

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-8

УДК 556.556

© Д. В. Доброхотова<sup>1,2\*</sup>, И. А. Капустин<sup>1–3</sup>, А. А. Мольков<sup>1–3</sup>, Г. В. Лещев<sup>1,2</sup>, А. В. Ермошкин<sup>1,2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

<sup>2</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

<sup>3</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5

\*vostryakova@ipfran.ru

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ТЕЧЕНИЙ В ВОЛЖСКОМ КАСКАДЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

Статья поступила в редакцию 25.11.2024, после доработки 22.01.2025, принята в печать 17.02.2025

### Аннотация

Данные о структуре течений в большинстве водохранилищ Волжского каскада получены в прошлом веке и корректно описывают современную структуру течений лишь в общем. В работе представлены структуры течений, полученные в ходе натурных измерений в 2023 и 2024 годах с помощью акустического профилографа течений, на разном удалении от ГЭС в четырех водохранилищах: Горьковском, Чебоксарском, Куйбышевском, Волгоградском. Настоящая работа представляет собой краткий обзор имеющейся базы данных измерений течений в акватории водохранилищ Волжского каскада. Продемонстрированы продольные разрезы речной части Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ, пространственные структуры течений в озерных частях рассматриваемых водохранилищ. Показано, что средняя скорость течения в речной части водохранилища спадает при удалении от плотины ГЭС, структура течений в озерной части водохранилища обладает высокой изменчивостью в зависимости от режима расхода через ГЭС. Представлены локальные особенности течений, связанные с регулированием стока на гидроузлах, к которым, согласно измерениям, относятся формирование круговоротов, изменение скоростей и направлений течений.

**Ключевые слова:** течение, ADCP-измерения, водохранилища Волжского каскада, режим работы ГЭС, речная и озерная части водохранилища, Волга

© D. V. Dobrokhotova<sup>1,2\*</sup>, I. A. Kapustin<sup>1–3</sup>, A. A. Molkov<sup>1–3</sup>, G. V. Leshchev<sup>1,2</sup>, A. V. Ermoshkin<sup>1,2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod 603022, Russia

<sup>2</sup>A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod 603950, Russia

<sup>3</sup>Volzhsky State University of Water Transport, 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod 603950, Russia

\*vostryakova@ipfran.ru

## PECULIARITIES OF CURRENTS IN THE VOLGA RESERVOIR CASCADE

Received 25.11.2024, Revised 22.01.2025, Accepted 17.02.2025

### Abstract

Data on the current structure in most reservoirs of the Volga Cascade were obtained in the last century and correctly describe the current structure only in general terms. The paper presents current structures at different distances from the HPPs in the Gorky, Cheboksary, Kuibyshev, and Volgograd reservoirs. The present work is a brief review of the existing database of current measurements in the water area of the Volga Cascade reservoirs. The data were obtained during field measurements in 2023 and 2024 using an acoustic current profiler. Longitudinal sections of the river part of the Cheboksarsky and Kuibyshev reservoirs, spatial structures of currents in the lake parts of the considered reservoirs are demonstrated. It is shown that the average current velocity in the river part of the reservoir decreases with distance from the HPP dam. The structure of currents in the lake part of the reservoir has high variability depending on the flow regime through the HPP. Local features of currents related to flow regulation at hydrosystems are presented, which include formation of whirlpools, changes in velocity and current directions.

**Keywords:** Current, ADCP measurements, Volga cascade reservoirs, flow rate at HPP, river and lake parts of the reservoirs, Volga

Ссылка для цитирования: 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. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-8

For citation: Dobrokhotova D.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Leshchev G.V., Ermoshkin A.V. Peculiarities of Currents in the Volga Reservoir Cascade. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):92–105. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-8

## 1. Введение

В настоящее время Волга представляет собой каскад водохранилищ, общей чертой которых является сезонное регулирование стока с весенним накоплением и последующей сработкой водохранилищ [1]. Помимо сезонного, имеет место суточное регулирование расхода через ГЭС, отвечающее потребностям в электроэнергии. Зарегулирование речного стока приводит к постепенному изменению гидрологических, гидрооптических, гидробиологических и гидрохимических показателей воды и формированию комплекса вторичных грунтов [2, 3]. Мониторинг водохранилищ ведется на сетке гидрологических постов, функционирующих с момента их наполнения, хотя некоторые из постов функционировали и до наполнения водохранилищ. Однако в настоящее время для оценки влияния водохранилищ на газообмен [4, 5], региональный климат [6, 7], флору и фауну [8, 9] все чаще привлекаются данные спутниковых сканеров цвета высокого и среднего пространственных разрешений.

Несмотря на то, что течения играют определяющую роль в переносе водных масс, примесей, перемешивании, накоплении донных отложений и создании условий для жизнедеятельности различных организмов, данные о структуре течений в большинстве водохранилищ получены в прошлом веке путем измерений с помощью плавучих самописцев и вертушек на гидрологических постах [10]. На основе таких дискретных данных построена усредненная структура течений [1, 11, 12], корректно описывающая современную лишь обобщенно. К настоящему времени изменившиеся со времени наиболее активных измерений [1, 2, 11, 12] рельеф дна и уровень воды, а также переменный объем сброса воды через ГЭС, привели к локальным изменениям в структуре течений. Такие изменения течений затруднительно учитывать при верификации методов спутникового мониторинга внутренних водоемов с помощью данных, полученных в прошлом веке. К примеру, структура течений в акватории наиболее молодого Чебоксарского водохранилища (наполнение 1980 г.) представлена в литературе [12] до наполнения в составе Куйбышевского водохранилища. Исследования в Чебоксарском водохранилище в большинстве случаев направлены на гидрологические и экологические проблемы в связи с его заполнением до промежуточного уровня [13, 14], однако ни структура течений, ни влияние на течение режима работы ГЭС в литературе не представлены. Со времени регулярных измерений [1, 11, 12] изменился суточный режим работы ГЭС, как, например, увеличения расхода в утренние и вечерние часы сменилось на дневное увеличение стока в Нижегородской ГЭС [11]. Учитывая влияния суточного регулирования стока на течения (согласно [15] зона влияния на больших реках не превышает 100 км), смена суточного регулирования приводит к существенным изменениям в режиме течений.

Для оценок влияния гидродинамического режима ГЭС на развитие фитопланктона [16], изменение удельной электропроводности и температуры [17], распределение рыб [18] и формирование донных осадков [19] используются гидродинамические модели [20, 21] и данные среднесуточных расходов и уровней. Для апробации, верификации моделей измерение течений в ходе натурных измерений необходимы. Использование данных, полученных в прошлом веке, для развития методов спутникового мониторинга внутренних водоемов, для восстановления поля течений дистанционными методами (например, методом МСС [22–24]), не представляются корректным. Как показано в [23, 24], обобщенное представление о структуре течений не всегда может объяснить некоторые возникающие эффекты в отсутствие непосредственных измерений.

В настоящей работе продемонстрирована структура средних течений на разных участках четырех водохранилищ Волжского каскада на основе данных натурных измерений, проведенных в 2023 и 2024 гг. Измерения выполнены в период сработки водохранилища до заданной отметки, т. е. после весеннего накопления. В работе приводятся средние по глубине течения, ветровые течения не рассматриваются.

## 2. Методы и подходы

В безледный период в 2023 г. в трех водохранилищах были проведены измерения магнитуды и направления течений. На рис. 1 представлены районы исследований, а именно южная часть Горьковского водохранилища вблизи Нижегородской ГЭС, Чебоксарское водохранилище (от Нижнего Новгорода до Чебоксарской ГЭС), Куйбышевское водохранилище (от Чебоксарской ГЭС до устья р. Камы). Синими точками с соответствующими подписями отмечено расстояние от истока Волги в километрах.

