

Поле концентрации окрашенного растворенного органического вещества и его связь с соленостью в открытых водах Азовского моря

П. Д. Ломакин *, Д. Д. Завьялов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: p_lomakin@mail.ru*

Аннотация

На основе материалов серии экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом (г. Севастополь) и Южным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии (г. Керчь) в 2002–2013 гг., получено уравнение регрессии, свидетельствующее о наличии достаточно тесной обратной корреляционной связи между соленостью и концентрацией окрашенного растворенного органического вещества в открытых водах Азовского моря. Показано, что теснота корреляционной зависимости между этими величинами существенным образом зависит от наличия в водах рассматриваемого региона растворенной органики антропогенного происхождения. При помощи данного уравнения по известным полям средней месячной солености рассчитаны поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества, проанализирована их структура и внутригодовая изменчивость. Выявлено, что поле исследуемого вещества характеризуется низкой концентрацией и однородностью. В открытой акватории моря вариации солености, определяемые внутригодовым ходом объема стока рек Дон и Кубань, не оказывают существенного влияния на пространственно-временную изменчивость поля окрашенного растворенного органического вещества. Показано, что тесная обратная корреляционная связь между содержанием окрашенного растворенного органического вещества и соленостью – индикатор хорошего качества вод. Слабая или положительная корреляционная зависимость между этими величинами – признак наличия в водной среде растворенных органических веществ антропогенной природы.

Ключевые слова: окрашенное растворенное органическое вещество, соленость, корреляция, загрязнение, Азовское море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Ломакин П. Д., Завьялов Д. Д. Поле концентрации окрашенного растворенного органического вещества и его связь с соленостью в открытых водах Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 104–112. EDN XDLBGE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-104-112

© Ломакин П. Д., Завьялов Д. Д., 2023



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

The Field of Colored Dissolved Organic Matter Content and its Relationship with Salinity in the Open Water of the Sea of Azov

P. D. Lomakin *, D. D. Zavyalov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

*e-mail: p_lomakin@mail.ru

Abstract

Based on the materials of a series of expeditions carried out by Marine Hydrophysical Institute (Sevastopol) and Southern Scientific Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (Kerch) during 2002–2013, a regression equation was obtained indicating the presence of a fairly close inverse correlation relationship between salinity and the concentration of colored dissolved organic matter in the open waters of the Sea of Azov. It is shown that the closeness of the correlation dependence between these values depends significantly on the presence of dissolved organic matter of anthropogenic origin in the waters of the studied region. Using this equation, according to the known average monthly salinity fields, the concentration fields of colored dissolved organic matter were calculated and the regularities of their structure and intra-annual variability were analyzed. It is found that the field of the studied matter is characterized by low concentration and relative homogeneity. In the open water area of the sea, salinity variations determined by the intra-annual variation in the runoff volume of the Don and Kuban Rivers do not significantly affect the spatiotemporal variability in the field of colored dissolved organic matter. It is shown that a close inverse correlation between the content of colored dissolved organic matter and salinity is an indicator of the good quality of water. A weak or positive correlation between these quantities is a sign of the presence of dissolved organic substances of anthropogenic nature in the aquatic environment.

Keywords: colored dissolved organic matter, salinity, correlation, pollution, Sea of Azov

Acknowledgements: The work was performed under state assignment no 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”.

For citation: Lomakin, P.D. and Zavyalov, D.D., 2023. The Field of Colored Dissolved Organic Matter Content and its Relationship with Salinity in the Open Water of the Sea of Azov. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 104–112. EDN XDLBGE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-104-112

Введение

Содержание растворенного органического углерода (*dissolved organic carbon, DOC*) и окрашенного растворенного органического вещества (*colored dissolved organic matter, fDOM*) относят к основным репрезентативным показателям содержания растворенного органического вещества в морской воде [1]. На шельфе океанов и морей, распресненных речными водами, в районах стоковых фронтов и фронтальных зон поля концентрации каждого из этих показателей связаны с соленостью тесной обратной корреляционной зависимостью с коэффициентом корреляции до -0.95 [2, 3]. Эта связь обусловлена высокой концентрацией растворенного органического вещества терригенного происхождения в прибрежных распресненных материковым стоком водах.

