

УДК 556.55: 551.3.051

Н. А. Белкина  
Е. В. Гатальская<sup>1</sup>  
Г.Э. Здоровеннова  
М. С. Потахин  
Р. Э. Здоровеннов  
И. В. Морозова

## **Современные седиментационные процессы в Выгозерском водохранилище**

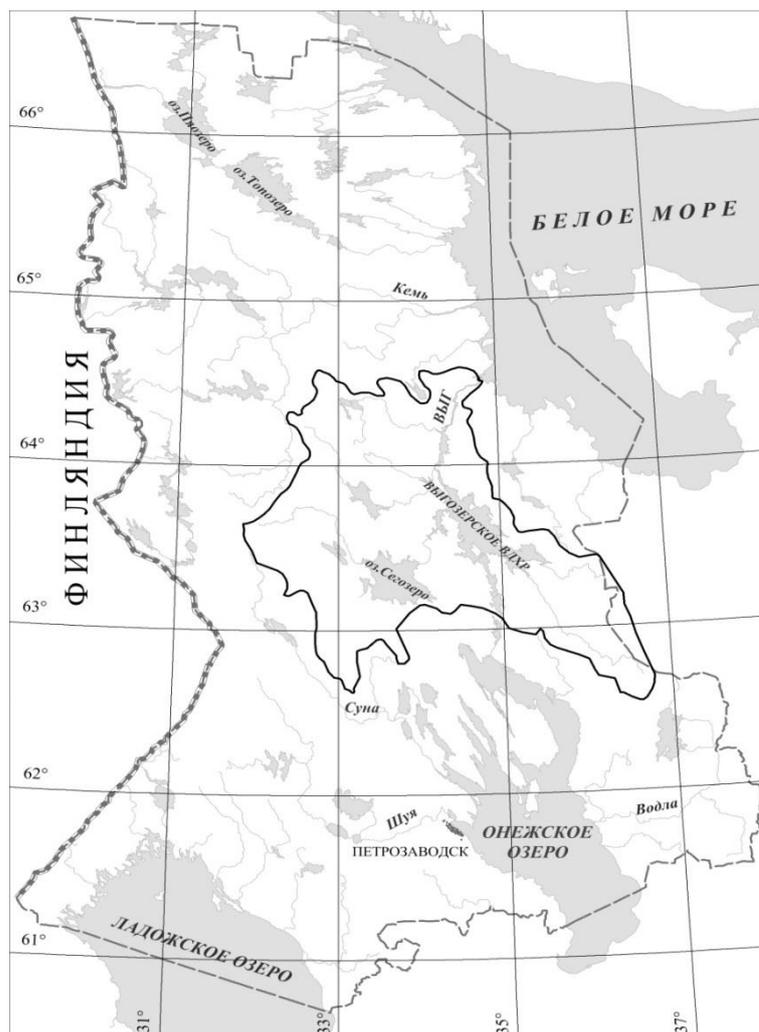
ФГБУН Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
г. Петрозаводск  
e-mail: <sup>1</sup>katusha9210@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены результаты гидрофизических и гидрохимических исследований седиментационных процессов в одном из крупнейших водоемов Северо-Запада Российской Федерации Выгозерском водохранилище. Измерения температуры, электропроводности и мутности воды в режиме вертикальных зондирований в летние и осенние месяцы показали, что на распределение взвешенного вещества в водной толще в южных районах водоема влияет ветро-волновое перемешивание, а в северном – сточные воды Сегежского ЦБК. Наблюдения за поступлением взвешенного вещества на дно с помощью седиментационных ловушек выявили пространственно-временную изменчивость накопления осадочного вещества в донных отложениях. Измеренные скорости седиментации и выполненные по ним оценки скорости осадконакопления различаются в 2-10 раз в зависимости от района водохранилища. Количественный и качественный состав взвешенного вещества, поступающего на дно, отличался в разных районах водохранилища.

**Ключевые слова:** водохранилище, седиментационные процессы, взвешенное вещество, скорость осадконакопления, температура и мутность воды

### **Введение**

Выгозерское водохранилище расположено в центральной части Карелии и является одним из крупнейших водоемов республики. Оно принадлежит к водосборному бассейну Белого моря, к частному водосбору р. Выг (рис. 1). До начала 30-х годов XX века Выгозеро находилось в естественном состоянии, при среднем многолетнем уровне воды 82,7 м БС площадь его водного зеркала составляла 561 км<sup>2</sup> [1]. В результате гидротехнического освоения территории Карелии в XX веке водоем дважды претерпел колоссальные преобразования [2]. Так в результате строительства Беломорско-Балтийского канала (ББК) и сооружения Надвоицкой плотины уровень его был поднят на 6 м. В результате было образовано Выгозерское водохранилище (1933 г.), площадь которого увеличилась вдвое по сравнению с озером (табл. 1). В дальнейшем, в процессе гидроэнергетического освоения бассейна р. Выг, посредством Майгубского канала были соединены верхний бьеф Ондской ГЭС и Выгозерское водохранилище, что привело к образованию объединенного Выгозерско-Ондского водохранилища (1957 г.) (см. табл. 1).



**Рис. 1.** Географическое положение Выгозерского водохранилища и водосбора р. Выг

**Таблица 1.**  
Морфометрические характеристики Выгозера в различные этапы своего существования [2]

| Название водоема                 |            | оз. Выгозеро | Выгозерское водохранилище | Выгозерско-Ондское водохранилище |
|----------------------------------|------------|--------------|---------------------------|----------------------------------|
| Период                           |            | до 1932 г.   | 1934-1955 гг.             | 1957-1974 гг.                    |
| Средний уровень, м БС            |            | 82,7         | 88,8                      | 89,1                             |
| Площадь зеркала, км <sup>2</sup> |            | 561          | 1196                      | 1270                             |
| Глубина, м                       | средняя    | 6,1          | 7,2                       | 7,1                              |
|                                  | наибольшая | 18           | 25                        | 25                               |
| Объем, км <sup>3</sup>           |            | 3,4          | 8,7                       | 9,1                              |

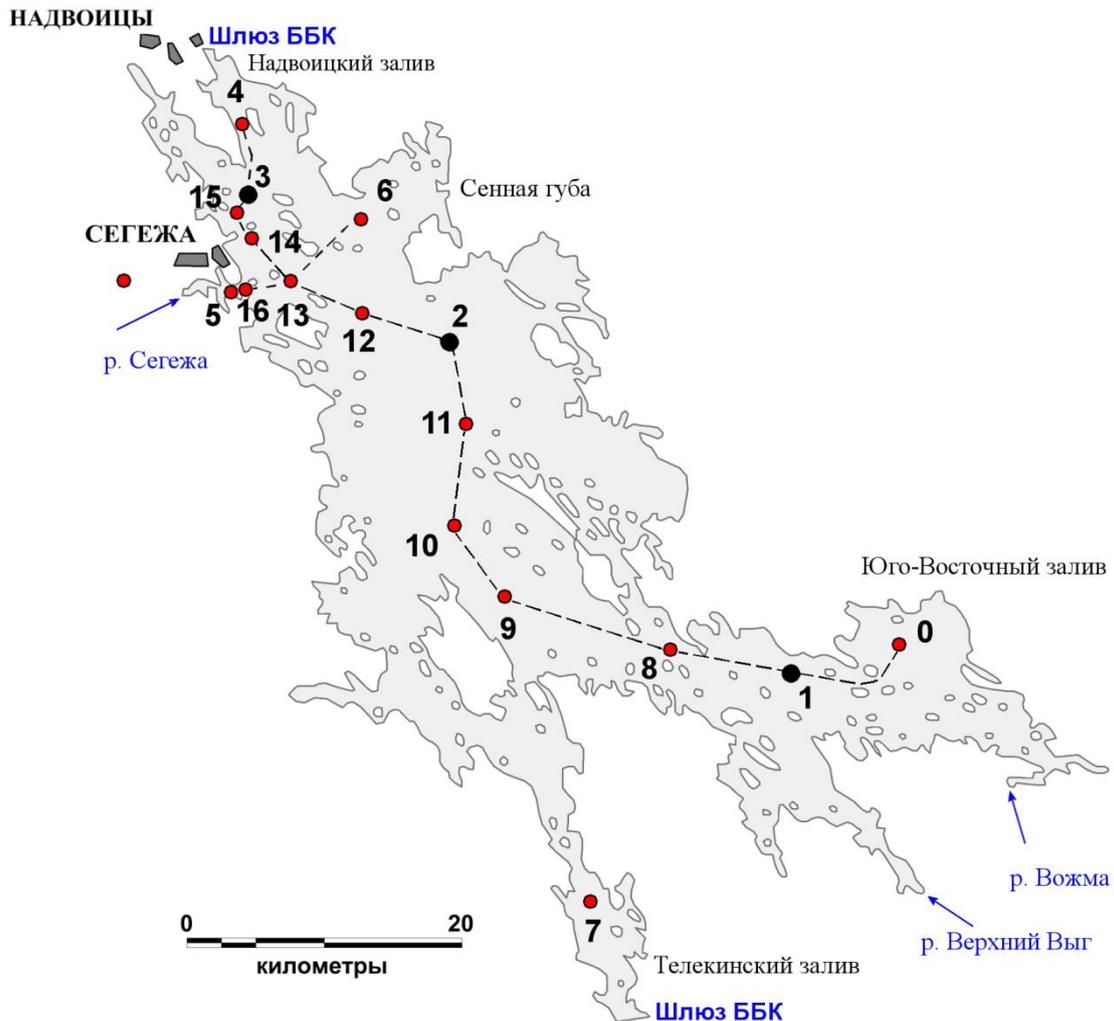
Преобразование озера в водохранилище привело к изменению его морфометрических характеристик, уменьшению водообмена, трансформации внутригодового хода уровня воды и т.д. [2]. Изменения морфологических и гидрологических особенностей водоема, наряду с влиянием сточных вод Сегежского ЦБК (действует с 1938 г.), повлияло на все компоненты его экосистемы, в том числе и на донные отложения [3].

