

**Количественное распределение
потенциально токсичной диатомовой водоросли
Halamphora coffeiformis (C. Agardh) Levkov, 2009
в микрофитобентосе акваторий крымского побережья**

Д. С. Балычева

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей
имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия
e-mail: dashik8@gmail.com

Аннотация

Halamphora coffeiformis – широко распространенная бентосная диатомовая водоросль, хотя и упоминается в литературе как возможный продуцент токсичной домоевой кислоты, представляет биотехнологический интерес, поскольку содержит триацил-глицериды, полиненасыщенные жирные кислоты, пигменты, витамины и др. Целью работы является обобщение собственных данных о встречаемости и количественном распределении вида *H. coffeiformis*, условиях его обитания в прибрежных акваториях Крыма для выявления перспектив его выделения в чистую культуру и оценки его биотехнологического потенциала. По данным мониторинга микрофитобентоса крымского побережья, с 2011 по 2023 г. диатомовая водоросль встречалась круглогодично в 16 районах Черного и Азовского морей на глубинах от 0 до 38 м в диапазоне температур 3–36 °С, солёности 14–126 г·л⁻¹. На твердых субстратах и макрофитах численность N вида колебалась от 100 до $24 \cdot 10^3$ кл.·см⁻², биомасса B – от 0.00001 до 0.02292 мг·см⁻²; в рыхлых грунтах N варьировала от 100 до $253.6 \cdot 10^3$ кл.·см⁻³, B – от 0.0004 до 0.6612 мг·см⁻³. Максимальные количественные показатели на твердых субстратах и макрофитах ($N = 5.5 \cdot 10^3$ кл.·см⁻², $B = 0.0196$ мг·см⁻²) зарегистрированы в 2011 г. на поверхности раковин мидии *Mytilus galloprovincialis*, отобранных в районе пос. Качивели на глубине 4 м при температуре 24 °С. В рыхлых грунтах максимальные значения ($N = 253.6 \cdot 10^3$ кл.·см⁻³ и $B = 0.66116$ мг·см⁻³) отмечены в ноябре 2018 г. в зал. Сиваш Азовского моря на глубине 0.2–0.6 м при температуре 10–14 °С и солёности воды 100 г·л⁻¹. Обобщение и анализ многолетних данных о встречаемости *H. coffeiformis* в крымском побережье показали широкое распространение вида и толерантность к большому диапазону температуры и солёности воды, что подтверждает его перспективность для биотехнологического применения и необходимость дальнейших токсикологических и генетических исследований. Вид можно рекомендовать для выделения в альгологически чистую культуру для дальнейшего генетического анализа и изучения биохимических, токсикологических и экологических свойств.

© Балычева Д. С., 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

Ключевые слова: диатомовые водоросли, *Halamphora coffeiformis*, Азовское море, Черное море, крымское побережье, цветение воды, микрофитобентос, биотехнологический потенциал

Благодарности: выражаю благодарность д. б. н. Л. И. Рябушко за ценные замечания и редактирование рукописи. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ 124022400152-1). Данные о гиперсоленых водоемах озеро Херсонесское и залив Сиваш получены при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-16-00001).

Для цитирования: Балычева Д. С. Количественное распределение потенциально токсичной диатомовой водоросли *Halamphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009 в микрофитобентосе акваторий крымского побережья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 117–132. EDN AIMHIF.

Quantitative Distribution of the Potentially Toxic Diatom *Halamphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009 in the Microphytobenthos of the Crimean Coastal Waters

D. S. Balycheva

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia
e-mail: dashik8@gmail.com*

