

Расход воды реки Дуная по оптическим спутниковым данным серии *Landsat*

В. В. Суслин, С. А. Шоларь, Е. А. Подгибайлов *, О. В. Мартынов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: e.podgibailov@yandex.ru

Аннотация

Цель работы – найти корреляционную связь между соотношением площадей суши и воды для фиксированного района дельты Дуная и суммарным расходом реки, используя спутниковые продукты серии *Landsat* и гидрологическую модель *SMHI Hyrweb*. Период исследования охватывал 1984–2010 гг. Всего было использовано 132 спутниковых снимка в одном спектральном канале в ближнем инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 30 м. Выбрали два района исследования: участок дельты с руслом и сушей (44.9–45.4° с. ш., 29.55–29.60° в. д.), а также контрольный участок устьевого взморья (44.9–45.4° с. ш., 29.80–29.85° в. д.). Для каждого из них строили гистограмму, характеризующую отраженный свет в условных единицах и соответствующие им количества пикселей. Получено, что сигнал, исходящий от первого района, находится в диапазоне 7000–26 000 у. е., а от второго – 7000–8000 у. е. Данное различие позволило отделить участки дельты, занятые речной водой, от суши. Для этого вычисляли отношение между числом пикселей, соответствующих значению 7000–8000 у. е., ко всем пикселям в данном районе. Затем находили корреляцию между расходом реки по гидрологической модели *SMHI Hyrweb* и долей пикселей, соответствующих занятым водой участкам. Получена регрессия $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$. Анализ сезонной изменчивости показал, что в исследуемом участке дельты доле пикселей, соответствующих занятым водой участкам, превышающим 0.5, соответствуют месяцы с марта по май, а минимальные значения (менее 0.3) характерны для июля – сентября. Все это согласуется с периодом интенсивности выпадения осадков и таяния снегов в ареале бассейна р. Дуная. Данные этой работы могут быть полезны исследователям, оценивающим влияние стока указанной реки на гидрологические режим и состояние Черного моря.

Ключевые слова: дистанционные методы исследований, Дунай, расход рек, *Landsat TM*, гидрологическая модель, Черное море

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ МГИ РАН FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений».

© Суслин В. В., Шоларь С. А., Подгибайлов Е. А., Мартынов О. В., 2025



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

Для цитирования: Расход воды реки Дуная по оптическим спутниковым данным серии *Landsat* / В. В. Суслин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 42–50. EDN GJZXGP.

The Danube River Water Discharge According to Satellite Optical Data of the Landsat Series

V. V. Suslin, S. A. Sholar, E. A. Podgibailov *, O. V. Martynov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

*e-mail: e.podgibailov@yandex.ru

Abstract

The paper aims to find the correlation relationship between the land–water area ratio for a fixed area of the Danube Delta and the total river discharge using Landsat series satellite products and SMHI Hypeweb hydrological model. The study period covered 1984–2010. We used a total of 132 satellite images in one band in the near-infrared spectral range with a spatial resolution of 30 m. Two study areas were selected: the delta area with channel and land (44.9–45.4°N, 29.55–29.60°E) and the control area of the mouth seashore (44.9–45.4°N and 29.80–29.85°E). For each of them a histogram was plotted which characterised the reflected light in relative units and their corresponding numbers of pixels. The signal from the first area was found to be in the range of 7000–26,000 r.u., whereas from the second one it was 7000–8000 r.u. This distinction allowed us to separate the delta areas occupied by river water from those of land. For this purpose, we calculated the ratio between the number of pixels corresponding to a value of 7000–8000 r.u. to all pixels in the area. Then we found the correlation between the river discharge from the SMHI Hypeweb hydrological model and the proportion of pixels corresponding to areas occupied by water. The regression $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$ was obtained. The analysis of seasonal variability showed that in the studied delta area, the share of pixels related to water-occupied areas > 0.5 corresponds to the months from March to May, and the minimum values < 0.3 correspond to July–September. All this is consistent with the period of intensity of precipitation and snowmelt in the Danube River basin area. The data from this work may be useful to researchers assessing the impact of this river discharge on the hydrological regime and condition of the Black Sea.