Комплексные исследования Выгозера, в том числе его донных отложений (ДО), проводятся на протяжении 100 лет. В 20-е годы XX века в ходе Олонецкой научной экспедиции были получены первые сведения о грунтах озера [4]. Изучение донных осадков после создания водохранилища впервые было выполнено сотрудниками Северного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства [1]. В 60-80 годы XX века Карельским филиалом АН СССР выполнен большой комплекс работ по исследованию ДО водохранилища (картирование грунтов, изучение стратификации, механического и химического состав ДО и др.) [5, 6]. В конце XX – начале XXI века сотрудниками ИВПС КарНЦ РАН подробно изучался химический состав поверхностных ДО водохранилища [3, 7-11].

Цель данного исследования – изучение современных седиментационных процессов в границах акватории Выгозерского водохранилища – включала наблюдения за распределением взвешенного вещества в водной толще и его поступлением на дно, сбор свежесосажденного вещества с помощью седиментационных ловушек (СЛ) и оценку скорости осадконакопления, отбор проб ДО и изучение вещественного состава взвешенного вещества и донных осадков.

### **Материалы и методы**

Экспедиционные исследования седиментационных процессов были проведены на Выгозерском водохранилище в период открытой воды 2008-2011 гг. и 2017-2023 гг. Схема наблюдательной сети представлена на рисунке 2. Станции установки СЛ, отбора проб воды и ДО были выделены в соответствии с морфологией котловины и особенностями циркуляции водных масс водохранилища [3, 10]. Станция 1 расположена в южном районе, представляющем собой затопленные устьевые участки рр. Верхний Выг и Вожма; станция 2 – в центральном районе, являющемся дном озера Выгозера, существовавшего до образования водохранилища; станция 3 – в северном районе, расположена в зоне влияния р. Сегежи (самого крупного притока) и сточных вод Сегежского ЦБК.



**Рис. 2.** Положение станций отбора проб и установки седиментационных ловушек (ст. 1-3) и станций зондирования STD-90m (ст. 1-16) на акватории Выгозерского водохранилища. Штриховые линии схематично показывают положение разрезов, приведенных на рисунках 3-5.

*Составлено авторами*

Зондирование водной толщи с целью определения температуры, электропроводности и мутности воды проводилось мультипараметрическим зондом STD-90m в летние месяцы 2008-2011 гг. и 2022 г. на 16 станциях в разных районах водохранилища (рис. 2). В Российской Федерации на сегодняшний день в качестве официальной единицы измерения мутности используют ЕМФ (единицы мутности по формазину на литр), в английском варианте – Formazin Turbidity Unit (FTU), также используется единица измерения мутности мг/л (по каолину). Мультипараметрический зонд STD-90m определяет мутность в единицах FTU. Численно мутность, выраженная в единицах FTU, отличается от измеренной в единицах мг/л: 1 FTU = 0,58 мг/л каолина. В данной статье приведены значения мутности в единицах FTU.

Отбор проб воды и ДО проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 [12]. Для сбора взвешенного вещества, поступающего на дно, была использована малая СЛ (МСЛ-110), разработанная сотрудниками Института океанологии им. П.П.

Ширшова РАН [13], которая устанавливалась в водоеме на высоте 1 м от дна со временем экспозиции – 1 год. После подъема СЛ бутылки с осадком отделялись от ловушки для транспортировки в лабораторию. Содержимое СЛ переносилось в мерный цилиндр и тщательно перемешивалось для свободного осаждения частиц под действием гравитационного поля. Через 24 часа в цилиндре измерялась высота осадка, на основе которой рассчитывались скорости накопления неконсолидированного и уплотненного осадка в мм/год, учитывая поправки на площадь ловушки, время экспозиции и коэффициент уплотнения грунта. Осадок в цилиндре декантировали [14].

Камеральные исследования и анализ химического состава взвешенного вещества и ДО выполнены в ИВПС КарНЦ РАН. Содержание взвешенного вещества в воде, физические (влажность – естественная ( $wet_{20}$ ) и абсолютная ( $wet_{105}$ ), пористость ( $P_{or}$ ), плотность ( $d$ ), удельная масса ( $m_d$  – плотность твердого вещества осадка)) и физико-химические (рН, Eh) показатели, характеристики органического вещества (потери при прокаливании ( $LOI_{550}$ ), зольность (Ash),  $C_{org}$ , растительные пигменты (Chl. A, B, C, Feof.), гуминовые и фульвовые кислоты) биогенные элементы ( $N(NH_4)$ ,  $N_{org}$ ,  $P_{min}$ ,  $P_{tot}$ ) и металлы (Fe, Mn) в ДО определялись классическими методами [15-18].

