

УДК 556.044

Вострякова Дарья Васильевна, старший лаборант-исследователь
отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН

Капустин Иван Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник
отдела радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН,
старший научный сотрудник кафедры ГТК и ЭБС ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,
e-mail: kapustin-i@yandex.ru

Мольков Александр Андреевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник отдела
радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН,
старший научный сотрудник кафедры ГТК и ЭБС ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Ермаков Станислав Александрович, д.ф.-м.н., заведующий отделом
радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН, профессор,
заведующий кафедрой ГТК и ЭБС ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950, г. Нижний Новгород, БОКС - 120, ул. Ульянова, 46.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский
государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»)

603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РУСЛОВОГО И ВЕТРОВОГО ТЕЧЕНИЙ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Ключевые слова: ADCP измерения, характеристики течений, внутренние водоемы, расход воды, влияние ветра, водовороты, Горьковское водохранилище

Аннотация. В работе представлены результаты исследования течений в южной части Горьковского водохранилища с использованием акустического доплеровского профилографа течений (ADCP). Аналогичные работы систематически проводились в акватории водохранилища в 60-80-х годах двадцатого века и полученные ранее данные до сих пор используются для решения ряда практических задач. Отсутствие свежих данных по течениям послужило мотивацией к данной работе. В настоящей работе проведены исследования структуры течений, выявлены ее особенности при относительно малом расходе через Нижегородскую ГЭС и слабом ветре южного направления. Анализ полученных данных показал, что структура течений характеризуется существенной неоднородностью. В частности, показано образование водоворота, наблюдаемого в верхнем слое водоема. При относительно большом расходе воды через ГЭС и ветре северного направления возможные особенности структуры течений, по-видимому, преимущественно определяются батиметрией в пойменной части водохранилища.

Введение

Гидродинамические течения во внутренних водоемах играют определяющую роль в переносе водных масс, примесей, перемешивании, накоплении донных отложений и создании условий для жизнедеятельности различных организмов. Известно также, что течения и вертикальное перемешивание могут существенно влиять на гидрохимический режим водоема [1, 2]. Со времен строительства первых гидротехнических сооружений на Волге и наполнения водохранилищ начали проводиться и систематические наблюдения за течениями. В частности, как можно заключить из литературы [1–4], в озерной части Горьковского водохранилища такие работы систематически проводились Волжской гидрометеорологической обсерваторией в 60–80-х годах двадцатого века. В книге [4] описанию течений в водохранилищах посвящена глава, в которой, в частности, дана общая характеристика структуры течений в озерной части Горьковского водохранилища и отмечена его сильная изменчивость под действием различных факторов – в первую очередь, режима регулирования стока Нижегородской гидроэлектростанции (ГЭС) и ветрового воздействия. В настоящее время усредненные суточные данные о расходе через гидроузлы и об уровне водохранилищ доступны на ресурсе [5], поэтому любые наблюдения за скоростями и направлениями течений в заданные дни года могут сопоставляться с этими исходными данными. Отметим высокую важность проведенных ранее исследований, которые являются основополагающими и, по-видимому, из-за отсутствия свежих данных измерений, сложившиеся представления о структуре течений во внутренних водоемах используются для решения ряда практических задач до сих пор (см., например, [3, 6–9]). Настоящая работа является продолжением исследований начатых в [10] и посвящена исследованию

структуры течений в южной части Горьковского водохранилища, а также ее изменчивости в зависимости от ветрового воздействия и режима регулирования стока Нижегородской ГЭС.

1. Методика исследований

Ранние измерения течений преимущественно проводились с использованием буйковых станций с самописцами [11]. В настоящей работе измерения проводились с использованием акустического доплеровского профилографа течений ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz (см., например, [12–14]), установленного на маломерном судне. На протяжении дня проводились измерения в южной части Горьковского водохранилища. От г. Городец (яхт-клуба «Белая речка») до реки Санахта в г. Чкаловск было сделано несколько поперечных к направлению основного руслового потока разрезов водохранилища. С использованием ADCP измерялись скорости течения по глубине, начиная с глубины 1 м с интервалом 0,5 м [15]. Для осуществления навигации и последующего построения карт использовались данные GPS-приемника GlobalSat и картплоттера Garmin Echomap 50. Скорость и направление приводного ветра непрерывно измерялись с использованием ультразвукового анемометра WindSonic, установленного на мачте судна.

