

Технические средства и методика исследования тонкой структуры течения водного потока с использованием видеорегистрации

Д. А. Антоненков

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
e-mail: dmitry_science@mail.ru*

Поступила 9.06.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Рассматриваются разработанные технические средства и методика, позволяющие получать пространственное распределение скоростей перемещения взвешенных частиц водным потоком в природных условиях. Приведено краткое описание созданного измерительного комплекса, работа которого основана на видеорегистрации водной среды. Описана методика выполнения природных экспериментов на примере исследования морских устьев рек. Приведены результаты измерений, а также примеры пространственных распределений скоростей течения, необходимых для решения различных задач, связанных с массообменом, размывом берегов и заилением акваторий. Анализ полученных с помощью разработанного комплекса результатов экспедиционных исследований позволил выработать методические подходы к оценке текущего состояния водного объекта и информативных параметров его состояния с применением метода визуализации. На основе созданной методики получены данные о тонкой структуре течения в устьевой зоне реки Черной. Сопоставление усредненных данных о скорости водного потока с результатами измерений стандартными техническими средствами, а именно гидрометрической вертушкой, показало минимальные расхождения, не превышающие 11 %. Разработанные метод и технические средства дают возможность исследовать динамику водного потока, а также описывать тонкую структуру течения, что необходимо для изучения механизмов эрозии, аккумуляции и транспорта наносов.

Ключевые слова: скорость течения, распределения скорости, PIV-метод, транспорт наносов.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0006 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Антоненков Д. А. Технические средства и методика исследования тонкой структуры течения водного потока с использованием видеорегистрации // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 123–131. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-123-131

© Антоненков Д. А., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Technical Means and Methods for Studying the Fine Structure of a Water Flow using Video Registration

D. A. Antonenkov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: dmitry_science@mail.ru

Submitted 9.06.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

The article discusses developed technical means and methods allowing to obtain *in situ* spatial distribution of velocity of suspended particle movement by a water flow. A brief description is given of the developed measuring complex based on video recording of the aquatic environment. The method of performing full-scale experiments by the example of study of sea estuaries is described. The article presents measurement results and examples of spatial distributions of flow velocities required for solving various problems related to mass transfer, coast erosion and silting of water areas. Analysis of expedition research results obtained using the developed complex allowed to create methodical approaches to assess the current state of a water body and informative parameters of its state using a visualization method. Based on the created methods, data on the fine structure of the flow in the Chernaya River estuary area were obtained. Comparison of the averaged data on the water flow velocity with the measurement results obtained through standard technical means, namely a hydrometric current meter, showed minimal discrepancies not exceeding 11 %. The developed method and technical means make it possible to study the water flow dynamics and to describe the flow fine structure, which is necessary for studying the mechanisms of erosion, sediment accumulation and transport.

Keywords: flow velocity, velocity distribution fields, PIV method, sediment transport.

Acknowledgements: the research is performed under state task on topic no. 0555-2021-0006 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Antonenkov, D.A., 2021. Technical Means and Methods for Studying the Fine Structure of a Water Flow using Video Registration. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 123–131. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-123-131 (in Russian).

Активная хозяйственная деятельность в прибрежной морской зоне приводит к интенсификации техногенных процессов, что оказывает отрицательное влияние на окружающую среду. В соответствии с этим все большее внимание уделяется экологическому мониторингу, необходимому для организации эффективных природоохранных мероприятий. Одним из актуальных направлений исследований в данной области является изучение гидрологических процессов в прибрежной зоне и морских устьях рек. Гидродинамическая и морфологическая структура водных масс, их свойства, формирующиеся при смешении речных и морских вод, определяют протекание различных природных процессов не только в устьевой области, но и за ее пределами¹⁾. В настоящее время устья рек вызывают повышенный научный

¹⁾ Михайлов В. Н. Гидрология устьев рек. М. : Изд-во МГУ, 1998. 176 с.