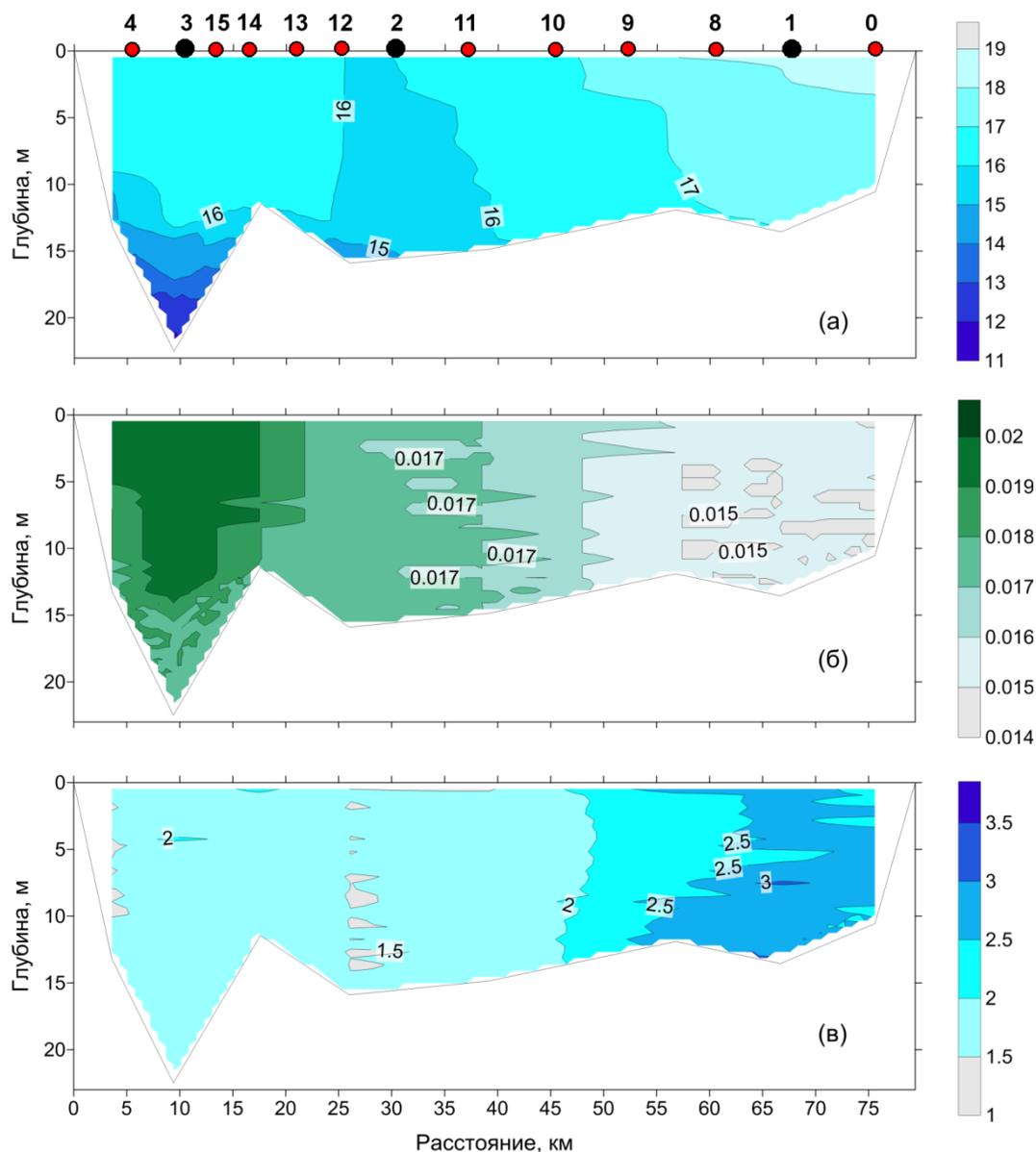
Полученные в результате экспедиционных и лабораторных исследований данные, наряду с архивными и литературными материалами [1, 3, 5, 6, 9, 10], были объединены в базу данных № 2018620170 «Донные отложения Выгозерского водохранилища».

### **Результаты и обсуждение**

Изучение седиментационных процессов в Выгозерском водохранилище, на основе исследования распределения взвешенного вещества в воде по анализу распределения мутности, было проведено по данным зондирований STD-90m на сетке станций (см. рис. 2) в июле 2008, июле 2009 и августе 2011 гг. на этапе летнего нагревания и в августе 2010 и августе-сентябре 2022 гг. на этапе осеннего охлаждения.

На этапе летнего нагревания водная толща Выгозерского водохранилища была хорошо перемешана, наибольшая температура наблюдалась в южной части акватории – в Телекинском (трасса ББК, ст. 7) и юго-восточном заливах (оз. Боброво и устье р. В. Выг, ст. 0, 1 и 8), где достигала 17-19°C по водному столбу (рис. 3а). В центральной части озера (ст. 2, 12) стратифицирован был только придонный слой толщиной 1-2 м. В северной глубоководной части водоема (ст. 3, 1, 15) слой скачка температуры залегал на глубинах 9-12 м. В связи с большой протяженностью водохранилища по широте наблюдалась выраженная изменчивость физических показателей между северными и южными районами. Температура поверхностного перемешанного слоя уменьшалась от южных районов к северным на 1,5-2,0°C. Электропроводность воды плавно увеличивалась с юга на север по акватории водоема и характеризовалась минимальными значениями в Телекинском заливе (0,013 мСм/см) и максимальными – в перемешанном слое северного района (0,023 мСм/см). Электропроводность воды в центральном районе составляла 0,016-0,017 мСм/см, в юго-восточном – была несколько меньше и не превышала 0,014-0,015 мСм/см. На большей части акватории Выгозерского водохранилища мутность была

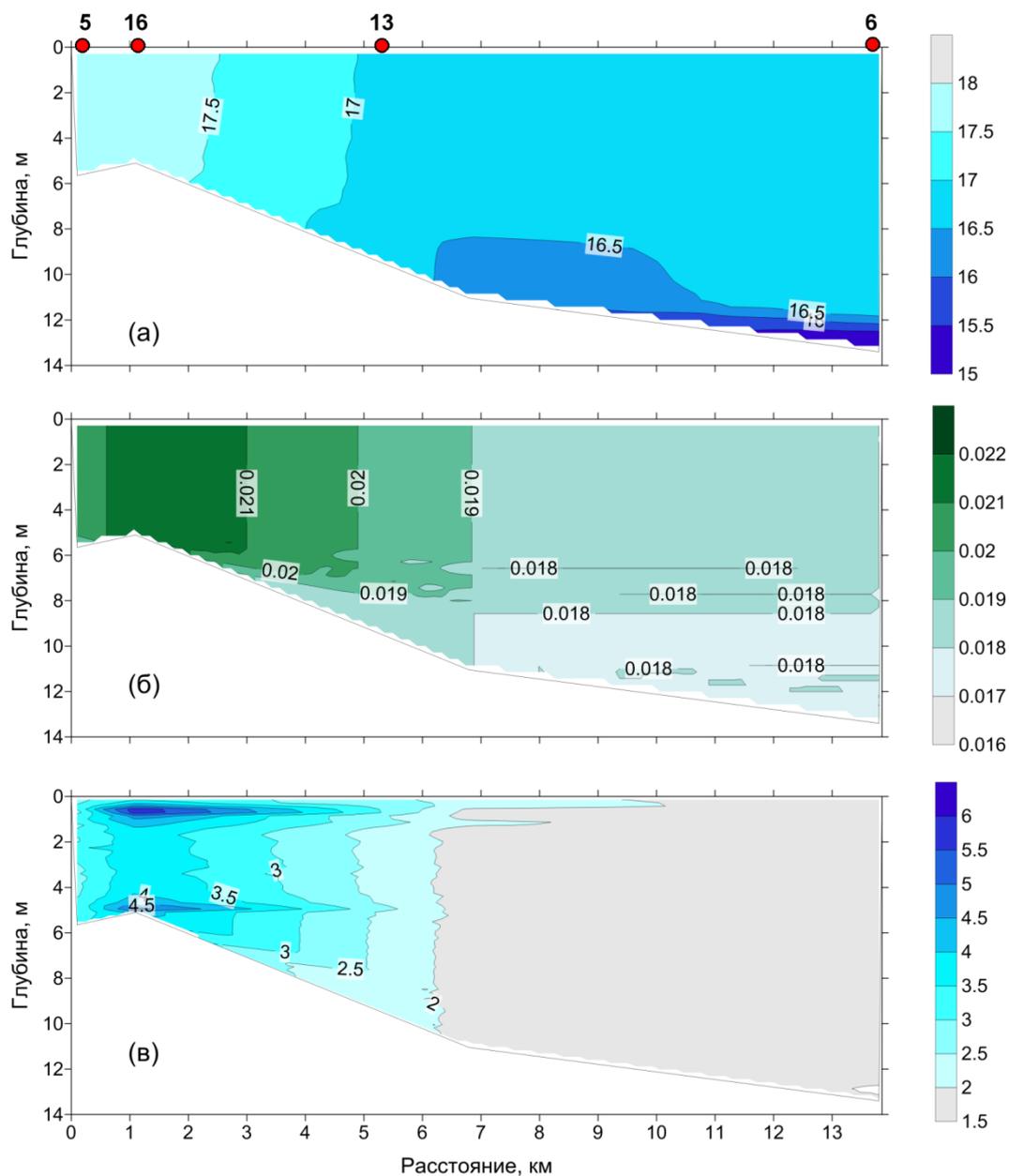
однородна по водному столбу и составляла 1,5-1,6 FTU, увеличиваясь до 3-4 FTU в поверхностном 2-3 м слое вершины Надвоицкого залива (ст. 4) и в южных районах озера по всему водному столбу (ст. 8). В Телекинском заливе (ст. 7) на глубинах 4-5,6 м было зафиксировано резкое увеличение мутности до 11-21 FTU, обусловленное, предположительно, взмучиванием донных осадков при прохождении судов. Юго-восточный залив (ст. 0, 1) характеризовался повышенными до 3-4 FTU значениями мутности.