Keywords: remote sensing, Danube River, river discharge, Landsat TM, SMHI Hypeweb, hydrological model, Black Sea

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment of MHI RAS FNNN-2024-0012 “Analysis, diagnosis and operational forecast of the state of hydrophysical and hydrochemical fields of marine areas based on mathematical modeling using data from remote and contact measurement methods” (code “Operational oceanology”).

For citation: Suslin, V.V., Sholar, S.A., Podgibailov, E.A. and Martynov, O.V., 2025. The Danube River Water Discharge According to Satellite Optical Data of the Landsat Series. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 42–50.

Введение

Черное море занимает уникальное географическое положение благодаря системе проливов Босфор, Дарданеллы и Гибралтар, что делает его самым изолированным водоемом в бассейне Атлантического океана. В таких условиях масса воды, поступающая из устьев рек, оказывает особо выраженное влияние на динамику, а также оптические и биохимические характеристики вод в приустьевых районах морских акваторий. Для Черного моря сток р. Дуная является определяющим в физико-химических процессах как в районе северо-западного шельфа, так и во всем море в целом [1, 2]. Также велик вклад Дуная в многолетние и сезонные изменения уровня моря [3]. Поэтому количественная оценка объема воды, попадающей из Дуная в Черное море, весьма востребована в разных областях научного знания.

С развитием дистанционных методов наблюдения земной поверхности с искусственных спутников Земли возникают новые возможности мониторинга зон сопряжения устья реки с озером или морем ^{1), 2)}.

Проблема изучения расхода рек по спутниковым данным в оптическом диапазоне спектра не является новой. Например, решению этой проблемы посвящены работы [4–6]. В этих трудах для разделения поверхности занятой водой и суши используется двухканальный подход [5] или система автоматической классификации (*ISODATA*) [4]. Использование полученных результатов с синхронными измерениями расхода реки на гидропостах позволило построить регрессионную связь между этими параметрами, которую можно использовать для мониторинга расхода реки, опираясь только на спутниковые измерения.

Известны также альтиметрические методы [7–9] и оценка с использованием данных высокого разрешения, полученных со спутника *Sentinel-2* [10–13]. Однако следует отметить, что указанные методы, несмотря на их преимущества, затруднительны для использования отечественными исследователями, так как доступ к спутниковым продуктам в настоящее время ограничен. Использование этих методов требует учета множества факторов (растительный покров, цветность воды, аэрозольный компонент атмосферы, спектральные индексы, основанные на нескольких каналах и пр.), что усложняет оценку расхода рек по этим методам.

Цель работы – найти корреляционную связь между соотношением площадей суша/вода и суммарного расхода воды р. Дуная по наблюдениям фиксированного района дельты реки с использованием спутниковых данных среднего разрешения второго уровня (т. е. после выполнения атмосферной коррекции) в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, используя один спектральный канал. В статье использованы материалы доклада на XII Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод 2023» [14].

¹⁾ Scott J. W., Moore L., Harris W. M., Reed M. D. Using the Landsat 7 enhanced thematic mapper tasseled cap transformation to extract shoreline // Geological Survey Open File Report. 2003. 03-272. doi:10.3133/ofr2003272

²⁾ The Thematic Mapper (NASA Landsat Science) URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/thematic-mapper/> (дата обращения 11.02.2025).

Материалы и методы

В качестве исходных данных расхода в устье р. Дуная использованы данные реанализа, полученные с сайта *SMHI Hypeweb*³⁾. В источнике приводятся сведения о ежедневном расходе воды (сектор 9600704) с 1 января 1981 г. по 31 декабря 2010 г. (рис. 1).