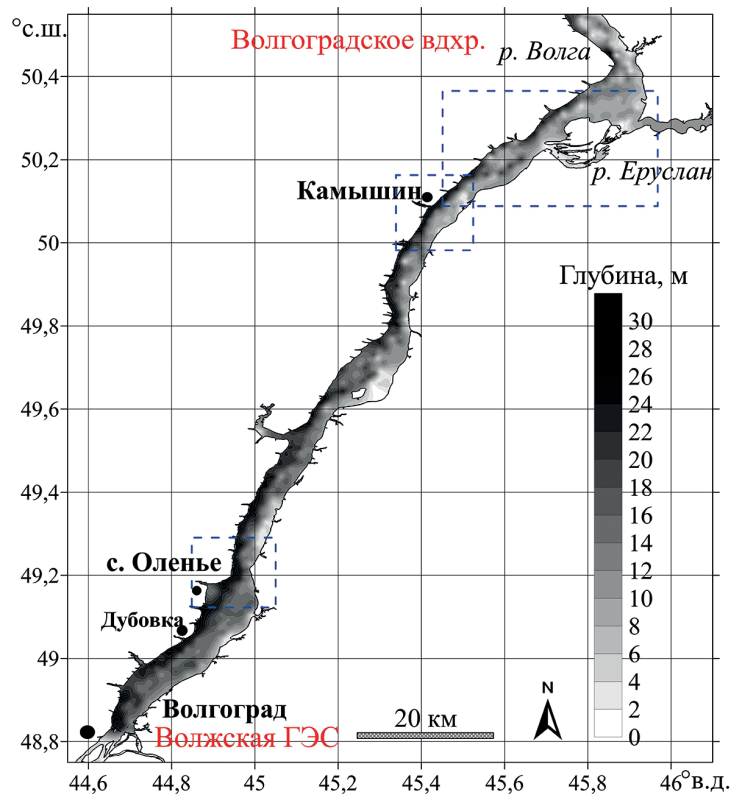
Измерения в южной части Горьковского водохранилища осуществлялись 1 августа 2023 г. Район исследований в увеличенном масштабе представлен на рис. 1 и включал затопленные русло и пойму Волги. Измерения в Чебоксарском водохранилище проводились на судовом ходу (преимущественно над руслом) 9–10 сентября и 16–17 сентября 2023 г., в Куйбышевском (до устья р. Камы) — 10–11 сентября и 14–15 сентября 2023 г., а в районе слияния Волги и Камы — 22–25 июля и 12–13 сентября 2023 г.

В 2024 г. с 31 мая по 5 июня и с 17 по 21 августа осуществлялись измерения в озерной части Волгоградского водохранилища напротив р. Еруслан, г. Камышин и с. Олень (отмечены на рис. 2 синими прямоугольниками).



**Рис. 1.** Район исследований в 2023 г: южная часть Горьковского водохранилища, Чебоксарское водохранилище, Куйбышевское водохранилище

**Fig. 1.** Studied water sites in 2023: southern part of the Gorky Reservoir, Cheboksary Reservoir, Kuibyshev Reservoir



**Рис. 2.** Район исследований в 2024 г: Волгоградское водохранилище

**Fig. 2.** Studied water sites in 2024: Volgograd Reservoir

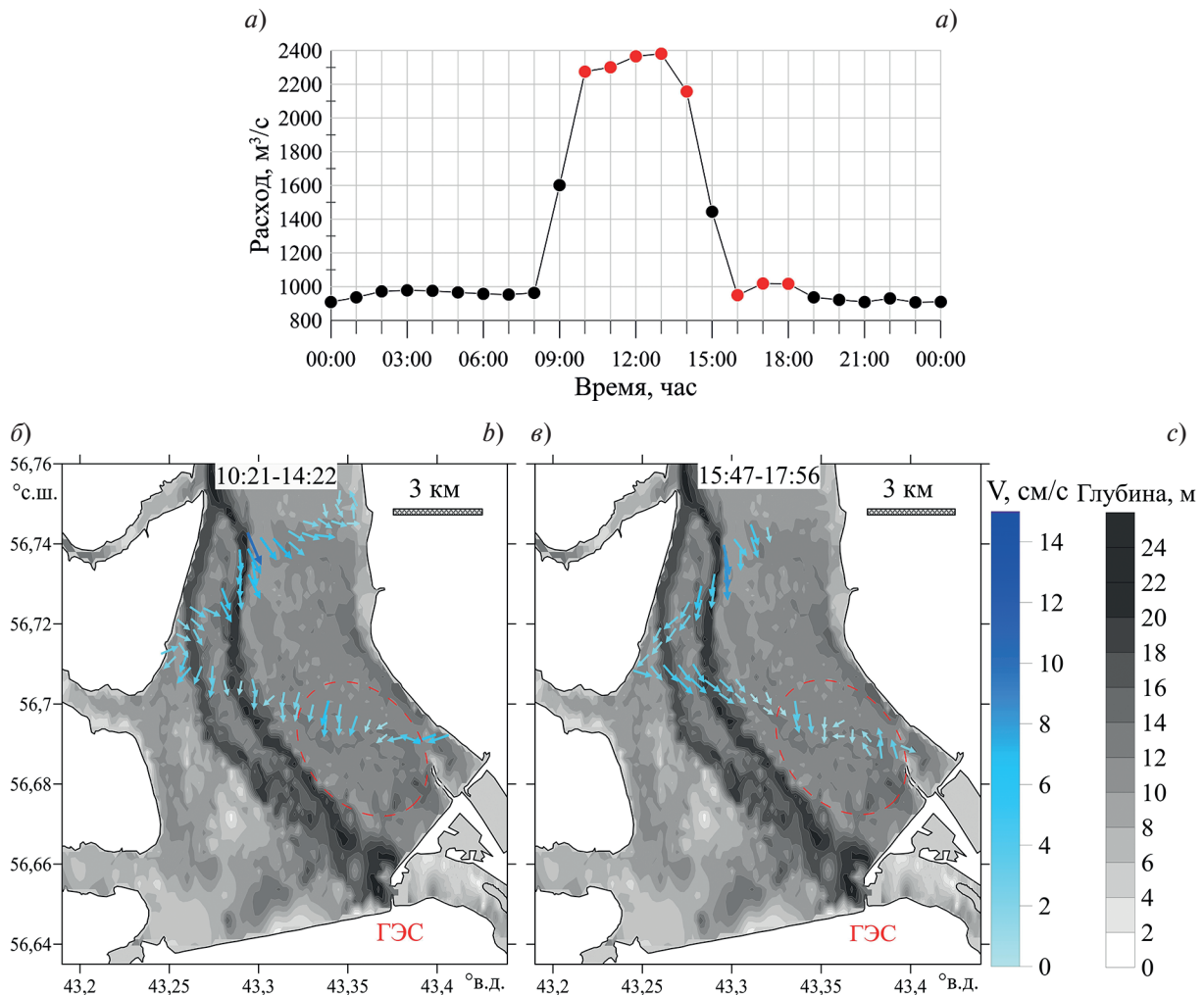
Величина и направление течений непрерывно регистрировались с использованием акустического доплеровского профилографа течений ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz вдоль маршрутов следования ма-

ломерных исследовательских судов. ADCP размещался на борту плавучей лаборатории ИПФ РАН «Геофизик» для измерений в Горьковском водохранилище [25], на моторной лодке «Волжанка-46» для измерений в Камском устье и в Волгоградском водохранилище, и на стальной водоизмещающей моторной яхте «Pedro Skiron 35» для измерений в Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах. Скорость движения судов не превышала 13 км/ч, обеспечивая корректную работу ADCP. Данные усреднялись по 60 пингам, что соответствовало примерно 30 с по времени (80 м по расстоянию).

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Горьковское водохранилище

Течения в южной части Горьковского водохранилища существенно зависят от суточных изменений расхода воды через Нижегородскую ГЭС [26, 27]. В безледный период с мая по октябрь согласно информации, предоставленной РусГидро [28] график расхода представляет периодическую последовательность «импульсов» повышенного стока. Рис. 4, *а* демонстрирует пример регулирования стока за сутки 01.08.23. В этот день было сделано несколько разрезов водохранилища: в момент максимального пикового сброса (около 2300 м<sup>3</sup>/с) и при минимальном ночном значении расхода (около 1000 м<sup>3</sup>/с). На рис. 3 (*б*, *в*) показано усредненное векторное поле скоростей течений в южной части Горьковского водохранилища для двух периодов времени.



