако, зачастую для определения механизмов седиментации и источников осадочного материала необходимо знать гранулометрические распределения отдельных компонентов осадка, например, терригенной или биогенной составляющих, например, (McCave et al., 1995; McCave, Hall, 2006). В таком случае гранулометрический анализ для одного и того же образца может выполняться несколько раз после последовательного растворения биогенных компонентов (карбонатов, кремнезема).

Таким образом, наиболее распространенными методами определения гранулометрического состава в морской геологии в настоящее время являются ситовой анализ и лазерная дифракция, а также комбинация двух методов (Ломтадзе, 1990). При комбинации ситового и приборного анализов возникает вопрос выбора и обоснования границы разделения. Исторически в российской научной школе была принята десятичная схема ранжирования классов обломочных пород, где граница песка находится в диапазоне от 50 до 100 мкм. В отечественной шкале нижняя граница песчаной фракции составляет 100 мкм (Безруков, 1960), или 50 мкм (Рухин, 1969; Шванов, 1969; Фролов, 1992). Основу для выбора границы разделения песок/алеврит закладывают физико-механические свойства частиц. В настоящей работе авторы принимают границу песок/алеврит, которую проводят по логарифмической шкале

Вентворса (Wentworth, 1922): пелит (<2 мкм), алеврит (2–63 мкм), песок (>63 мкм). Используемая нами шкала Вентворса широко применяется в международной практике. Это позволяет сопоставлять полученные данные с мировыми исследованиями. Вместе с тем публикация полных таблиц измерений позволяет пересчитать данные согласно любой из общепринятых шкал.

Целью наших исследований является обоснование единого методологического подхода к определению гранулометрического состава донных осадков. В настоящей работе на основе обобщения накопленного опыта и серии экспериментальных работ обсуждаются сопутствующие спорные вопросы и возникающие трудности, а также предлагаются варианты решения методических проблем. Также рассматриваются методы удаления биогенных компонентов из валового (натурального) осадка и формулы расчета гранулометрических распределений этих компонентов.

Материалы

Данная методическая работа появилась в результате обобщения накопленного опыта гранулометрического анализа методом лазерной дифракции более тысячи образцов донных осадков шельфовых морей и Атлантического океана, выполняемого в аналитических лабораториях ИО РАН. Полученные результаты легли в основу ряда научных статей (Баширова и др., 2017; Сивков и др., 2015; Стрельцова и др., 2024; Ульянцев и др., 2024; Belyaev et al., 2024; Dorokhova, 2026; Dorokhova et al., 2026; McCave, 2008; Ovsepyan et al., 2025; Ulyantsev et al., 2023). Параллельно проводились серии экспериментальных работ для усовершенствования методики гранулометрического анализа проб широкого размерного диапазона частиц.

Материалом для экспериментальной части представленной работы послужила коллекция донных осадков ИО РАН и приготовленные на ее основе модельные смеси путем выделения на ситах интересующих размерных фракций. Для приготовления модельных смесей использовались поверхностные донные осадки, отобранные в акватории Карского моря в экспедициях по программе «Экосистемы морей Сибирской Арктики» в 54-м, 59-м и 92-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2007–2024 гг.) и рейсе НИС «Профессор Молчанов» (2019 г.). Используемые образцы представляют собой терригенные осадки, обломочная часть которых содержит преимущественно кварц (более 95 %) с окатанностью зерен 1–2 класса (Рухин, 1969).

Модельные смеси для экспериментов, описанных в настоящей работе, были приготовлены следующим образом. Для первой группы экспериментов к алеврито-пелитовому осадку, промытому на сите с размером ячеек 63 мкм и высушенному до постоянного веса, добавлялась фракция песка >63 мкм от 20 до 50 % по массе. Полученные смеси с известным содержанием песка анализировались на лазерном анализаторе. Масса каждой смеси составляла 10 г.

Модельная смесь для второй группы экспериментов приготовлена выделением на ситах путем мокрого ситования фракции 50–125 мкм. Выделенная фракция

анализировалась на приборе, затем высушивалась до постоянного веса и взвешивалась. Масса выделенной фракции составила около 5 г. Далее высушенная фракция рассеивалась сухим способом на сите с размером ячеек 63 мкм на две части, соответственно, 50–63 мкм и 63–125 мкм. Обе части взвешивались и анализировались на приборе. Таким образом, ситовым методом была получена фракция 63–125 мкм, а внутри нее определено весовое соотношение фракций 63–125 мкм к 50–63 мкм. В выделенных размерных диапазонах частицы имеют одинаковый минеральный состав и окатанность, а следовательно, и удельный вес, поэтому в данном эксперименте отношение масс равно отношению объемов в каждой фракции.

Методы

Основные этапы совместного гранулометрического анализа ранее были изложены в статье (Streltsova, 2025), где описан метод определения алевритовой и пелитовой фракций осадка методом лазерной дифракции с предварительным отделением песчаного материала промывкой через сито и одновременного рассева песка на колонне сит. Для оптимизации процесса предлагается деление исходного образца на две навески для выделения частиц песчаных и алеврито-пелитовых размеров и их параллельный анализ. Полученные в результате ситового и лазерного анализов данные объединяются в единый массив суммированием и пересчетом общего размерного ряда на 100 % (комбинированный метод). Однако обоснованность необходимости предварительной отситовки песчаной фракции и возможные варианты объединения данных в единый массив были рассмотрены недостаточно подробно. Для решения этих вопросов нами были проведены эксперименты с модельными смесями.

Ситовой анализ проводился с использованием набора лабораторных сит из нержавеющей стали (диаметр сита 70 мм, высота обечайки 38 мм) производства НПО «Лаборкомплект» с размером ячеек 50 мкм, 63 мкм, 125 мкм.

Гранулометрический анализ выполнен на лазерном анализаторе частиц SHIMADZU SALD 2300, Япония. Заявленный диапазон измерения данного прибора находится в пределах от 0,017 мкм до 2500 мкм, что потенциально позволяет измерять как тонкодисперсные алеврито-пелитовые осадки, так и смешанные, с высоким содержанием песчаной фракции.

Для описания типа образцов донных осадков, из которых создавались модельные смеси, использовался поляризационный микроскоп ПОЛАМ Л-213М с окулярами 10X и объективами 2,5X, 10X, 25X, 40X (планахроматические) и 60X (ахроматический). Фотографии частиц выделенных размерных фракций выполнены с использованием бинокулярного стереоскопического микроскопа Olympus SZX16 с увеличением 7-115X (увеличение трансфокатора 0.7-11.5X, парфокальный объектив 1X, окуляры 10X). Камера для микроскопа – ADF PRO20 (20 Мп). Программа для съемки – ADFImageCapture, версия 4.11.

Результаты экспериментов

Первая группа экспериментов проводилась для обоснования необходимости предварительного отделения частиц песчаной фракции перед лазерным анализом. Результат эксперимента на модельной смеси с известным содержанием фракции >63 мкм представлен на рисунке 1.

