О формировании изолированной линзы речного стока круговоротом в Горьковском водохранилище

И. А. Капустин^{1,3}, С. А. Ермаков^{1,2}, М. В. Смирнова^{2,1}, Д. В. Вострякова^{1,3},
А. А. Мольков^{1,2}, Е. Ю. Чебан², Г. В. Лещёв^{1,3}

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mail: kapustin-i@yandex.ru

² *Волжский государственный университет водного транспорта*
Нижний Новгород, 603950, Россия

³ *Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского*
Нижний Новгород, 603950, Россия

Структура течений в акватории Горьковского вдхр. сильно изменчивая и характеризуется наличием основного руслового потока и крупных вихревых образований, называемых в литературе круговоротами. Формирование круговоротов преимущественно определяется ветровыми условиями, неравномерным стоком через гидроэлектростанции (ГЭС) и батиметрией, что исследовалось в ряде экспериментальных работ. В настоящей работе в ходе комплексного эксперимента в Горьковском вдхр. впервые обнаружена изолированная «линза», образованная водной массой речного стока и расположенная в области круговорота в пойменной части водохранилища. Линза характеризуется более низкими значениями электропроводности воды по сравнению с окружающими водами водохранилища. В ходе обследования ближайших притоков был обнаружен источник вод с близкими характеристиками. Предложен механизм формирования линзы, связанный с захватом речного выноса водоворотом в условиях переменного сброса воды через ГЭС и работы шлюзов и приводящий к торможению речного стока. Показано, что захваченные циркуляционным течением водные массы речного стока могут перемещаться по водохранилищу на большие расстояния (6 км и более) от устья реки, оставаясь практически не смешанными с водой водохранилища.

Ключевые слова: Горьковское водохранилище, течения, круговороты, речные выносы, притоки, гидрохимические показатели

Одобрена к печати: 02.12.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221

Введение

Водохранилища — это искусственные водные объекты, предназначенные для накопления водных масс и регулирования речного стока и, как правило, образованные преграждением речного русла гидротехническими сооружениями и затоплением поймы. Горьковское море — типичное равнинное водохранилище с высокой проточностью и сезонным и суточным регулированием стока.

В последнее десятилетие в Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН) активно ведутся работы по созданию подспутникового научно-исследовательского полигона на Горьковском вдхр. За эти годы в акватории водохранилища проведено множество экспериментов по исследованию зон эвтрофирования (Ермаков и др., 2013; Grishin et al., 2016), ветрового волнения и динамики искусственных сликов (Ермаков и др., 2016а, б, 2017; Ермошкин, Капустин, 2015), структуры течений и глубины (Вострякова и др., 2019; Капустин, Мольков, 2019; Капустин и др., 2021), гидрооптических и гидрохимических свойств эвтрофных вод (Мольков и др., 2017, 2019б), выбросов парниковых газов (Гречушников и др., 2018) и натурному моделированию газовых выходов (Smirnova et al., 2020). Широкий круг решаемых задач во многом обусловлен сильной изменчивостью ветро-волновых и гидрологических условий в акватории водохранилища и множеством наблюдаемых явлений и эффектов.

Структура течений в акватории водохранилища сильно изменчивая и, как известно, характеризуется наличием основного руслового потока и крупных вихревых образований, называемых в литературе круговоротами (Экологические..., 2001). Формирование круговоротов преимущественно определяется ветровыми условиями, неравномерным стоком через гидроэлектростанции (ГЭС) и батиметрией, что исследовалось в ряде экспериментальных работ (Буторин, 1969; Эдельштейн, 1965; Экологические..., 2001). В частности, в статье (Капустин, Мольков, 2019) было показано существование круговорота в пойме вблизи левого берега в южной части водохранилища. Важную роль в формировании гидрологического и гидрохимического режимов водохранилища и характере течений играют притоки Волги, водные массы которых, выносимые в акваторию водохранилища, могут значительно отличаться по своим характеристикам от основных масс водохранилища. На *рис. 1* приведены примеры спутниковых изображений речных выносов в озёрной части Горьковского водохр. Видно, что в ряде случаев выносы маркируются взвесью или фитопланктоном.

Рис. 1. Примеры спутниковых изображений речных выносов в акватории Горьковского водохр.: а — Landsat-7, 05.05.2009; б — Sentinel-2A, 24.08.2016

В настоящей работе выполнен анализ комплексных исследований как структуры течений, так и пространственной изменчивости характеристик воды. Обнаружено явление формирования изолированной области — «линзы» в водной толще водохранилища из-за захвата вод речного выноса круговоротом.