и прикладной интерес. Во многом он связан с использованием ресурсного потенциала этих районов, а также с необходимостью их охраны и защиты от загрязнения, так как в речных устьях часто располагаются крупные порты. При этом сочетание природных и антропогенных факторов, определяющих эволюцию устьевых областей, обуславливает дополнительные сложности при исследовании таких объектов [1]. В соответствии с этим необходимо создание новых технических средств и методов для реализации данных задач.

Одна из задач экологического мониторинга – исследование механизмов эрозии, аккумуляции и транспорта наносов, требующееся для организации эффективных берегозащитных мероприятий. Основными параметрами водной среды, которые необходимы для описания данных процессов, являются концентрация взвеси (мутность) и структура течения в исследуемой области. В данной статье рассматривается разработанный метод определения скорости перемещения взвешенных частиц водным потоком, основанный на получении и программной обработке видеоизображений, который позволяет получать данные о тонкой структуре течения и динамике водного потока. Существует ряд методов и приборов для определения скорости течения [2–6]. При исследовании рек в основном применяют гидрометрические вертушки²⁾. Данные приборы, как правило, позволяют определять горизонтальную составляющую скорости течения на заданном горизонте в определенной точке. Однако для исследования указанных выше процессов необходимо более детальное представление о перемещении частиц в пространстве, в частности в придонной области, где происходят процессы взмучивания и осаждения донного материала. Существующие технические средства не позволяют в полной мере обеспечить получение таких данных.

Нами был разработан измерительный комплекс [7, 8], работа которого основана на использовании *PIV*-метода [9–11]. Применение данного метода дает возможность получать пространственные распределения скоростей течения, необходимые для решения различных задач, связанных с массообменом, размывом и заилением акваторий.

Цель работы заключается в том, чтобы показать возможности созданных технических средств и методик при выполнении исследований динамики водного потока и структуры течения.

Разработанный измерительный комплекс «Визуализатор потока» (рис. 1) состоит из нескольких функциональных блоков:

1) блок подсветки, представляющий собой водонепроницаемый светодиодный модуль мощностью 20 W с щелевой диафрагмой для уменьшения паразитной засветки;

2) блок регистрации, включающий в себя цифровую видеокамеру³⁾, работающую в *slow motion* режиме и обеспечивающую регистрацию процесса с максимальной скоростью 240 fps;

3) блок позиционирования, состоящий из п-образной штанги с прикрепленными к ней пластинами. Задача данного блока заключается в ориентации комплекса по направлению потока;

²⁾ Быков В. Д. Гидрометрия. Л. : Гидрометеиздат, 1977. 448 с.

³⁾ URL: <https://www.2yitechnology.com/yi-4k-plus-action-camera> (дата обращения 08.06.2021).

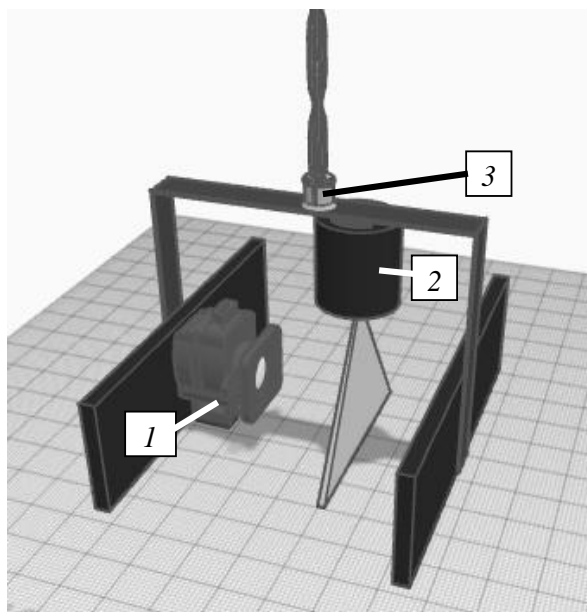


Рис. 1. Схема измерительного комплекса: 1 – цифровая видеокамера; 2 – система подсветки; 3 – конструктивные элементы позиционирования

Fig. 1. Measuring complex scheme: 1 – digital videocamera; 2 – illumination system; 3 – positioning structural units

4) блок обработки данных, включающий в себя адаптированное программное обеспечение для получения полей скорости течения.