Спутниковые продукты серии *Landsat* (совместный проект геологической службы США и НАСА) получены с сайта *Landsat Missions*⁴⁾. Для исследования из всего доступного массива снимков отбирали безоблачные изображения второго уровня, то есть после выполнения атмосферной коррекции, в спектральном канале (СК) 5, диапазон длин волн 1.55–1.75 мкм с пространственным разрешением 30 м. Этот спутниковый продукт характеризует коэффициент отражения естественного солнечного света (в у. е.) исследуемого участка земной поверхности с учетом влияния атмосферы и геометрии наблюдения. Для водной поверхности сами значения коэффициента отражения и его изменчивость, связанная с геометрией наблюдения, минимальны, так как при выборе сцен мы исключили данные, где был блик от морской поверхности. Выбор СК был обусловлен его меньшей чувствительностью к ошибкам, связанным с аэрозолем в атмосфере и высоким содержанием минеральной взвеси в речных водах, что определяло более качественное разделение суши и водной поверхности.

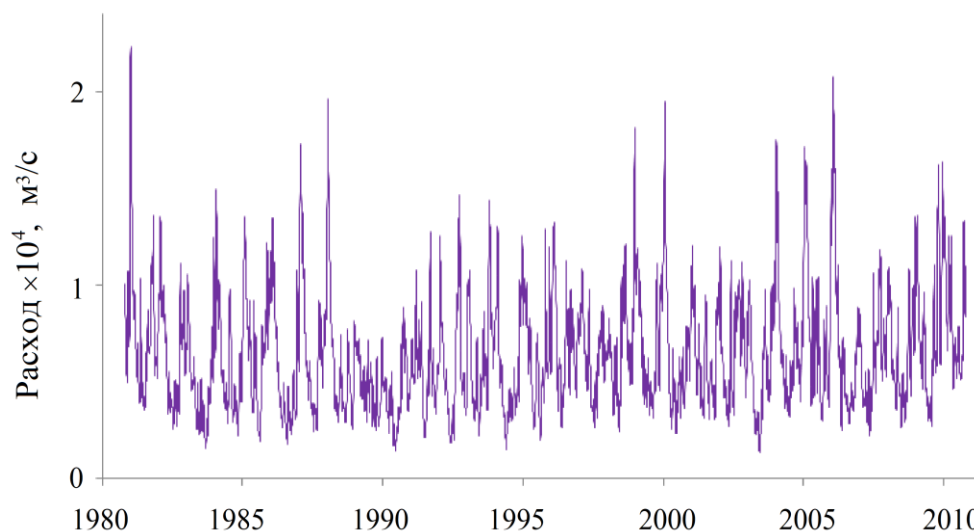


Рис. 1. Расход в устье р. Дуная (сектор 9600704) по данным реанализа с сайта *SMHI Hypeweb*

Fig. 1. Water discharge at the Danube River mouth (sector 9600704) according to reanalysis data from the *SMHI Hypeweb* website

³⁾ URL: <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/historical-data/europe-time-series/> (дата обращения: 11.02.2025).

⁴⁾ URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (дата обращения: 11.02.2025).

Всего за 1984–2010 гг. было отобрано 132 снимка, с разбивкой по месяцам:

январь	3	июль	22
февраль	5	август	19
март	8	сентябрь	11
апрель	9	октябрь	11
май	14	ноябрь	5
июнь	18	декабрь	7

Как и следовало ожидать, наибольшее число подходящих для использования сцен приходится на теплый период года, что связано в первую очередь с частотой покрытия облаками в течение года. По годам за рассматриваемый интервал времени отобранные снимки распределены равномерно – в среднем было охвачено пять месяцев в году.

Район исследования (фиксированный участок дельты) имеет координаты 44.9–45.4° с. ш. и 29.55–29.60° в. д. (рис. 2, *a*). Кроме того, был взят контрольный участок устьевого взморья с координатами 44.9–45.4° с. ш. и 29.80–29.85° в. д., расположенный рядом с районом исследования (рис. 2, *b*).