**Рис. 3.** Температура, °С (а), электропроводность, мкСм/см (б) и мутность воды, FTU (в) на разрезе от северного (ст. 4) до юго-восточного (ст. 0) районов Выгозерского водохранилища, по данным измерений 20-23 июля 2009 г. Здесь и на рисунках 4 и 5 на панели (а) приведены номера станций измерений.

*Составлено авторами*

В северном районе водохранилища максимальные значения электропроводности (0,019-0,022 мСм/см, рис. 4б) и мутности (3-9 FTU, рис. 4в) наблюдались вблизи устья р. Сегежа (ст. 5, 16). Мутность уменьшалась в направлении открытого плеса до 2 FTU (ст. 13) и до 1,6 FTU в направлении Сенной губы (ст. 6).

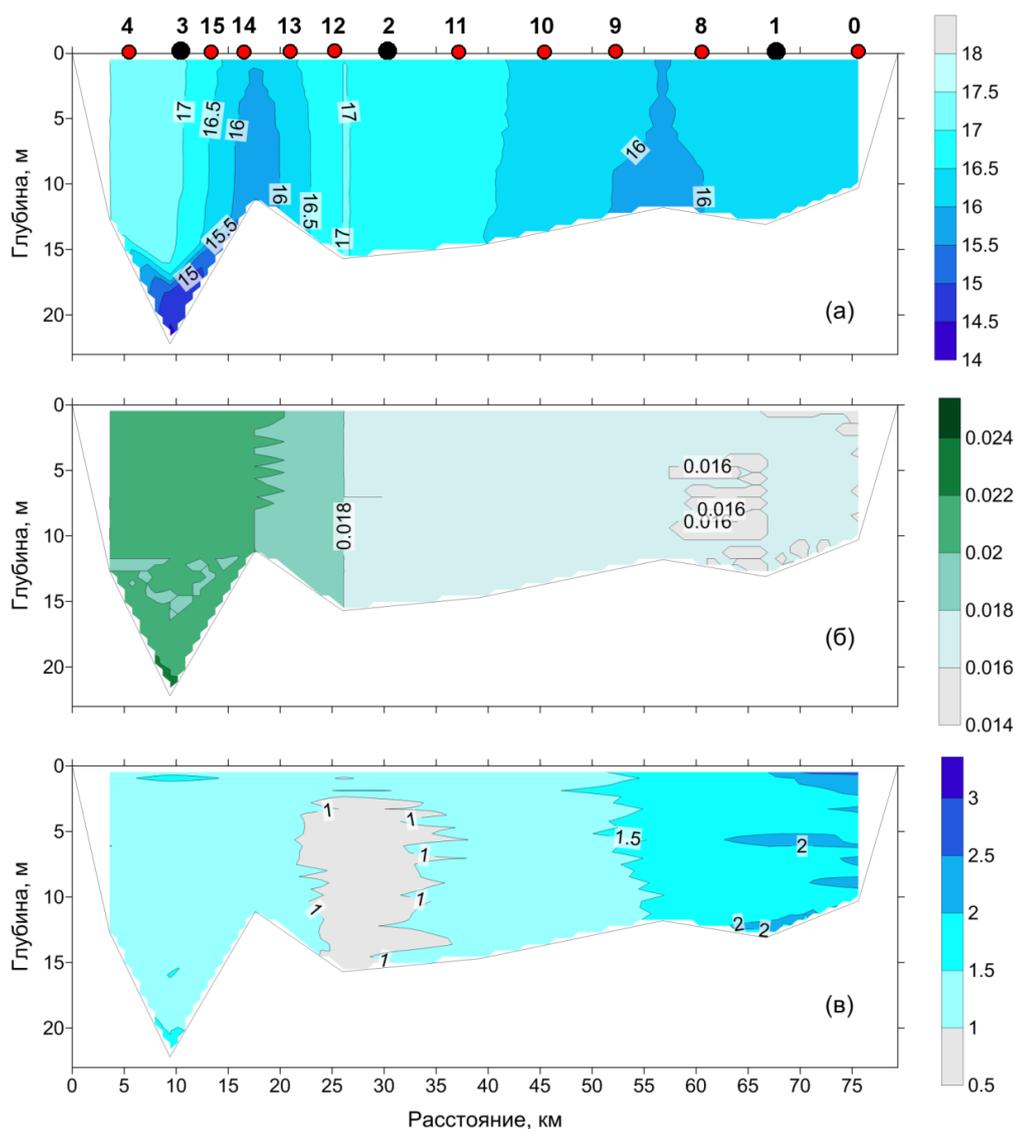


**Рис. 4.** Температура, °С (а), электропроводность, мСм/см (б) и мутность, FTU (в) на разрезе от р. Сегежа (ст. 5) в направлении Сенной губы (ст. 6), по данным измерений 21 июля 2009 г.

*Составлено авторами*

Измерения на этапе осеннего охлаждения водоема были проведены 24-26 августа 2010 г. и 3-4 сентября 2022 г. Было установлено, что мелководная южная и центральная части акватории были перемешаны до дна, северная глубоководная

котловина сохраняла стратификацию (рис. 5а). Максимальные значения фиксировали в придонных слоях северной котловины (до 0,024 мСм/см, рис. 5б). Наименьшие показатели мутности наблюдались в центральном районе (менее 1,0 FTU на ст. 2, рис. 5в). Значения мутности постепенно увеличивались на север (до 1,5 FTU) и на юг (до 2-3 FTU в юго-восточном заливе, ст. 0 и 1). В Телекинском заливе (ст. 7) мутность составляла 1,5-2,5 FTU, в юго-восточном районе достигала 2-3 FTU.



**Рис. 5.** Температура, °С (а), электропроводность, мкСм/см (б) и мутность, FTU (в) на разрезе от северного района озера (ст. 4) до юго-восточного залива (ст. 0), по данным измерений 24-26 августа 2010 г.

*Составлено авторами*

В августе 2010 г. электропроводность вод р. Сегежа изменялась в пределах 0,020-0,027 мСм/см, на Сегежском плесе достигала 0,022 мСм/см, увеличиваясь в направлении ст. 14 до 0,021-0,024 мСм/см. В зоне распространения сточных вод Сегежского ЦБК в районе ст. 14 и 15 удалось зафиксировать высокие значения

электропроводности (от 0,032 мСм/см в поверхностном слое до 0,039 мСм/см на глубине 6 м и далее до 0,06 мСм/см у дна на глубине 7,5 м).

Та же закономерность наблюдалась и в распределении мутности воды. В р. Сегежа она составляла 1,2-1,4 FTU, на Сегежском плесе – от 1,2 на поверхности до 1,5 FTU у дна, в направлении Сенной губы уменьшалась до 1,0 FTU по столбу. В районе ст. 14 и 15 мутность составляла 0,9-1,2 FTU, в зоне влияния сточных вод ЦБК повышалась до 1,7-3,0 FTU. Также в августе 2010 г. были проведены измерения в струе сточных вод Сегежского промузла; температура этих вод составила 20°C, электропроводность – 0,053 мСм/см, мутность – 14,4 FTU.

Измерения 2-4 сентября 2022 г. показали, что в юго-восточной части акватории (ст. 1) распределение мутности по водному столбу характеризовалось увеличением значений с глубиной от 1,5 до 2,0 FTU в перемешанном слое и резким ростом до 3-4 FTU в слое скачка температуры и ниже этого слоя. В северной части акватории (ст. 3) мутность также увеличивалась по перемешанному слою в пределах 1,0-1,5 FTU, в слое скачка температуры и ниже этого слоя резко увеличивалась до 1,9 FTU. Повышенные значения мутности могли быть обусловлены поступлением сточных вод Сегежского промузла. В центральной части акватории (ст. 2) мутность в поверхностном слое составляла 0,9-1,0 FTU, постепенно увеличиваясь с глубиной до 1,2-1,4 FTU.