Abstract

Halamphora coffeiformis is a widespread benthic diatom. Despite being mentioned in the literature as a potential producer of the toxic domoic acid, it is of biotechnological interest, since it contains triacylglycerides, polyunsaturated fatty acids, pigments, vitamins and others. This work aims to summarize original data on the occurrence, quantitative distribution and habitat conditions of *H. coffeiformis* in the coastal waters of Crimea to assess the prospects for its isolation into a pure culture and evaluate its biotechnological potential. According to long-term monitoring (2011–2023) of the microphytobenthos in the Crimean coastal zone, the diatom was found in 16 areas of the Black Sea and the Sea of Azov. It was recorded at depths from 0 to 38 m, within a temperature range of 3–36°C, salinity of 14–126 g·L⁻¹, and occurred year-round. On hard substrates and macrophytes, the species abundance (N) ranged from 100 to 24·10³ cells·cm⁻², and the biomass (B) varied from 0.00001 to 0.02292 mg·cm⁻². In sediments, N varied from 100 to 253.6·10³ cells·cm⁻³, and B was from 0.0004 to 0.6612 mg·cm⁻³. The maximum abundance and biomass on hard substrates and macrophytes (N = 5.5·10³ cells·cm⁻², B = 0.0196 mg·cm⁻²) were recorded in 2011 on the shells of the mussel *Mytilus galloprovincialis* near the village of Katsiveli at a depth of 4 m and a temperature of 24°C. In sediments, the maximum values (N = 253.6·10³ cells·cm⁻³, B = 0.66116 mg·cm⁻³) were observed in November 2018 in Sivash Bay of the Sea of Azov at a depth of 0.2–0.6 m, temperature of 10–14°C and water salinity of 100 g·L⁻¹. The integration and analysis of long-term data on the occurrence of *H. coffeiformis* in the Crimean coastal zone showed its wide distribution and tolerance to a broad range of temperatures and salinity. This confirms the species potential for biotechnological application and the need for further toxicological and genetic studies. The species can be recommended for isolation into a pure culture for subsequent genetic analysis and study of its biochemical, toxicological and ecological properties.

Key words: diatoms, *Halamphora coffeiformis*, Sea of Azov, Black Sea, Crimean coastal waters, algae bloom, microphytobenthos, biotechnological potential

Acknowledgments: I express my gratitude to Dr. L. I. Ryabushko for her valuable comments and editing of the manuscript. This work was carried out within the framework of IBSS state research assignment no. 124022400152-1. Data on hypersaline water bodies of Lake Chersonesskoye and Sivash Bay were obtained with the support of the Russian Science Foundation (grant № 18-16-00001).

For citation: Balycheva, D.S., 2025. Quantitative Distribution of the Potentially Toxic Diatom *Halamphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009 in the Microphytobenthos of the Crimean Coastal Waters. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 117–132.

Введение

С конца XX в. пристальное внимание альгологов направлено на изучение вредоносного «цветения» водорослей, «красных приливов» и потенциально токсичных водорослей^{1), 2)} [1–4]. Среди диатомовых водорослей встречаются как токсичные виды, содержащие домоевую кислоту (многие планктонные виды рода *Pseudo-nitzschia*), так и потенциально опасные виды, вызывающие цветение воды (вспышки численности). Бентосная мелкоклеточная диатомовая водоросль *Halamphora coffeiformis* (C. Agardh) Levkov 2009 также упоминается как продуцент домоевой кислоты в ряде работ^{2), 3)} [2, 5–7]. Однако все эти источники ссылаются на один описанный в работе [8] случай массового отравления среди населения в 1987 г. мидиями, выращенными в зал. Кардиган на о. Принца Эдуарда в Канаде. В указанной работе сообщалось о двух смертельных случаях. В экстрактах мидий авторы исследования [8] выявили домоевую кислоту, а среди микроорганизмов, выделенных из эпизоона этих мидий, с помощью ЯМР-спектроскопии токсин был обнаружен в культуре *H. coffeiformis* [5].

В 2021 г. были опубликованы результаты токсикологического анализа аргентинского штамма *H. coffeiformis*, выделенного из вод залива Баия-Бланка при солености 33 г·л⁻¹. Домоевая кислота отсутствовала на всех стадиях роста культуры [9]. Ранее авторы [10] высказали предположение, что штаммы *H. coffeiformis*, у которых была выделена домоевая кислота, могли быть ошибочно определены только по морфологическим признакам. Кроме того, известно, что на продуцирование токсинов микроводорослями может влиять симбиоз с бактериями, как, например, было показано для динофитовой водоросли *Alexandrium tamarense* (Lebour) Balech 1995, способной вырабатывать

¹⁾ LIFEHAB : Life histories of microalgal species causing harmful blooms. Report of a European workshop / Edited by E. Garcés [et al.]. Calvia, Majorca, Spain : Calvia Town Council, 2002. 208 p.

²⁾ Toxic and harmful microalgae of the World Ocean / P. Lassus [et al.]. Denmark : International Society for the Study of Harmful Algae, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2016. 523 p.

³⁾ Manual on harmful marine microalgae. 2nd revised edition / Edited by G. M. Hallegraeff [et al.]. Paris : UNESCO, 2004. 793 p. <https://doi.org/10.25607/OBP-1370>

сакситоксин и его аналоги и формировать одновременно токсичные и нетоксичные штаммы [11]. Поэтому уточнение видовой принадлежности и токсичности *H. coffeiformis* требует дополнительных исследований с привлечением данных электронного сканирующего микроскопа, а также таксономических, экологических, генетических и токсикологических анализов.

В то же время доказательств биотехнологического потенциала *H. coffeiformis* в литературе достаточно много [9, 12–17]. Биохимический анализ биомассы выявил в ее составе высокое содержание триацилглицеридов (до $18 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$), свободных и этерифицированных стеринов, белков и углеводов [15]. Содержание незаменимых полиненасыщенных жирных кислот достигало 17.5 % от жирных кислот, из них около 9 % составляли омега-3, 5 % – омега-6 и 3 % – омега-9, при этом соотношение омега-3/омега-6 составляло 1.64. Из стиролов преобладал стигмастирол, из аминокислот 50 % относятся к числу незаменимых для рыб и других водных животных. Анализ липидного состава *H. coffeiformis* показал подходящие результаты для производства биотоплива [18]. Кроме того, обнаружено, что *H. coffeiformis* является источником многих фармакологически активных вторичных метаболитов, например витаминов C и E, α -токоферола, флавоноидов [13], и содержит множество пигментов, включая каротиноиды (фукоксантин и β -каротин) и хлорофилл, которые имеют антибактериальные, противовирусные противовоспалительные, противораковые и антиоксидантные свойства и поэтому широко применяются в медицине. В работе [19] показана также выраженная антиоксидантная активность *H. coffeiformis*.

Таким образом, на данный момент остается невыясненным, способен ли данный вид вырабатывать токсины (возможно, для этого нужны определенные условия) или он является полностью безопасным. При этом доказательств биотехнологического потенциала *H. coffeiformis* в литературе достаточно много. Поскольку вид вызывает трудности при его идентификации только по морфологическим признакам, необходимо проведение не только таксономических и экологических, но и генетических и токсикологических исследований. Для исследования этого вопроса и оценки перспектив использования этого вида в биотехнологиях необходимы работы с чистыми культурами, поэтому критически важным становится этап первичного выделения штаммов вида из природной среды.

Целью работы является обобщение собственных данных о встречаемости, количественном распределении и условиях обитания бентосной диатомовой водоросли *Halamphora coffeiformis* в прибрежных водах Крыма для определения перспектив выделения в чистую культуру, оценки ее биоресурсного потенциала и возможности последующего биотехнологического использования.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили пробы микрофитобентоса различных субстратов, отобранные с разных глубин и в разные сезоны с 2011 по 2023 г. в крымском побережье Черного и Азовского морей и прибрежных гиперсоленых водоемах: в зал. Сиваш, озерах Джарылгач и Херсонесском (рис. 1, б). В Черном море пробы отбирали в прибрежных акваториях Севастополя, южного и западного берегов Крыма, в районе Азовского моря –