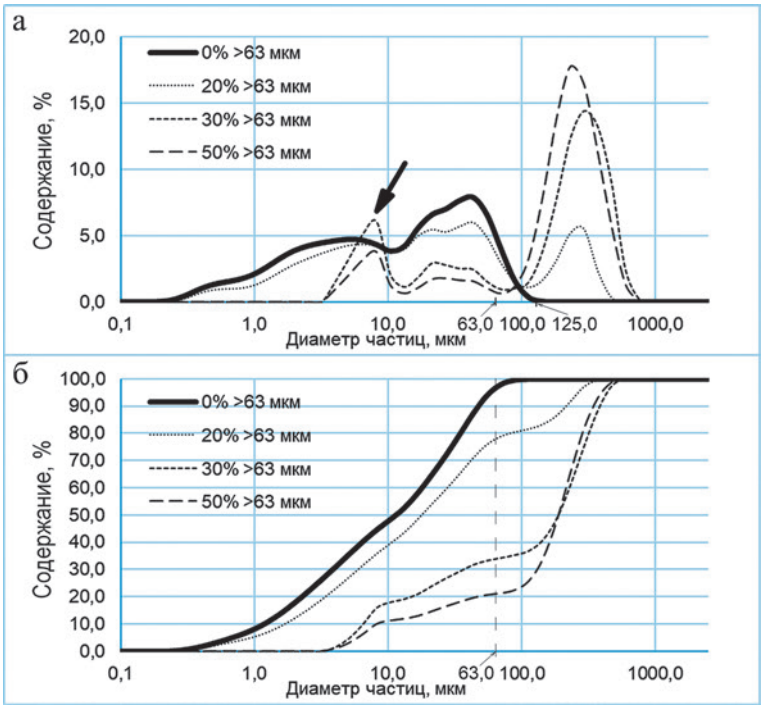


Рис. 1 – Результат эксперимента на модельной смеси с известным содержанием фракции >63 мкм, обозначенным разным типом линий: **а** – гранулометрические распределения; **б** – кумулятивные кривые

Эксперимент показал, что перед анализом методом лазерной дифракции возникает необходимость предварительного отделения частиц песчаной фракции по ряду причин. Во-первых, в ходе лазерного анализа при добавлении песка профиль распределения пелитовой и алевритовой фракций искажается (рисунок 1). Расхождение в измеренном содержании песчаной фракции с известными массовыми концентрациями достигает 36 % при содержаниях песка более 20 %. При содержании песка в пробе 30 % и более лазерный анализатор завышает долю алевритовой фракции за счет пелитовой. Сигнал от пелитовых частиц не регистрируется из-за эффекта «затенения», в результате чего на графике (рисунок 1а) появляется пик в диапазоне 5–10 мкм (обозначен стрелкой). Во-вторых, невозможно добиться равномерной циркуляции частиц песчаной фракции через измерительную ячейку из-за различного гидродинамического сопротивления частиц разного размера и различного количества зерен разного размера. В-третьих, нестабильность отбора аликвоты на анализ подтверждает необходимость отделения песчаной фракции. Данные три фактора обосновывают предварительный отсев песчаных частиц,

самые крупные из которых (>1000 мкм) к тому же могут повредить измерительную ячейку анализатора.

Вторая группа экспериментов выполнялась для исследования возможных способов объединения результатов лазерного анализа с данными ситового анализа. Рассмотрен пограничный случай, когда распределение мономодально и его максимум находится в области 63–100 мкм.

Приготовленная модельная смесь (50–125 мкм) и ее фракции (50–63 мкм и 63–125 мкм) были проанализированы на лазерном анализаторе. Гранулометрические кривые фракций 50–63 мкм, 63–125 мкм и 50–125 мкм представлены на рисунке 2 в масштабе, пропорциональном известному весовому процентному содержанию этих фракций. Также пунктирной линией показана интегральная кривая распределения (интегральный метод), построенная на основе суммарных значений двух кривых (50–63 мкм и 63–125 мкм). Результаты измерений представлены в таблице 1.

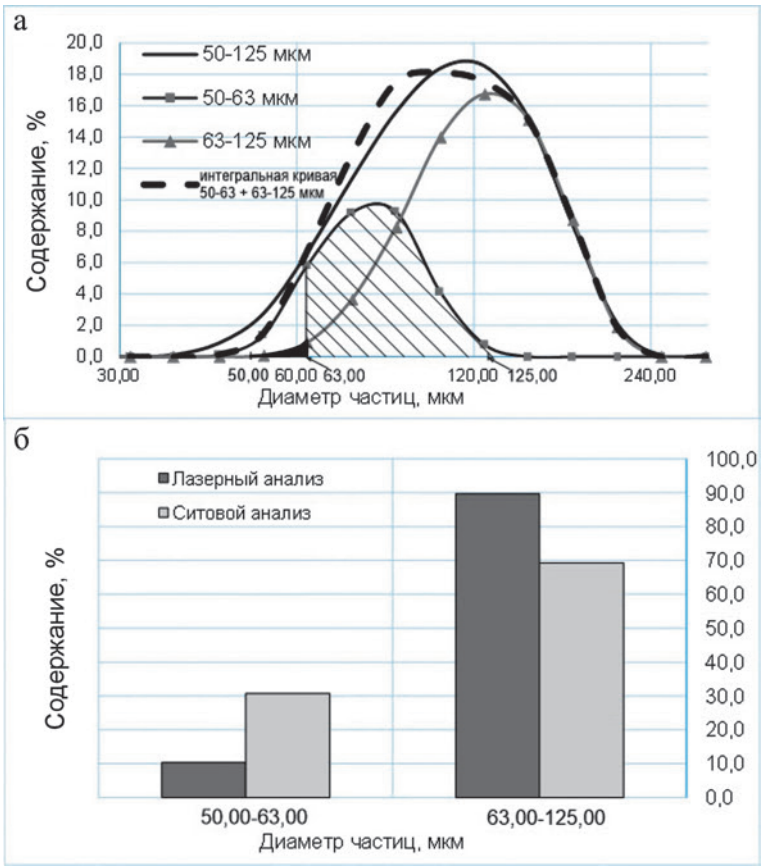


Рис. 2 – Результат эксперимента на модельной смеси с выделенной фракцией 50–125 мкм:
а – результаты лазерного анализа; **б** – сравнение ситового и лазерного анализов

Из рисунка 2а видно, что для фракции 63–125 мкм доля частиц 50–63 мкм, определенных методом лазерной дифракции, не превышает 2 % (закрашенная область на рисунке 2а). Это позволяет говорить о практическом отсутствии мелких частиц в предварительно отситованной песчаной фракции. Однако основная доля выделенной ситовым способом фракции 50–63 мкм лазерным анализатором измеряется

как фракция 63–125 мкм с модальным диаметром 80 мкм (в показаниях лазерного анализатора обнаруживается 76 % частиц крупнее 63 мкм – область, выделенная штриховкой на рисунке 2а). Модальный диаметр фракции 63–125 мкм также смещен в область более крупных частиц и составляет 128 мкм. Интегральная кривая 50–63 мкм + 63–125 мкм практически совпадает с результатами определения неразделенной фракции – 50–125 мкм, модальный диаметр – 105–110 мкм. Результаты эксперимента показывают, что при определении размеров песчаных частиц методом лазерной дифракции происходит сдвиг размерной кривой в область более крупных значений по сравнению с ситовым методом.