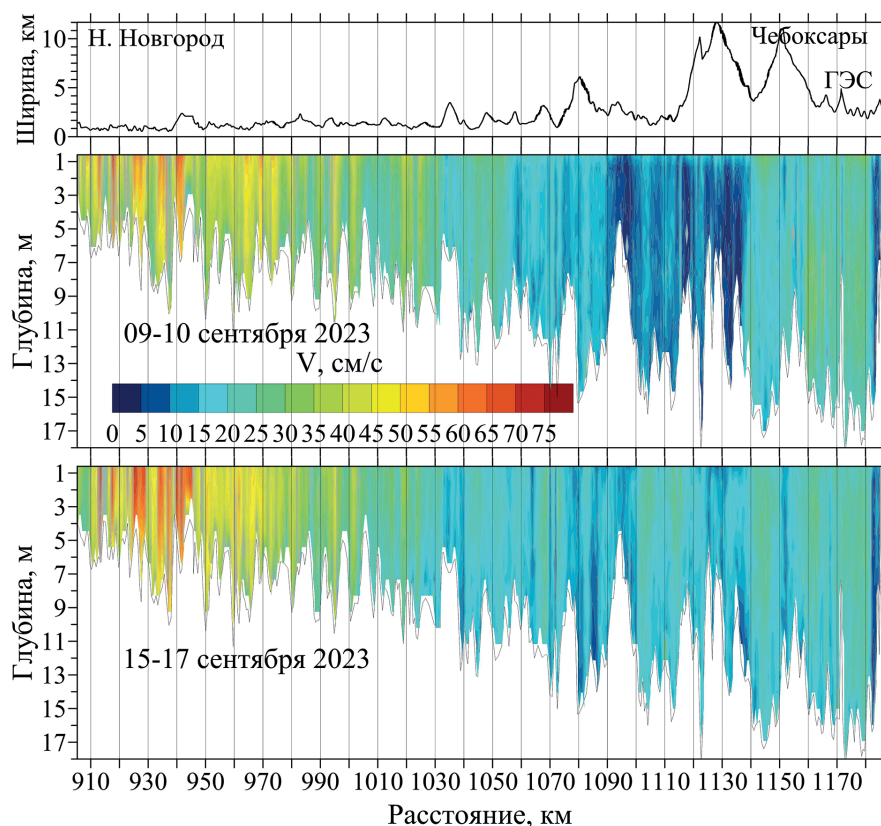
**Рис. 3.** Почасовой расход через Нижегородскую ГЭС 01.08.2023, где красными точками отмечено время измерений, (*а*) и соответствующие векторные поля средних по глубине течений, наложенных на батиметрию, для двух интервалов времени в течение указанной даты: 10:21–14:22 (*б*) и 15:47–17:56 (*в*)

**Fig. 3.** Hourly flow rate at Nizhny Novgorod HPP for 01.08.2023, where red dots indicate the time of measurements, (*a*) and corresponding vector fields of depth-averaged currents superimposed on bathymetry for two time intervals: 10:21–14:22 (*b*) and 15:47–17:56 (*c*)

Из рис. 3 можно видеть изменения структуры течений при вариациях расхода воды через ГЭС. Поле течений, измеренное в момент максимального суточного сброса, демонстрирует преимущественно южное направление над руслом (в сторону ГЭС) и юго-западное — над поймой. Среднее значение скорости составило 5 см/с, максимальные значения скорости над руслом — 14 см/с, над поймой — 6 см/с. При уменьшении расхода воды через ГЭС магнитуа течений уменьшается до 9 см/с над руслом и до 4 см/с над поймой. Над поймой формируется обратное течение, встречное русловому потоку, т. е. интенсифицируется круговорот (на рис. 3 соответствующая область отмечена красной пунктирной линией), приводящий к захвату речных выносов и образованию локализованных масс воды с отличными от окружающей воды характеристиками, а также неоднородному перераспределению фитопланктона по акватории [27, 29, 30]. Разрез круговорота наблюдается в представленных данных.

### 3.2. Чебоксарское водохранилище

На рис. 4 представлен продольный разрез Чебоксарского водохранилища вдоль судового хода, на который наложено цветное поле магнитуды течения. Начало измерений в Чебоксарском водохранилище совпадает с отметкой 906 км, в области слияния Волги и Оки в г. Нижний Новгород, что на 53 км ниже Нижегородской ГЭС. На рис. 4 сверху приведена примерная ширина Волги. Направление течений в водохранилище русловое/стоковое.



**Рис. 4.** Продольный разрез Чебоксарского водохранилища с наложенным цветовым градиентом магнитуды течений. Сверху — примерная ширина реки

**Fig. 4.** Longitudinal section of the Cheboksary Reservoir with superimposed color gradient of current magnitude. Approximate width of the river (above)

Скорость течения вдоль судового хода уменьшается при удалении от Нижегородской ГЭС. Оба трека демонстрируют схожее распределение скоростей на участке от 906 до 1045 км, т. е. до озерной части водохранилища. Незначительные отличия в скоростях, например, на расстояниях 1020–1035 км, связаны с разницей в положении пересечения поперечных разрезов реки треками, вдоль которых осуществлялись измерения (разные глубины, расстояние от берегов). Помимо участка около водосброса Нижегородской

ГЭС, где скорости составляли 90–100 см/с [27], наибольшие скорости течения 60–75 см/с наблюдались на расстоянии 913 км и 925 км в наиболее узкой части водохранилища (ширина около 500 м). Минимальная скорость течения на судовом ходу была менее 6 см/с в озерной части водохранилища 10 сентября.

Сравнение скоростей течений в 2023 г. с данными 2019 г. представлено на рис. 5, а. В 2019 году измерения течений проводились поперек русла реки [31]. Точками отмечены средние скорости в точке пересечения треков в 2023 г. и поперечных разрезов Волги в 2019 г., линиями обозначены данные магнитуд 2023 года, усредненные методом плавающего окна по 10 точкам. На рис. 5, б представлены значения почасовых расходов через Нижегородскую ГЭС в момент измерений с учетом времени (скорости) добегания расхода [15].

На рис. 5, а видно, что пространственные распределения средних скоростей в 2019 и 2023 годах схожи: скорость течения уменьшается по мере удаления от ГЭС, магнитуды на поперечном разрезе реки близки. Значения расхода через Нижегородскую ГЭС при измерениях в 2023 и 2019 годах с учётом времени добегания отличаются, но, несмотря на это, на поперечных разрезах Волги скорости близки. Увеличение расхода в структуре течений на расстоянии более 53 км от ГЭС не наблюдается, а незначительные различия связаны с разницей в положении пересечения поперечных разрезов реки треками, вдоль которых осуществлялись измерения.