Эксперимент

Комплексный натурный эксперимент был проведён 16 августа 2019 г. Измерения течений (ADCP WH Monitor 1200, *англ.* — Acoustic Doppler Current Profiler Workhorse Monitor, акустический доплеровский профилометр течений) и ветра (WindSonic) выполнялись с борта

плавучей гидрофизической лаборатории «Геофизик» (Мольков и др., 2019а). На «Геофизике» был также установлен СТД-зонд (*англ.* Conductivity-Temperature-Depth — STD) на горизонте 0,5 м, которым периодически производились зондирования по глубине. Эксперимент проводился в течение 4 ч.

Тем же курсом, что и «Геофизик», с отставанием около 5 мин шло учебно-научное судно «Петр Андрианов» с гидрохимической лабораторией на борту, где проводились отборы проб воды и периодическое зондирование водной толщи по глубине многопараметрическим зондом Aqua Troll 500 с датчиками электропроводности, температуры, плотности воды и концентрации растворённого кислорода. Зондирование выполнялось с интервалом около 800 м по схеме движения, совпадающей с маршрутом «Геофизика».

В день проведения измерений ветровые условия были преимущественно штилевыми, в течение дня наблюдалось усиление ветра северного направления до скорости 3 м/с к полудню. Над поймой (ближе к левому берегу) в момент проведения измерений преобладали штилевые условия, т. е. ветер не оказывал влияния на приповерхностный слой и течения. С целью полного исключения возможного влияния ветра на структуру течений для анализа течений был выбран горизонт на глубине 4 м.

Анализ и обсуждение результатов

Результаты обработки данных ADCP, наложенные на карту глубин, представлены на *рис. 2*. Структура течений демонстрирует наличие круговорота над поймой со скоростью течения от 2 до 7 см/с. Круговорот регистрировался нами и в ранних экспериментах, его форма отвечает изгибу старого русла Волги (глубокая часть водохранилища), скорость течения в круговороте обычно составляла 3–4 см/с.

Рис. 2. Поле течения на глубине 4 м, наложенное на карту глубин

Электропроводность воды — один из наиболее стабильных показателей водных масс, по которому в случае смешения различных водных потоков можно в первом приближении

различить водную массу различных источников. В ходе измерений были получены данные о распределении основных физико-химических характеристик водных масс в приплотинном плёсе Горьковского вдхр.

На *рис. 3* приведены горизонтальный разрез водохранилища и карта распределения удельной электропроводности (УЭП). Как видно, водные массы имеют существенную неоднородность: в районе круговорота наблюдается линза, в которой средние значения электропроводности составляют 150 мкСм/см, в то время как значения электропроводности воды водохранилища — 240 мкСм/см. Размеры линзы — до 6 м в глубину и порядка 2000 м в диаметре. Оценочный объём — около 0,02 км³.

Рис. 3. Распределение удельной электропроводности (УЭП) воды в поперечном сечении водохранилища в области линзы от правого берега к левому (*вверху*) и распределение УЭП (мкСм/см) на глубине 1,5 м по акватории (*внизу*). Красными крестами на рисунке отмечены точки зондирования

Обследование близлежащих притоков с помощью зонда Aqua Troll 500 показало, что наиболее близка по электрохимическим свойствам и по водности к водным массам обнаруженной линзы р. Белая, впадающая в водохранилище через аванпорт в его юго-восточной части. Отрыв части речного выноса р. Белой мог произойти при резком изменении скорости и направления течений в районе аванпорта и приплотинного плёса, чему могли способствовать резкие дискретные сбросы воды через судоходные шлюзы, а затем повышение расхода воды через ГЭС с последующим его понижением. При этом водная масса р. Белой, захваченная сформировавшимся круговоротом, переместилась на расстояние 6,5 км от устья в практически не разбавленном виде.

Для оценки влияния Нижегородской ГЭС на вынос части речного стока р. Белой за пределы аванпорта и захват его круговоротом нами были проанализированы предоставленные ПАО «Русгидро» данные по внутрисуточным расходам в трёхдневной временной окрестности дня проведения измерений. Почасовые расходы через ГЭС за период с 13.08.2019 по 17.08.2019 приведены на *рис. 4* (см. с. 218).

Как можно видеть из *рис. 4*, суточное регулирование стока в день проведения наших измерений не имело значительных девиаций. Однако в течение трёх суток до этого были ежедневные регулирования с трехкратным увеличением сброса. Такие сбросы привели к падению среднего уровня водохранилища (днём 14 августа и вечером 15 августа) и интенсификации стока р. Белой с образованием более выраженного, чем обычно, выноса за пределами аванпорта. Важно подчеркнуть, что в условиях меняющегося расхода воды через ГЭС, а также нерегулярной работы шлюзов формирование как самого выноса, так и круговорота должно носить существенно нестационарный характер, что косвенно подтверждается наличием менее ярко выраженного выноса за пределами аванпорта в предыдущие и последующие годы наблюдений в том же районе. Течение в затопленном русле Волги, усилившееся во время ппуска воды, после снижения расхода через ГЭС тормозится у плотины, что вызывает возвратное течение и интенсификацию круговорота в приплотинной части водохранилища. Речной сток Белой, неоднородно смешанный с водными массами аванпорта, также тормозится на выходе из аванпорта при снижении расхода через ГЭС, в результате чего вынос носит пульсирующий характер. Вероятно, захват выноса круговоротом происходит именно в период снижения расхода через ГЭС.

Рис. 4. Почасовые расходы через ГЭС (*сверху*), динамика уровня водохранилища в районе плотины (*снизу*) за период с 13 по 17 августа 2019 г.

Оценим характерное время указанных процессов. Полагая характерные скорости течений в водохранилище порядка 5 см/с, можно ожидать, что усиление круговорота с масштабами 3–5 км происходит на временах около суток после окончания усиленного сброса через ГЭС. Подъём уровня водохранилища, согласно *рис. 4*, происходит на временах около 6 ч. Таким образом, можно полагать, что ко времени интенсификации круговорота речной сток, выходящий из аванпорта, сильно замедлится, и у выхода из аванпорта будет накоплен достаточно большой объём водных масс из р. Белой, чтобы они увлеклись круговоротом и сформировали в его центре линзу значительных размеров.

Заключение

В ходе комплексных измерений гидрологических характеристик Горьковского водохр. обнаружена локализованная масса воды («линза») с существенно отличными от окружающей воды характеристиками, которые соответствовали воде, выносимой в водохранилище р. Белой. Установлено также, что линза находилась в области круговорота, формируемого в пойменной части водохранилища.

Предложен механизм формирования линзы, который связан с захватом речного выноса круговоротом в условиях переменного сброса воды через ГЭС и работы шлюзов, приводящих к торможению речного стока.

Дальнейшее изучение эффекта захвата речного выноса круговоротом может оказаться полезным при анализе спутниковых данных и для предсказания поведения в водохранилищах речных выносов, несущих в водохранилища биогены, водоросли и загрязняющие вещества (см. рис. 1). Кроме того, как показали измерения, в области линзы наблюдалось существенное отличие температуры воды, что указывает на возможность дистанционного зондирования таких линз, например спутниковыми радиометрами.

В дальнейшем планируется провести более детальное наблюдение за формированием речных выносов в приплотинной части Горьковского водохр. с целью уточнения механизмов их формирования и захвата циркуляционными течениями.

Работа выполнена при поддержке Научно-образовательного центра Нижегородской области «Техноплатформа 2035» в рамках договора № 16-11-2021/54 от 16.11.2021, данные измерения течений получены в ходе выполнения гранта РГО «Плавучий университет Волжского бассейна», договор № 17-2021-Р.

Литература

1. Буторин Н. В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волж. ка-скада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
2. Вострякова Д. В., Капустин И. А., Мольков А. А., Ермаков С. А. Натурные исследования характери-стик руслового и ветрового течений в южной части Горьковского водохранилища // Вестн. Волж. гос. акад. водного транспорта. 2019. № 61. С. 11–18.
3. Гречушников М. Г., Репина И. А., Степаненко В. М., Казанцев В. С., Артамонов А. Ю., Варенцов М. И., Ломова Д. В., Мольков А. А., Капустин И. А. Пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана в водохранилищах с различным коэффициентом водообмена // Изв. Рус. геогр. об-ва. 2018. Т. 150. № 5. С. 14–33. DOI: <https://doi.org/10.7868/S086960711805002X>.
4. Ермаков С. А., Капустин И. А., Лазарева Т. Н., Сергеевская И. А., Андриянова Н. В. О возможностях радиолокационной диагностики зон эвтрофирования водоемов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 336–343. DOI: [10.7868/S000235151303005X](https://doi.org/10.7868/S000235151303005X).
5. Ермаков С. А., Кунаев А. В., Капустин И. А., Мольков А. А., Сергеевская И. А., Шомина О. В. (2016a) Эксперименты по дистанционному зондированию органических пленок с использованием много-частотного радиолокатора микроволнового диапазона // Вестн. Волж. гос. акад. водного транспор-та. 2016. № 48. С. 111–121.
6. Ермаков С. А., Лаврова О. Ю., Капустин И. А., Макаров Е. В., Сергеевская И. А. (2016b) Исследование особенностей геометрии пленочных сликов на морской поверхности по данным спутниковых ра-диолокационных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 97–105. DOI: [10.21046/2070-7401-2016-13-3-97-105](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-3-97-105).
7. Ермаков С. А., Ермошкин А. В., Капустин И. А. Об эффекте сжатия пленочного слика // Современ-ные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 288–294. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294).
8. Ермошкин А. В., Капустин И. А. Исследование особенностей растекания пленок поверхностноак-тивных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 136–142.
9. Капустин И. А., Мольков А. А. Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохра-нилища // Метеорология и гидрология. 2019. № 7. С. 110–117.

10. Капустин И.А., Вострякова Д.В., Мольков А.А., Даниличева О.А., Лещёв Г.В., Ермаков С.А. Натурные подспутниковые наблюдения конвергентных течений в приповерхностном слое воды по их пенным образам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 188–196. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-188-196.
11. Мольков А.А., Калинин Д.В., Капустин И.А., Корчемкина Е.Н., Осокина В.А., Пелевин В.В. О перспективах дистанционной оценки гидробиооптических характеристик вод внутренних пресных водоемов по результатам экспедиций на Горьковском водохранилище 2016 г. // Эколог. безопасность прибреж. и шельфовой зон моря. 2017. № 2. С. 59–67.
12. Мольков А.А., Капустин И.А., Ермаков С.А., Сергеевская И.А., Шомина О.В., Лазарева Т.Н., Даниличева О.А., Лещев Г.В. (2019а) Гидрофизическая лаборатория ИПФ РАН «Геофизик» как эффективный инструмент лимнологического мониторинга // Науч. проблемы оздоровления рос. рек и пути их решения: сб. ст. конф. 8–14 сент. 2019, Нижний Новгород. 2019. С. 214–218.
13. Мольков А.А., Корчемкина Е.Н., Лещев Г.В., Даниличева О.А., Капустин И.А. (2019б) О влиянии цианобактерий, волнения и дна на коэффициент яркости воды Горьковского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 203–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-203-212.
14. Эдельштейн К.К. Водные массы озерной части Горьковского водохранилища // Динамика вод. масс водохранилищ: сб. статей. М.; Л.: «Наука», 1965. С. 29–38.
15. Экологические проблемы верхней Волги / отв. ред. А.И. Копылов. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
16. Grishin M. Y., Lednev V. N., Pershin S. M., Bunkin A. F., Kobylanskiy V. V., Ermakov S. A., Kapustin I. A., Molkov A. A. Laser remote sensing of an algal bloom in a freshwater reservoir // Laser Physics. 2016. V. 26. No. 12. 125601. DOI: 10.1088/1054-660X/26/12/125601.
17. Smirnova M. V., Kapustin I. A., Ermoshkin A. V. Investigation of the possibility of remote detection of gas outlets in the sea using X-band radar // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 6. С. 116–121. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-116-121.

On the formation of an isolated lens of a river runoff by a whirlpool in the Gorky Reservoir

I. A. Kapustin^{1,3}, S. A. Ermakov^{1,2}, M. V. Smirnova^{2,1}, D. V. Vostryakova^{1,3},
A. A. Molkov^{1,2}, E. Yu. Cheban², G. V. Leshchev^{1,3}

¹ Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: kapustin-i@yandex.ru

² Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia

³ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603950, Russia

The structure in the water area of the Gorky Reservoir is highly variable and contains a main channel flow and large eddy formation, characterized in the literature as whirlpools. The formation of the whirlpools is mainly determined by wind conditions, uneven runoff through the hydroelectric power plants and bathymetry, and the phenomenon was investigated in a number of experimental studies. An isolated “lens” formed by the water mass of a river runoff and located in the circulation area in the floodplain part of a reservoir was observed for the first time due to hydrophysical and hydrochemical observations in the Gorky Reservoir. The lens formation mechanism associated with the capture of a river plume by a whirlpool under conditions of variable water discharge through the hydroelectric power plant and the operation of sluices, and leading to inhibition of the river runoff is proposed. The lens is characterized by lower values of the electrical conductivity of water in comparison with the surrounding waters of the reservoir. During the survey of the nearest tributaries, a water source with similar characteristics was found. It is shown that the water mass of the river plume captured by the circulation current can move along the reservoir over long distances (6 km or more) from the river mouth, remaining practically unmixed with the surrounding reservoir water.