Табл. 1 – Гранулометрический состав модельной смеси с выделенной фракцией 50–125 мкм

Способ определения	**Гранулометрический состав модельной смеси осадков, %**				
	<50	50–63 мкм	63–125 мкм	>125	50–125 мкм
	<63 мкм		**>63 мкм**		
Ситовой анализ	0,0	30,7	69,3	0,0	100,0
	30,7		**69,3**		
Лазерный анализ	3,7	6,7	63,8	25,8	100,0
	10,4		**89,6**		
Комбинированный метод	1,5	5,8	92,7	0,0	100,0
	7,3		**92,7**		
Интегральный метод	1,6	6,7	66,0	25,7	100,0
	8,3		**91,7**		

Из полученных данных видно, что в рассматриваемом размерном диапазоне 50–125 мкм данные лазерного анализа неразделенной смеси и ее отдельных фракций сопоставимы друг с другом, однако имеют существенное расхождение с ситовым методом. Учитывая, что в предыдущих исследованиях показана хорошая сходимость при сравнении результатов лазерного и ситового анализа для сферических частиц (Blott, Pye, 2006), мы предполагаем, что выявленное нами различие возникло в результате: 1) высокого содержания частиц неизометричной (вытянутой) формы в модельной смеси, которые попали в более мелкую фракцию при ситовании; 2) производственного допуска и эксплуатационного износа сит, также способствующего проникновению более крупных частиц в меньшую фракцию; 3) завышения содержания фракций в лазерном анализе. Последнее, по данным Blott, Pye (2006) обусловлено как программным сглаживанием границ выделенных фракций до логнормальных, так и более высоким шумом в дифракционных данных, собранных при малых углах (дифракция крупных частиц), по сравнению с большими углами (дифракция мелких частиц). Поскольку невозможно точно выделить процентный вклад каждого фактора, мы предполагаем, что решающую роль играют первые два. Это подтверждают прямые измерения форм частиц и фотографии ячеек сит под микроскопом (рисунок 3).

Методические проблемы и спорные вопросы

Важным вопросом, возникающим при определении гранулометрического состава совмещенным методом, является объединение полученных данных в единый массив. Здесь нужно обратить внимание на распределение по размерам зерен неизометричной формы (рисунок 3а). При тщательном механическом просеивании через сито фракции будут охарактеризованы по своему минимальному размеру, тогда как при исследовании на лазерном анализаторе – по среднему. Кроме того, любое сито имеет производственный допуск и эксплуатационный износ, и фактическим размером ячеек является диапазон вокруг номинального значения (рисунок 3б). В результате во фракции <63 мкм после промывки могут оказаться более крупные частицы, которые при измерении зафиксирует прибор.

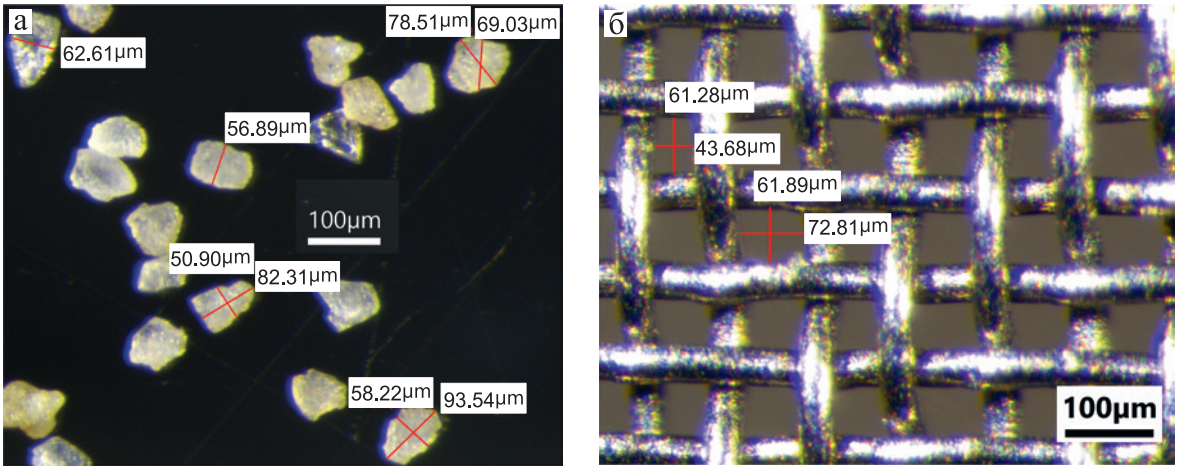


Рис. 3 – Фотографии частиц размерной фракции 50–63 мкм (**а**) и ячеек сита 63 мкм (**б**) под бинокулярным стереоскопическим микроскопом

Второй основной причиной расхождения процентного содержания песчаных фракций, определенных различными методами, является использование в лазерных анализаторах процедур сглаживания распределения до лог-нормального (Blott, Pye, 2006). В этом случае наибольшая ошибка возникает, если песчаные фракции имеют асимметричное распределение (модальный, средний и медианный диаметр сильно расходятся) и узкий диапазон размеров, как во втором эксперименте с модельной смесью.

Отдельная проблема при объединении результатов заключается в способах выражения процентного содержания фракций. Данные ситового анализа выражаются в массовых процентах, а приборного – в объемных. Аналогичная проблема наблюдается при комбинации седиментационного анализа с ситовым. Для свода данных в единый массив необходимо учитывать удельный вес минералов в каждой фракции, что является затруднительным. Переход от объемных процентов к весовым возможен лишь при допущении о равенстве плотностей (ρ) всех частиц во всех фракциях (n). Тогда объемный процент, рассчитанный по формуле $\varphi = (V_n/V)\times 100$ %, будет соответствовать

массовому проценту $\omega = (m_n/m)\times 100\ \% = (\rho V_n/\rho V)\times 100\ \% = (V_n/V)\times 100\%$, и эти величины возможно объединять суммированием.

При объединении полученных результатов совмещенного анализа в одном и том же классе крупности ситовой и приборной шкалы могут оказаться отличные от нуля величины относительных процентов. Возможны разные варианты объединения данных. В одном варианте фракция крупнее 63 мкм в показаниях лазерного анализатора объединяется с алевритовыми фракциями. В этом случае предполагается, что после предварительного просева частицы этого размера не должны были попасть во фракцию <63 мкм, и показания лазерного анализатора в этой фракции являются ошибочными. Однако, как показано выше, при неизометричной форме частиц и тщательном просеве некоторая доля частиц крупнее 63 мкм может попасть в часть пробы, анализируемую на приборе. Кроме того, не зная размерного состава этих частиц, их невозможно пропорционально распределить по отдельным фракциям алеврита, поэтому такой способ суммирования является некорректным.