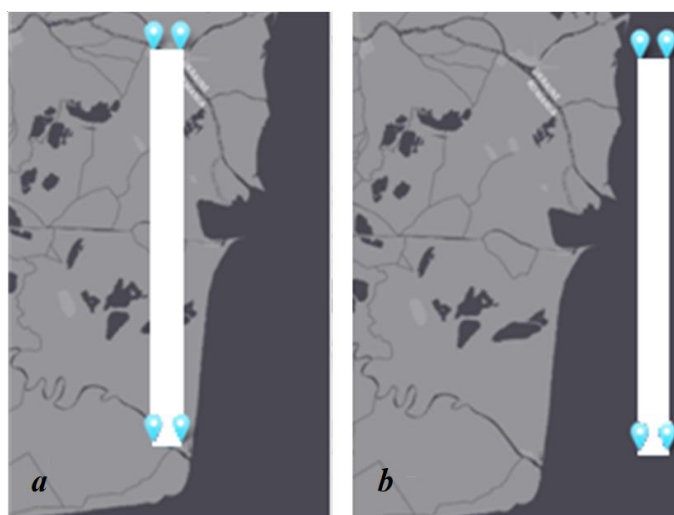
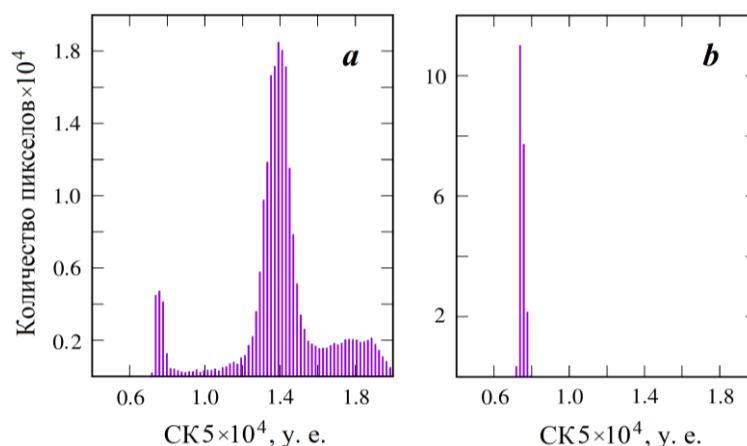


Рис. 2. Районы исследования: *a* – фиксированный участок дельты; *b* – контрольный район устьевого взморья (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Fig. 2. Study areas: *a* – the fixed section of the delta; *b* – the control area of the mouth seashore (adopted from: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)



Р и с . 3 . Пример гистограмм сигналов в СК 5 (1.55–1.75 мкм) для фиксированного участка дельты (а) и контрольного района устьевого взморья (b) за 5 сентября 2009 г.

Fig. 3. An example of SC 5 (1.55–1.75 μm) signal histograms for the fixed delta area (a) and the control area of the mouth sea-shore (b) for 5 September 2009

Для СК 5 для двух выбранных районов (рис. 2) были построены гистограммы (рис. 3). Контрольный район устьевого взморья (рис. 3, b) характеризуется диапазоном изменчивости сигнала, исходящего от водной поверхности, в интервале 7000–8000 у. е. В то же время весь возможный диапазон изменчивости для фиксированного участка дельты (рис. 3, a) составлял от 7000 до 26 000 у. е. На рис. 3 демонстрируется тот очевидный факт, что для ближнего инфракрасного диапазона сигнал от водной поверхности (рис. 2, b) существенно слабее, чем от суши (рис. 2, a).

Таким образом, долю занятой водой поверхности на фиксированном участке дельты на рис. 2, a (*weight water*) находили как отношение числа пикселей в гистограмме из диапазона от 7000 до 8000 у. е. ко всем пикселям в районе. Связь между расходом р. Дуная и величиной *weight water* находили по соответствующей дате съемки, т. е. в тот же день. Так как сечение русла (рукавов) меняется с глубиной, то должна быть связь между шириной русла (рукавов) и расходом воды. При этом ширина русла (рукавов), очевидно, связана с наблюдаемой на спутниковой сцене площадью, покрытой водой.