Параллельно с зондированием водной толщи во время переустановки ловушек отбирались пробы воды на содержание взвешенного вещества. Его концентрация колебалась от 1,2 до 4,0 мг/л (среднее значение 2,8 мг/л) в поверхностных и от 1,3 до 4,9 мг/л (среднее – 4,2 мг/л) в придонных слоях воды. Для станции 1 обычно отмечалось увеличение концентрации взвеси с глубиной. Для станций 2 и 3 различия по глубине не были ярко выражены, иногда концентрация в поверхностном слое чуть превышала содержание взвеси в придонном горизонте. Весь период наблюдений сохранялась закономерность: минимум концентраций взвешенного вещества фиксировали на ст. 2, а максимум – на ст. 1. По сравнению с данными наблюдений прошлых лет средние значения концентраций взвешенного вещества в воде водохранилища были несколько выше, чем 10 лет назад и ниже, чем 40 лет назад. Так, в период минимальной антропогенной нагрузки на водоем (летние исследования 2007-2011 гг.) средние концентрации взвешенного вещества в воде в северном и центральном районах были равны 1,2 мг/л, в юго-восточном – 1,9 мг/л. Исследования, проведенные в 1982-1986 гг. в период максимальной антропогенной нагрузки на водохранилище, показали, что содержание взвешенного вещества в водоеме зависит от сезона и глубины. Так, в воде Северного Выгозера в зимний период средняя концентрация взвеси в поверхностном слое составляла 0,5 мг/л, а в придонном – 7,0 мг/л, что было обусловлено влиянием сточных вод ЦБК. После вскрытия водоема ото льда в результате весеннего перемешивания происходило выравнивание концентрации взвешенных веществ по глубине. В летний период среднее содержание взвешенных веществ в северной части было 4,4 мг/л, в осенний – 1,4 мг/л. [9].

По данным наблюдений 2017-2023 гг. за поступлением взвешенного вещества на дно с помощью СЛ были оценены современные скорости седиментации и осадконакопления в Выгозерском водохранилище. Наименьшая скорость седиментации вещества была зафиксирована в 2018 г. в центральном районе на ст. 2 (0,27 г/(м<sup>2</sup>сут), что соответствует скорости осадконакопления 0,9 мм/год уплотненного осадка) (табл. 2). В аккумуляционной зоне северного района (ст. 3) и

в юго-восточном районе (ст. 1) значения скорости в этот год были выше (0,41 и 2,02 г/(м<sup>2</sup>сут.) или 0,8 и 6,3 мм/год уплотненного осадка, соответственно. К сожалению, в период 2019-2022 гг. в центральном районе и в 2020-2022 гг. в северном ловушки не были найдены. В 2023 году количество осадка, собранного за год на ст. 2 было в 10 раз больше, чем в 2018 г. Для северного района масса осадка различалась в два раза. Неравномерный характер осадочного процесса проявился и на ст. 1 в юго-восточной части озера, где в 2022 г. наблюдалась наиболее высокая скорость седиментации (4,34 г/(м<sup>2</sup>сут.), при скорости осадконакопления 21,3 мм/год неконсолидированного или 10,2 мм/год уплотненного осадка), а в 2019 г. здесь был зафиксирован минимум (0,85 г/(м<sup>2</sup>сут.), что соответствует скорости осадконакопления 6,3 мм в год неконсолидированного или 2,4 мм уплотненного осадка). Усреднение данных показывает возрастание скорости седиментации в водоеме с севера на юг. Средняя скорость осадконакопления в юго-восточной части водохранилища в 3 раза выше, чем в северной (см. табл. 2).

Основными причинами пространственно-временных колебаний седиментации в Выгозерском водохранилище, по нашему мнению, являются незавершенность процесса формирования озерного ложа и береговой линии после создания водохранилища, сложная морфология котловины, неравномерное распределение речного стока и, как следствие, сложная динамика вод. Периодический залповый вынос взвешенного вещества в зоны аккумуляции может происходить в результате развития определенной динамической обстановки, способствующей размыву грунта мелководной части затопленных речных пойм или абразии берегов. Например, в 2018 г. в юго-восточном районе водоема на глубине 12 м (1 м над дном) наблюдали мутьевой поток, количественные характеристики химического состава взвешенного вещества которого (17 % C<sub>org</sub>, 44 % LOI, 54 % Ash), близки к характеристикам вещества из СЛ (15 % C<sub>org</sub>, 47 % LOI, 52 % Ash). Кроме того, значительная межгодовая изменчивость массы взвешенного вещества в ловушках может быть обусловлена разной интенсивностью биологических процессов в самом водоеме в зависимости от погодных условий в разные годы, особенно в мелководной южной и юго-восточной частях водохранилища, где значительная часть дна покрыта высшей водной растительностью, а берега заболочены. Нельзя забывать и об ассимиляции взвешенного вещества в ловушках водными организмами.

**Таблица 2.**

Скорость седиментации (m) и осадконакопления (h) в Выгозерском водохранилище по данным наблюдений из СЛ (2017-2023 гг.)

| Станция | Глубина, м | Дата постановки  | Дата снятия | m, г/(м <sup>2</sup> ·сутки) | h, мм/год |       |
|---------|------------|------------------|-------------|------------------------------|-----------|-------|
|         |            |                  |             |                              | I*        | II**  |
| 1       | 13         | 27.06.2017       | 25.06.2018  | 2,02                         | 16,04     | 6,27  |
|         |            | 25.06.2018       | 19.06.2019  | 0,85                         | 6,26      | 2,43  |
|         |            | 19.06.2019       | 26.08.2020  | 1,71                         | 10,24     | 5,31  |
|         |            | 26.08.2020       | 10.09.2021  | 2,06                         | 11,03     | 6,39  |
|         |            | 10.09.2021       | 04.09.2022  | 4,34                         | 21,32     | 10,19 |
|         |            | 04.09.2022       | 14.09.2023  | 1,83                         | 7,81      | 4,28  |
|         |            | Среднее значение |             |                              | 2,14      | 12,12 |
| 2       | 15         | 27.06.2017       | 25.06.2018  | 0,27                         | 3,84      | 0,89  |

|   |    |                  |            |      |       |      |
|---|----|------------------|------------|------|-------|------|
|   |    | 03.09.2022       | 14.09.2023 | 3,14 | 11,36 | 5,22 |
|   |    | Среднее значение |            | 1,71 | 7,60  | 3,06 |
| 3 | 22 | 27.06.2017       | 24.06.2018 | 0,41 | 4,80  | 0,82 |
|   |    | 24.06.2018       | 19.06.2019 | 0,66 | 11,64 | 2,60 |
|   |    | 03.09.2022       | 14.09.2023 | 1,07 | 5,34  | 1,65 |
|   |    | Среднее значение |            | 0,71 | 7,26  | 1,69 |

\* – неконсолидированный осадок;

\*\* – пересчет на уплотненный осадок, залегающий в ДО на глубине 30 см.

Составлено авторами

Наблюдения за осадочными процессами в Выгозерском водохранилище с помощью ловушек проводилось впервые. В работах [6, 19] скорость осадконакопления в водоеме оценивали на основе изучения колонок ДО (по литологической стратификации). Сравнение наших результатов с литературными данными показывает, что в настоящее время интенсивность седиментационных процессов в водоеме значительно уменьшилась. Так, в центральном районе в период активного переформирования берегов и выравнивания озерного ложа (по экспертной оценке Ю. К. Полякова этот процесс в основном закончился к началу 1970-х гг. [6]) средняя скорость осадконакопления составляла 16,3 мм/год. В 1980<sup>е</sup> гг. она снизилась до 10,0 мм/год, к концу 1990<sup>х</sup> гг. – до 3,5 мм/год [19]. Современная скорость осадконакопления в центральном районе (по данным накопления вещества в ловушках) оценивается в 0,9 мм/год (см. табл. 2). Таким образом, за последние 50 лет скорость седиментации в этом районе Выгозерского водохранилища снизилась в 18 раз. В северном районе на ст. 3 скорость осадконакопления снизилась в пять раз (от 10 мм/год в период 40<sup>х</sup>-70<sup>х</sup>гг. до 2,0 мм/год в настоящее время). Современная скорость осадконакопления, наблюдаемая в юго-восточном районе (6,0 мм/год) в два раза ниже, чем средняя скорость за все время существования водохранилища (14,0 мм/год, мощность накоплений 110 см). Сравнение с озерным периодом (скорость осадконакопления для малого реликтового оз. Боброво, функционировавшего в естественных условиях гумидного климата на территории юго-восточной части водохранилища, была оценена в 0,09 мм/год [19]), показывает, что создание водохранилища привело к увеличению скорости седиментации более чем на два порядка.