Во втором возможном варианте фракция крупнее 63 мкм полностью исключается при объединении с результатами ситового анализа. Данный вариант также неверный, поскольку прибор фиксирует частицы песка, которые могли пройти сквозь ячейки сита, больше номинального значения 63 мкм.

В настоящей работе предлагается использовать комбинированный метод. Принимая, что показания лазерного анализатора отражают реальное содержание песчаных частиц, попавших в пробу после отсева, при комбинированном методе проводится суммирование приборных значений во фракциях крупнее 63 мкм с данными ситового анализа и пересчет общего размерного ряда на 100 %.

Несмотря на представленное обоснование использования комбинированного метода для полигранулярных осадков (миктитов), при анализе более однородных осадков следует избегать одновременного использования методов с разной физической основой. По возможности рекомендуется использовать либо один метод, либо не объединять результаты анализов и рассматривать их раздельно, как, например, при выявлении механизмов транспорта осадков в Восточно-Сибирском море (Ovsepyan et al., 2025).

При необходимости также возможно проводить анализ валового образца на лазерном анализаторе с целью сравнения результатов с ранее полученными данными методом лазерной дифракции. Однако нужно учитывать, что единичные крупные зерна, которые несут важную информацию, могут не попасть в ячейку прибора и остаться неучтенными.

Следует подчеркнуть, что для описанного эксперимента со второй модельной смесью была искусственно выделена фракция 50–125 мкм с максимальным содержанием частиц песка размером 63–125 мкм. Однако в морских терригенных осадках диапазон 63–125 мкм в большинстве случаев соответствует минимуму гранулометрического распределения, что подтверждается многочисленными предыдущими исследованиями, например, (Шванов, 1969; Романовский, 1977; и др.) и продемонстрировано на рисунке 1. В результате содержание этой фракции в осадке обычно не превышает 10 %, а разница

между ситовым и лазерным анализом составляет первые проценты. Таким образом, суммирование значений пересекающихся фракций существенно не повлияет на результаты анализа, однако использование единообразной методики обсчета позволит сравнивать данные, полученные различными научными группами.

Гранулометрический состав терригенных/обломочных осадков

Рекомендованная методика гранулометрического анализа проб широкого размерного диапазона частиц

Совмещенный ситовой и лазерный анализы, описанные в настоящей работе, проводятся параллельно. Гомогенизированный валовый образец натуральной влажности изначально делится на две навески, одна из которых подвергается промывке через сито с размером ячеек 63 мкм. Фракции алеврита и пелита собираются в стеклянный стакан. К промытому образцу добавляется раствор гексаметафосфата натрия и оставляется на сутки. Перед анализом образец обрабатывается ультразвуком в течение 5 минут для разрушения агрегатов частиц. После этого стакан помещается на магнитную мешалку для гомогенизации его содержимого. Интенсивное перемешивание необходимо для однородности распределения частиц разного размера в объеме жидкости, попадающей в измерительную ячейку. Представительная аликвота, отобранная из стакана, вводится в проточную ячейку лазерного анализатора до достижения необходимого для измерения абсорбционного диапазона. Далее проводится ультразвуковая обработка в ячейке прибора в течение 1 минуты. Результаты фиксируются после стабилизации размерной кривой.

Вторая навеска используется для ситового анализа. Для этого она высушивается до постоянного веса и взвешивается. Песчаная фракция крупнее 63 мкм выделяется путем промывания на соответствующем сите. Высушенная проба подвергается сухому рассеву на колонне сит. Отдельные фракции взвешиваются на аналитических весах для дальнейшего расчета процентного содержания каждой фракции.

Определение гранулометрического состава комбинированным методом также можно проводить из одной навески. Однако работа с двумя навесками имеет ряд преимуществ. Для приборного анализа используется небольшая влажная навеска, чтобы исключить неточности определения, связанные со спеканием тонких фракций при сушке. Вторая большая (насколько позволяет количество материала) навеска высушивается и используется в ситовом анализе для повышения точности взвешивания. Кроме того, появляется возможность многократной тщательной промывки при отделении пелитовой и алевритовой фракций. Поэтому, чтобы минимизировать погрешность в определении гранулометрического состава, совмещенный ситовой и приборный анализ предпочтительно проводить параллельно из двух навесок. Практика показала, что это также ускоряет процесс. При проведении ситового анализа из параллельной навески возможна комбинация сит любого размера в диапазоне 50–2000 мкм с целью

выделения интересующих фракций, например, 50–63–100–125 мкм и т. д. для сравнения с ранее полученными данными. Однако приборный анализ осуществляется для фракции <63 мкм, как было оговорено выше.

В таблице 2 приводится последовательность анализа гранулометрического состава, необходимые материалы и потенциальные трудности.

Табл. 2 – Валовый совмещенный анализ размеров частиц

№	Последовательность анализа	Необходимые материалы	Результат	Примечание
1	Гомогенизация валовой пробы и деление на 2 навески	Чашка Петри, лабораторный шпатель	Два гомогенизированных образца 2–3 г и 5–10 г	Используется метод квартования; деление ориентировочное, без точного взвешивания
Анализ размеров частиц на лазерном анализаторе				
2	Промывка 2–3 г влажной пробы через сито, сбор пелито-алевритовой фракции	Сито с размером ячеек 63 мкм, кисточка, стеклянный стакан, промывалка, дистиллированная вода	Суспензия в стакане; приблизительный объем 100–200 мл	Тщательная промывка, удлиненные частицы с наименьшим размером <63 мкм проходят через сито и попадают в стакан
3	Добавление диспергатора	0.7 % раствор гексаметафосфата натрия ($Na_6P_6O_{18}$)	Суспензия с диспергатором в стакане	Объем диспергатора эквивалентен объему суспензии в стакане; оставить на сутки для необходимого воздействия диспергатора
4	Диспергация в течение 5 минут на УЗ ванне	Ультразвуковая ванна	Суспензия с диспергатором в стакане, обработанная ультразвуком	При измерении валовой непромытой пробы время диспергации при необходимости может быть увеличено
5	Гомогенизация пробы в стакане	Магнитная мешалка, магнит для мешалки	Готовый к приборному анализу образец	Максимальная скорость вращения мешалки; не обеспечивает отбор одинаковых аликвот песчаных частиц в валовой пробе даже при максимальных оборотах мешалки
6	Анализ на лазерном анализаторе частиц	Анализатор частиц, пипетка для ввода аликвоты	Зафиксированная кривая распределения частиц по размерам	УЗ обработка в течение 1 минуты в приборе перед измерением обеспечивает стабильность распределительной кривой
Ситовой анализ размеров частиц				
7	Взвешивание гомогенизированной влажной пробы (5–10 г)	Аналитические весы	Вес влажной пробы	Необходимо для попутного определения влажности
8	Высушивание при 60°С до постоянного веса (1–2 суток)	Сушильный шкаф	Сухой валовый образец	При высушивании возможно спекание частиц пелита и мелкого алеврита
9	Взвешивание сухой пробы, определение влажности	Аналитические весы	Общий вес сухого образца	Необходимо для дальнейших расчетов