Результаты и обсуждение

Результат связи между долей пикселей (*weight water*), занятых водой, на фиксированном участке дельты и расходом р. Дуная за 1984–2010 гг. представлен на рис. 4. Коэффициент корреляции равен 0.78, суммарное число точек – 132. Выбор отдельных рукавов в дельте р. Дуная в качестве фиксированного участка дельты слабо влияет на характер полученной зависимости (рис. 4). То же самое можно сказать и про увеличение площади фиксированного участка внутри дельты.

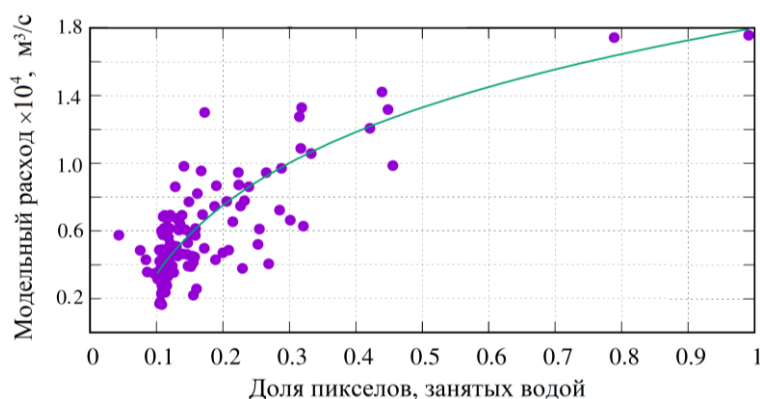


Рис. 4. Связь между долей пикселей (*weight water*), занятых водой, для фиксированного участка дельты и расходом реки Дуная за период 1984–2010 гг. (кружками обозначены отдельные сцены, линия – общая регрессионная связь: $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$

Fig. 4. Relationship between the proportion of pixels (*weight water*) occupied by water for the fixed delta area and the Danube River discharge for 1984–2010: the dots denote separate scenes and the line is the general regression relationship: $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$

Характер полученной функциональной зависимости качественно объясняется в рамках простой гипотезы. Для этого достаточно рассмотреть два тривиальных случая поперечных сечений русла реки: прямоугольное и треугольное. В первом случае ширина русла фиксирована, следовательно, изменение расхода не будет влиять на увеличение ширины русла или площади поверхности, занятой водой, то есть это период низкого расхода воды. Во втором случае это будет квадратичная функция от ширины русла. Все остальные варианты с менее крутым сечением русла будут приближаться к полученной нами зависимости.

Анализ сезонной изменчивости показывает, что значениям *weight water*, большим 0.5, соответствуют месяцы с марта по май; минимальные значения *weight water* (менее 0.3) соответствуют июлю – сентябрю. Все это удовлетворительно согласуется с периодом интенсивности выпадения осадков и таяния снегов в ареале водозабора р. Дуная⁵⁾.

Выводы

Для решения задачи определения расхода р. Дуная по спутниковым продуктам серии *Landsat* предложен простой одноканальный метод, отличающийся доступностью для широкого круга пользователей. Показана возможность разделения участка дельты реки на области, занятые сушей и водой, по их сигналу в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Выяснено, что водной поверхности соответствуют значения 7000–8000 у. е., а суше 7000–26 000 у. е.

⁵⁾ Иванов В. А., Миньковская Р. Я. Морские устья рек Украины и устьевые процессы. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 448 с.