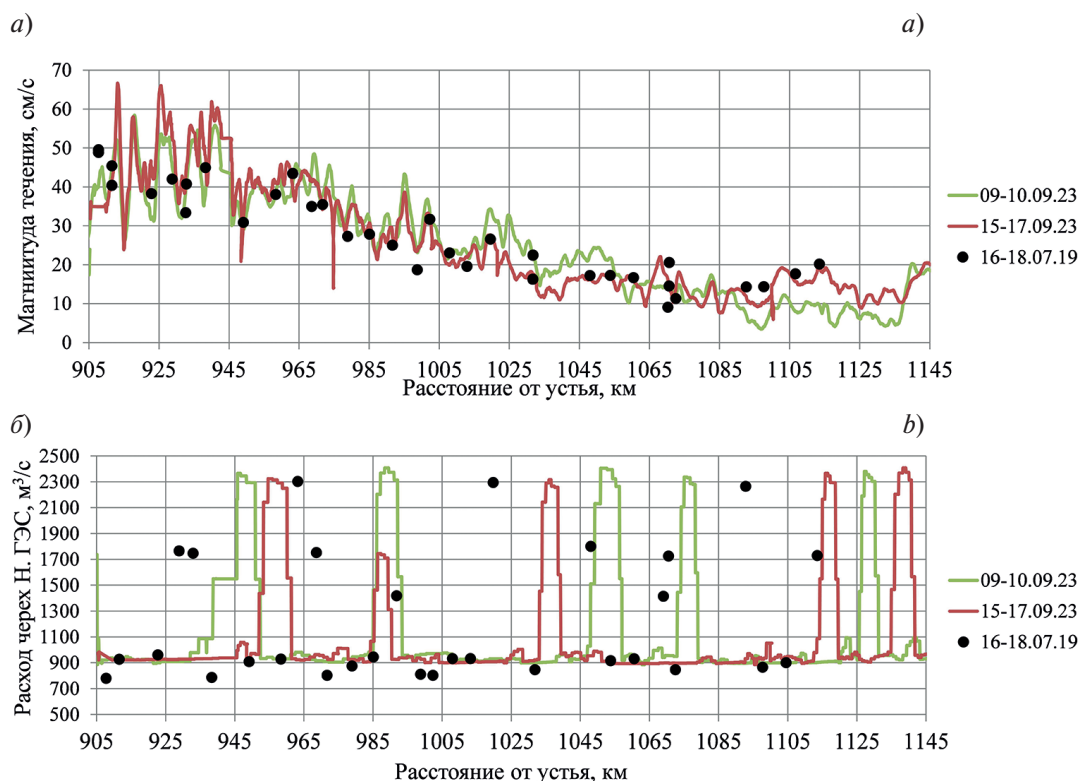
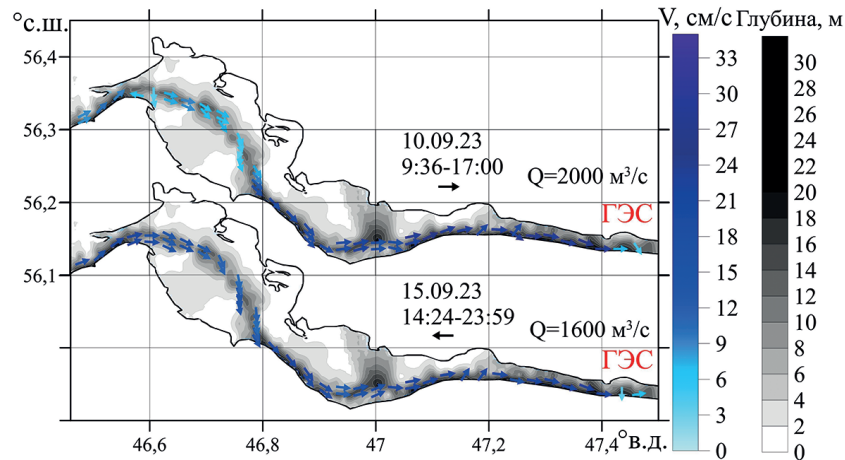


Рис. 5. Сравнение скоростей течений в 2023 г. с данными 2019 г. (а) и значения расхода через Нижегородскую ГЭС в момент измерений с учетом времени добегания расхода (б)

Fig. 5. Comparison of flow velocities in 2023 with the data of 2019 (a) and flow rates through Nizhgorodskaya HPP at the moment of measurements, taking into account the time of flow run-up time (b)

При точном повторении треков, различия скорости в озерной части в разные дни, по-видимому, связаны с суточным режимом расхода через Чебоксарскую ГЭС. На рис. 6 представлены векторные поля средней по глубине скорости в озерной части Чебоксарского водохранилища.

Среднее значение скорости течения в озерной части Чебоксарского водохранилища составило 14 см/с, увеличение скорости до 25–27 см/с наблюдалось в области сужения акватории перед Чебоксарской ГЭС. Предполагая, что режим расхода через ГЭС аналогичен расходу через Нижегородскую ГЭС, разные магнитуды течения в наиболее широкой части водохранилища можно объяснить разным временем измерений и откликом на изменения уровня расхода через ГЭС.

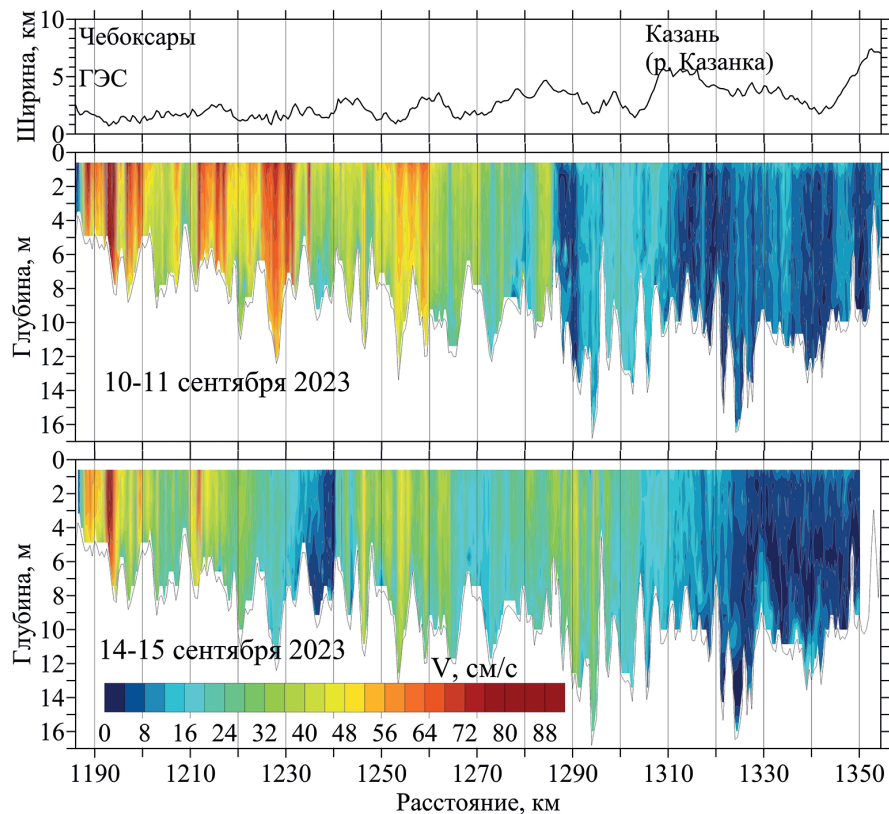


**Рис. 6.** Векторное поле средних по глубине течений в озерной части Чебоксарского водохранилища над затопленным руслом

**Fig. 6.** Vector field of depth-averaged currents in the lake part of the Cheboksary reservoir above the flooded channel

### 3.3. Куйбышевское водохранилище

Аналогично рис. 4, на рис. 7 представлен продольный разрез речной части Куйбышевского водохранилища до слияния Волги с Камой. Скорость течения вдоль судового хода, аналогично Чебоксарскому

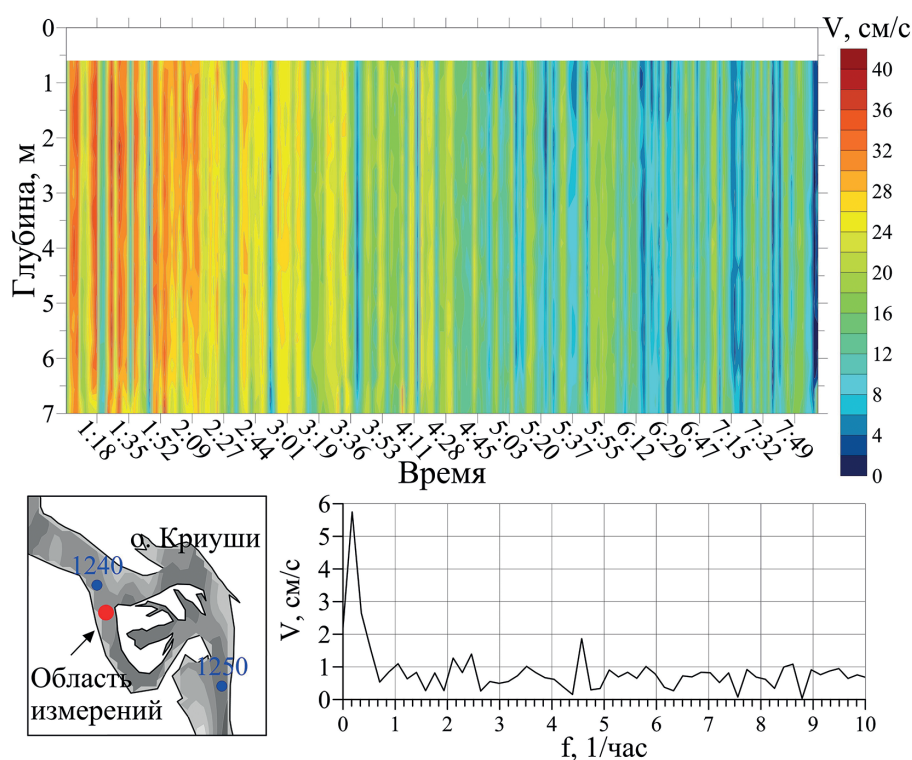


**Рис. 7.** Продольный разрез Куйбышевского водохранилища от Чебоксарской ГЭС до стрелки Волги и Камы с наложенным цветовым градиентом магнитуды течений. Сверху — примерная ширина реки