Продолжение табл. 2

№	Последовательность анализа	Необходимые материалы	Результат	Примечание
10	Промывка высушенной пробы через сито, сбор песчано-гравийной фракции	Сито с размером ячеек 63 мкм, кисточка, стеклянный стакан, промывалка, дистиллированная вода	Промытая фракция >63 мкм на сите	Тщательная промывка, удлиненные частицы с наименьщим размером <63 мкм проходят через сито; при необходимости сбор мелкой фракции <63 мкм на отдельные сита
11	Высушивание при 60°С собранной фракции >63 мкм	Сушильный шкаф	Сухая фракция >63 мкм	Высушивание до постоянного веса (1–2 суток)
12	Взвешивание сухой фракции >63 мкм	Аналитические весы	Общий вес фракции >63 мкм	Можно также определить по сумме выделенных фракций на следующем этапе
13	Сухой рассев фракции >63 мкм на колонне сит и взвешивание отдельных фракций	Сита с размером ячеек 2 мм, 1 мм, 500 мкм, 250 мкм и 125 мкм, аналитические весы	Вес выделенных фракций	Возможен мокрый рассев, а также использование сит других размеров, в зависимости от дальнейших задач

Данные, полученные в результате ситового и приборного анализа, объединяются в единый массив. Для возможности учета возникающей ошибки и выполнения собственных расчетов другими исследователями рекомендуется при публикации результатов приводить полный массив данных отдельно по результатам лазерного и ситового анализов.

Гранулометрический состав отдельных компонентов осадков

Данный метод применяется для исследования отдельных компонентов осадка после удаления органического вещества, карбоната кальция, аморфного кремнезема. В таблице 3 представлена методика, основанная на существующих схемах последовательного растворения биогенных составляющих осадка (McCave et al., 1995; McCave, Hall, 2006).

Табл. 3 – Пробоподготовка образцов с предварительным растворением отдельных компонентов

№	Последовательность анализа	Необходимые материалы
Удаление органического вещества		
1	Добавление к 3–4 г пробы натуральной влажности дистиллированной воды и перекиси водорода (оставить на сутки)	Стеклянный стакан, дистиллированная вода и концентрированная перекись водорода (ЧДА) в соотношении 1:2 (десятикратный объем)
2	Уменьшение скорости реакции путем добавления воды при высоких концентрациях органического вещества (>1–2 % масс.)	Дистиллированная вода

Продолжение табл. 2

№	Последовательность анализа	Необходимые материалы
3	Кипячение пробы в течение 1 минуты для окончательного испарения продуктов реакции	Электрическая плитка
Удаление карбоната кальция		
1	Добавление к пробе дистиллированной воды и соляной кислоты (оставить на сутки)	Стеклянный стакан, 10 мл дистиллированной воды, 30 мл 1Н соляной кислоты
2	Кипячение в течение 5 минут	Электрическая плитка
3	Промывка до нейтрального pH – стакан с пробой заливается дистиллированной водой доверху (оставить на сутки для оседания осадка)	Дистиллированная вода
4	Через сутки раствор сливается (повторяется трижды)	Дистиллированная вода, лакмусовая индикаторная бумага
Удаление биогенного кремния		
1	Перевод декарбонизированной пробы в пробирку	Пластиковая пробирка
2	Добавление раствора NaOH, интенсивное перемешивание	10 мл 1М раствора NaOH
3	Нагревание (10 минут до 90 °C) и перемешивание (повторяется дважды)	Водяная баня
4	Центрифугирование (15 минут, скорость не менее 2.5 тыс. оборотов)	Центрифуга
5	Сливание прозрачного раствора, промывка осадка до нейтрального pH	Дистиллированная воды, 3 мл 1Н раствора соляной кислоты, лакмусовая индикаторная бумага
6	Центрифугирование	Центрифуга
7	Контроль pH, нейтрализация среды	Лакмусовая индикаторная бумага, соляная кислота, гидроксид натрия (при необходимости)

В случае низких концентраций органического углерода этап удаления органики можно исключить. После удаления органического вещества при необходимости выполняется растворение карбоната кальция. В зависимости от процентного содержания карбонатов в пробе количество соляной кислоты может быть увеличено, кислота добавляется до прекращения реакции. После растворения карбоната кальция при необходимости выполняется удаление биогенного кремния. Дальнейшая пробоподготовка производится аналогично валовым пробам.

Последовательный гранулометрический анализ валового осадка и после растворения отдельных компонентов позволяет рассчитать распределения этих компонентов: биогенных карбонатных и кремнистых, а также минеральных. Расчет проводится путем поочередного вычитания гранулометрических распределений с учетом содержаний этих компонентов по данным химических анализов (содержания карбоната кальция и аморфного кремнезема). Расчет гранулометрических распределений карбонатных компонентов ($f(d\text{ч})\text{карб}$) выполняется по формуле:

$$f(d\text{ч})\text{карб} = f(d\text{ч})\text{в} - (1-\text{К})f(d\text{ч})\text{б},$$

где $f(d\text{ч})\text{в}$ – гранулометрическое распределение валового осадка, $f(d\text{ч})\text{б}$ – гранулометрическое распределение бескарбонатного осадка (McCave et al., 1995; McCave,

Hall, 2006). При этом подразумевается, что валовый осадок (В) состоит из трех компонентов, содержания которых в сумме дают единицу: минеральной (М), биогенных карбонатной (К) и кремнистой (Кр), В = М + К + Кр = 1.

Гранулометрические распределения биогенных кремнистых компонентов ($f(d\text{ч})$крем) рассчитываются по аналогичной формуле:

$$f(d\text{ч})\text{крем} = f(d\text{ч})\text{б} - (1-\text{Кр})f(d\text{ч})\text{м},$$

где $f(d\text{ч})$м – гранулометрическое распределение минерального осадка.

На рисунке 4 представлен пример гранулометрических распределений валового образца и его отдельных компонентов после их последовательного удаления в результате химической пробоподготовки.