В процессе формирования ложа водохранилища и его берегов выделяют два основных периода [20]: становление подводного рельефа, сопровождающееся более интенсивным поступлением наносов, и стабилизация подводного рельефа, происходящая при умеренном поступлении наносов в водохранилище и при ведущем значении процесса перераспределения наносов. В настоящее время можно констатировать, что Выгозерское водохранилище находится в периоде стабилизации подводного рельефа. Он характеризуется заметным уменьшением поступления материалов от абразии и возрастанием роли твердого стока с водосбора, а также продуктов жизнедеятельности организмов. В этот период рельеф ложа водохранилища формируется в результате накопления аккумулятивного материала все дальше от берега, что способствует постепенному выравниванию рельефа дна. Продолжительность этого этапа может достигать нескольких сотен лет. При этом следует отметить, что в северной части

водохранилища до сих пор фиксируется абразия высоких песчаных берегов, представленных ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями (источник поступления в водоем минеральных веществ). В южной части, где распространены низкие «биогенные» берега, фиксируется абразия торфяников, являющихся источником поступления в водохранилище биогенных материалов.

До создания водохранилища оз. Выгозеро характеризовалось как водоем, где дно заполнено преимущественно рыхлым илом серо-зеленого цвета, а значительное пространство литоральной зоны покрыто железной рудой (бобовой, в виде пластинок или толстой корки) [4]. Это позволяет характеризовать тип седиментогенеза в озере в его естественном состоянии как гумусо-железо-кремниевый. В результате антропогенной трансформации в ДО водоема изменилось соотношение органического и минерального вещества в сторону увеличения доли органической составляющей осадка. Источниками органического вещества являются: речные наносы, седиментация нерастворимых гумусовых веществ, остатки животных и растительных организмов, населяющих водоем, продукты размыва торфянистых сплавин, продукты переработки почвенного слоя и наземной растительности, затопленной при заполнении водоема, а также сточные воды ЦБК [10, 11].

В настоящее время в ДО Выгозерского водохранилища накапливаются железо-кремне-гумусовые осадки. Свежеосажденное взвешенное вещество седиментационных ловушек (табл. 3, рис.6) представлено сильно обводненным (плотность 1,02-1,09 г/мл, пористость от 0,94-0,99), крупноалевритовым (преобладающая фракция 0,03-0,06 мм), неконсолидированным илом. Удельная масса (плотность твердой фазы) варьировала от 1,2 до 2,2 с медианой 1,45 г/см<sup>3</sup>.

**Таблица 3**

Средние значения физических, физико-химических и химических характеристик взвешенного вещества из СЛ и ДО Выгозерского водохранилища

| Показатель                         | Станция 1 |       | Станция 2 |       | Станция 3 |       |
|------------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                                    | СЛ        | ДО    | СЛ        | ДО    | СЛ        | ДО    |
| Eh, мВ                             | 116       | 19    | 312       | 36    | 178       | 49    |
| pH                                 | 7,1       | 7,1   | 7,6       | 7,1   | 6,7       | 6,8   |
| wet(20°C), %                       | 94,7      | 89,3  | 97,5      | 90,3  | 96,6      | 87,4  |
| wet(105°C), %                      | 10,4      | 9,0   | 12,0      | 10,2  | 10,9      | 7,8   |
| por                                | 0,96      | 0,90  | 0,99      | 0,91  | 0,98      | 0,88  |
| m <sub>d</sub> , г/см <sup>3</sup> | 1,45      | 1,43  | 1,70      | 1,48  | 1,43      | 1,35  |
| d, г/мл                            | 1,05      | 1,07  | 1,07      | 1,06  | 1,05      | 1,07  |
| C <sub>org</sub> , %               | 16,4      | 15,9  | 16,6      | 17,7  | 18,5      | 11,9  |
| LOI <sub>(550°C)</sub> , %         | 43,2      | 39,6  | 41,5      | 41,9  | 46,7      | 29,8  |
| Ash, %                             | 54,6      | 57,8  | 57,9      | 55,3  | 50,9      | 67,0  |
| P <sub>min</sub> , %               | 0,15      | 0,18  | 0,13      | 0,16  | 0,18      | 0,13  |
| P <sub>tot</sub> , %               | 0,22      | 0,24  | 0,20      | 0,21  | 0,26      | 0,22  |
| N(NH <sub>4</sub> ), %             | 0,011     | 0,008 | 0,009     | 0,009 | 0,012     | 0,006 |
| N <sub>org</sub> , %               | 0,84      | 0,70  | 0,98      | 0,81  | 1,15      | 0,63  |

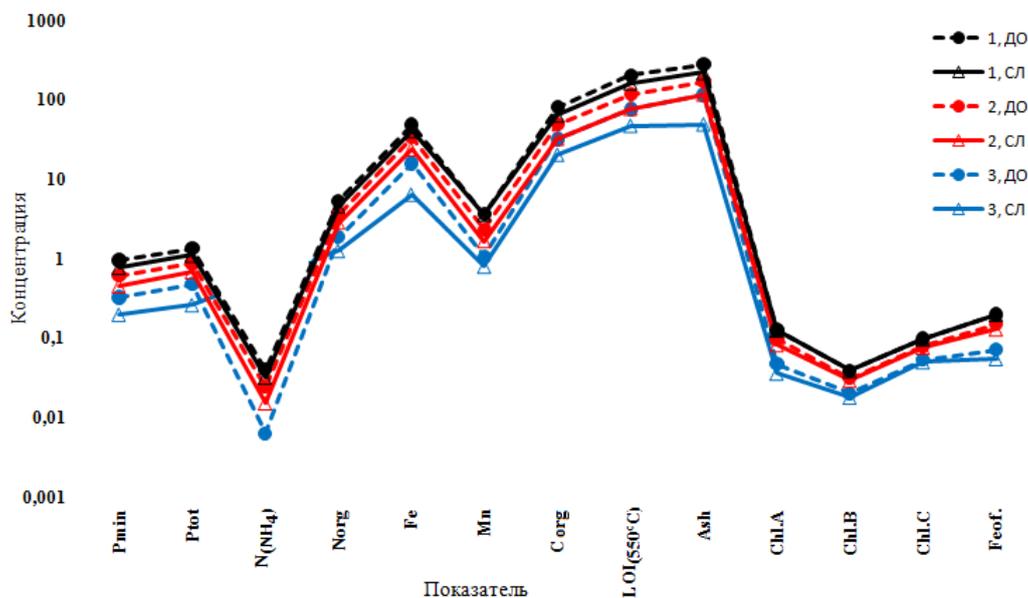
|                       |     |     |     |      |     |     |
|-----------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| Chl.A, мкг/г          | 333 | 142 | 352 | 148  | 324 | 109 |
| Chl.B, мкг/г          | 61  | 28  | 92  | 23   | 116 | 20  |
| Chl.C, мкг/г          | 134 | 12  | 225 | 36   | 310 | 35  |
| Feof., мкг/г          | 537 | 262 | 580 | 226  | 501 | 168 |
| *Гуминовые кислоты, % | 0,7 | 0,4 | 1,8 | 1,7  | 1,5 | 1,9 |
| *Фульвовые кислоты, % | 1,4 | 1,8 | 0,4 | 0,8  | 0,7 | 0,6 |
| Fe, %                 | 7,6 | 7,9 | 7,8 | 10,7 | 9,9 | 9,6 |
| Mn, %                 | 1,8 | 0,4 | 0,6 | 0,7  | 1,0 | 0,3 |

\*единичное определение

*Составлено авторами*

Окислительно-восстановительная обстановка во взвеси (Eh от 50 до 310 мВ) была связана с районом постановки СЛ: наименьшие значения, соответствующие слабовосстановительным условиям среды отмечены в юго-восточной части, наибольшие (слабоокислительные условия) фиксировали в центральном районе. Реакция среды осадков различалась на четыре единицы рН (от 4,1 до 7,8; медиана 7,4). Разнообразие редокс- и кислотно-основных обстановок в СЛ из разных районов определяется не только их местоположением (разные источники осадочного материала), но и неравномерным характером седиментационных процессов в водоеме. Геохимический состав и степень неоднородности осадка, скорость поступления на дно взвешенного вещества зависят от сезона года. Жизнедеятельность водных организмов, случайно попадающих в ловушки, также может изменять среду и состав осадка, накопленного в них за длительный срок [21].