**Fig. 7.** Longitudinal section of the Kuibyshev reservoir from the Cheboksarskaya HPP to the Volga-Kama arrow with superimposed color gradient of current magnitude. Approximate width of the river (above)

водохранилищу, спадает при удалении от плотины Чебоксарской ГЭС. Наибольшая скорость течения более 90 м/с наблюдалась в районе притоков Цивиль, Большая и Малая Кокшага (20–30 км от ГЭС, ширина около 1 км). Ниже скорость потока в речной части Куйбышевского водохранилища падала до 20–40 см/с. Ниже устья р. Казанки (г. Казань) скорость течения уменьшается в среднем до 5 см/с, что, вероятно, связано с влиянием (подпором) р. Камы.

При сравнении между собой скоростей течений вдоль обоих треков, можно видеть, что скорости течения в речной части Куйбышевского водохранилища изменчивы. Приведем временные серии скоростей, измеренных в одной точке и на продольном разрезе Волги. На рис. 8 представлено распределение скорости течения по глубине с течением времени, снизу слева на карте красной точкой отмечена область измерений, снизу справа приведен спектр колебаний скорости с вычетом из сигнала средней скорости. Непрерывные измерения осуществлялись на протяжении 7,5 ч на расстояние около 58 км от Чебоксарской ГЭС. Рис. 8 демонстрирует уменьшение скорости течения с 35 см/с до 6 см/с с 00:53 до 8:02 15 сентября 2023 г. Как можно видеть по цветовому градиенту скоростей, имеют место колебания скоростей (чередование полос разного цвета) с периодами около 25 мин и 5 ч 48 мин согласно спектру (рис. 8).



**Рис. 8.** Измеренные в одной точке временные серии скоростей (сверху); область непрерывных измерений (снизу слева) и спектр колебаний скорости (снизу справа)

**Fig. 8.** Time series of velocities measured at one point (top), area of continuous measurements (bottom left), and spectrum of velocity fluctuations (bottom right)

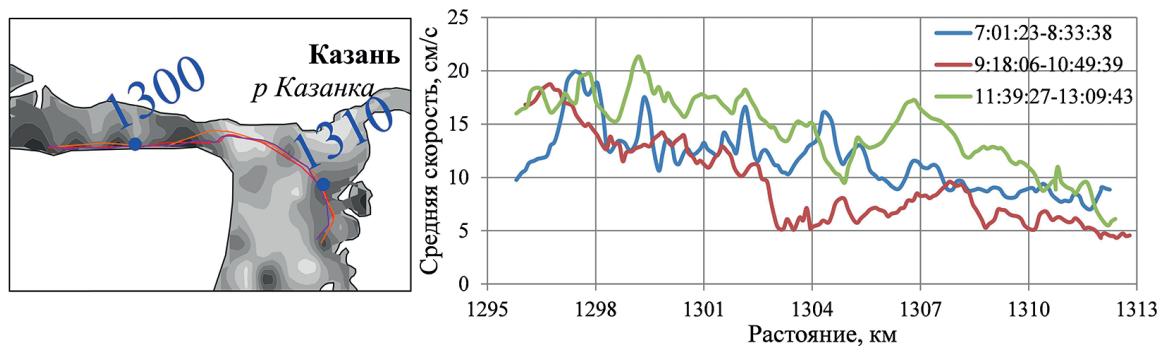
На рис. 9. представлен график скорости течений на продольном разрезе Волги около устья р. Казанки на расстояние около 110–128 км от плотины Чебоксарской ГЭС. Измерения проводились в течение одного дня. Разница между магнитудами скоростей составила от 3 до 8 см/с.

Рассмотрим течение около устья р. Камы, что более чем на 200 км выше Жигулевской ГЭС. На рис. 10 представлено векторное поле средних по глубине течений в период с 22 по 28 июля 2023 г и 12–13 сентября 2023 г. Течение в Волге после слияния с Камой усиливается.

Возле правого берега над затопленным руслом Волги до впадения Камы скорость течения составляет 25 см/с, после слияния с Камой скорость течения в русле достигает 30 см/с. Над поймой (менее глубокие области) средняя скорость течений не превышает 6 см/с. Скорости течения в июле и сентябре близки.

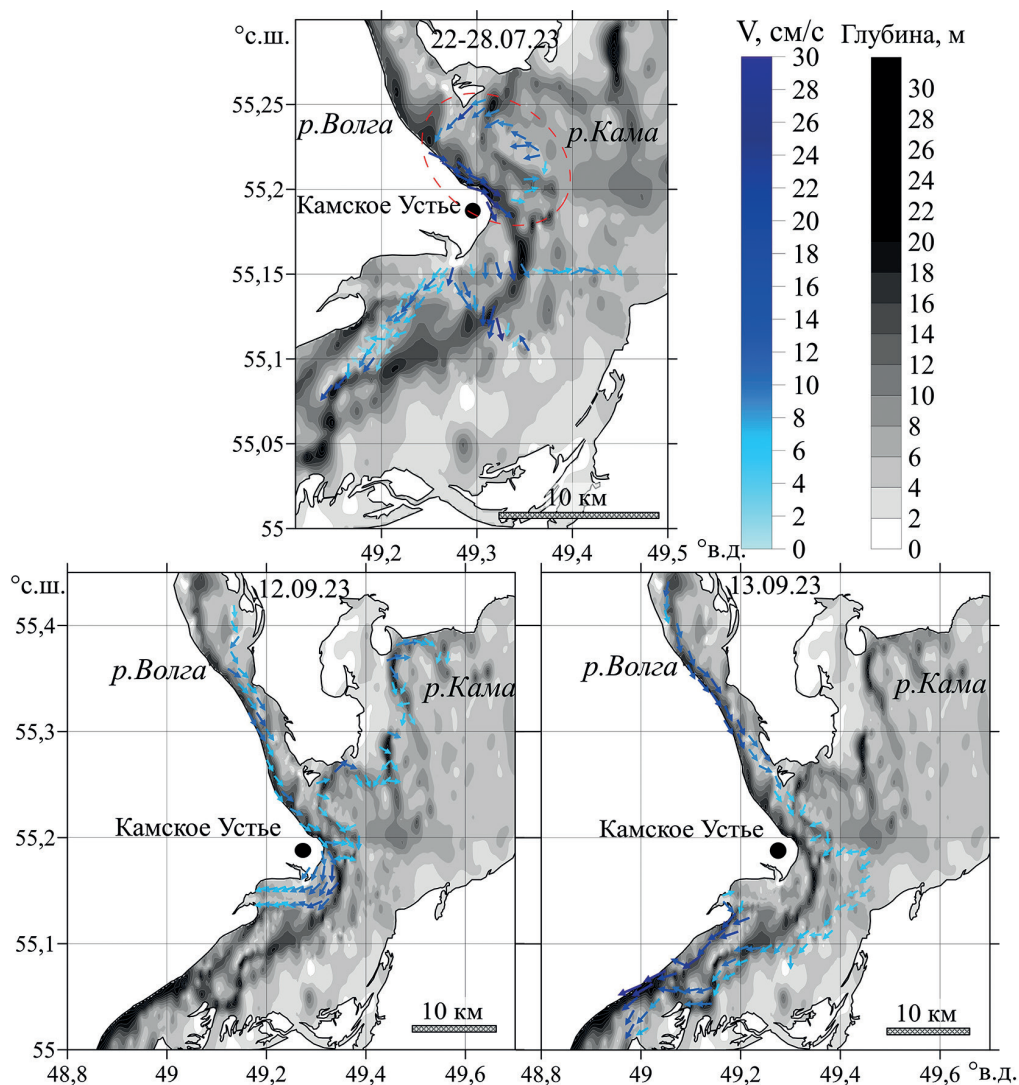
Направления течений 28.07 демонстрирует наличие круговорота в устье Камы, при этом 12.09 круговорот не прослеживается, течения направлены из Волги в сторону Камы. Вероятно, это связано с влиянием

комбинации режимов работы Чебоксарской и Нижнекамской ГЭС: равномерные среднесуточные расходы накануне измерений в июле (Чебоксарская 2260 м<sup>3</sup>/с и Нижнекамская 1800 м<sup>3</sup>/с), в сентябре равномерные среднесуточные расходы в Чебоксарской ГЭС (2000 м<sup>3</sup>/с) и уменьшение среднесуточные расходы через Нижнекамскую ГЭС (2220 м<sup>3</sup>/с и 660 м<sup>3</sup>/с) [28].