Вычислив соотношение между количеством пикселей, соответствующих занятым водой участкам, ко всем пикселям избранного участка дельты и связав эту долю с расходом реки по данным реанализа гидрологической модели для той же даты, мы получили регрессионную связь $y = 7.78 \cdot 10^{-4} \cdot x^{0.09} - 5.98 \cdot 10^{-4}$. Указанная зависимость может применяться для расчета поступления речной воды Дуная в Черное море. Выявлено, что соотношение пикселей вода/суша, превышающее 0.5, характерно для весенних месяцев, а менее 0.3 соответствует лету – началу осени, что совпадает с периодом интенсивности осадков и таяния снегов в бассейне р. Дуная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н. Влияние апвеллинга на развитие речного п्लума в прибрежной зоне северо-западного шельфа Черного моря на основе численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 20–30. EDN SYKFPE.
2. Кондратьев С. И. Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 4. С. 367–383. EDN VTJNWV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-4-367-383>
3. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь : ЭКОСИ-гидрофизика, 2006. 210 с. EDN XXXSRN.
4. Спутниковая диагностика расхода воды на реках снежно-ледового питания на примере реки Каш [КНР] / А. Г. Терехов [и др.] // Труды Тринадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва : ИКИ РАН, 2015. С. 140. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5229> (дата обращения: 20.02.2025).
5. Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударья / И. Д. Мухамеджанов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 1. С. 87–103. EDN IPZFFN. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103>
6. Gleason C. J., Durand M. T. Remote sensing of river discharge: A review and a framing for the discipline // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, iss. 7. P. 1107. <https://doi.org/10.3390/rs12071107>
7. Satellite remote sensing estimation of river discharge: Application to the Yukon River Alaska / D. M. Bjerklie [et al.] // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 561. P. 1000–1018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.005>
8. Evaluating the potential for measuring river discharge from space / D. M. Bjerklie [et al.] // Journal of Hydrology. 2003. Vol. 278, iss. 1–4. P. 17–38. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00129-X)
9. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing datasets / A. W. Sichangi [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 179. P. 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.019>
10. Sentinel-2 high-resolution data for river discharge monitoring / P. Filippucci [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 281. 113255. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113255>
11. Estimation of the Water Level in the Ili River from Sentinel-2 Optical Data Using Ensemble Machine Learning / R. I. Mukhamediev [et al.] // Remote Sensing. 2022. Vol. 15, iss. 23. P. 5544. <https://doi.org/10.3390/rs15235544>

12. *Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A.* The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin // *Regional Problems of Earth Remote Sensing*. 2020. Vol. 223. 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008>
13. Спутниковый мониторинг речных отmelей трансграничной реки Или (Центральная Азия) в задаче оценки уровня воды / А. Г. Терехов [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 4. С. 227–238. EDN IZGLPD. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-4-227-238>
14. *Суслин В. В., Подгибайлов Е. А., Мартынов О. В., Шоларь С. А.* Расход воды реки Дунай по оптическим спутниковым данным среднего разрешения // *Современные проблемы оптики естественных вод : Труды XII Всероссийской конференции с международным участием*. Санкт-Петербург, 25–27 октября 2023 года. Т. 13. Санкт-Петербург : Химиздат, 2023. С. 240–245. EDN FYCDDD.

Поступила 8.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Суслин Вячеслав Владимирович, заведующий отделом динамики океанических процессов, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8627-7603**, **Scopus Author ID: 6603566261**, **ResearcherID: B-4994-2017**, **SPIN-код: 1681-7926**, slava.suslin@mhi-ras.ru

Шоларь Станислав Александрович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7242-3403**, **Scopus Author ID: 57189886286**, **ResearcherID: GSD-9744-2022**, **SPIN-код: 4220-6994**, sa.sholar@mail.ru

Подгибайлов Евгений Анатольевич, ведущий инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0009-0002-2570-1367**, **Scopus Author ID: 58687010100**, **ResearcherID: KHZ-5622-2024**, **SPIN-код: 4659-9259**, e.podgibailov@yandex.ru

Мартынов Олег Викторович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 57201603369**, **SPIN-код: 9669-6935**, oleg.martynov.49@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Суслин Вячеслав Владимирович – формулировка и постановка задачи, разработка концепции, анализ результатов, написание рукописи

Шоларь Станислав Александрович – построение графического материала, обзор литературы по проблеме исследований, обсуждение результатов, формулировка выводов

Подгибайлов Евгений Анатольевич – сбор материалов исследования, первичная обработка и сортировка данных, обсуждение результатов, оформление статьи

Мартынов Олег Викторович – обзор литературы по проблеме исследований, обсуждение результатов, оформление статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.