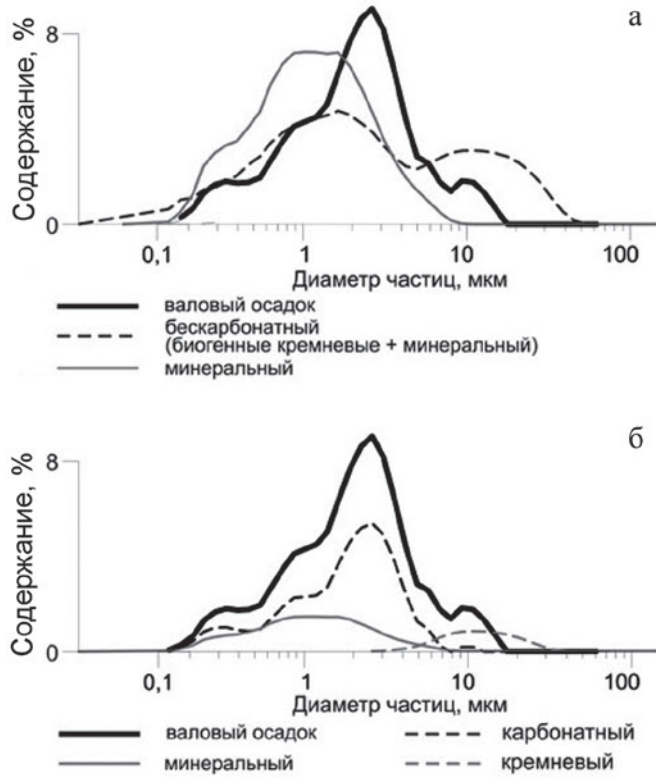


Рис. 4 – Гранулометрические распределения осадка с содержанием карбоната кальция 70 % (преимущественно кокколиты) и биогенного кремнезема около 15 % (диатомеи). Горизонт 14–15 см колонки V53-C1, отобранной в северной долине зоны трансформного разлома Чарли-Гиббс (Dorokhova et al., 2026; Dorokhova, 2026)

Заключение

Несмотря на широкое использование метода лазерной дифракции в производственных областях, до настоящего времени в отечественной литературе отсутствовало подробное описание особенностей его применения для исследований в области морской геологии.

По результатам проведенной методической работы установлено, что совмещенный метод определения гранулометрического состава донных осадков является наиболее точным и производительным. Он сочетает в себе ситовой и лазерный анализы. Необходимость использования ситового и лазерного методов при анализе образцов с высоким содержанием песчаной фракции была обоснована серией экспериментальных работ на модельных смесях, приготовленных из коллекции донных осадков ИО РАН. Показано, что перед анализом методом лазерной дифракции возникает необходимость предварительного отделения частиц песчаной фракции.

Добиться абсолютной точности в определении совмещенным методом не представляется возможным, однако единый методический подход позволит сравнивать данные между собой, а публикация полных массивов данных позволит сделать любые пересчеты для решения поставленных задач.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2024-0019. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

1. *Андреева И. А., Лапина Н. Н.* Методика гранулометрического анализа донных осадков Мирового океана и геологическая интерпретация результатов лабораторного изучения вещественного состава осадков. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1998. 45 с.
2. *Асташкин Д. А.* Определение гранулометрического состава пород лазерным анализатором // Научно-методический журнал «Геология и разведка». Известия высших учебных заведений. 2009. № 2. С. 60–66. EDN: KYQECN
3. *Баширова Л. Д., Дорохова Е. В., Сивков В. В., Андерсен Н., Кулешова Л. А., Матуль А. Г.* Палеотечения в районе разлома Чарли-Гиббс в позднечетвертичное время // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 491–502. EDN: YTLWPX. https://doi.org/10.7868/S0030157417020034
4. *Безруков П. Л., Лисицын А. П.* Классификация осадков современных морских водоемов // Труды Института океанологии. 1960. Т. 32. С. 3–14.
5. *Здобин Д. Ю., Семенова Л. К.* О гранулометрическом анализе глинистых грунтов: лазерные и классические методы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 6. С. 560–567. EDN: OJWQDF
6. *Лисицын А. П.* К обработке результатов механического анализа морских осадков // Труды Института океанологии. 1956. Т. 19. С. 262–287.
7. *Ломтадзе В. Д.* Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: Учебное пособие для вузов. 2-е изд.: перераб. и доп. Ленинград: Недра, 1990. 328 с. ISBN 5–247–01375–1. https://www.geokniga.org/books/18658
8. *Петелин В. П.* Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
9. *Романовский С. И.* Седиментологические основы литологии. Л.: Недра, 1977. 408 с. https://lithology.ru/system/files/books/romanovski.pdf
10. *Рухин Л. Б.* Гранулометрический метод изучения песков. Л., 1947. 211 с.
11. *Рухин Л. Б.* Основы литологии. Учение об осадочных породах. Л., 1969. 703 с. https://lithology.ru/node/860
12. *Свальнов В. Н., Алексеева Т. Н.* Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с. ISBN 5-02-032654-2. EDN: QKETVT

13. *Сивков В. В., Дорохова Е. В., Баширова Л. Д.* Контурные течения Северной Атлантики в последнем ледниковом цикле // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 994–1000. EDN: UVEPIL. https://doi.org/10.7868/S0030157415060180
14. *Стрельцова Е. А., Беляев Н. А., Федулов В. Ю., Пушкарева Е. М.* Гранулометрический состав, органический углерод и геохимические маркеры в поверхностном слое донных осадков северо-восточной части Карского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 2. С. 354–363. EDN: RULYWH. https://doi.org/10.31857/S0030157424020117
15. *Ульянцев А. С., Стрельцова Е. А., Чаркин А. Н.* Гранулометрические характеристики поверхностных донных осадков Чаунской губы // Океанология. 2024. Т. 64. № 3. С. 509–525. EDN: QCAJQM. https://doi.org/10.31857/S0030157424030117
16. *Фролов В. Т.* Литология. Кн. 1: Учеб. пособие: М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с. ISBN 5-211-02865-1. https://djvu.online/file/m7psuxE2FMc8t
17. *Шванов В. Н.* Песчаные породы и методы их изучения (распространение, структуры, текстуры). Л.: Недра, 1969. 213 с. https://lithology.ru/system/files/books/shvanov_pes_m.pdf
18. *Belyaev N. A., Lyubimov I. V., Fedulov V. Y., Streltsova E. A., Afanasyeva M. S., Danilova N. A., Kolyuchkina G. A.* Supply of inorganic carbon to bottom sediments of the North-Eastern shelf of the Black Sea // Oceanology. 2024. Vol. 64. No. S1. P. S170–S182. EDN: GGSDDG. https://doi.org/10.1134/S0001437024700978
19. *Blott S. J., Pye K.* Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape // Sedimentology. 2006. Vol. 53 (3). P. 671–685. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00786.x
20. *Dorokhova E. V.* Size versus sorting: textural trends in the polyfacial sediments of the Charlie-Gibbs fracture zone contourite drifts (North Atlantic) // Geo-Marine Letters. 2026. Vol. 46. No. 2. P. 2–10. EDN: VKFZZY. https://doi.org/10.1007/s00367-025-00835-3
21. *Dorokhova E. V., Sokolov S. Y., Ponomarenko E. P., Bashirova L. D., Pugacheva T. L., Urazmuratova Z. F., Laskina D. N., Dobrolyubova K. O.* Current-controlled sedimentation in a megatransform system: a case study of the Charlie-Gibbs Fracture Zone // Geological Society, London, Special Publications, 2026. 553. EDN: KHVEEB. https://doi.org/10.1144/sp553-2023-138
22. *Laible J., Camenen B., Le Coz J., Pierrefeu G., Mourier B., Lauters F. & Dramais G.* Comparison of grain size distribution measurements of sand-silt mixtures using laser diffraction systems // Journal of Soils and Sediments. 2023. Vol. 23. P. 2310–2325. EDN: CSDIKQ. https://doi.org/10.1007/s11368-023-03470-6
23. *McCave I. N.* Size sorting during transport and deposition of fine sediments: sortable silt and flow speed. In: Developments in Sedimentology / M. Rebesco and A. Camerlenghi (eds). 2008. Vol. 60. P. 121–142. https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)10008-5
24. *McCave I. N., Manighetti B. and Robinson S. G.* Sortable Silt and Fine Sediment Size/Composition Slicing: Parameters for Paleocurrent Speed and Paleoceanography // Paleoceanography. 1995. Vol. 10. P. 593–610. https://doi.org/10.1029/94PA03039
25. *McCave I. N., Hall I. R.* Size sorting in marine muds: Processes, pitfalls, and prospects for paleoflow-speed proxies // Geochemistry. Geophys. Geosystems. 2006. Vol. 7. https://doi.org/10.1029/2006GC001284
26. *Ovsepyan E. A., Dorokhova E. V., Ovsepyan Ya. S., Aliev R. A., Jin Y. K.* Grain size and geochemical evidence for sediment transport mechanisms in the northeastern part of the East Siberian Sea and on the adjacent continental slope // Journal of Marine Systems. 2025. Vol. 252. Art. 104140. EDN: KLTNMQ. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2025.104140
27. *Rasmussen C.* Particle Sizing in Geosciences: Explanation of various techniques and pre-treatments. AU Library Scholarly Publishing Services, 2020. 52 p. https://doi.org/10.7146/aul.374