Изучение состава взвешенного вещества из СЛ, установленных в разных районах водоема, показало следующие отличия (см. табл. 3). Соотношения органической и минеральной частей осадка во всех изученных пробах были близки к единице (0,8; 0,7; 0,9 здесь и далее для ст. 1, 2, 3 соответственно). Органическое вещество взвесей, собранных в юго-восточном районе отличается более высокими значениями атомного соотношения С:N (23; 20; 19), фульватным характером гумуса (отношение концентраций гуминовых и фульвовых кислот – 0,5; 4,5; 2,1), более низким пигментным фоном (сумма хлорофиллов А, Б, С – 530; 670; 750 мкг/г). Осадки этого района также отличаются очень высоким содержанием Mn (в 200 раз выше кларковых значений). Во взвешенном веществе северного района водохранилища (приемник сточных вод Сегежского ЦБК) зафиксированы самые высокие концентрации азота, фосфора и Fe (см. табл. 3). Взвешенное вещество центрального района содержит больше минерального компонента (см. табл. 3). Для всех исследованных станций характерны значимые (в 2-3 раза) межгодовые колебания значений концентраций Fe, Mn и подвижных форм азота и фосфора. Сравнение химического состава взвешенного вещества из СЛ с составом донных отложений, залегающих в районах установки ловушек, показало, что в целом ДО (данные, представленные в табл. 3 и на рис. 6, а также полученные ранее [10, 11, 22]) наследуют состав поступающей на дно взвеси (см. табл. 3, см. рис. 6). Химический состав ДО по сравнению со взвесью отличается меньшими концентрациями органических веществ и биогенных элементов, что связано с преобразованиями вещества в ДО в раннем диагенезе.



**Рис. 6.** Сравнение химического состава поверхностного слоя ДО и взвешенного вещества СЛ, %  
*Составлено авторами*

### Выводы

Исследования современных седиментационных процессов в Выгозерском водохранилище, включавшее гидрофизические и гидрохимические наблюдения за распределением взвешенного вещества в водной толще и его поступлением на дно выявило следующие особенности.

1. Измерения температуры, электропроводности и мутности воды в режиме вертикальных зондирований на сетке станций, проведенные в летние и осенние месяцы 2008-2011 гг. и 2022 г. показали, что южный, юго-восточный и центральный районы Выгозерского водохранилища подвержены ветровому перемешиванию, глубоководная северная котловина водоема остается стратифицированной. Максимальные значения электропроводности были характерны для северного района и уменьшались в направлении южных районов озера. Минимальные значения мутности были характерны для центрального района водохранилища, максимальные – для южного (Телекинский залив) и юго-восточного районов, что связано с их мелководностью и влиянием взмучивания донных отложений под действием ветро-волнового перемешивания и при прохождении судов по трассе ББК. Высокие значения мутности в устье р. Сегежа и зоне городского побережья в северном районе водохранилища обусловлены влиянием Сегежского промузла.

2. Наблюдения 2017-2023 гг. за поступлением взвешенного вещества в донные отложения с помощью СЛ показали неравномерный характер осадконакопления в Выгозерском водохранилище. Скорость седиментации изменялась от 0,27 (центральный район) до 4,34 (юго-восточный район) г/(м<sup>2</sup>сут.). Межгодовая изменчивость массы взвешенного вещества, поступающего на дно водоема, составила: от 0,85 до 4,34, среднее значение 2,14 г/(м<sup>2</sup>сут.) в юго-восточном районе; от 0,27 до 3,14, среднее значение 1,71 г/(м<sup>2</sup>сут.) в центральном районе; от 0,41 до 1,07, среднее значение 0,71 г/(м<sup>2</sup>сут.) в северном районе.

Средняя за период наблюдений скорость осадконакопления в юго-восточном районе водохранилища (6 мм/год) в два раза выше скорости в центральном районе (3 мм/год) и в 3 раза выше, чем в северном (2 мм/год). Незавершенность процесса формирования ложа и береговой линии водохранилища, сложная морфология котловины, неравномерное распределение речного стока и антропогенной нагрузки являются основными причинами пространственно-временной изменчивости современных седиментационных процессов в Выгозерском водохранилище.

3. Изучение химического состава взвешенного вещества, поступающего на дно, выявило отличие состава взвесей из разных районов Выгозерского водохранилища. Вещество юго-восточного района отличается фульватным характером гумуса, более высокими значениями атомного соотношения C:N, более низким пигментным фоном и аномально высоким содержанием Mn. Вещество северного района отличается высокими концентрациями азота, фосфора и Fe. Вещество центрального района содержит больше минерального компонента. Для всего водоема характерны межгодовые колебания концентраций Fe, Mn, подвижных форм азота и фосфора во взвешях СЛ (в 2-3 раза). ДО наследуют состав поступающего на дно взвешенного вещества.

В заключении необходимо отметить, что процессы абразии высоких песчаных берегов в северной части водоема, абразия торфяников в южных районах водохранилища и твердый сток ЦБК являются значимыми внешними источниками осадочного материала, влияющими на неоднородность седиментационных процессов в котловине. Выгозерское водохранилище с точки зрения лимногенеза находится в настоящее время в периоде стабилизации подводного рельефа, который характеризуется заметным уменьшением поступления материалов от абразии и возрастанием роли твердого стока с водосбора, а также продуктов жизнедеятельности организмов.

*Работа выполнена в рамках темы НИР Госзадания ИВПС КарНЦ РАН.*

### *Литература*

1. Озера Карелии. Природа, рыбы, рыбное хозяйство. Справочник / под ред. Александрова Б.М. и др. Петрозаводск: Госиздат Карел. АССР, 1959. 619 с.
2. Литвиненко А. В., Филатов Н. Н., Богданова М. С., Карпечко В. А., Литвинова И. А., Сало Ю. А. Антропогенная трансформация и хозяйственное использование озера Выгозеро // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 4. С. 419-428.
3. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада ЕТР: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / под ред. Филатов Н. Н., Калинин Н. М., Куликова Т. П., Литвиненко А. В., Лозовик П. А. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
4. Соколов С. И., Верещагин Г. Ю. Лимнологический очерк оз. Выгозера // Труды I Всероссийского гидрологического съезда. Л., 1925. С. 198-200.
5. Васильева Е. П. Характеристика химического состава донных отложений Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск, 1978. С. 63-79.
6. Поляков Ю. К. Донные отложения Выгозера // Водные ресурсы Карелии и их использование. Петрозаводск, 1978. С. 57-63.