Содержание данного вещества скачкообразно уменьшается в речных устьях на естественном маргинальном фильтре и далее заметно падает на мористой границе стоковых фронтальных зон [4, 5].

За пределами прибрежных стоковых фронтальных зон в открытых водах океанов и морей подобные связи и их свойства менее изучены. Так, в статье [6] в открытой части Черного моря в вертикальной структуре вод обнаружена обратная зависимость концентрации растворенного органического углерода от солености – $DOC(S)$. Данная связь, проанализированная на качественном уровне авторами цитируемой работы, была использована ими для интерпретации биохимических процессов в глубоководной зоне моря.

Отметим, что связи между показателями содержания растворенного органического вещества и соленостью важны и полезны в ряде прикладных и теоретических направлениях океанологии. Они позволяют, например, получить представление о структуре малоизученного поля содержания растворенного органического вещества на основе массивов солености, отследить траектории распространения речных вод на шельфах и за их пределами.

Цели настоящей статьи:

- получить уравнение корреляционной зависимости концентрации $fDOM$ от солености в водах Азовского моря, которые расположены за пределами основных стоковых фронтальных зон и не подвержены непосредственному влиянию речного стока;

- на основе этого уравнения и известных средних месячных полей солености рассчитать поля содержания рассматриваемой величины, выявить особенности их структуры и внутригодовой изменчивости;

- оценить влияние антропогенной составляющей поля содержания $fDOM$ на тесноту корреляционной зависимости концентрации этого вещества от солености.

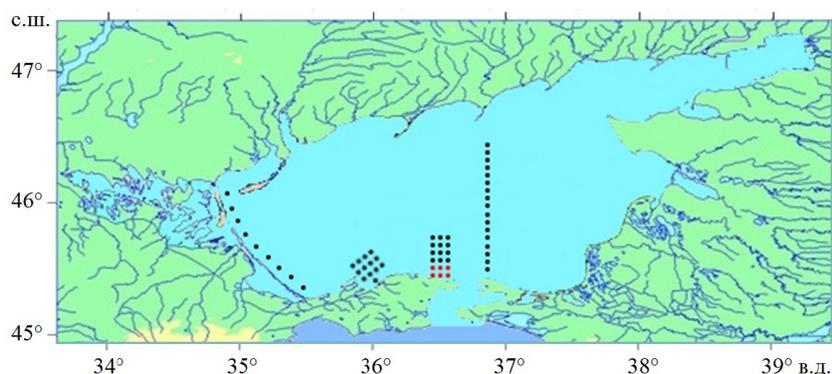
Исходные данные и методы исследования.

Рассматриваемая акватория – часть моря, характеризующая максимальной соленостью и включающая открытые воды, а также воды западной и южной прибрежных областей, где средняя месячная соленость более 10 ЕПС. Согласно атласу¹⁾, изохалина 10 представляет собой мористую границу прибрежных стоковых халинных зон, наблюдаемых вдоль северного и восточного берегов Азовского моря и в Таганрогском заливе.

Исследуемая величина – оптический показатель содержания растворенного органического вещества, $fDOM$. Ее размерность представлена в оптических единицах калибровки – сульфат хинина (*quinine sulfate unit, QSU*) [7].

Используемый для анализа эмпирический материал – выборка инструментальных синхронных наблюдений за соленостью и концентрацией $fDOM$ (всего 54 зондирования). Они были выполнены в ряде экспедиций Морского гидрофизического института (г. Севастополь) и Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (г. Керчь)

¹⁾ *Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006*. NOAA National centers for environmental information. International Ocean Atlas and Informational Series, Vol. 10. Available at: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/AZOV2006/start.html> [date of access: 12.03.2023].



