

УДК 504.455

ПЛОТНОСТЬ ЧАСТИЦ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ¹© 2021 г. Ш. Р. Поздняков^a, А. В. Ревунова^{a, *}^aИнститут Озероведения РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

*e-mail: reina_abc@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 29.06.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Плотность частиц донных отложений водных объектов – важная характеристика, определяющая интенсивность взаимодействия придонной толщи воды с поверхностным слоем донных отложений, – в современных исследованиях не может приниматься постоянной величиной. Выполнена оценка вариабельности данного параметра для Ладожского озера. Изменчивость данной характеристики требует корректировки существующих методик гранулометрического анализа частиц донных отложений естественных водных объектов.

Ключевые слова: гидравлическая крупность, плотность твердых частиц, гранулометрический анализ, донные отложения Ладожского озера, органическая составляющая, донный рельеф.

DOI: 10.31857/S0321059621020103

Многие гидрофизические и гидрохимические процессы в водных объектах обусловлены в значительной степени взаимодействием водной массы с твердыми частицами, взвешенными в ней и отложившимися на дне. Интенсивность процессов такого взаимодействия определяется целым рядом характеристик твердых частиц. При этом один из важнейших показателей – их плотность и связанные с ней параметры, в частности гидравлическая крупность. В самом деле гидродинамическое и физико-химическое взаимодействие твердых частиц с окружающей водой в водных объектах, процессы взвешивания и осаждения наносов в определяющей степени зависят от их гидравлической крупности. Это относится как к взвешенным в толще воды частицам, так и к осаждаемым на дне твердым отложениям. Общепринятым термином “гидравлическая крупность” u (м/с) обозначают скорость равномерного падения частицы в неподвижной (невозмущенной) воде. Многочисленные классические теоретические и экспериментальные исследования гидравлической крупности частиц, начатые еще в середине XIX в. в работах Дж.Г. Стокса, получили свое интенсивное развитие во второй половине XX в. Здесь следует упомянуть фундаментальные исследования М.А. Великанова, В.Н. Гончарова,

А.В. Караушева и др. [1, 2, 5–7]. В результате были получены формулы и таблицы зависимости гидравлической крупности от диаметра частиц, температуры водной среды и формы частиц (для крупных наносов при турбулентном и переходном режиме осаждения [6]). На основе этих работ подготовлены методические рекомендации по практическому гранулометрическому анализу частиц, вошедшие в соответствующие Наставления и применяемые на сети Росгидромета [8]. Для мелких частиц с ламинарным режимом осаждения при этом, как правило, использовалась теоретическая зависимость Стокса [5]:

$$U = k_l g d^2 (\rho_s - \rho) / 4k_v \rho,$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; ρ_s – плотность частиц наносов, кг/м³; k_v – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; g – ускорение свободного падения; d – диаметр равновеликого частице шара; k_l – постоянный коэффициент, принятый Стоксом для шарообразных частиц равным 0.22. Данная зависимость имела экспериментальное подтверждение в многочисленных исследованиях на протяжении всего XX в., например в [5].

При этом важно отметить следующее. Практически во всех разработках плотность твердых частиц, как правило, принималась постоянной и равной 2.65 г/см³. Это характерно для всех классических работ [1, 2, 6]. Исследований вариаций плотности твердых частиц естественных водоемов явно недостаточно даже в специальных работах [10]. При этом, если рассматривать, напри-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН (тема № 0154-2019-0003 “Разработка комплексных методов исследования и оценки характеристик твердых частиц в наномасштабном диапазоне размеров в водных объектах с различной степенью антропогенной нагрузки”).