7. Лозовик П. А. Современное состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга в 1992-1997 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 188 с.
8. Состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга в 1998-2006 гг./ под ред. Лозовика П. А. и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.
9. Озера Карелии. Справочник / под ред. Филатова Н. Н., Кухарева В. И. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 463 с.
10. Белкина Н. А. Ретроспективная оценка состояния донных отложений Выгозерского водохранилища // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 3. С. 270-279.
11. Белкина Н. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В. Особенности миграции, трансформации и накопления железа в Выгозерском водохранилище // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 5. С. 505-513. DOI: 10.1134/S0321059618050036
12. ГОСТ 17.1.5.01-80 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. –М., 1982. 6 с.
13. Лукашин В. Н., Ключиткин А. А., Лисицын А. П., Новигатский А. Н. Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С.746-750.
14. Belkina N. A., Kulik N. V., Efremenko N. A., Potakhin M. S., Kukharev V. I., Ryabinkin A. V., Zdorovenov R. E., Georgiev A. P., Strakhovenko V. D., Gatalskaya E. V., Kravchenko I. Y., Ludikova A. V., Subetto D.A. Contemporary Sedimentation in Lake Onego: Geochemical Features of Water, Suspended Matter, and Accumulation Rate. Water – 2023. Vol. 15, № 1014. <https://doi.org/10.3390/w15061014>
15. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под ред. Лозовика П. А., Ефременко Н. А. СПб: Нестор-История, 2017. 272 с.
16. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1982. 487 с.
17. Орлов Д. С. Практикум по биохимии гумуса. М.: Изд. Моск. ун-та, 1969. 157 с.
18. РД 52.24.382-2019 Массовая концентрация фосфатного фосфора в водах. Методика измерений фотометрическим методом. Ростов-на-Дону., 2019. 31 с.
19. Потахин М. С., Белкина Н. А., Слукровский З. И., Новицкий Д. Г., Морозова И. В. Изменение донных отложений Выгозера в результате многофакторного антропогенного воздействия // Общество. Среда. Развитие. 2018. № 3. С. 107-117.
20. Авакян А. Б., Шарапов В. А., Салтанкин В. П. Водоохранилища мира. М.: Наука, 1979. 285 с.
21. Buesseler K. O., Antia A. N., Chen M., Fowler S. W., Gardner W. D., Gustafsson O., Harada K., Michaels A. F., van der Loeff M.R., Sarin M., et al. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes. J. Mar. Res. 2007. № 65. P. 345-416.
22. Морозова И. В., Белкина Н. А., Потахин М. С., Гатальская Е. В. Эмиссия метана из донных отложений Выгозерского водохранилища // Вестник Московского университета. Сер. 5. Геогр. 2022. № 6. С.15-26. DOI:10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-15-26

N. A. Belkina,  
E. V. Gatal'skaya<sup>1</sup>,  
G. E. Zdoroven'nova,  
M. C. Potakhin,  
R. E. Zdoroven'nov,  
I. V. Morozova

## *Modern sedimentation processes in the Vygozersk reservoir*

---

Institute of Water Problems of the North KarSC RAS,  
Petrozavodsk  
e-mail: <sup>1</sup>katusha9210@yandex.ru

**Abstract.** *The results of hydrophysical and hydrochemical studies of sedimentation processes in one of the largest reservoirs of the North-West of the Russian Federation, the Vygozersk reservoir, are presented. Measurements of temperature, electrical conductivity and turbidity of water in the mode of vertical probing in the summer and autumn months showed that the distribution of suspended matter in the water column is affected by wind-wave mixing in the southern regions of the reservoir; the north deep water region is influenced by wastewater of the Segezha Pulp and Paper Mill. Observations of the arrival of suspended matter to the bottom using sedimentation traps revealed the spatial and temporal variability of the accumulation of sedimentary matter in the bottom sediments. The masses of the substance accumulated in the traps and the estimates of the sedimentation rate made on them differ by 2-10 times depending on the reservoir area. The quantitative and qualitative composition of the suspended matter entering the bottom varies in different areas of the reservoir.*

**Keywords:** *reservoir, sedimentation processes, suspended matter, sedimentation rate, water temperature and turbidity*

### *References*

1. Oзера Karelii. Priroda, ryby, rybnoe hozyajstvo. Spravochnik / pod red. Aleksandrova B.M. i dr. Petrozavodsk: Gosizdat Karel. ASSR, 1959. 619 s. (in Russian)
2. Litvinenko A. V., Filatov N. N., Bogdanova M. S., Karpechko V. A., Litvinova I. A., Salo YU. A. Antropogennaya transformaciya i hozyajstvennoe ispol'zovanie ozera Vygozero // Vodnye resursy. 2014. T. 41. № 4. S. 419-428. (in Russian)
3. Krupnejshie ozera-vodohranilishcha Severo-Zapada ETR: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennyh vozdeystviyah / pod red. Filatov N. N., Kalinkina N. M., Kulikova T. P., Litvinenko A. V., Lozovik P. A. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2015. 375 s. (in Russian)
4. Sokolov S. I., Vereshchagin G. YU. Limnologicheskij ocherk oz. Vygozera // Trudy I Vserossijskogo gidrologicheskogo s"ezda. L., 1925. S. 198-200. (in Russian)
5. Vasil'eva E. P. Harakteristika himicheskogo sostava donnyh otlozhenij Vygozerskogo vodohranilishcha // Vodnye resursy Karelii i ih ispol'zovanie. Petrozavodsk, 1978. S. 63-79. (in Russian)
6. Polyakov YU. K. Donnye otlozheniya Vygozera // Vodnye resursy Karelii i ih ispol'zovanie. Petrozavodsk, 1978. S. 57-63. (in Russian)
7. Lozovik P. A. Sovremennoe sostoyanie vodnyh ob"ektov respubliky Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa v 1992-1997 gg. Petrozavodsk: KarNC RAN, 1998. 188 s. (in Russian)

8. Sostoyanie vodnyh ob"ektov respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa v 1998-2006 gg./ pod. red. Lozovika P. A. i dr. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2007. 210 s. (in Russian)
9. Ozera Karelii. Spravochnik / pod red. Filatova N. N., Kuhareva V. I. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2013. 463 s. (in Russian)
10. Belkina N. A. Retrospektivnaya ocenka sostoyaniya donnyh otlozhenij Vygozerskogo vodohranilishcha // Vodnye resursy. 2014. T. 41. № 3. S. 270-279. (in Russian)
11. Belkina N. A., Efremenko N. A., Kulik N. V. Osobennosti migracii, transformacii i nakopleniya zheleza v Vygozerskom vodohranilishche // Vodnye resursy. 2018. T. 45. № 5. S. 505-513. DOI: 10.1134/S0321059618050036. (in Russian)
12. GOST 17.1.5.01-80 Ohrana prirody (SSOP). Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnyh otlozhenij vodnyh ob"ektov dlya analiza na zagryaznennost'. – M., 1982. 6 s. (in Russian)
13. Lukashin V. N., Klyuvitkin A. A., Lisicyn A. P., Novigatskij A. N. Malaya sedimentacionnaya lovushka MSL-110 // Okeanologiya. 2011. T. 51. № 4. S.746-750. (in Russian)
14. Belkina N. A., Kulik N. V., Efremenko N. A., Potakhin M. S., Kukharev V. I., Ryabinkin A. V., Zdorovennov R. E., Georgiev A. P., Strakhovenko V. D., Gatal'skaya E. V., Kravchenko I. Y., Ludikova A. V., Subetto D.A. Contemporary Sedimentation in Lake Onego: Geochemical Features of Water, Suspended Matter, and Accumulation Rate. Water – 2023. Vol. 15, № 1014. <https://doi.org/10.3390/w15061014>. (in Russian)
15. Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrohimicheskoy praktike / pod red. Lozovika P. A., Efremenko N. A. SPb: Nestor-Istoriya, 2017. 272 s. (in Russian)
16. Arinushkina E. V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv. M.: Izd-vo MGU, 1982. 487 s. (in Russian)
17. Orlov D. S. Praktikum po biohimii gumusa. M.: Izd. Mosk. un-ta, 1969. 157 s. (in Russian)
18. RD 52.24.382-2019 Massovaya koncentraciya fosfatnogo fosfora v vodah. Metodika izmerenij fotometricheskim metodom. Rostov-na-Donu., 2019. 31 s. (in Russian)
19. Potahin M. S., Belkina N. A., Slukovskij Z. I., Novickij D. G., Morozova I. V. Izmenenie donnyh otlozhenij Vygozera v rezul'tate mnogofaktornogo antropogennogo vozdejstviya // Obshchestvo. Sreda. Razvitie. 2018. № 3. S. 107-117. (in Russian)
20. Avakyan A. B., SHarapov V. A., Saltankin V. P. Vodohranilishcha mira. M.: Nauka, 1979. 285 s. (in Russian)
21. Buesseler K. O., Antia A. N., Chen M., Fowler S. W., Gardner W. D., Gustafsson O., Harada K., Michaels A. F., van der Loeff M.R., Sarin M., et al. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes. J. Mar. Res. 2007. № 65. P. 345-416. (in Russian)
22. Morozova I. V., Belkina N. A., Potahin M. S., Gatal'skaya E. V. Emissiya metana iz donnyh otlozhenij Vygozerskogo vodohranilishcha // Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geogr. 2022. № 6. S.15-26. DOI:10.55959/MSU0579-9414-5-2022-6-15-26. (in Russian)

*Поступила в редакцию 01.10.2023 г.*