Р и с . 1 . Расположение станций с синхронной фиксацией концентрации *fDOM* и солёности (2002–2013 гг.)

Fig. 1. Map of stations with simultaneous registration of *fDOM* concentration and salinity (2002–2013)

за временной интервал с 2002 по 2013 г. Наблюдения охватывали центральную, западную, юго-западную части моря и район керченского предпроливья (рис. 1).

Все анализируемые данные получены при помощи портативного оптического зондирующего комплекса «Кондор» (URL: ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor). На каждом зондировании с шагом по глубине 0.1 м солёность и концентрация *fDOM* фиксировались синхронно *in situ*. Погрешность измерений солёности – ± 0.01 ЕПС. Погрешность измерений содержания *fDOM*, – ± 0.2 *QSU*. Диапазон исследованных глубин 1.5–10.5 м.

Зависимость между солёностью и концентрацией *fDOM* рассчитана методом парной корреляции. При помощи полученного уравнения регрессии средние месячные климатические поля солёности для рассматриваемой акватории Азовского моря¹⁾, которые построены по хорошо обеспеченным выборкам фактических данных, были оцифрованы, а затем пересчитаны в поля концентрации исследуемой величины.

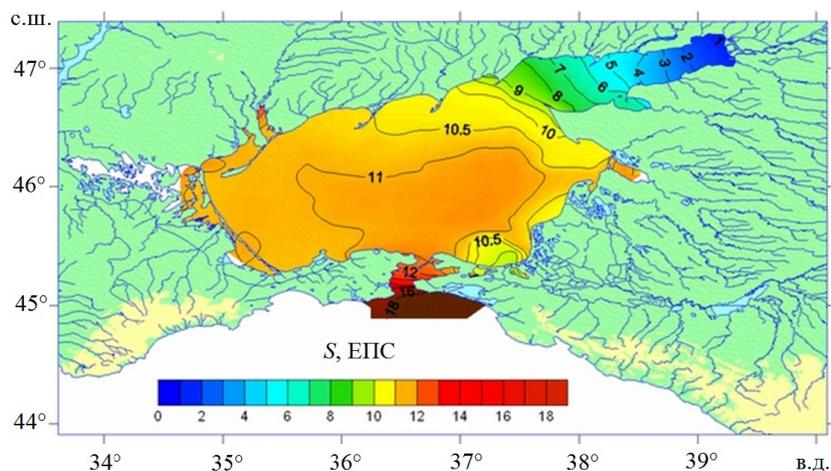
В качестве примера на рис. 2 показано среднее месячное поле солёности для июня.

Обсуждение результатов

На рис. 3, *a* в системе координат *S*, *fDOM* показана исходная выборка данных и график корреляционной связи между анализируемыми величинами, откуда следует, что они независимы (коэффициент корреляции $R = -0.14$).

В правом верхнем углу координатной плоскости расположено обособленное облако точек, которые явно не вписываются в основное поле, иллюстрирующее тенденцию падения концентрации *fDOM* с ростом солёности.

Выяснилось, что особые точки (всего их шесть), отличавшиеся максимальной концентрацией *fDOM* (45–61 *QSU*) и высокой солёностью (12.9–13.3 ЕПС) (на рис. 3, *a* они обведены), соответствовали станциям, находившимся в районе выпуска сточных вод Бондаренковских очистных сооружений г. Керчи (точки красного цвета на рис. 1). Эти данные характеризовали загрязнённые канализационным стоком прибрежные воды и были исключены из исходной выборки.