Таблица 1. Вещества, образующие донные отложения, и их плотность

Вещество	Плотность, г/см ³
Пенопласт	0.2–0.4
Полипропилен	0.9
Поликарбонат	1.2
Поливинилхлорид	1.34–1.43
Кварц	2.2–2.65
Граниты	2.5–3.05
Алюминий	2.68
Мрамор	2.6–2.84
Слюда	2.6–3.2
Базальты	2.7–3.2
Апатит	3.1–3.2
Корунд	3.9–4.5
Пирит	5.0
Железо	7.87
Серебро	10.5
Золото	19.32

мер, донные отложения, то их формирование обусловлено целым рядом различных причин – поступлением в водный объект речных и эоловых наносов, продуктов абразии берегов, накоплением продуктов химических реакций, осаждением остатков отмирающих организмов (аллохтонных, т.е. поступающих в водный объект извне) и автохтонных (образующихся в самом водном объекте). Кроме того, особенности современного антропогенного воздействия обуславливают появление новых видов твердых частиц в водных объектах, например частиц микропластика. Все эти составляющие имеют очень широкий диапазон значений плотностей. Плотность частиц наносов может достигнуть весьма больших величин при размывании текучей водой рудных жил, содержащих, например, серебро, золото или другие металлы. В

то же время твердые органические частицы имеют, как правило, меньшую плотность. Еще меньшую плотность могут иметь частицы микропластика (табл. 1).

Таким образом, для частиц одинакового диаметра гидравлическая крупность в соответствии с зависимостью Стокса может достаточно сильно различаться. Например, рассчитанное для частицы диаметром 0.001 мм и плотностью 2.65 г/см³ значение гидравлической крупности составит 0.00000078 м/с. В то же время для частицы такого же диаметра, но плотностью 2.0 г/см³ это значение будет равняться 0.00000047 м/с, а плотностью 3.5 г/см³ – уже 0.00000118 м/с; т.е., строго говоря, для всего актуального диапазона плотностей, характерных для твердых частиц, присутствующих в водных объектах, существующие методы гранулометрического анализа взвешенных наносов и донных отложений, основанные на значении плотности 2.65 г/см³ [5], недостаточно корректны (в частности, рекомендуемые в Наставлениях [8] сроки отборов проб частиц на пипеточной установке). Частицы диаметром 1 мкм и плотностью 2.65 г/см³ при температуре 17.6–22.5°C за рекомендуемый срок отбора пробы 15 ч 35 мин опустятся на глубину 4.4 см, а плотностью 1.2 г/см³ (т.е. поликарбонат или капрон) – только на 0.5 см. Таким образом, в столбе воды высотой 5 см, рекомендуемой для отбора пробы для определения содержания частиц <1 мкм [8], будет большое количество более крупных фрагментов, но с меньшей плотностью. Это зафиксировано при проведении контрольных экспериментов в ИНОЗ РАН с применением мембранных фильтров с диаметром пор 1 мкм. По всей видимости, данный вопрос потребует в ближайшее время дополнительного анализа и пересмотра.

Кроме того, процесс взмучивания и переноса частиц донных отложений в придонную зону водного объекта в значительной степени также зависит от их плотности. Этот показатель в явном виде входит в разработанные формулы для количественной оценки этого явления. В качестве примера можно привести уравнение Гончарова для так называемой срывающей скорости, т.е. “наименьшей скорости потока, при которой происходит беспрестанный срыв отдельных зерен на дне и при которой средний уровень пульсационных подъемных усилий примерно равен весу зерна в воде” [2]:

$$V_c = \lg(8.8h/d)[2g(\rho_s - \rho)d/1.75\rho]^{1/2},$$

где V_c – срывающая скорость, h – глубина.

Примечательно, что показатель $(\rho_s - \rho)/\rho$ встречается в абсолютном большинстве аналогичных зависимостей [5, 7, 9]. Можно констатировать, что величина плотности твердых частиц на дне в значительной степени определяет интен-