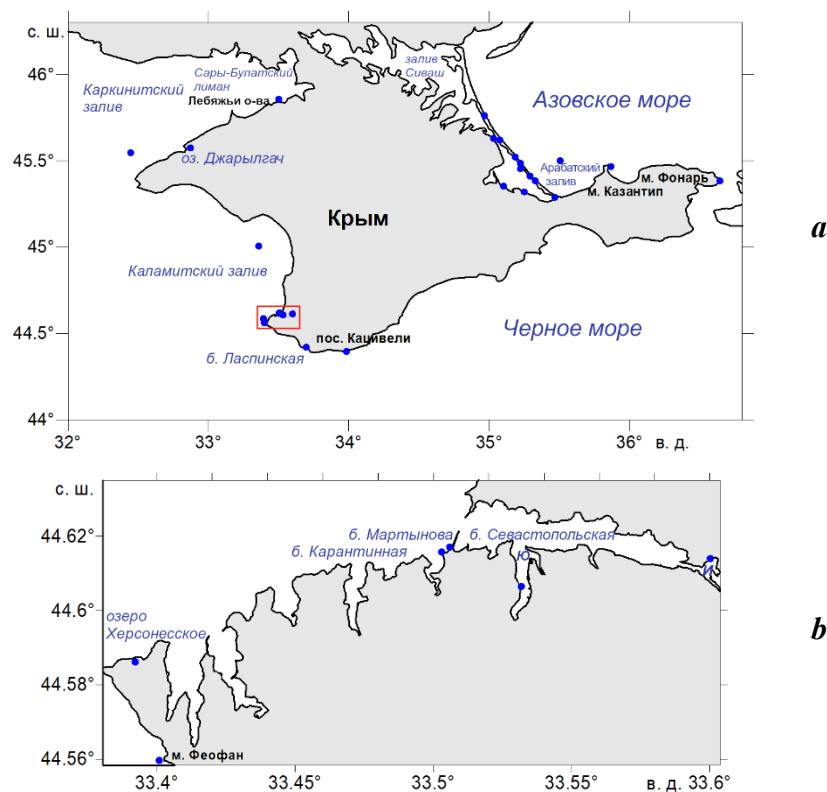


Рис. 1. Места отбора проб (синие кружки) в исследуемом районе, красным прямоугольником выделено сева­стопольское побережье (а); укрупненное изобра­жение выделенной зоны (буквой «Ю» обозначена Южная бухта, «И» – Инкерманская) (б)

Fig. 1. Sampling points (blue dots) in the study area, the red rectangular highlights the Sevastopol coastal area (a); the enlarged image of the highlighted area (letter "Ю" stands for Yuzhnaya Bay, letter "И" stands for Inkerman Bay) (b)

в Арабатском зал. и в районе мысов Казантип и Фонарь. Для исследования микроводорослей эпифитона были использованы макроводоросли: красная водоросль *Laurencia obtusa*, зеленые *Cladophora siwaschensis* и *Cladophora* sp. (см. приложение А).

Кроме того, приведена информация о сезонной динамике численности и биомассы *Halimnophora coffeiformis* в перифитоне экспериментальных стеклянных пластин (декабрь 2010 – январь 2012), эпизооне культивируемой мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. и в рыхлых грунтах под мидийными коллекторами (февраль 2015 – февраль 2016). Включены также данные о встречаемости *H. coffeiformis* по результатам исследований желудков, фекалий и псевдофекалий культивируемой мидии [20] и кишечника остракод *Eucypris mareotica* Fischer, отобранных в оз. Херсонесском [21].