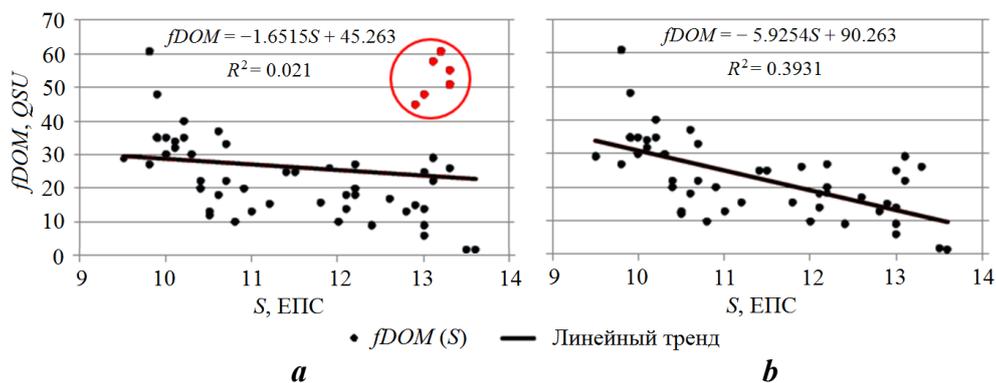


Р и с . 2. Средняя месячная солёность в поверхностном слое (0 м) Азовского моря в июне ¹⁾

Fig. 2. Average monthly salinity in the surface layer (0 m) of the Sea of Azov in June ¹⁾

По отфильтрованной выборке между исследуемыми величинами обнаружена типичная обратная и достаточно тесная корреляционная связь, коэффициент корреляции $R = -0.63$ (уравнение регрессии $fDOM = -5.92 \cdot S + 90.26$; $N = 48$, рис. 3, *b*).

Представленный на рис. 3 результат указывает на следующее. Зависимость $fDOM(S)$ реагирует на присутствие в исследуемых водах растворенного органического вещества антропогенного происхождения и представляет собой хороший показатель загрязнения водной среды этим веществом. Тесная обратная корреляционная зависимость $fDOM(S)$ и, соответственно, достаточно высокий (по модулю) коэффициент корреляции – показатели хорошего качества вод.



Р и с . 3. Графики корреляционной зависимости $fDOM(S)$ для рассматриваемой акватории Азовского моря: *a* – исходная выборка; *b* – отфильтрованная выборка

Fig. 3. $fDOM(S)$ correlation dependence charts for the studied water area of the Sea of Azov: *a* – original sample; *b* – filtered sample

Слабая отрицательная или положительная корреляционная зависимость между анализируемыми величинами – признак наличия в водной среде растворенных органических веществ антропогенной природы.

Рассмотрим факторы, обуславливающие особенности структуры и временную изменчивость солёности и $fDOM$ в Азовском море.

Основной фактор, определяющий солёностный режим преобладающей части акватории моря и, соответственно, структуру и внутригодовую изменчивость полей солёности и концентрации $fDOM$, связан с объемом стока р. Дон. Максимальный сток этой реки наблюдается в мае. В остальные месяцы года для гидрологического режима Дона типична маловодная межень²⁾.

В восточной прибрежной области Азовского моря поле солёности¹⁾ определяется стоком р. Кубани, который достигает максимальных значений в летние месяцы во время интенсивных паводков вследствие таяния снега в горах Кавказа [8].

Соответственно, максимальное распреснение преобладающей части акватории моря, характеризуемое средней месячной солёностью 11–11.5 ЕПС в центральной части, наблюдается в мае и июне (рис. 2). В остальные месяцы года солёность вод исследуемой акватории 11.5–12.5 ЕПС¹⁾ и незначительно изменяется во времени [8].