Для обработки данных ADCP использовались специализированные программы Winriver I (анализ, усреднение и вывод данных), GPS MapEdit 2.1.78.8 (обработка навигационной информации). Проводилось усреднение по 100 полученным на разрезе профилям скорости, соответствующим измерительным зондирующим импульсам ADCP (пингам). Для удобства представления данных и привязки координат и скоростей в разных проекциях, а также дальнейшей работы с ними использовался программный пакет MS Excel (2010), а для построения карт скоростей течений - Surfer 7.0 (13.0.383).

2. Анализ невозмущенных ветром полей течений

В работе получены векторные поля течений, формируемые при относительно большом ($3072 \text{ м}^3/\text{с}$) и малом ($1109 \text{ м}^3/\text{с}$) среднесуточном расходе через ГЭС (Q) [5] (см. рис. 1, 2). На рис. 1 сплошными линиями обозначены треки, на которых производились измерения. Вектора между треками – результат интерполяции данных. На картах нанесены вектора скорости на глубине 4,05 м (рис. 1), на которой, в соответствии с рекомендациями [2] влиянием ветровых эффектов на течения для внутренних водоемов можно пренебречь. Следует отметить, что доступные нам данные о расходе ГЭС являются усредненными за сутки значениями, не учитывающим суточное регулирование стока, которое может оказывать существенное влияние на формирование особенностей структуры течения. В настоящей работе для исключения влияния суточного регулирования на структуру течения рассмотрены случаи существенно различающихся расходов.

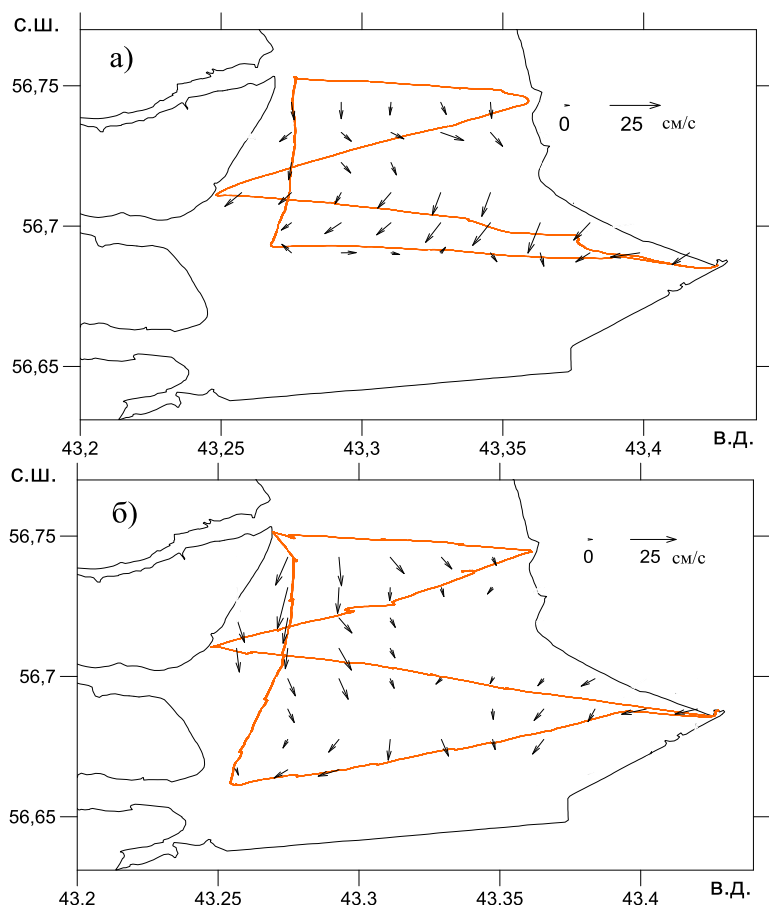


Рис. 1. Векторные поля течений в южной части Горьковского водохранилища на глубине 4,05 м по данным измерений 08 августа 2019 г. $Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$ (а) и 15 мая 2018г. $Q=3072 \text{ м}^3/\text{с}$ (б)

Как при малом, так и при большом расходе через ГЭС регистрируется стоковое течение. Скорость течения в старом русле Волги коррелирует со среднесуточным расходом через Нижегородскую ГЭС. При расходе $Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$ значительного усиления течения в русле не наблюдается, т.е. средняя скорость течения по руслу примерно равна средней скорости течения в пойме (рис. 1а). При расходе $Q=3072 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость течения в русле существенно превышает значения скоростей в пойме (рис. 1б). При расходе $Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$ средние скорости в русле и в пойме имеют значения порядка 4–4,5 см/с. При расходе $3072 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость в русле больше скорости в пойме в 2,5–2,75 раз: 10–11 см/с и 4–4,3 см/с соответственно.