**Рис. 9.** Скорость течений на продольном разрезе Волги около устья р. Казанки, измеренные в течение одного дня

**Fig. 9.** Current velocity on the longitudinal section of the Volga River near the mouth of the Kazanka River, measured during one day



**Рис. 10.** Векторное поле средних по глубине течений в озерной части Куйбышевского водохранилища в районе слияния Волги и Камы

**Fig. 10.** Vector field of depth-averaged currents in the lake part of the Kuibyshev reservoir in the area of the Volga-Kama confluence

### 3.4. Волгоградское водохранилище

Примерное расстояние от Волжской ГЭС до районов, где проводились измерения: 190 км до устья р. Еруслан, 150 км до г. Камышина, 35–40 км до с. Оленье. Согласно серии измерений в 2024 г. течение в исследуемом районе Волгоградского водохранилища имеет русловой/стоковый характер, р. Еруслан не находится в подпоре. На рис. 11 представлены векторные поля течений в Волгоградском водохранилище около р. Еруслан 31.05.24 и 20.08.24, на рис. 12 представлены векторные поля течений в июне (03.06.24 и 05.06.24) и в августе (17.08.24 и 18.08.24) около города Камышин.

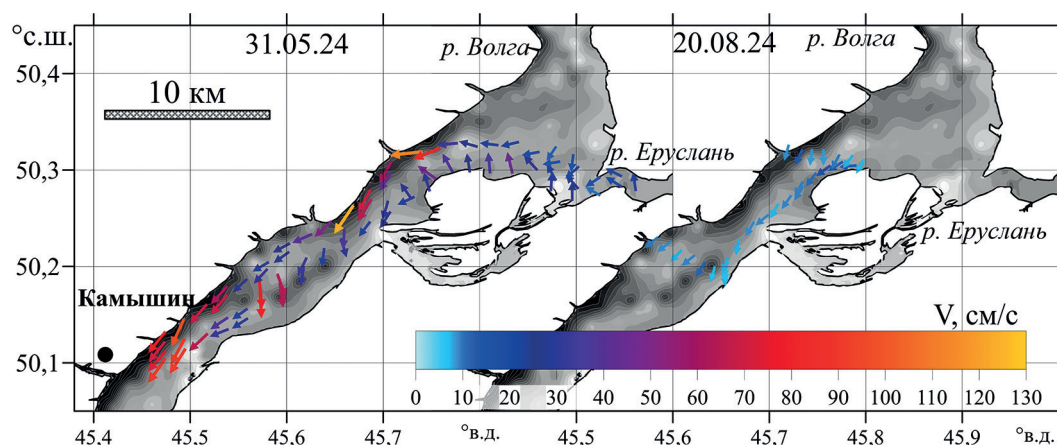


Рис. 11. Векторные поля течений в Волгоградском водохранилище около р. Еруслан 31.05.24 (слева) и 20.08.24 (справа)

Fig. 11. Vector fields of currents in the Volgograd Reservoir near the Eruslan River 31.05.24 (left) and 20.08.24 (right)

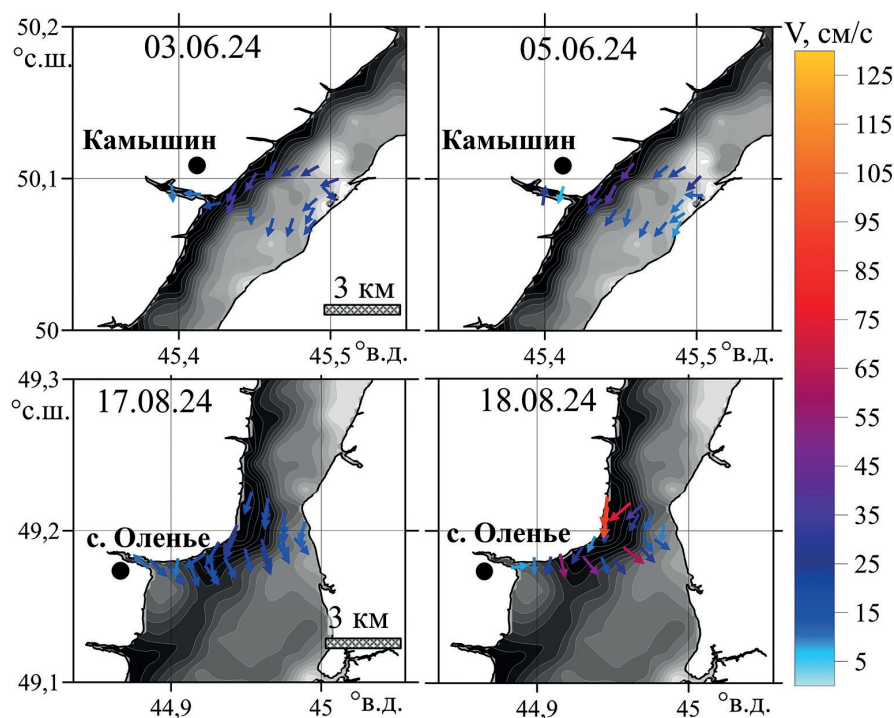


Рис. 12. Векторные поля течений в Волгоградском водохранилище около г. Камышин (верхний ряд) и около с. Оленье (нижний ряд)

Fig. 12. Vector fields of currents in the Volgograd reservoir near Kamyshevo (top row) and near Olenye (bottom row)

Скорости течения над руслом выше скоростей над поймой. При сравнении течений в июне и августе (рис. 11) можно видеть, что магнитуда течений в дни измерений существенно отличается. За счет

увеличенных сбросов в Волжском каскаде ГЭС (среднесуточные значения расхода через Волжскую ГЭС в начале июня около 13500 м<sup>3</sup>/с, в августе 5500 м<sup>3</sup>/с [28]), среднее значение скорости течения в конце мая — июне составляют 50–55 см/с. Максимальные скорости над руслом достигают 150 см/с. В августе среднее значение скорости составляет 10–13 см/с, магнитуа течений не превышает 40 м/с в том числе над руслом.

Как можно видеть из рис. 12 магнитуды течений в дни с близкими среднесуточными расходами различаются. Близкое положение к ГЭС приводит к существенным межсуточным изменениям в структуре течений. Сравнивая средние значения скоростей в августе на рис. 11 (справа) и рис. 12 (снизу), можно видеть, что при близких значениях среднесуточных расходов (5500 м<sup>3</sup>/с и 5550 м<sup>3</sup>/с) более высокие средние скорости наблюдаются на близком к ГЭС расстоянии около с. Олень (выше г. Дубовки) по сравнению с «верхней» озерной частью у устья Еруслан.

#### 4. Заключение

В ходе экспедиционных работ 2023 г. и 2024 г. с использованием акустического доплеровского профилографа течений (ADCP) проведены исследования структуры течений в четырех водохранилищах Волжского каскада: Горьковском, Чебоксарском, Куйбышевском, Волгоградском. Измерения проводились на различных удалениях от ГЭС как при движении носителя измерительной аппаратуры так при стационарном размещении измерителя течений в отдельных точках акватории.