Апробация разработанного комплекса выполнялась в рамках экспедиционных

исследований в устье реки Черной (г. Севастополь). Для этой цели были разработаны методика и рекомендации для выполнения измерений с использованием данного комплекса. Согласно данной методике экспериментальные наблюдения включают:

- определение скорости перемещения наносов в створе;
- построение распределения скорости течения для придонного слоя с целью исследования мелкомасштабных турбулентных процессов;
- исследование динамики водных масс в устьевой зоне (определение периода, частоты возвратно-поступательного движения воды, изменения скорости течения во времени).

Выбор створов осуществляется на основе рекогносцировочного обследования местности и дистанционных снимков со спутника. Далее выполняется разметка створов и станций, а также промерные работы. Сеть станций и створов охватывает: вершину устья, нижнюю границу устьевое участка реки (нижнюю границу дельты), устьевое взморье.

Станции выбираются по следующей методике:

- для створов шириной более 50 м измерения выполняются на трех станциях (в середине створа и на расстоянии 10 м от левого и правого берегов);
- для створов шириной от 10 до 50 м измерения выполняются на двух станциях (расстояние от правого и левого берега выбирается из расчета 1/3 от ширины створа);
- для створов шириной менее 10 м – на одной станции посередине створа.

Методика выбора горизонтов:

- для станций глубиной от 0.5 до 1 м задается один горизонт (при сильном обрастании водорослями – в поверхностном слое, при отсутствии обрастания – в придонном слое для изучения процессов взмучивания);
- для станций глубиной от 1 до 3 м задается три горизонта (на поверхности, на середине глубины, в придонном слое).

Рис. 2. Схема станций для измерений комплексом «Визуализатор потока» в устье р. Черной

Fig. 2. Station map for measurements using “Flow Visualizer” Complex in the Chernaya River estuary

После выполнения сопутствующих измерений (температуры, солености, мутности, скорости течения) с использованием гидрометрической вертушки выбираются станции с максимальными и минимальными значениями параметров, и на этих станциях проводятся дальнейшие эксперименты с помощью разработанного комплекса.

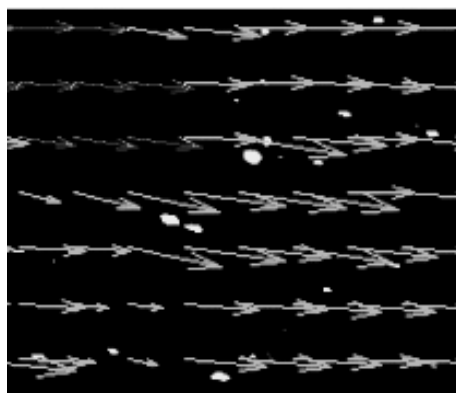
В качестве примера на рис. 2 приведена схема створов и станций, составленная на основе описанной выше методики, для исследования процессов седиментации и транспорта наносов в устье р. Черной, г. Севастополь.

По результатам натурных экспериментов, выполненных в 2020 г., были получены пространственные распределения скоростей течения, необходимые для решения различных задач, связанных с массообменом, размывом и заилением акваторий. В качестве примера на рис. 3 приведены изображения мгновенного поля скорости течения на трех горизонтах (в поверхностном, среднем и придонном слоях), полученные в период экспедиционных исследований. Измерения выполнялись в области смешения морской и речной воды. Для этой области характерна нестабильная структура течения. Наибольшие значения скорости составляли 0.4 м/с, течение периодически меняло направление на противоположное, что было зафиксировано при выполнении измерений в среднем слое, при этом осредненная скорость течения составила 0.13 м/с. Для придонного слоя характерны турбулентные процессы, которые благодаря применению разработанного комплекса удалось визуализировать.