3. Анализ влияния приводного ветра

На рис. 2 нанесены вектора скорости на верхнем горизонте (глубина 1,05 м), где ветер оказывает существенное влияние на течение. В ходе эксперимента фиксировался ветер со средней за день скоростью ветра $W=1,7\text{--}2 \text{ м/с}$ для обоих экспериментов по данным ультразвукового анемометра. В среднем по акватории водохранилища наблюдался ветер южного направления за 08 августа 2019 ($Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$) и северного за 15 мая 2018 ($Q=3072 \text{ м}^3/\text{с}$).

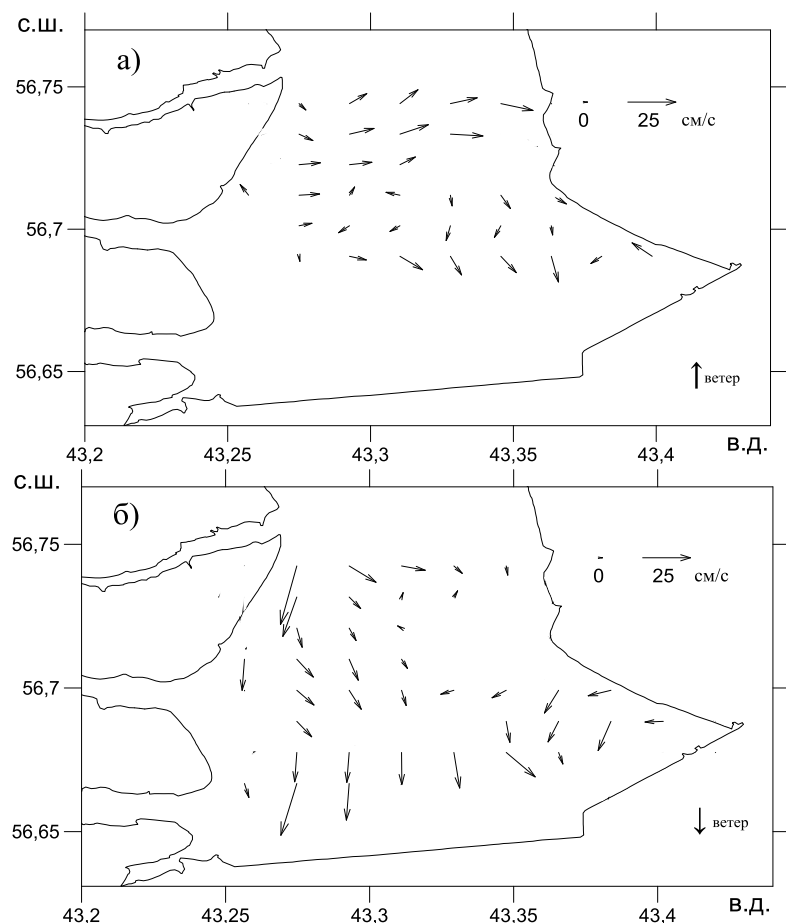


Рис. 2. Векторные поля течений в южной части Горьковского водохранилища на глубине 1,05 м по данным а) за 08 августа 2019 г (расход ГЭС $Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер южный $W=1,7-2 \text{ м/с}$); б) за 15 мая 2018 г ($Q=3072 \text{ м}^3/\text{с}$ ветер северный $W=2 \text{ м/с}$).

При расходе $Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$ измеренные скорости в русле и в пойме на глубине 1,05 м варьируют от 3 см/с до 6 см/с. При расходе $3072 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость в пойменной части увеличивается до 7 см/с, а средняя скорость в русле остается примерно равной 10,5 см/с. Как можно видеть из сопоставления рис. 1 и 2, на глубинах 1,05 м и 4,05 м есть существенные различия в величине скорости. Вблизи поверхности скорости течения практически везде больше, чем на горизонте 4,05 м.