На примере измерений в речной части Чебоксарского и Куйбышевского водохранилища показано, что характерной особенностью течения в речной части исследуемых водохранилищ является снижение скорости по мере удаления от плотины ГЭС и при приближении к озерной части водохранилища. При этом влияние суточного регулирования стока ГЭС на изменения скорости в Чебоксарском водохранилище не прослеживается. Участок ниже 53 км от Нижегородской ГЭС характеризуется близкими скоростями не зависимо от расхода в разные дни измерения по данным 2023 и 2019 гг. Скорость течения в Куйбышевском водохранилище до слияния Волги с Камой обладает большей изменчивостью на более длинной дистанции от плотины ГЭС по сравнению с Чебоксарским водохранилищем.

Скорости течения в озерных частях водохранилищ увеличиваются при приближении к ГЭС (Чебоксарское и Волгоградское), при этом в зависимости от режима регулирования стока ГЭС наблюдается высокая изменчивость в пространственной структуре течений. В Волгоградском водохранилище это проявляется в увеличении скорости. В Горьковском водохранилище вблизи плотины Нижегородской ГЭС суточное увеличение стока приводит к усилению руслового течения, последующее уменьшение расхода — к формированию обратного течения над поймой и интенсификации круговорота. Наличие круговорота в районе слияния Волги и Камы в Куйбышевском водохранилище вероятно связано со сложным взаимодействием расходов через Чебоксарскую Нижнекамскую ГЭС.

Настоящую работу следует рассматривать как краткий обзор имеющейся обширной базы данных измерений течений, полученной с использованием ADCP в акватории водохранилищ Волжского каскада. Дальнейший анализ полученных данных будет посвящен детальному исследованию отдельных эффектов, связанных с регулированием стока.

#### Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-17-00071 («Волжские биооптические алгоритмы»), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. Влияние неравномерности стока воды через ГЭС на течения проводилось в рамках госзадания FFUF-2024-0033.

#### Funding

This research was supported by the Russian Science Foundation, No. 23-17-00071 (“Volga Biooptical Algorithms”), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>. The influence of uneven water flow through the hydroelectric power station on currents was carried out within the framework of the state task FFUF-2024-0033.

#### Литература

1. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
2. Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

3. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 367 с.
4. Goldenfum J.A. Challenges and solutions for assessing the impact of freshwater reservoirs on natural GHG emissions // *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2012. Vol. 12, N 2. P. 115–122. doi:10.2478/v10104-012-0011-5
5. Prairie Y.T., Alm J., Beaulieu J. et al. Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: what does the atmosphere see? // *Ecosystems*. 2018. Vol. 21. P. 1058–1071. doi:10.1007/s10021-017-0198-9
6. Chen Z., Liu Z., Yin L., Zheng W. Statistical analysis of regional air temperature characteristics before and after dam construction // *Urban Climate*. 2022. Vol. 41. P. 101085. doi:10.1016/j.uclim.2022.101085
7. Iakunin M., Abreu E.F., Canhoto P., Pereira S., Salgado R. Impact of a large artificial lake on regional climate: A typical meteorological year Meso-NH simulation results // *International Journal of Climatology*. 2022. Vol. 42, N 2. P. 1231–1252. doi:10.1002/joc.7299
8. Karadžić V., Subakov-Simić G., Krizmanić J., Natić D. Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garaši and Bukulja (Serbia) // *Desalination*. 2010. Vol. 255. P. 91–96. doi:10.1016/j.desal.2010.01.009
9. Genkal S.I., Okhapkin A.G., Vodeneva E.L. Planktonic Centric Diatoms (Bacillariophyta, Coscinodiscaceae) of the Cheboksary Reservoir, Russia // *Inland Water Biol.* 2022. Vol. 15. P. 750–759. doi:10.1134/S1995082922060037
10. Литвинов А.С. Об измерении течений в водохранилищах самописцами БПВ-2р // *Труды Института биологии внутренних вод Академии наук СССР*. 1968. № 16. С. 259–268.
11. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: водохранилища верхней Волги. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 292 с.
12. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 269 с.
13. Ильина А.А., Никонорова И.В., Ильин В.Н., Никитина Е.А. Гидрологические и экологические проблемы Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ чебоксарского участка Чувашской республики // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 6. С. 34–39. doi:10.17513/use.38050
14. Смирнова М.В., Чебан Е.Ю., Ермаков С.А. и др. Исследования экологического состояния вод участков горьковского и чебоксарского водохранилищ в рамках экспедиции «Плавучий университет Волжского бассейна» 2017 г. // *Труды научного конгресса 20-го Международного научно-промышленного форума «ВЕЛИКИЕ РЕКИ» 2018*, 2018. С. 290–293.
15. Грушевский М.С. Волны пропусков и паводков в реках. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 337 с.
16. Рахуба А.В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // *Ученые записки Казанского университета. Серия естественные науки*. 2020. Т. 162, № 3. С. 430–444. doi:10.26907/2542-064X.2020.3.430-444
17. Рахуба А.В. Динамика водных масс Саратовского водохранилища под влиянием попусков ГЭС // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2008. № 2. С. 55–67.
18. Герасимов Ю.В., Поддубный С.А., Малин М.И., Цветков А.И. Влияние гидродинамических условий на распределение рыб в Чебоксарском водохранилище // *Вопросы рыболовства*. 2014. Т. 15, № 3. С. 295–305.
19. Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада. // *Труды Института биологии внутренних вод РАН*. 2018. № 81(84). С. 35–46. doi:10.24411/0320-3557-2018-1-0004
20. Рахуба А.В., Шмакова М.В. Нестационарный режим водохранилища: опыт моделирования русловых процессов с подвижным дном // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 138–149. doi:10.59887/fpg/peru-3z3h-gazh
21. Паршакова Я.Н., Любимова Т.П., Лепихин А.П., Тиунов А.А. Численное моделирование влияния неравномерности сброса воды через плотины крупных ГЭС на гидродинамические режимы верхних бьефов гидроузлов // *Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции «Математическое моделирование в естественных науках»*, 2020. С. 91.
22. Гузиватый В.В., Науменко М.А., Румянцев В.А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера методом максимальной кросс-корреляции // *Исследование Земли из космоса*. 2020. № 1. С. 20–30. doi:10.31857/S0205961420010042
23. Капустин И.А., Мольков А.А., Даниличева О. Аю и др. Определение течений в водохранилище по последовательным внутрисуточным спутниковым изображениям // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2024. Т. 60, № 3. С. 347–356. doi:10.31857/S0002351524030071
24. Капустин И.А., Мольков А.А., Ермошкин А.В. и др. Восстановление структуры течений в Куйбышевском водохранилище с использованием спутниковых данных и натурных измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 1. С. 63–72. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-5
25. Мольков А.А., Капустин И.А., Ермаков С.А. и др. Гидрофизическая лаборатория ИПФ РАН «Геофизик» как эффективный инструмент лимнологического мониторинга // *Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения*. Нижний Новгород 8–14 сентября, 2019. С. 214–218.

26. Капустин И.А., Мольков А.А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 110–117.
27. Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M. et al. Investigation of Water Dynamics Nearby Hydroelectric Power Plant of the Gorky Reservoir on Water Environment: Case Study of 2022 // Water. 2023. Vol. 15, N 17. P. 3070. doi:10.3390/w15173070
28. Расходы воды через ГЭС, РусГидро. URL: <https://rushydro.ru/informer/> (дата обращения: 12.10.2024).
29. Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещев 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. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252
30. Капустин И.А., Ермаков С.А., Смирнова М.В., Вострякова Д.В., Мольков А.А., Чебан Е.Ю., Лещев Г.В. О формировании изолированной линзы речного стока круговоротом в горьковском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 6. С. 214–221. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221
31. Капустин И.А., Мольков А.А., Ермаков С.А., Смирнова М.В. Общая характеристика и особенности структуры течения в акватории Чебоксарского водохранилища от Нижнего Новгорода до Козьмодемьянска // Труды 4-й всероссийской научной конференции «Проблемы экологии Волжского бассейна», 2019. С. 17.