Keywords: Gorki Reservoir, currents, water circulation, river outflow, tributaries, hydrochemical indicators

Accepted: 02.12.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221

References

1. Butorin N. V., *Gidrologicheskie protsessy i dinamika vodnykh mass v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada* (Hydrological processes and water mass dynamics in the Volga cascade reservoirs), Leningrad: Nauka, 1969, 322 p. (in Russian).
2. Vostryakova D. V., Kapustin I. A., Molkov A. A., Ermakov S. A., Field studies of riverbed and wind flows characteristics in the Southern part of the Gorky Reservoir, *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta*, 2019, No. 61, pp. 11–18 (in Russian).
3. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Stepanenko V. M., Kazantsev V. S., Artamonov A. Yu., Varentsov M. I., Lomova D. V., Molkov A. A., Kapustin I. A., Spatio-temporal change of methane distribution and emission in reservoirs with different water residence coefficient, *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2018, Vol. 150, No. 5, pp. 14–33 (in Russian), DOI: <https://doi.org/10.7868/S086960711805002X>.
4. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergievskaya I. A., Andriyanova N. V., On the Possibilities of Radar Probing of Eutrophication Zones in Water Reservoirs, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 3, pp. 307–314, DOI: 10.1134/S0001433813030055.
5. Ermakov S. A., Kupaev A. V., Kapustin I. A., Molkov A. A., Sergievskaya I. A., Shomina O. V. (2016a), Experiments on remote sensing of organic films using multi frequency microwave radar, *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta*, 2016, No. 48, pp. 111–121 (in Russian).
6. Ermakov S. A., Lavrova O. Yu., Kapustin I. A., Makarov E. V., Sergievskaya I. A. (2016b), Investigation of geometry of film slicks on the sea surface from satellite radar observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 97–105 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-97-105.
7. Ermakov S. A., Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., On the effect of film slick compression, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 288–294 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-288-294.
8. Ermoshkin A. V., Kapustin I. A., Investigation of surfactant spreading over the surface of internal fresh-water reservoir using marine navigation radar, *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 136–142 (in Russian).
9. Kapustin I. A., Molkov A. A., Structure of currents and depth in the lake part of the Gorky Reservoir, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, No. 7, pp. 110–117 (in Russian).
10. Kapustin I. A., Vostryakova D. V., Molkov A. A., Danilicheva O. A., Leshchev G. V., Ermakov S. A., Field observations of convergent currents in the near-surface layer of water using foam patterns in quasi-synchronous satellite optical images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 188–196 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-188-196.
11. Molkov A. A., Kalinskaya D. V., Kapustin I. A., Korchemkina E. N., Osokina V. A., Pelevin V. V., About the perspectives of remote assessment of hydrobiooptic water parameters of internal fresh water resources according results of expeditions on Gorkovsky water reservoir in 2016, *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2017, No. 2, pp. 59–67 (in Russian).
12. Molkov A. A., Kapustin I. A., Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Shomina O. V., Lazareva T. N., Danilicheva O. A., Leshchev G. V. (2019a), Gidrofizicheskaya laboratoriya IPF RAN “Geofizik” kak effektivnyi instrument limnologicheskogo monitoringa (Hydrophysical laboratory of IAP RAS “Geophysicist” as an effective tool for limnological monitoring), *Nauchnye problemy ozdorovleniya rossiiskikh rek i puti ikh resheniya*, Proc. Conf., 8–14 Sept., 2019, Nizhny Novgorod, 2019, pp. 214–218 (in Russian).
13. Molkov A. A., Korchemkina E. N., Leshchev G. V., Danilicheva O. A., Kapustin I. A. (2019b), On the influence of cyanobacteria, surface roughness, and bottom radiance on the remote sensing reflectance of the Gorky Reservoir, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 203–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-203-212.
14. Edelshtein K. K., Water masses in the lakeside part of the Gorki Reservoir, In: *Dinamika vodnykh mass vodokhranilishch*, Moscow; Leningrad: “Nauka”, 1965, pp. 29–38 (in Russian).
15. *Ekologicheskie problemy verkhnei Volgi* (Environmental problems of the upper Volga), A. I. Kopylov (ed.), Yaroslavl: Izd. YaGTU, 2001, 427 p. (in Russian).
16. Grishin M. Y., Lednev V. N., Pershin S. M., Bunkin A. F., Kobylanskiy V. V., Ermakov S. A., Kapustin I. A., Molkov A. A., Laser remote sensing of an algal bloom in a freshwater reservoir, *Laser Physics*, 2016, Vol. 26, No. 12, 125601, DOI: 10.1088/1054-660X/26/12/125601.
17. Smirnova M. V., Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Investigation of the possibility of remote detection of gas outlets in the sea using X-band radar, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 6, pp. 116–121, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-116-121.