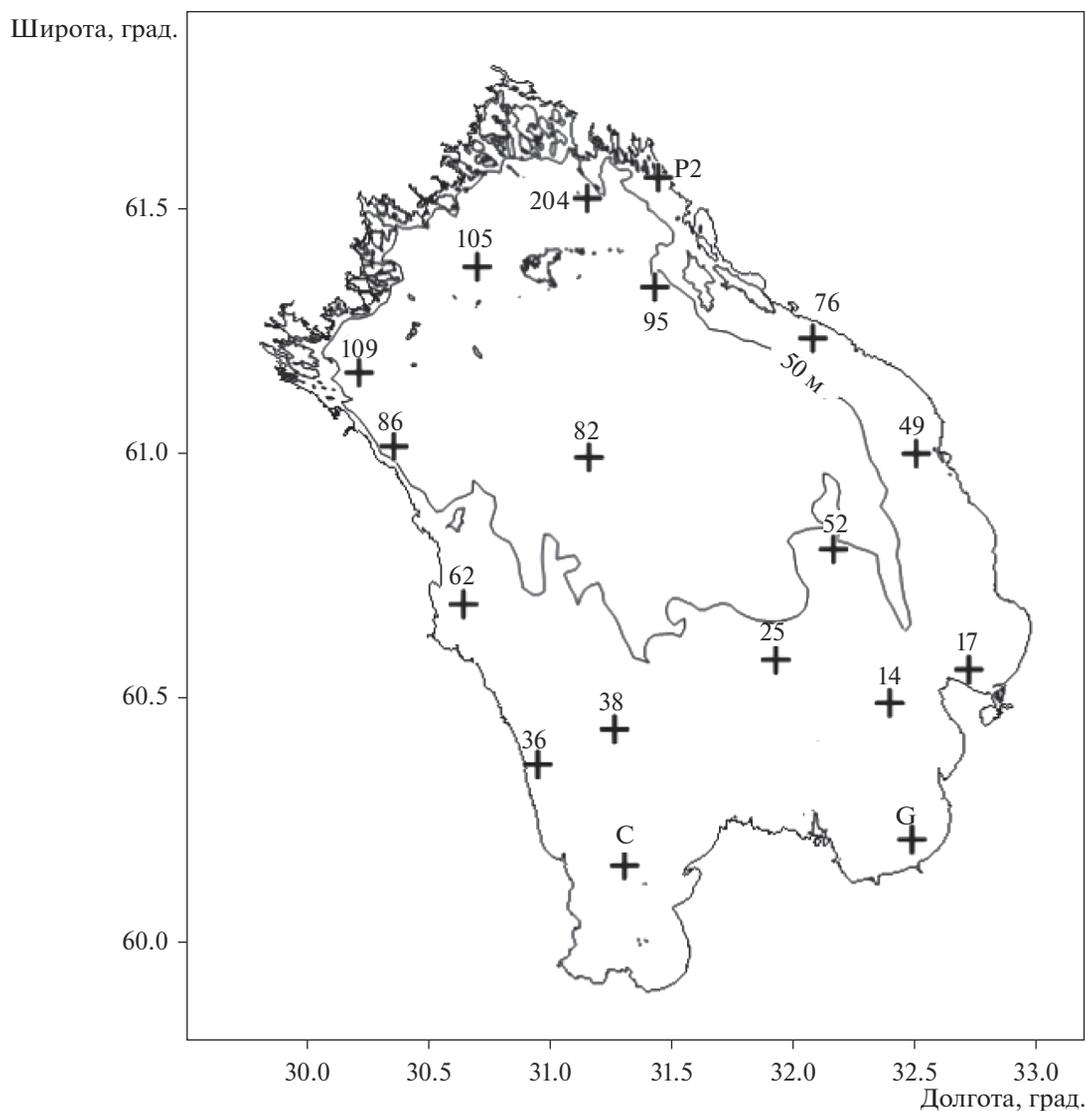


Рис. 1. Картограмма территории расположения станций отборов проб донных отложений Ладожского озера. Крестики – точки отбора, буквы и цифры у крестиков – номера станций.

сивность взаимодействия придонных слоев воды и верхнего слоя донных отложений, что в конечном счете может сказываться даже на микроформах поверхности дна. Важно отметить, что интенсивность взаимодействия в этой зоне водного объекта в значительной степени может влиять на процессы вторичного загрязнения, что в конечном счете определяет его актуальное экологическое состояние.

В этой связи интересным представляется анализ изменения преобладающей плотности частиц наносов для конкретного водного объекта. В ИНОЗ РАН проведены подобные исследования применительно к донным отложениям Ладожского озера. В процессе этих работ были отобраны пробы с характерных участков дна.