28. *Streltsova E. A., Belyaev N. A., Dorokhova E. V.* Optimization of the Method of Grain Size Analysis by Laser Diffraction for Bottom Sediments // Oceanology. 2025. Vol. 65 (Suppl. 1). P. S102–S109. EDN: FVGBTQ. https://doi.org/10.1134/S0001437025700821
29. *Ulyantsev A. S., Streltsova E. A., Charkin A. N.* Lithological and granulometric data for the upper sedimentary layer of the Chaun Bay, East Siberian Sea // Data in Brief. 2023. Vol. 46. EDN: TSSDAT. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108813
30. *Wentworth C. K.* A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments // The Journal of Geology. 1922. Vol. 30. No. 5. P. 377–392. https://archive.org/details/jstor-30063207/page/n1/mode/2up

Статья поступила в редакцию 04.02.2026, одобрена к печати 29.03.2026.
Для цитирования: *Стрельцова Е. А., Якимова К. С., Дорохова Е. В., Беляев Н. А.* Методы гранулометрического анализа с использованием лазерного дифракционного анализатора размеров частиц: методические проблемы и спорные вопросы // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 2. С. 83–103. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).6

METHODS OF GRANULOMETRIC ANALYSIS USING A LASER DIFFRACTION PARTICLE SIZE ANALYZER: METHODOLOGICAL PROBLEMS AND DISCUSSION QUESTIONS

E. A. Streltsova[1], K. S. Iakimova[1], E. V. Dorokhova[1,2], N. A. Belyaev

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: Alena.St@mail.ru;
[2] Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, Alexander Nevsky str., Kaliningrad, 236041, Russia

Series of experimental studies were conducted to determine the bulk particle size distribution of sediments using the laser diffraction method. It was shown that the presence of a sand fraction can significantly distort the measurement results. The necessity of preliminary separation of the sand fraction before instrumental analysis was substantiated. Possible options for combining sieve and laser analysis data into a single dataset and the associated methodological difficulties were considered. A special case of a unimodal distribution with a maximum in the range of 63–100 μm, falling at the boundary between the two methods, was examined separately. Based on the generalization of accumulated experience, a unified methodological approach to determining the particle size distribution of sediments is described.

Keywords: grain size distribution, laser diffraction, sieve analysis, sediments

Acknowledgments: This work was completed under government contract No. FMWE-2024-0019. Conflict of interest: The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.

References

1. Andreeva, I. A. and N. N. Lapina, 1998: *Methodology of Granulometric Analysis of Bottom Sediments of the World Ocean and Geological Interpretation of the Results of Laboratory Studies of the Material Composition of Sediments*, edited by A. I. Burskaya, Saint Petersburg, VNIIOkeangeologia, 45 p.
2. Astashkin, D. A., 2009: Determination of the grain-size composition of rocks by a laser analyzer. *Scientific and methodological journal "Geology and Exploration", Journal of Higher Educational Institutions*, **2**, 60–66, EDN: KYQECN
3. Bashirova, L. D., E. V. Dorokhova, V. V. Sivkov, L. A. Kuleshova, N. Andersen, and A. G. Matul, 2017: Paleocurrents in the Charlie-Gibbs fracture zone during the late quaternary. *Oceanology*, **57** (3), 491–502, EDN: YTLWPX, https://doi.org/10.7868/S0030157417020034
4. Belyaev, N. A., I. V. Lyubimov, V. Y. Fedulov, E. A. Streltsova, M. S. Afanasyeva, N. A. Danilova, and G. A. Kolyuchkina, 2024: Supply of inorganic carbon to bottom sediments of the North-Eastern shelf of the Black Sea. *Oceanology*, **64** (S1), S170–S182, EDN: GGSDDG, https://doi.org/10.1134/S0001437024700978
5. Blott, S. J. and K. Pye, 2006: Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology*, **53** (3), 671–685, https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00786.x
6. Bezrukov, P. L. and A. P. Lisitsyn, 1960: Klassifikatsiya osadkov sovremennykh morskikh vodoemov. *Trudy Instituta okeanologii*, **32**, 3–14.
7. Dorokhova, E. V., 2026: Size versus sorting: textural trends in the polyfacial sediments of the Charlie-Gibbs fracture zone contourite drifts (North Atlantic). *Geo-Marine Letters,* **46** (2), 2–10, EDN: VKFZZY, https://doi.org/10.1007/s00367-025-00835-3
8. Dorokhova, E. V., S. Y. Sokolov, E. P. Ponomarenko, L. D. Bashirova, T. L. Pugacheva, Z. F. Urazmuratova, D. N. Laskina, and K. O. Dobrolyubova, 2026: *Current-controlled sedimentation in a megatransform system: a case study of the Charlie-Gibbs Fracture Zone*, Geological Society. London, Special Publications, 553 p., EDN: KHVEEB, https://doi.org/10.1144/sp553-2023-138
9. Frolov, V. T., 1992: *Lithology*. Book 1: *Textbook.* Moscow, Moscow State University Press, 336 p., ISBN: 5-211-02865-1, https://djvu.online/file/m7psuxE2FMc8t
10. Laible, J., B. Camenen, J. Le Coz, G. Pierrefeu, B. Mourier, F. Lauters, & G. Dramais, 2023: Comparison of grain size distribution measurements of sand-silt mixtures using laser diffraction systems. *Journal of Soils and Sediments*, **23**, 2310–2325, EDN: CSDIKQ, https://doi.org/10.1007/s11368-023-03470-6
11. Lisitsyn, A. P., 1956: K obrabotke rezul'tatov mekhanicheskogo analiza morskih osadkov. *Trudy Instituta okeanologii*, **19**, 262–287.
12. Lomtadze, V. D., 1990: *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornyh porod. Metody laboratornyh issledovaniy*: Uchebnoe posobie dlya vuzov, 2-e izd., pererab. i dop., Leningrad, Nedra, 328 p., ISBN 5–247–01375–1, https://www.geokniga.org/books/18658
13. McCave, I. N., 2008: Size sorting during transport and deposition of fine sediments: sortable silt and flow speed. In: Rebesco, M. and Camerlenghi, A. (eds), *Developments in Sedimentology*, **60**, 121–142, https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)10008-5
14. McCave, I. N., B. Manighetti, and S. G. Robinson, 1995: Sortable Silt and Fine Sediment Size/Composition Slicing: Parameters for Paleocurrent Speed and Paleoceanography. *Paleoceanography*, **10**, 593–610, https://doi.org/10.1029/94PA03039
15. McCave, I. N. and I. R. Hallm, 2006: Size sorting in marine muds: Processes, pitfalls, and prospects for paleoflow-speed proxies. *Geochemistry, Geophys. Geosystems*, **7**, https://doi.org/10.1029/2006GC001284