Сравнение полей течений на рис. 1а и 2а, а также рис. 1б и 2б показывает изменения в направлении течения, связанные с влиянием ветрового дрейфа. Влияние, оказываемое ветром на тонкий приповерхностный слой водоема можно оценить как 3 % от величины вектора скорости ветра [7]. Несмотря на то, что в дни измерений регистрировался относительно слабый ветер, оценки дают значения скоростей ветрового дрейфа соизмеримые со скоростью течения, а именно 5–6 см/с. Учитывая, что вклад ветра в дни проведения измерений был приблизительно одинаковым, можно заключить, что ветер дает более сильный вклад в течение в случае меньшего расхода через ГЭС. Очевидно, что это связано с соизмеримостью величин скорости течения и ветрового дрейфа. Для большего значения расхода скорость течения оказывается больше величины вклада ветра, следовательно, влияние ветра на течение в этом случае более слабое.

Можно заметить, что в случае $Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$ на рис. 2а (верхняя часть рисунка ближе к левому берегу) течение в верхнем слое направлено перпендикулярно направлению течения по руслу, в то же время на глубине 4 м рис. 1а скорости направлены в сторону ГЭС. Из-за влияния ветра южного направления локальное течение на глубине порядка 1 м меняет направление на 90 градусов, что может приводить к образованию водоворотов, захватывающих верхний слой водоема.

Наблюдение указанного эффекта в самом верхнем слое водоема можно выполнить, если построить течения, связанные с ветровым дрейфом, в виде поля векторной суммы скорости течения на глубине 4,05 м и трехпроцентного вклада скорости ветра (5 см/с, южного направления). Это показано на рис. 3а. В нижней части карты можно видеть, что ветер в верхнем слое создает течение с юга на север, что и приводит к образованию водоворота у левого берега водохранилища (отмечен на рис. 3а овалом). Полученное таким образом поле течений качественно согласуется с данными измерений на рис. 2а.

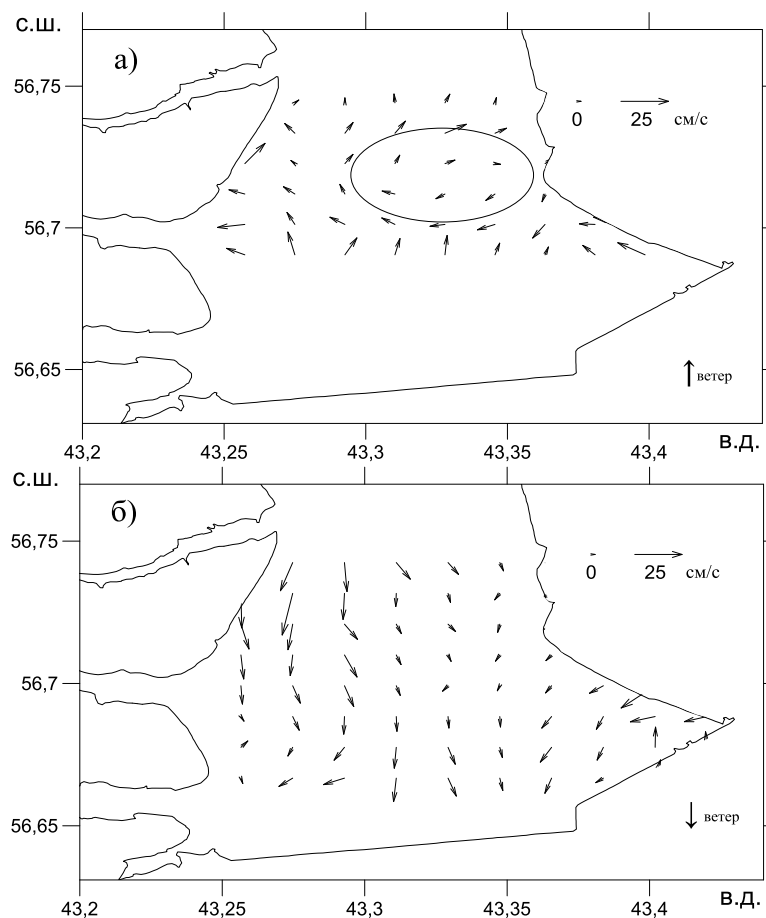


Рис. 3. Векторные поля течений в южной части Горьковского водохранилища в верхнем слое по данным за 08 августа 2019 г. Расход ГЭС $Q=1109 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер южный $W=1,7-2 \text{ м/с}$ (а) по данным за 15 мая 2018г. $Q=3072 \text{ м}^3/\text{с}$ ветер северный $W=2 \text{ м/с}$ (б)

Можно заметить, что в случае $Q=3072 \text{ м}^3/\text{с}$ влияние ветра приводит к значительному усилению течения вблизи устья реки Юг (нижняя часть рис. 2б) и вблизи дамбы, что также может способствовать возникновению краевых эффектов, связанных с батиметрией и структурой береговой линии в районе притоков. Однако при построении поля течений, связанных с ветровым дрейфом (рис. 3б) оказалось, что при большом расходе воды через ГЭС и аналогичного по скорости ветра северного направления водоворотов в верхнем слое не наблюдается, последнее, возможно, связано с недостатком данных измерений ниже по течению вблизи правого берега.