На рис. 1 указаны станции отбора проб в ходе проведенных экспедиционных исследований.

Для всех отобранных проб выполнена оценка плотности частиц. Анализ проводился пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ [2]. В табл. 2 приведены результаты выполненных анализов.

Впервые получена картограмма распределения плотности донных отложений Ладожского озера, приведенная на рис. 2. Как видно из этой схемы, наибольшая плотность донных отложений данного водоема имеет место в зонах преобладания минеральной составляющей в общем составе наносов, т.е. в районах распространения песчаных грунтов, преимущественно в южной части. Для оценки доли органической части дон-

Таблица 2. Плотность частиц донных отложений на станциях отбора Ладожского озера

№ пункта	Номер станции	Гранулометрический состав (визуально)	Плотность частиц донных отложений, г/см ³
1	P2	Ил	2.367
2	82	»	2.696
3	105	»	2.557
4	109	Глина	2.576
5	204	»	2.585
6	52	»	2.652
7	86	»	2.658
8	95	»	2.569
9	14	Супесь	2.782
10	С	Мелкий песок	2.743
11	76	»	2.703
12	36	Песок	2.705
13	25	»	2.773
14	38	»	2,644
15	G	»	2.771
16	62	»	2.687
17	17	Крупный песок	2.821
18	49	»	2.753

Таблица 3. Доля органической составляющей и плотность частиц донных отложений на станциях отбора Ладожского озера

Номер станции	Гранулометрический состав (визуально)	Плотность частиц донных отложений, г/см ³	Доля органической составляющей (ППП), %
P2	Ил	2.37	19.7
105	Глина	2.56	10.5
109	»	2.58	10.2
204	»	2.58	10.4
52	»	2.65	8.6
86	»	2.66	11.6
62	»	2.69	1.2
36	»	2.70	0.6
76	Мелкий песок	2.70	0.6
С	»	2.74	0.5
49	Крупный песок	2.75	0.9
25	Песок	2.77	1
14	Супесь	2.78	3.7
17	Крупный песок	2.82	0.7