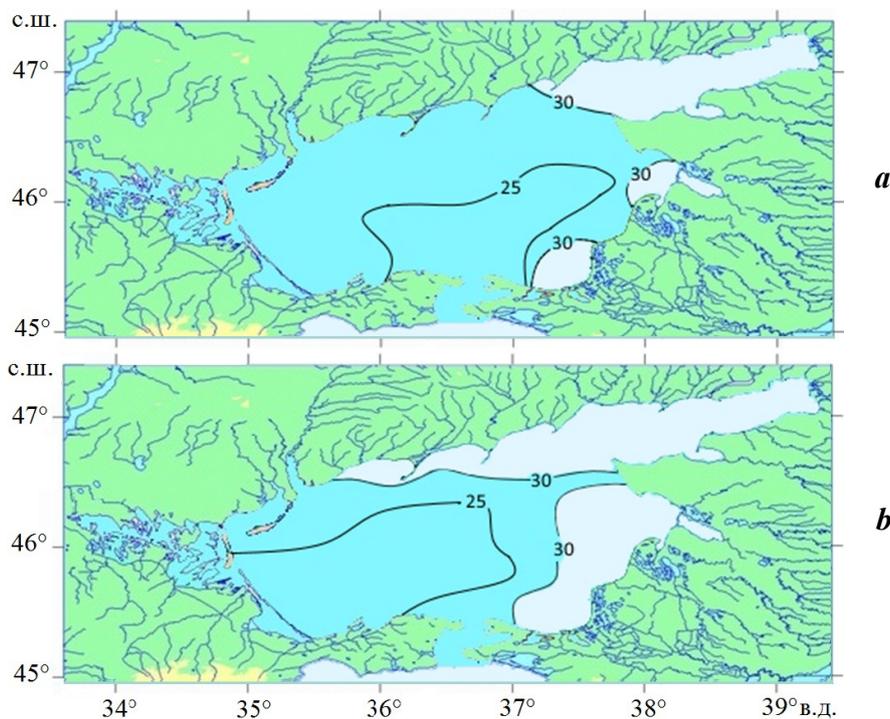
В рассматриваемой области моря средние месячные поля солёности в поверхностном слое однородны. Перепад солёности на границах – 1.5–2.5 ЕПС. Также небольшим интервалом 0.5–0.7 ЕПС оценивается размах внутригодового хода средней месячной солёности.

Для иллюстрации особенностей структуры и внутригодовой изменчивости характеристик поля исследуемой величины на рис. 4 изображены распределения содержания $fDOM$, рассчитанные нами на основе полученного уравнения регрессии $fDOM(S)$ и средних месячных полей солёности¹⁾ для марта и июня.

Видно, что в месяцы, относящиеся к крайним фазам внутригодовых вариаций стока р. Дон, определяющим максимальный размах внутригодовых колебаний солёности вод в Азовском море, структура поля содержания $fDOM$ рассматриваемой акватории изменяется незначительно. Оно однородно. Концентрация анализируемого вещества почти не подвержена внутригодовым вариациям, она минимальна на всей акватории моря и изменяется в интервале 25–30 QSU . Согласно [9], концентрация $fDOM$ в водах Таганрогского залива, в северной и восточной распресненных прибрежных областях Азовского моря максимальна и изменяется в интервале 30–300 QSU .

Существенные изменения в течение года претерпевает площадь ареала минимальной концентрации рассматриваемой величины. В июле – марте, в межень Дона и Кубани, в условиях минимального распреснения моря она наибольшая и равна 70–80 % от площади всей акватории моря (рис. 4, а). В мае – июне во время паводков на Дону и Кубани площадь, занимаемая водами с минимальным содержанием $fDOM$, наименьшая – 50–60 % от площади всей акватории Азовского моря (рис. 4, б).

²⁾ Родионов Н. А. Гидрология устьевой области Дона. Ленинград : Гидрометеиздат, 1958. 95 с.



Р и с . 4 . Концентрация $fDOM$, QSU , на поверхности в открытой части Азовского моря в марте (а) и в июне (b)

Fig. 4. Concentration of $fDOM$, QSU , at the surface in the open part of the Sea of Azov in March (a) and June (b)

Стабильность структуры поля $fDOM$ и значительные внутригодовые колебания площади распространения вод максимальной солености можно объяснить следующим образом. Согласно классическим представлениям К. Н. Федорова [5], на мористой границе стоковых фронтальных зон происходит скачкообразное изменение свойств распресненных вод. Влияние этих вод становится малозначимым и исчезает в открытом море.