Заключение

Анализ полученных данных по течениям в южной части Горьковского водохранилища показал, что структура течений характеризуется существенной неоднородностью. В условиях слабого приводного ветра южного направления и при небольшом расходе через Нижегородскую ГЭС зарегистрировано формирование водоворота вблизи левого берега водохранилища; водоворот зарегистрирован в самом верхнем слое водоема, отвечающем за формирование особенностей на спутниковых изображениях. При этом в толще воды, на глубинах, слабо подверженных ветровому воздействию, течение носит русловый характер практически по всей южной части водохранилища. В условиях слабого ветра северного направления и относительно большого расхода через ГЭС особенностей в структуре течений в приповерхностном слое водоема не выявлено, но отмечено усиление течения в старом русле реки Волга в несколько раз. Получено, что при больших расходах через ГЭС влияние ветра на структуру течения уменьшается и большую роль на формирование ее особенностей, по-видимому, оказывают батиметрия и особенности береговой линии в областях притоков. Последнее утверждение пока является гипотезой и требует строго экспериментального подтверждения, которое будет получено в ходе дальнейшей обработки данных.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РГО (проект № 02/2019-Р) и РФФИ проекты 18-45-520004 р_а и 17-05-41095 РГО_а.

Список литературы:

- [1] Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука. 1969. 322 с.
- [2] Литвинов А.С. Об измерении течений в водохранилищах самописцами ЕПВ-2р. Труды ин-та биологии внутренних вод АН СССР, 1968, вып.16(19), с. 259–268.
- [3] Экологические проблемы верхней Волги. Отв. ред. А.И. Копылов. Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2001. 427 с.
- [4] Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. Л., 1975. 292 с.
- [5] <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer>
- [6] Molkov A.A., Kapustin I.A., Shchegolkov Yu.B., Vodeneva E.L., Kalashnikov I.N. On correlation between inherent optical properties at 650nm, secchi depth and blue-green algal abundance for the Gorky reservoir *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11. № 3. С. 26-33.
- [7] Капустин И.А., Ермошкин А.В., Богатов Н.А., Мольков А.А. Об оценке вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 2. С. 163–172.
- [8] Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / В.В. Пуклаков, Ю.С. Даценко, А.В. Гончаров и др. — Перо Москва, 2015. — С. 284.
- [9] Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Том 5. Река Волга. От Рыбинского гидроузла (423 км) до Чебоксарского гидроузла (1185 км). С.-Петербург: ФБУ «Администрация «Волго-Балт». 2016. 46 С.
- [10] Капустин И.А., Мольков А.А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища. *Метеорология и Гидрология*. 2019. №7. С. 110-117.
- [11] Литвинов А.С. Об измерении течений в водохранилищах самописцами ЕПВ-2р. Труды ин-та биологии внутренних вод АН СССР, 1968, вып.16(19), с.259-268.
- [12] <http://www.teledynemarine.com/adcps/marine-measurements>
- [13] Dinehart R.L., Bura J.R. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river // *Journal of Hydrology* Volume 314, Issues 1–4, 2005, P. 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.019>
- [14] Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акустический журнал*. – 2012. – т.58, № 5. – С.639-648.
- [15] Ермаков С.А. и др. Комплексные исследования гидрологии Горьковского водохранилища радиофизическими методами. Предварительные результаты. Препринт № 787. ИПФ РАН. 2009. 24 С.