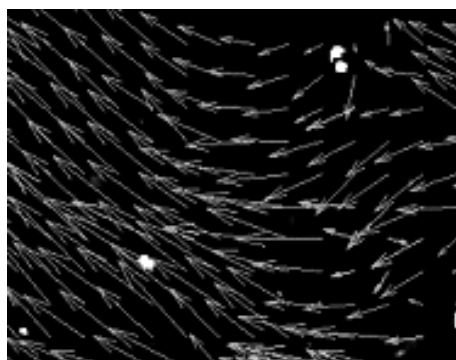
В ходе экспедиции эксперименты выполнялись в соответствии с разработанной методикой, описанной выше. Были проведены измерения скорости в разных створах и горизонтах в устье р. Черной. Получены профили скоростей, необходимые для исследования динамики потока. Для примера на рис. 4 показано распределение скорости течения водного потока в одном из створов.

В этом створе скорость течения изменялась от 0.01 до 0.4 м/с, течения на разных горизонтах разнонаправлены. Доминировали течения, направленные из реки в среднем слое в центральной части створа, в придонном слое на ст. 4 и 14. В показанном створе в условиях меженного расхода реки

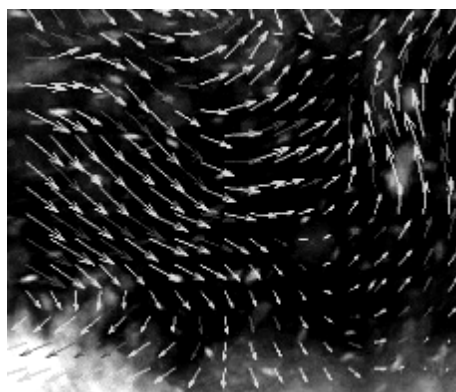




a



b



c

Рис. 3. Поле скорости течения в поверхностном (*a*), среднем (*b*) и придонном (*c*) слоях

Fig. 3. Flow velocity field in the surface (*a*), middle (*b*) and bottom (*c*) layers

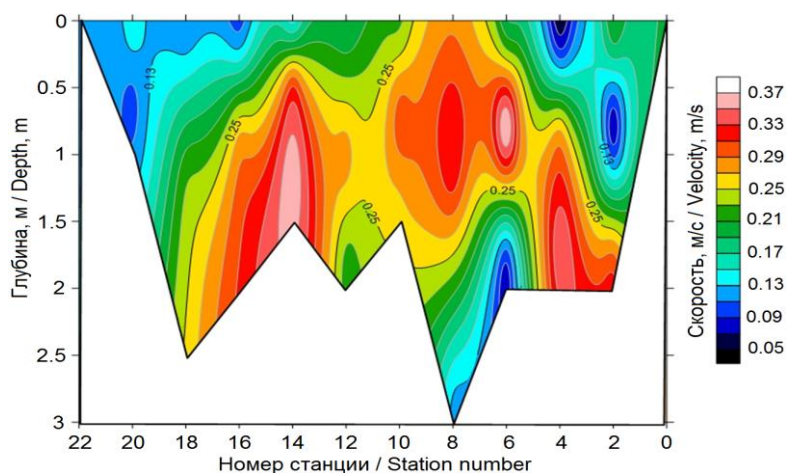
отмечалось взаимодействие двух основных потоков: потока прямого направления, обусловленного расходом реки, и обратного потока (реверсивного), обусловленного поступлением более соленой воды из бухты в устьевой участок реки.

Смешение водных масс приводило к неустойчивой структуре течения и локальному взмучиванию отложений в придонной области.

С целью верификации получаемых данных одновременно выполнялись измерения стандартными средствами, а именно гидрометрической вертушкой, входящей в состав биофизического комплекса «Кондор» [12]. Комплекс «Визуализатор потока», благодаря использованию методов видеорегистрации, позволяет получать мгновенные поля скорости течения, в то время как гидрометрическая вертушка, обладая большей инерционностью, дает данные о средней скорости за некоторый интервал времени. В соответствии с этим применялась следующая методика выполнения совместных экспериментов: для выбранной станции задавались горизонты – 0.1 м (поверхностный слой) и значение, равное 1/2 глубины (средний слой). Затем оба прибора устанавли-

вались на заданном горизонте и одновременно выполняли измерения с экспозицией 200 с. После этого производилась обработка данных, результатом которой являлась средняя скорость водного потока за указанное время экспозиции для каждого прибора. Для примера в таблице приведены данные, полученные для одной из станций.