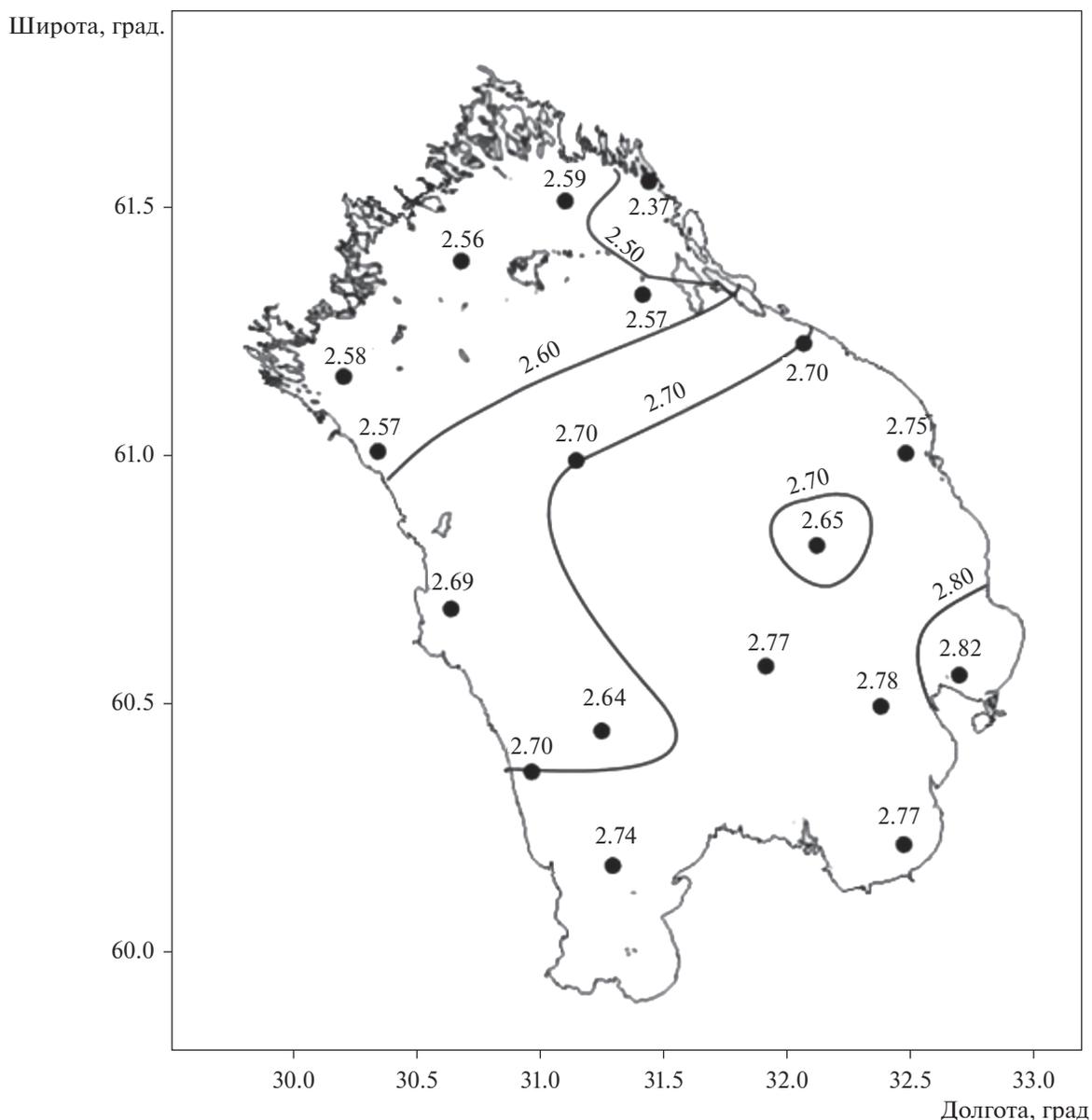


Рис. 2. Картограмма распределения плотности (г/см^3) донных отложений Ладожского озера.

ных отложений для некоторых проб определены потери при прокаливании в муфельной печи. Результаты выполненных анализов и значения плотности частиц приведены в табл. 3.

В табл. 3 станции расположены в порядке увеличения измеренной плотности частиц. Из нее видно, что для северной глубоководной зоны характерны меньшие величины плотности и большие величины органической составляющей в пробах по сравнению с южными районами. В рамках данной работы выполнено визуальное сравнение фрагментов дна на характерных участках с различной плотностью частиц. Для этих це-

лей использованы фотографии соответствующих участков дна, полученные с использованием подводного аппарата "Лимноскоут", разработанного и изготовленного в ИНОЗ РАН. Данный аппарат позволяет выполнять фотографирование на максимальных глубинах, характерных для Ладожского озера [4]. Полученные фотографии в окрестностях станций 17 (плотность частиц донных отложений 2.8 г/см^3) и 105 (2.56 г/см^3) приведены на рис. 3а, 3б, 4а, 4б соответственно. Как видно на фото, имеет место серьезное различие микроформ, образуемых частицами различной плотности и размеров в разных частях дна. Безусловно,

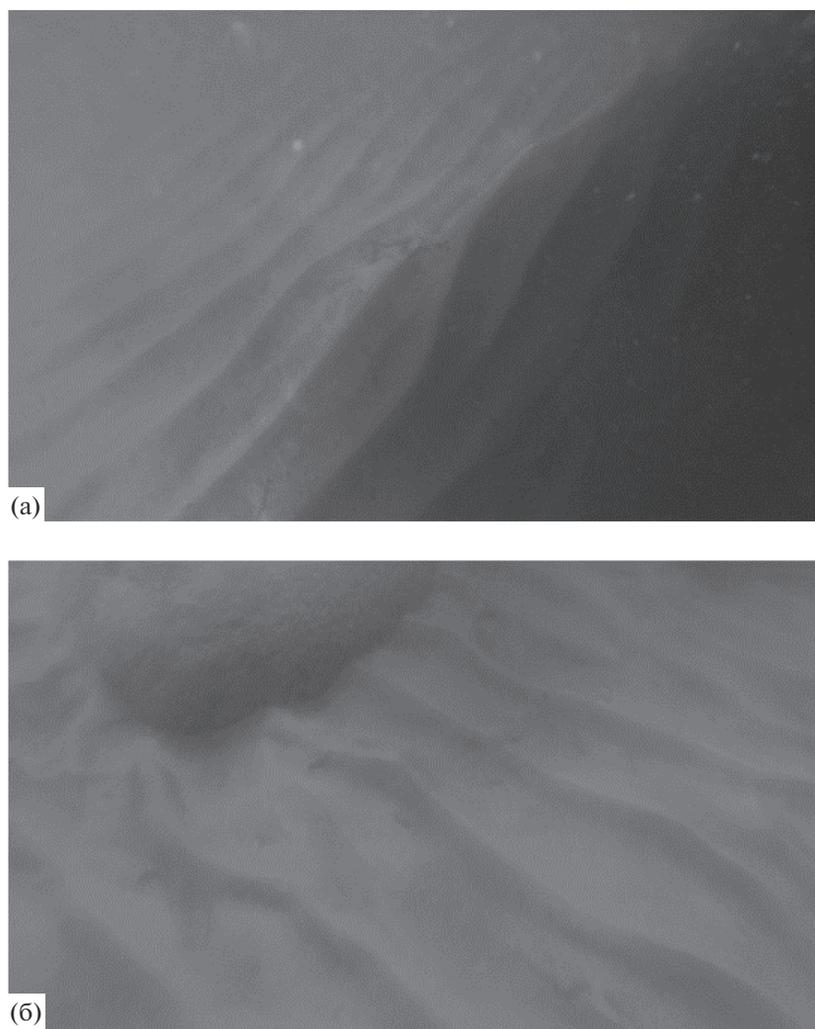


Рис. 3. Дно Ладожского озера в окрестностях ст. 17. Плотность частиц донных отложений – 2.8 г/см^3 . (Фото М.О. Дудакова, сделанные подводным аппаратом “Лимноскаут”).

донный рельеф в обоих случаях сформирован в результате воздействия очень большого количества разных факторов. Тем не менее видно, что плотность частиц донных отложений оказывает влияние как на результирующие формы, так и на условия взаимодействия твердых частиц с водной массой в придонной зоне.

Полученные результаты демонстрируют зависимость плотности частиц донных отложений от соотношения органической и минеральной частей общего объема. При этом как органическая, так и минеральная части сами могут варьировать в очень широких пределах, что определяется большим количеством факторов. Все это создает весьма пеструю картину плотности частиц донных отложений, что необходимо учитывать при современном выявлении причинно-следствен-

ных связей между факторами того или иного экологического состояния водного объекта. Представленная на рис. 2 картосхема распределения плотности донных отложений уникальна не только для Ладожского озера, но и для крупных водных объектов вообще. В данном случае демонстрируется уменьшение плотности донных отложений от южных районов озера к северным. Безусловно, данная картосхема дает самое общее представление о распределении этого параметра на Ладоге. В дальнейшем, по-видимому, потребуются детализация измерений плотности в зависимости от конкретных задач и особенностей района исследований на озере. По существу, это требуется для любых крупных водных объектов при современных исследованиях взаимодействия донных отложений с водными массами, при

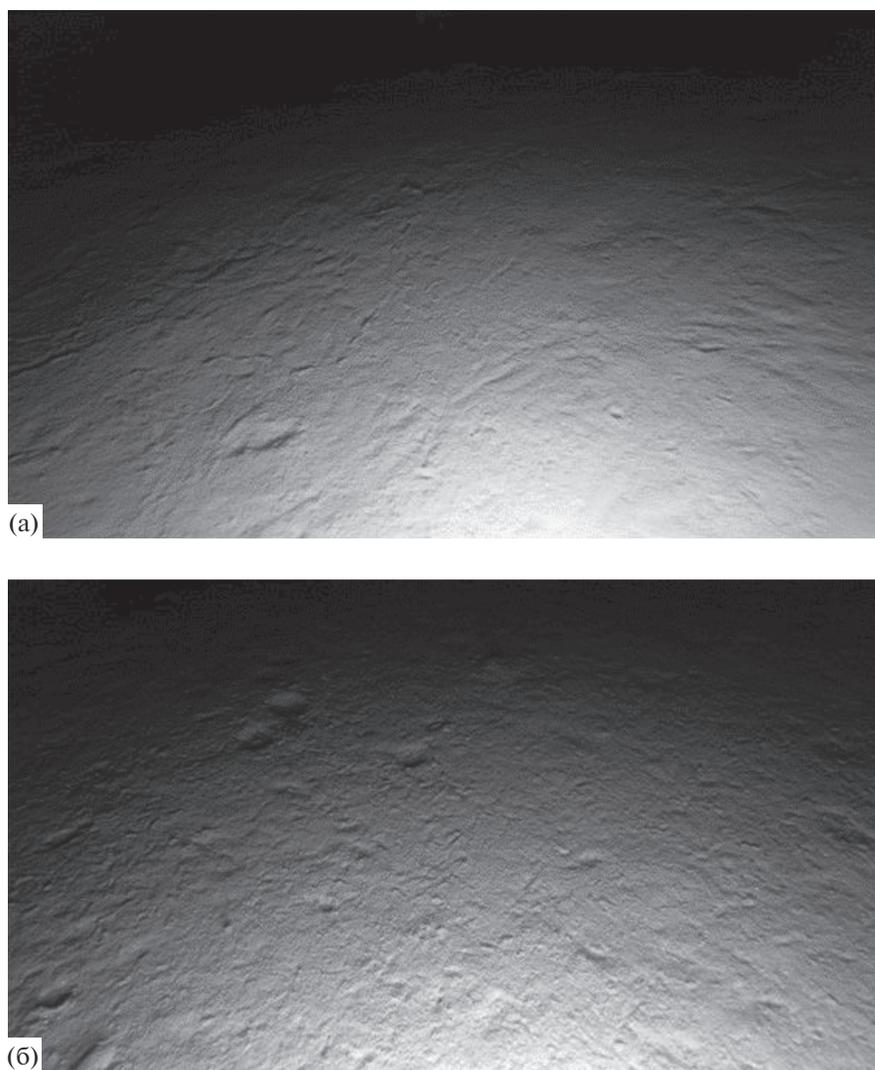


Рис. 4. Дно Ладожского озера в окрестностях ст. 105. Плотность частиц донных отложений – 2.56 г/см^3 . (Фото М.О. Дудакова, сделанные подводным аппаратом “Лимноскаут”).

оценке внутренней нагрузки, моделировании изменения экологического состояния и решении других задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плотность частиц донных отложений водных объектов, зависящая от большого количества внешних и внутренних факторов, в современных исследованиях не может приниматься постоянной величиной для крупных озер и водохранилищ. Для корректного выявления причин того или иного экологического состояния водного объекта необходим учет вариабельности этого параметра и его влияния на протекающие процессы.

Существующие методики гранулометрического анализа частиц донных отложений естественных водных объектов требуют корректировки с учетом изменчивости величины плотности частиц.

Авторы приносят благодарность М.О. Дудакову (ИНОЗ РАН) за любезно предоставленные фотографии характерных участков дна Ладожского озера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Великанов М.А.* Динамика русловых потоков. Т. 2. М.: Гос. изд-во техн.-теоретич. лит., 1955. 324 с.
2. *Гончаров В.Н.* Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1954. 452 с.

3. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартиформ, 2015.
4. Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Анохин В.И. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера // Рос. журн. прикладной экологии. 2018. № 4. С. 51–55.
5. Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 416 с.
6. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 272 с.
7. Леви И.И. Инженерная гидрология. М.: Высш. шк., 1968. 238 с.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам: Вып. 2. Ч. 2. Гидрологические наблюдения на постах. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 263 с.
9. Поздняков Ш.Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах. СПб.: Лема, 2012. 227 с.
10. Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера. М.; Л.: Наука, 1966. 124 с.
11. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.