Резко возрастающий сток Дона и Кубани сопровождается распреснением прибрежных вод и поступлением большого количества $fDOM$, которое в основном сосредоточено в пределах стоковой фронтальной зоны. В открытую часть моря проникает небольшая доля этого вещества. Во время паводка площадь стоковой зоны увеличивается, соответственно, сокращается площадь Азовского моря с максимальной соленостью.

Заклучение

На основе материалов серии экспедиций, проведенных в 2002–2013 гг., выявлена достаточно тесная обратная корреляционная зависимость между соленостью и концентрацией $fDOM$ (коэффициент $R = -0.63$) в открытых водах Азовского моря и на акватории, примыкающей к его западному и южному берегам.

Установлено, что корреляционная связь $fDOM(S)$ реагирует на присутствие в исследуемых водах растворенного органического вещества антропогенного

происхождения и представляет собой хороший показатель загрязнения водной среды этим веществом. Тесная обратная корреляционная зависимость $fDOM(S)$ – индикатор хорошего качества вод. Слабая или положительная корреляционная зависимость между рассмотренными величинами – признак наличия растворенных органических веществ антропогенной природы.

При помощи полученного уравнения регрессии по картам средней месячной солености рассчитаны и построены поля содержания $fDOM$.

Показано, что в водах осолоненной части Азовского моря, вследствие незначительной пространственно-временной изменчивости солености, средние месячные поля $fDOM$ однородны и мало изменяются во времени. Они характеризуются небольшой концентрацией 25–30 QSU и почти не реагируют на распреснение моря, обусловленное внутрigoдовым ходом объема стока рек Дон и Кубань. Во время паводков на этих реках в мае – июне площадь акватории с низким содержанием $fDOM$ минимальна и занимает 50–60 % от всей площади Азовского моря. В остальное время года в период маловодной межени на Дону и Кубани она увеличивается до 70–80 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И. Особенности распределения органического вещества в водах Черного моря // Система Черного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 146–170. doi:10.29006/978-5-91522-473-4.2018
2. Пугач С. П., Пинко И. И. Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточносибирского моря // Доклады академии наук. 2012. Т. 447, № 6. С. 671–674. EDN PNSDQJ.
3. Development of under-ice stratification in Himmerfjärden bay, North-Western Baltic proper, and their effect on the phytoplankton spring bloom / E. Kari [et al.] // Journal of Marine Systems. 2018. Vol. 186. P. 85–95. doi:10.1016/j.jmarsys.2018.06.004
4. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
5. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
6. Organic matter along longitudinal and vertical gradients in the Black Sea / D. Kaiser [et al.] // Deep Sea Research Part: Oceanographic Research Papers. 2017. Vol. 129. P. 22–31. doi:10.1016/j.dsr.2017.09.006
7. High-frequency in situ optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes / J. F. Saraceno [et al.] // Journal of Geophysical Research. Biogeosciences. 2009. Vol. 114, iss. G4. G00F09. doi:10.1029/2009JG000989
8. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море / Ильин Ю. П. [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
9. Ломакин П. Д., Завьялов Д. Д. Поле содержания окрашенного растворенного органического вещества и его связь с соленостью в распресненных прибрежных водах Азовского моря / Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2021. Т. 6, № 3. С. 14–21. doi:10.21072/eco.2021.19.02

Поступила 16.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 28.10.2022 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Ломакин Павел Демьянович, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **IstinaResearcherID: 18321047**, *p_lomakin@mail.ru*

Завьялов Дмитрий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), *evilfence@ya.ru*

Заявленный вклад авторов:

Ломакин Павел Демьянович – общая постановка задачи, подбор исходной информации, интерпретация результатов, написание текста статьи

Завьялов Дмитрий Дмитриевич – выполнение расчетов, интерпретация результатов, оформление иллюстраций

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.