По результатам обработки всего массива данных, полученных в ходе экспедиционных исследований, можно сделать вывод, что средние значения скорости течения, измеренные обоими приборами, имеют минимальные расхождения, которые не превышают 11 %.



Р и с . 4 . Распределение средней скорости течения водного потока в створе № 4 в устье р. Черной

Fig . 4 . Distribution of the average water flow velocity at Section Line 4 at the Chernaya River estuary

Скорость течения, измеренная с помощью комплекса «Кондор» и методом видеорегистрации на ст. 8 (створ № 4)

Flow velocity as measured using “Condor” Complex and video registration method at Station 8 (Section Line 4)

Горизонт наблюдений / Observation horizon	Скорость течения, м/с, по данным / Flow velocity, m/s, according to data of		Расхождение, % / Discrepancy, %
	комплекса «Кондор» / “Condor” Complex	видеорегистрации / Video registration	
0.1 м (поверхностный слой) / 0.1 m (surface layer)	0.27	0.29	7
1.25 м (средний слой) / 1.25 m (middle layer)	0.39	0.34	13

Заклучение

Таким образом, анализ полученных с помощью разработанного комплекса результатов экспедиционных исследований позволил выработать методические подходы к оценке текущего состояния водного объекта и информативных параметров его состояния с применением метода визуализации. На основе созданной методики получены данные о тонкой структуре течения в устьевой зоне реки Черной. Сопоставление осредненных данных о скорости водного потока с результатами измерений стандартными техническими средствами, а именно гидromетрической вертушкой, входящей в состав измерительного комплекса «Кондор», показало минимальные расхождения, не превышающие 11 %. Разработанные технические средства имеют ряд преимуществ по сравнению с другими приборами для исследования течений. В частности, они дают возможность получать мгновенные и осредненные поля распределения скорости водного потока, вихревую

структуру турбулентного потока, выяснять расположение стационарных и квазистационарных вихревых образований, что позволяет составить детальное представление о характере природных процессов и их особенностях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование зон смешения в устьевой области р. Кереть Белого моря / Р. Е. Смагин [и др.] // Известия Русского географического общества. 2009. Т. 141, № 2. С. 63–70.
2. *Gartner J. W.* Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California // *Marine Geology*. 2004. Vol. 211, iss. 3–4. P. 169–187. doi:10.1016/j.margeo.2004.07.001
3. *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.
4. *Морозов А. Н., Лемешко Е. М.* Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в Черном море // *Морской гидрофизический журнал*. 2006. № 4. С. 31–48.
5. *Дыкман В. З.* Технические средства для исследования структуры и динамики водных масс // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 49–62. doi:10.22449/0233-7584-2016-6-49-62
6. *Клименко Д. Е.* Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом // *Географический вестник*. 2010. № 2. С. 64–76.
7. *Antononkov D. A.* Water flow speed determining using visualization methods // *Scientific Visualization*. 2020. Vol. 12, № 5. P. 102–111. doi:10.26583/sv.12.5.09
8. *Антоненков Д. А.* Измерительный комплекс для исследования динамических характеристик и структуры течения водного потока в прибрежной морской зоне // *Известия вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 12. С. 1112–1118. doi:10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118
9. *Сергеев Д. А.* Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом пробы частиц на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // *Приборы и техника эксперимента*. 2009. № 3. С. 138–144.
10. *Jahanmiri M.* Particle Image velocimetry: Fundamentals and its applications : Research report. Göteborg, Sweden : Chalmers University of Technology, 2011. 58 p. URL: https://www.academia.edu/2263312/Particle_Image_Velocimetry_Fundamentals_and_Its_Applications (дата обращения: 08.06.2021).
11. *Хмелевой С. В.* Использование GPU для расчетов скоростей газо-жидкостных сред с помощью метода PIV // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2012. № 6. С. 124–129.
12. *Чепыженко А. А., Чепыженко А. И.* Методы и средства мониторинга in-situ общего взвешенного вещества в природной водной среде // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тезисы докладов XXIII Международного симпозиума*. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. 87. URL: <https://symp.iao.ru/ru/aoo/23/progpdf> (дата обращения: 08.09.2021).