## References

1. Butorin N.V. Hydrological processes and water mass dynamics in the Volga cascade reservoirs. Leningrad: Nauka; 1969. 322 p. (in Russian).
2. Edelstein K.K. Reservoirs of Russia: Ecological Problems, Ways of Their Solution. GEOS Publishers: Moscow; 1998. 277 p. (in Russian).
3. Reservoirs and their impact on the environment. Moscow: Nauka, 1986. 367 p. (in Russian).
4. Goldenfum J.A. Challenges and solutions for assessing the impact of freshwater reservoirs on natural GHG emissions. *Ecology & Hydrobiology*. 2012;12(2):115–122. doi:10.2478/v10104-012-0011-5
5. Prairie Y.T., Alm J., Beaulieu J. et al. Greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs: what does the atmosphere see? *Ecosystems*. 2018;21:1058–1071. doi:10.1007/s10021-017-0198-9
6. Chen Z., Liu Z., Yin L., Zheng W. Statistical analysis of regional air temperature characteristics before and after dam construction. *Urban Climate*. 2022;41:101085. doi:10.1016/j.uclim.2022.101085
7. Iakunin M., Abreu E.F., Canhoto P., Pereira S., Salgado R. Impact of a large artificial lake on regional climate: A typical meteorological year Meso-NH simulation results. *International Journal of Climatology*. 2022;42(2):1231–1252. doi:10.1002/joc.7299
8. Karadžić V., Subakov-Simić G., Krizmanić J., Natić D. Phytoplankton and eutrophication development in the water supply reservoirs Garaši and Bukulja (Serbia). *Desalination*. 2010;255:91–96. doi:10.1016/j.desal.2010.01.009
9. Genkal S.I., Okhapkin A.G., Vodeneva E.L. Planktonic Centric Diatoms (Bacillariophyta, Coscinodiscaceae) of the Cheboksary Reservoir, Russia. *Inland Water Biol.* 2022;15:750–759. doi:10.1134/S1995082922060037
10. Litvinov A.C. About measurement of currents in reservoirs by EPV-2r recorders. *Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the USSR Academy of Sciences*. 1968;16:259–268 (in Russian).
11. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR: reservoirs of the upper Volga. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 292 p. (in Russian).
12. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR: Kuibyshev and Saratov reservoirs. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1978. 269 p. (in Russian).
13. Ilina A.A., Nikonova I.V., Ilin V.N., Nikitina E.A. Hydrological and ecological problems of Cheboksary and Kuibyshev reservoirs of Cheboksary section of the Chuvash republic. *Uspehi Sovremennogo Estestvoznaniya*. 2023;6:34–39. doi:10.17513/use.38050 (in Russian).
14. Smirnova M.V., Cheban E.Y., Ermakov S.A. et al. Studies of the ecological state of the waters of the sites of the Gorky and Cheboksary reservoirs within the expedition “Floating university of the Volga basin” 2017. *Proceedings of the scientific congress of the 20th International Scientific and Industrial Forum “GREAT RIVERS’2018”*. 2018; 290–293 (In Russian).
15. Grushevskii M.S. Waves of skips and floods in rivers. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1969. 337 p. (In Russian).
16. Rakhuba A.V. Assessment of the influence exercised by the hydrodynamic regime on the phytoplankton development and the water quality of the Kuibyshev Reservoir. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2020;162(3):430–444. doi:10.26907/2542-064X.2020.3.430-444 (In Russian).
17. Rakhuba A.V. The Saratov Reservoir water masses dynamics under the hydro power station releases impact. *Vodnoe Hozhajstvo Rossii: Problemy, Tehnologii, Upravlenie*. 2008;2:55–67 (In Russian).

18. Gerasimov Yu.V., Poddubny S.A., Malin M.I., Tsvetkov A.I. The influence of hydrodynamic conditions on fish distribution in cheboksary reservoir. *Problems of Fisheries*. 2014;15(3):295–305 (In Russian).
19. Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. Hydrodynamic processes and their role in formation of bottom sediments in reservoirs of the Volga — Kama cascade. *Transactions of IBIW RAS*, 2018, 81 (84), 35–46. doi:10.24411/0320-3557-2018-1-0004 (In Russian).
20. Rakhuba A.V., Shmakova M.V. Regime of Reservoir: Experience in Modeling Riverbed Processes with a Movable Bed. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022;15(2):138–149. doi:10.59887/fpg/peru-3z3h-gazh (In Russian).
21. Parshakova Y.N., Lyubimova T.P., Lepikhin A.P., Tiunov A.A. Numerical modeling of influence of irregularity of water discharge through the dams of large HPPs on hydrodynamic regimes of the upper embankments of hydroelectric complexes. *Abstracts of XXIX All-Russian School-Conference “Mathematical Modeling in Natural Sciences”*. 2020; 91 (in Russian).
22. Guzivaty V.V., Naumenko M.A., Rumyantsev V.A. Estimation of velocity of upper layer of Lake Ladoga by using of Maximum Cross Correlation (MCC) Method. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020;1:20–30. doi:10.31857/S0205961420010042 (in Russian).
23. Kapustin I.A., Molkov A.A., Danilicheva O.A., et al. Determining currents in the reservoir by consequent subdaily satellite images. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;60(3):297–305. doi:10.1134/S0001433824700233
24. Kapustin I.A., Molkov A.A., Ermoshkin A.V. Reconstruction of the currents structure in the Kuibyshev Reservoir using satellite data and field measurements. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(1):63–72. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(1)-5 (in Russian).
25. Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermakov S.A. Hydrophysical laboratory of IPF RAS “Geofizik” as an effective tool for limnological monitoring. *Scientific problems of improvement of Russian rivers and ways of their solution. Nizhny Novgorod*, 8–14 September 2019, 214–218 (in Russian).
26. Kapustin I.A., Molkov A.A. Structure of currents and depth in the lake part of the Gorky Reservoir. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019;7:110–117 (In Russian).
27. Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M., Dobrokhotova D., Leshchev G., Vodeneeva E., Sharagina E., Kolesnikov A. Investigation of water dynamics nearby hydroelectric power plant of the Gorky Reservoir on water environment: Case study of 2022. *Water*. 2023;15(17):3070. doi:10.3390/w15173070
28. Water flow rates through HPPs, RusHydro URL: <https://rushydro.ru/informer/> (accessed: 12.10.2024).
29. Dobrokhotova D.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Leshchev G.V. A study of the effect of hydropower operation regime on the redistribution of phytoplankton in the upper water layer in the dam section of the Gorki Reservoir. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2023;20:242–252. doi:10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252 (In Russian).
30. Kapustin I.A., Ermakov S.A., Smirnova M.V., Vostryakova D.V., Molkov A.A., Cheban E. Yu., Leshchev G.V. On the formation of an isolated lens of a river runoff by a whirlpool in the Gorky Reservoir. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2021;18(6):214–221. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221 (In Russian).
31. Kapustin I.A., Molkov A.A., Ermakov S.A., Smirnova M.V. General characterization and features of the flow structure in the water area of the Cheboksary reservoir from Nizhny Novgorod to Kozmodemyansk. *Proceedings of the 4th All-Russian Scientific Conference “Problems of ecology of the Volga basin”*. 2019; 17. (In Russian).

### Об авторах

- ДОБРОХОТОВА Дарья Васильевна, младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-5546-1670, Scopus AuthorID: 57219659995, WoS ResearcherID: AAA-7981-2022, SPIN-код (РИНЦ): 9740-3806, e-mail: vostryakova@ipfran.ru
- КАПУСТИН Иван Александрович, заведующий лабораторией ННГУ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-6845-3119, Scopus AuthorID: 25629629000, WoS ResearcherID: A-3593-2014, SPIN-код (РИНЦ): 7060-5757, e-mail: kia@ipfran.ru
- МОЛЬКОВ Александр Андреевич, заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-8550-2418, Scopus AuthorID: 55377777800, WoS ResearcherID: A-3623-2014, SPIN-код (РИНЦ): 8959-5235, e-mail: molkov@ipfran.ru
- ЛЕЩЕВ Георгий Владимирович, младший научный сотрудник ННГУ, ORCID: 0000-0001-5574-7935, Scopus AuthorID: 57213165519, SPIN-код (РИНЦ): 5370-0731, e-mail: georgeleshev@ipfran.ru
- ЕРМОШКИН Алексей Валерьевич, старший научный сотрудник ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-6528-7589, Scopus AuthorID: 54410480500, WoS ResearcherID: D-5271-2015, SPIN-код (РИНЦ): 1336-6994, e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru