



УДК 556:532.5:528.8

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ В АКВАТОРИИ НИЖНЕГО БЬЕФА НИЖЕГОРОДСКОГО ГИДРОУЗЛА

**Шишкина Ольга Дмитриевна**, к.т.н., научный сотрудник отдела нелинейных геофизических процессов  
ФИЦ Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова - Грехова  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

**Капустин Иван Александрович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности  
заведующий лабораторией информационно-измерительных систем, заместитель заведующего отделом радиофизических методов в гидрофизике  
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
ФИЦ Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова - Грехова  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

**Мольков Александр Андреевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности  
научный сотрудник отдела радиофизических методов в гидрофизике  
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
ФИЦ Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова - Грехова  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

**Доброхотова Дарья Васильевна**, стажер-исследователь лаборатории информационно-измерительных систем отдела радиофизических методов в гидрофизике  
ФИЦ Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова - Грехова  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

---

*Работа авторов профинансирована частично из средств государственного задания  
(программы № FFUF-2024-0026 и № FFUF-2024-0033)*

---

*Аннотация. Проведено инструментальное исследование морфологии и гидрологии участка реки Волги в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла. Были выполнены акустические измерения плотности взвеси во время трех сезонов в навигационный*

период. Выявлено наличие вертикальной и горизонтальной стратификации в исследуемой акватории. Пространственное распределение взвеси в объеме воды зависело от морфологии дна, времени суток и сезона проведения исследований.

**Ключевые слова:** гидроузел, нижний бьеф, сбросной поток, гидрологический режим, концентрация взвеси, пространственное распределение, ADCP-измерения, стратификация, морфология дна, размываемое дно, русловой процесс.

## Введение:

В результате проведения комплексного исследования нижнего бьефа Нижегородского гидроузла (НГУ) [1] было выявлено наличие выраженной стратификации в исследуемой акватории.

Измерения проводились на участке от плотины НГУ до г. Городец в весенний, летний и осенний периоды во время навигации на р. Волга.

При помощи акустического доплеровского профилографа течений (ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz) [2], установленного на маломерном судне, измерялась концентрация эхогенных частиц в толще воды на глубинах от 0.6 м до дна. Траектория движения измерительного комплекса охватывала как периметр исследуемой акватории, так и несколько сечений поперек сбросного потока. Далее по результатам программной обработки сигнала восстанавливалось распределение плотности взвеси по глубине [3].

Особенностью такого метода исследования является неизбирательная фиксация наличия любых частиц с плотностью, отличающейся от плотности воды. То есть, сигнал могут создавать частицы различной природы, как органического, так и неорганического происхождения.

## Результаты натурных измерений:

Исследования поля плотности взвеси в натуральных условиях проводились в дневное время при различных объемах расхода гидроузла в диапазоне  $Q = 940 \div 4000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Результаты замеров в одном из поперечных сечений сбросного потока в период максимального почасового объема сброса  $Q \sim 4000 \text{ м}^3/\text{с}$  представлены на (рис. 1).

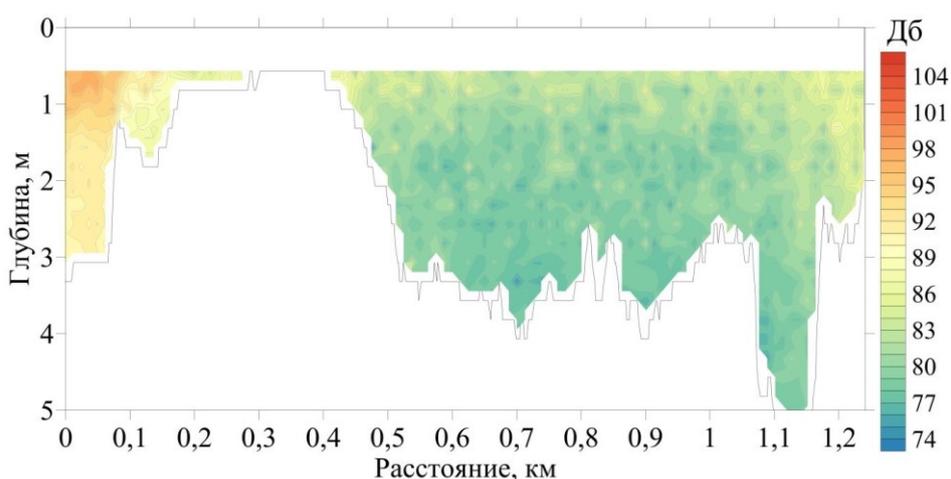


Рис.1. Распределение взвеси 25.05.2022 г. в сечении поперек сбросного потока на расстоянии  $\sim 1500$  м от НГУ (расстояние от левого берега) ( $Q = 3750 \text{ м}^3/\text{с}$ , время измерения 12:00 ч. – 18:00 ч.).

Измерения, выполненные 25.05.2022 г., показали фактическое отсутствие в акватории слоев с однородными гидрофизическими свойствами (стратификации). Поле

плотности экзогенных частиц имело слабоконтрастную структуру при равномерном распределении по глубине мелкомасштабных зон с однородной интенсивностью сигнала.

При этом уровень акустического сигнала повышался по направлению от дна к свободной поверхности, а также в прибрежной зоне.

Замеры в поперечных сечениях сбросного потока от 08.08.2022 г. и от 25.08.2023 г., представленные на (рис. 2) и (рис. 3) соответственно, выявили наличие приповерхностного слоя толщиной 1.5 м с высоким градиентом акустического сигнала. Что свидетельствует о формировании выраженной вертикальной стратификации.

На большей глубине от 1.5 м до дна наблюдались слои с существенным горизонтальным градиентом плотности взвеси (рис. 2, а,б). Величина горизонтального градиента акустического сигнала возрастала с увеличением сбросного расхода. Интенсивность сигнала снижалась по мере удаления от сбросного потока как источника возмущения.

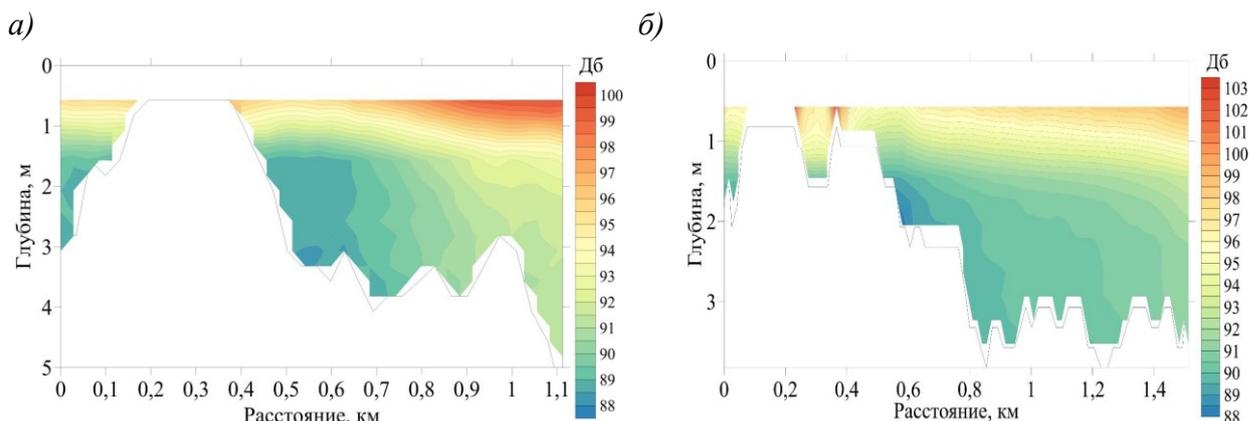


Рис.2. Распределение взвеси 08.08.2022 г. в сечении поперек сбросного потока на расстоянии до 1500 м от НГУ (расстояние от левого берега):

а -  $Q = 2230 \text{ м}^3/\text{с}$ , время измерения 14:20 ч. – 17:00 ч.;

б -  $Q = 1190 \text{ м}^3/\text{с}$ , время измерения 17:20 ч. – 18:34 ч..

На продольном разрезе, представленном на (рис. 3), также был зафиксирован 1.5-метровый приповерхностный слой с высокоградиентной вертикальной стратификацией. Его заглубление в средней части акватории приводит к появлению придонных зон с горизонтальным градиентом плотности взвеси как выше, так и ниже по течению сбросного потока.

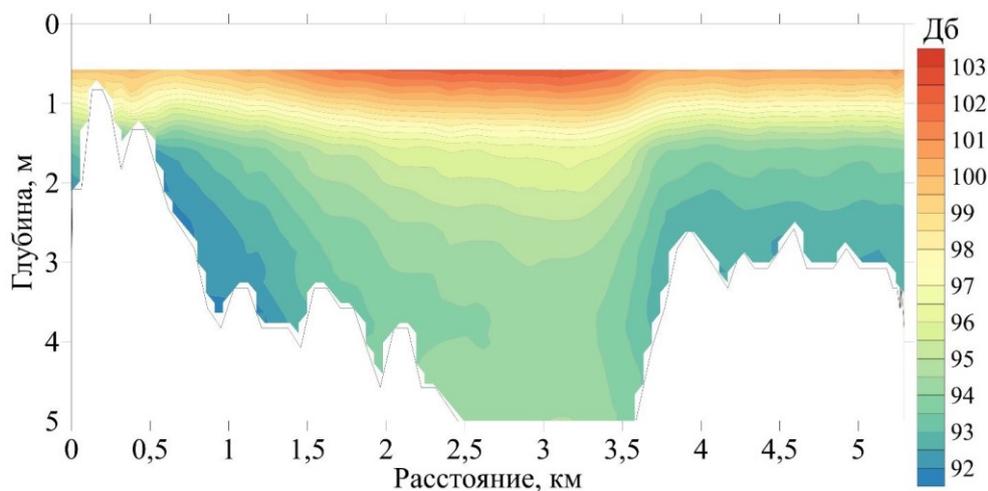


Рис.3. Распределение взвеси 25.08.2023 г. в сечении вдоль сбросного потока на расстоянии до 5500 м от НГУ (время измерения 11:30 ч. – 14:30 ч.).

Аналогичная структура поля плотности вблизи свободной поверхности до глубины 1.5 м наблюдалась по результатам измерений от 12.10.2022 г., представленных на (рис. 4). При этом величина вертикального градиента уровня сигнала была существенно ниже значений, зафиксированных на (рис. 2) и (рис. 3) в летний период.

В придонном слое на глубинах ниже 3 м была также зафиксирована слабо выраженная вертикальная стратификация. Горизонтальная стратификация отсутствовала на всем пути движения измерительного комплекса вдоль сбросного потока.

Следует отметить, что данные измерения проводились при относительно низком значении сбросного расхода  $Q = 940 \text{ м}^3/\text{с}$ . Что, одновременно с низкой температурой воздуха в осенний период, определяло факторы формирования структуры акустического поля.

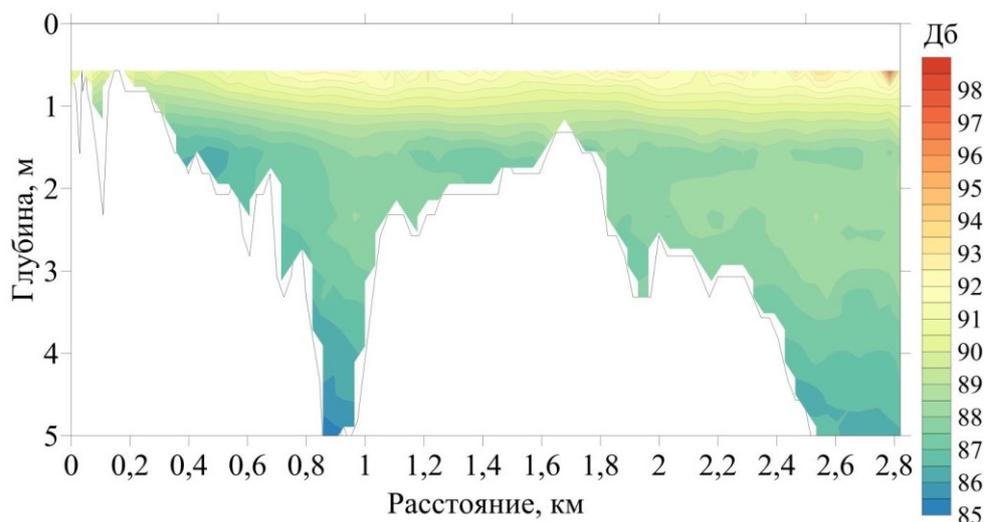


Рис.4. Распределение веса 12.10.2022 г. в сечении вдоль сбросного потока на расстоянии до 2800 м от НГУ ( $Q = 940 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

### Обсуждение результатов:

Результаты проведенного исследования дают представление о сезонном изменении пространственного распределения взвеси в акватории р. Волги от плотины НГУ до г. Городец.

Отсутствие стратификации в сбросном потоке по данным измерений 25.05.2002 г. обусловлено высокой степенью его турбулентности при значениях почасового сбросного расхода гидроузла в дневное время  $Q = 3000 \div 4000 \text{ м}^3/\text{с}$  при слабом влиянии температуры воздуха на гидрологические параметры приповерхностного слоя воды в весенний период.

Повышение температуры воздуха в период проведения замеров летом 08.08 2022 г. и 25.08.2023 г. привело к формированию прогретого приповерхностного слоя с выраженным вертикальным градиентом плотности экзогенных частиц. Которые, при описанных гидрофизических условиях, вероятно, имеют органическую природу. Так как сопутствуют температурным изменениям речной воды.

При этом горизонтальная стратификация более глубоких слоев воды, по всей видимости, имеет неорганическую природу и определяется концентрацией песчаной взвеси в сбросном потоке.

Таким образом, в исследуемой акватории существуют несколько источников формирования комбинированной стратификации. Каждый из них определяется конкретными физическими свойствами среды и активируется в зависимости от внешних условий.

Плотностная стратификация верхнего слоя воды определяется градиентом температуры и зависит от сезона и времени суток. Этому источнику вертикальной неоднородности поля плотности в виде температурной стратификации соответствует

распределение органических включений (планктона), а также пузырьков воздуха. Эти включения обладают плавучестью, близкой к нейтральной для гидрологических условий приповерхностного слоя воды.

Процесс формирования и свойства приповерхностной температурной стратификации как наиболее распространенного типа натурной плотностной неоднородности водной среды достаточно хорошо известны и были исследованы авторами как в натуральных [1, 4], так и в лабораторных условиях [5-6].

Вязкостная стратификация более глубоких слоев формируется из твердых частиц размываемого дна. Величина горизонтального градиента плотности в данном случае зависит от интенсивности (расхода) сбросного потока.

Аналогичная структура с комбинированной стратификацией наблюдается при впадении рек в заливы с морской водой [7]. Где поле с вертикальным градиентом плотности формируется за счет соленостной стратификации по границе смешения морской и речной воды. А горизонтальная вязкостная стратификация возникает за счет выноса донных отложений речного русла потоком пресной воды. Профили двух описанных типов стратификации формируются независимо друг от друга и практически не имеют пространственной корреляции.

Свойства и условия формирования вязкостной стратификации как одного из механизмов трансформации размываемого дна могут быть предметом отдельного исследования.

### **Выводы:**

В акватории нижнего бьефа НГУ на расстоянии до 5 км от плотины в навигационный период наблюдается формирование неоднородной структуры (стратификации) как вдоль, так и поперек сбросного потока.

Анализ условий формирования различных типов таких пространственных структур позволил сделать предварительные выводы о причинах их возникновения.

Количественные оценки пространственного распределения взвеси различного происхождения в исследуемой акватории требуют проведения более детальных и систематизированных измерений гидрофизических, -химических и -биологических параметров в зависимости от объема и суточной динамики сброса воды через гидроузел.

### **Список литературы:**

1. Molkov A. A., Kapustin I. A., Grechushnikova M. G., Dobrokhotova D. V., Leshchev G. V., Vodeneeva E. L., Sharagina E. M., Kolesnikov A. A. Investigation of water dynamics nearby hydroelectric power plant of the Gorky Reservoir on water environment: case study of 2022 //Water. – 2023. – V. 15. – Iss. 17. – P. 3070.
2. Доброхотова Д. В., Капустин И. А., Мольков А. А., Лещёв Г. В. Исследование влияния режима работы ГЭС на перераспределение фитопланктона в верхнем водном слое в приплотинном участке Горьковского водохранилища //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – №. 1. – С. 242-252.
3. Доброхотова Д. В., Капустин И. А., Мольков А. А., Лещев Г.В., Ермошкин А. В. Об особенностях течений в Волжском каскаде водохранилищ //Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2025. – Т. 18. – №. 1. – С. 92-105.
4. Исследование границы применимости теории нелинейных внутренних волн для пространственных краевых явлений в шельфовой зоне: Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». / О.Д. Шишкина-; под ред. Б.П. Белова, А.А. Родионова, С.А. Смирнова, Ф.Ф. Легуши. - С.-Пб.: СПбНЦ РАН, 2018. - 652 с.
5. Баханов В. В., Власов С. Н., Казаков В. И., Кемарская О. Н., Копосова Е. В., Шишкина О. Д. Моделирование внутренних и поверхностных волн реального океана в Большом

термостратифицированном опытовом бассейне ИПФ РАН //Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. – №. 7. – С. 537-554.

6. Линейные и нелинейные механизмы пространственной трансформации внутренних волн на шельфе с горизонтальным и наклонным дном: Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». / О.Д. Шишкина. – С.-Пб.: Химиздат, 2019. - 1023 с.

7. Uncles R. J., Stephens J. A., Law D. J. Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK: Flocs, fluid mud, stationary suspensions and tidal bores //Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2006. – V. 67. – P. 30-52.

## **CONDITIONS OF FORMATION OF STRATIFICATION IN WATER AREA OF LOWER REACHES OF NIZHNY NOVGOROD HYDROELECTRIC COMPLEX**

Olga D. Shishkina, Ivan A. Kapustin, Alexander A. Molkov, Daria V. Dobrokhotova

*Abstract. An instrumental study of the morphology and hydrology of the Volga River in the lower reaches of the Nizhny Novgorod hydroelectric complex has been carried out. Acoustic measurements of the suspension density were performed during three seasons within the navigation period. The presence of both vertical and horizontal stratification was revealed. The formation of the spatial distribution of the suspension in the water volume depended on the morphology of the bottom, the time period of day and the season of the year studied.*

*Keywords: hydroelectric complex, lower reaches, discharge flow, hydrological regime, suspension concentration, spatial distribution, ADCP-measurements, stratification, riverbed morphology, eroded bottom, riverbed process.*