Об авторе:

Антоненков Дмитрий Александрович – научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-2601-7751**, **Scopus Author ID: 6508261173**, **ResearcherID: V-7284-2019**, dmitry_science@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Smagin, R.E., Ionov, V.V., Pryakhina, G.V. and Fedorova, I.V., 2009. [Study of Mixing Zones in the Estuary Area of the Keret River of the White Sea]. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 141(2), pp. 63–70 (in Russian).
2. Gartner, J.W., 2004. Estimating Suspended Solids Concentrations from Backscatter Intensity Measured by Acoustic Doppler Current Profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211(3–4), pp. 169–187. doi:10.1016/j.margeo.2004.07.001
3. Sabinin, K.D. and Serebryanyi, A.N., 2012. Results of Using Acoustic Doppler Current Profilers for Studying the Spatial Structure of the Marine Environment. *Acoustical Physics*, 58(5), pp. 586–595. <https://doi.org/10.1134/S106377101203013X>
4. Morozov, A.N. and Lemeshko, E.M., 2006. Methodical Aspects of the Application of Acoustic Doppler Current Profilers in the Black Sea. *Physical Oceanography*, 16(4), pp. 216–233. <https://doi.org/10.1007/s11110-006-0027-8>
5. Dykman, V.Z., 2016. Technical Tools for Studying Structure and Dynamics of Water Masses. *Physical Oceanography*, (6), pp. 43–55. doi:10.22449/1573-160X-2016-6-43-55
6. Klimenko, D.E., 2010. Evolution of Hydrometric Propellers in Russia and Abroad. *Geographical Bulletin*, (2), pp. 64–76 (in Russian).
7. Antonenkov, D.A., 2020. Water Flow Speed Determining Using Visualization Methods. *Scientific Visualization*, 12(5), pp. 102–111. doi:10.26583/sv.12.5.09
8. Antonenkov, D.A., 2020. Measuring Complex for Studying the Dynamic Characteristics and Structure of the Water Flow in the Coastal Sea Zone. *Journal of Instrument Engineering*, 63(12), pp. 1112–1118. doi:10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118 (in Russian).
9. Sergeev, D.A., 2009. A Measuring System for Studying Liquid Flows by the Particle Image Velocimetry Method Based on a Diode-Pumped Solid-State Laser. *Instruments and Experimental Techniques*, 52(3), pp. 438–444. <https://doi.org/10.1134/S0020441209030257>
10. Jahanniri, M., 2011. *Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications*. Research report 2011:03. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 58 p. Available at: https://www.academia.edu/2263312/Particle_Image_Velocimetry_Fundamentals_and_Its_Applications [Accessed: 08 September 2021].
11. Khmilovyi, S.V., 2012. Using GPU for Speed-Calculations of Gazo-Liquid Systems by Means of PIV Method. *Radioelectronic and Computer Systems*, (6), pp. 124–129 (in Russian).
12. Chepyzhenko, A.A. and Chepyzhenko, A.I., 2017. Methods and Device for in situ Total Suspended Matter (TSM) Monitoring in Natural Waters' Environment. In: G.G. Matvienko and O.A. Romanovskii, Eds., 2017. *Proceedings of SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (30 November 2017)*. Irkutsk. 104663G. doi:10.1117/12.2287127

About the author:

Dmitry A. Antonenkov, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0003-2601-7751**, **Scopus Author ID: 6508261173**, **ResearcherID: V-7284-2019**, dmitry_science@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.