FIELD STUDIES OF RIVERBED AND WIND FLOWS CHARACTERISTICS IN THE SOUTHERN PART OF THE GORKY RESERVOIR

Vostryakova Daria V., Senior Laboratory Assistant Researcher of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics

Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences

Kapustin Ivan A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Senior Researcher of the Department of Radiophysical Methods

in Hydrophysics Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences

Senior Researcher of Volga State University of Water Transport

Molkov Alexander A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Researcher of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics

Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences

Senior Researcher of Volga State University of Water Transport

Ermakov Stanislav A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences,

Head of the Department of Radiophysical Methods in Hydrophysics,

Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences,

Head of the Department of Volga State University of Water Transport

Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences

46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950

Volga State University of Water Transport

5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Key words: ADCP measurements, flow characteristics, inland water bodies, water flow, wind effect, whirlpools, Gorky reservoir.

Annotation: The paper presents the results of a study of currents in the southern part of the Gorky reservoir using the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Similar work was systematically carried out in the water area of the reservoir in the 60-80s of the twentieth century and the previously obtained data are still used to solve a number of practical problems. The lack of fresh data on the currents served as the motivation for this work. Study of the flow structure has been carried out. An analysis of the data showed that the structure of the flows is characterized by significant heterogeneity. Features of the flow structure have been identified at the weak south wind conditions and the low water flow through the Nizhny Novgorod hydroelectric station. The formation of the whirlpool observed in the

upper layer of the reservoir was shown. Probably the possible features of the flow structure are determined by bathymetry in the floodplain of the reservoir with the relatively large water flow through the hydroelectric station and the north wind conditions.

References:

- [1] Butorin N.V. Hidrologicheskie processy i dinamika vodnyh mass v vodohranilishchah Volzhskogo kaskada. L.: Nauka. 1969. 322 s.
- [2] Litvinov A.C. Ob izmerenii techenij v vodohranilishchah samopiscami EPV-2r. Trudy in-ta biologii vnutrennih vod AN SSSR, 1968, vyp.16(19), s.259-268.
- [3] Ekologicheskie problemy verhnej Volgi. Otv. red. A.I. Kopylov. YAroslav!': Izd-vo YAGTU. 2001. 427 s.
- [4] Gidrometeorologicheskij rezhim ozer i vodohranilishch SSSR. Vodohranilishcha Verhnej Volgi. L., 1975. 292 s.
- [5] <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer>
- [6] Molkov A.A., Kapustin I.A., Shchegolkov Yu.B., Vodeneeva E.L., Kalashnikov I.N. On correlation between inherent optical properties at 650nm, secchi depth and blue-green algal abundance for the Gorky reservoir Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika. 2018. T. 11. № 3. С. 26-33.
- [7] Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Bogatov N.A., Molkov A.A. Ob ocenke vklada privodnogo vetra v kinematiku slikov na morskoy poverhnosti v usloviyah ogranichennyh razgonov volneniya. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. T. 16. № 2. S. 163–172.
- [8] Hidroekologicheskij rezhim vodohranilishch Podmoskov'ya (nablyudeniya, diafnoz, prognoz) / V. V. Puklakov, YU. S. Dacenko, A. V. Goncharov i dr. – Pero Moskva, 2015.–S.284.
- [9] Atlas edinoj glubokovodnoj sistemy Evropejskoj chasti RF. Tom 5. Reka Volga. Ot Rybinskogo gidrouzla (423 km) do CHEboksarskogo gidrouzla (1185 km).S.-Peterburg: FBU «Administraciya «Volgo-Balt». 2016. 46
- [10] S.Kapustin I.A., Molkov A.A. Struktura techenij i glubiny v ozernoj chasti Gor'kovskogo vodohranilishcha. Meteorologiya i Gidrologiya. 2019. №7. S. 110-117.
- [11] Litvinov A.C. Ob izmerenii techenij v vodohranilishchah samopiscami EPV-2r. Trudy in-ta biologii vnutrennih vod AN SSSR, 1968, vyp.16(19), s.259-268.
- [12] <http://www.teledynemarine.com/adcps/marine-measurements>
- [13] Dinehart R.L., Bura J.R. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river // Journal of Hydrology Volume 314, Issues 1–4, 2005, P. 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.019>
- [14] Ermakov S.A. i dr. Kompleksnye issledovaniya gidrologii Gor'kovskogo vodohranilishcha radiofizicheskimi metodami. Predvaritel'nye rezul'taty. Preprint № 787. IPF RAN. 2009. 24 S.
- [15] Sabinin K.D., Serebryanyj A.N. Primenenie akusticheskikh dopplerovskih profilometrov techenij dlya izucheniya prostranstvennoj struktury morskoy sredy // Akusticheskij zhurnal.– 2012.– t.58, № 5.– S.639-648.

Статья поступила в редакцию 15.11.2019 г.