16. Ovsepyan, E. A., E. V. Dorokhova, Ya. S. Ovsepyan, R. A. Aliev, and Y. K. Jin, 2025: Grain-size and geochemical evidence for sediment transport mechanisms in the northeastern part of the East Siberian Sea and on the adjacent continental slope. *Journal of Marine Systems*, **252**, Art. 104140, EDN: KLTNMQ, https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2025.104140
17. Petelin, V. P., 1967: *Granulometric Analysis of Marine Bottom Sediments*. Moscow, Nauka, 128 p.
18. Rasmussen, C., 2020: *Particle Sizing in Geosciences: Explanation of various techniques and pre-treatments*. AU Library Scholarly Publishing Services, 52 p., https://doi.org/10.7146/aul.374
19. Romanovsky, S. I., 1977: *Sedimentological foundations of lithology*. Leningrad, Nedra, 408 p., https://lithology.ru/system/files/books/romanovski.pdf
20. Rukhin, L. B., 1947: *Granulometric method of sand analysis*. Leningrad, Publishing house of Leningrad State University, 211 p.
21. Rukhin, L. B., 1969: *Fundamentals of Lithology. The Study of Sedimentary Rock*s. Leningrad, 703 p., https://lithology.ru/node/860
22. Shvanov, V. N., 1969: *Sand rocks and methods of their study (distribution, structures, textures*). Leningrad, Nedra, 213 p., https://lithology.ru/system/files/books/shvanov_pes_m.pdf
23. Sivkov, V. V., E. V. Dorokhova, and L. D. Bashirova, 2015: Contour currents of the North Atlantic during the last glacial cycle. *Oceanology*, **55** (6), 994–1000, EDN: UVEPIL, https://doi.org/10.7868/S0030157415060180
24. Streltsova, E. A., N. A. Belyaev, V. Y. Fedulov, and E. M. Pushkareva, 2024: Grain size distribution, organic carbon and geochemical markers in the surface layer of bottom sediments in the northeastern part of the Kara Sea. *Oceanology*, **64** (2), 354–363, EDN: RULYWH, https://doi.org/10.31857/S0030157424020117
25. Streltsova, E. A., N. A. Belyaev, and E. V. Dorokhova, 2025: Optimization of the Method of Grain Size Analysis by Laser Diffraction for Bottom Sediments. *Oceanology*, **65** (1), S102–S109, EDN: FVGBTQ, https://doi.org/10.1134/S0001437025700821
26. Svalnov, V. N. and T. N. Alekseeva, 2005: *Granulometric composition of sediments of the World Ocean*. Moscow, Nauka, 297 p., ISBN 5-02-032654-2, EDN: QKETVT
27. Ulyantsev, A. S., E. A. Streltsova, and A. N. Charkin, 2024: Grain size properties of surface bottom sediments from the Chaun Bay. *Oceanology,* **64** (3), 509–525, EDN: QCAJQM, https://doi.org/10.31857/S0030157424030117
28. Ulyantsev, A. S., E. A. Streltsova, and A. N. Charkin, 2023: Lithological and granulometric data for the upper sedimentary layer of the Chaun Bay, East Siberian Sea. *Data in Brief*, **46**, EDN: TSSDAT, https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108813
29. Wentworth, C. K., 1922: A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, **30** (5), 377–392, https://archive.org/details/jstor-30063207/page/n1/mode/2up
30. Zdobin, D. Yu. and L. K. Semenova, 2011: O granulometricheskom analize glinistykh gruntov: lazernye i klassicheskie metody [About granulometric analysis of clay soils: laser and classical methods]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, **6**, 560–567, EDN: OJWQDF

Submitted 04.02.2026, accepted 29.03.2026.
For citation: Streltsova, E. A., K. S. Iakimova, E. V. Dorokhova, and N. A. Belyaev, 2026: Methods of granulometric analysis using a laser diffraction particle size analyzer: methodological problems and discussion questions. *Journal of Oceanological Research*, **54** (2), 83–103, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).6

ISSN (online): 2587-9634 / ISSN (print): 1564-2291
Океанологические исследования. 2026. Том 54. № 2. С. 83–103

利用激光粒度分析仪进行粒度分析的方法：方法论问题与争议

E. A. Streltsova[1], K. S. Iakimova[1], E. V. Dorokhova[1,2], N. A. Belyaev

[1] Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编：*117997, Russia,*
电子邮件：*Alena.St@mail.ru;*
[2] Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, Alexander Nevsky str., Kaliningrad, 邮编：*236041, Russia*

本文通过一系列实验研究，利用激光衍射法测定了海底沉积物的总粒级组成。结果表明，砂质粒级的存在可能会显著影响测定结果的准确性。研究证实了在进行仪器分析之前有必要预先分离砂质粒级。探讨了将筛分分析与激光分析数据合并为一个统一数据集的可行方案及相关的方法学困难。特别讨论了单峰分布中最大值位于63–100 μm这一两种方法分界区域的情况。在总结积累经验的基础上，描述了测定海底沉积物粒级组成的统一方法论。

关键词： 粒级组成，激光衍射法，筛分分析，海底沉积物

致谢： 本研究在国家任务（编号：FMWE-2024-0019）框架内完成。本文作者声明不存在利益冲突。