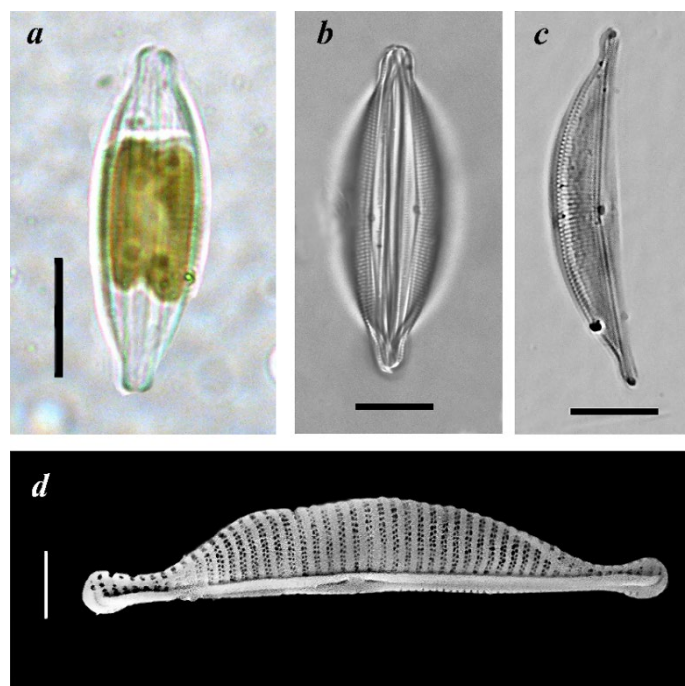
Пробы отбирали и обрабатывали по методикам, подробно описанным ранее [22–26]. При обработке проб микрофитобентоса твердых субстратов (экспериментальные стеклянные пластины, раковины мидии, камни) и эпифитона макроводорослей макроводоросли счищали с поверхности субстратов синтетической щеткой. От рыхлых грунтов макроводоросли отделяли с помощью многократной отмывки фильтрованной морской водой с последующей седиментацией. Обработка проб макроводорослей из желудков, фекалий и псевдофекалий мидий описана в [20], кишечника остракод в [21]. Подсчет клеток *H. coffeiformis* и измерение их линейных размеров проводили в камере Горяева (объем 0.9 мм³) под световым микроскопом *Axioskop 40* (*C. Zeiss*, Германия). Для расчета биомассы использовали метод геометрического подобия. Видовую принадлежность уточняли с помощью сканирующего электронного микроскопа *Hitachi SU3500* (Япония). При определении *H. coffeiformis* учитывали отличительные признаки вида [27] и фотографии из работы [28], в которой также был проведен молекулярный филогенетический анализ вида.

Результаты

В ходе мониторинга микрофитобентоса крымского побережья с 2011 по 2023 г. диатомовая водоросль *Halamphora coffeiformis* (рис. 2) встречалась в 16 районах исследования на глубинах от 0 до 38 м круглогодично (см. приложение А).

Диапазон температур, при которых встречался вид, составлял от 3 до 36 °С и солености *S* от 14 до 126 г·л⁻¹. Наиболее часто водоросль *H. coffeiformis* наблюдалась в августе (при *t* в интервале 22–32 °С) и октябре (*t* = 19.3 °С). Длина клеток варьировала от 9.3 до 52.8 мкм, ширина – от 3 до 20 мкм (с поясковой стороны клетки). Численность *N* вида в микрофитобентосе твердых субстратов и эпифитоне макроводорослей колебалась от 100 до 24·10³ кл·см⁻², биомасса *B* – от 0.00001 до 0.02292 мг·см⁻², в рыхлых грунтах *N* варьировала от 100 до 253.6·10³ кл·см⁻³, *B* – от 0.0004 до 0.6612 мг·см⁻³. Максимальные количественные показатели (*N* = 5.5·10³ кл·см⁻², *B* = 0.0196 мг·см⁻²) зарегистрированы в 2011 г. на поверхности раковин мидии *M. galloprovincialis*, отобранных на мидийной ферме в районе пос. Кацивели на глубине 4 м при температуре 24 °С. Для рыхлых грунтов максимум количественных показателей (*N* = 253.6·10³ кл·см⁻³, *B* = 0.66116 мг·см⁻³) наблюдался в ноябре 2018 г. в зал. Сиваш на глубине 0.2–0.6 м при температуре 10–14 °С и солености воды 100 г·л⁻¹.

В ходе годового экспериментального исследования макроводорослей перифитона стеклянных пластин при сроке их экспозиции в море один месяц на глубине 2 м водоросль *H. coffeiformis* встречалась единично и только в августе при 24 °С. Однако на протяжении годового исследования эпизоона раковин мидии, отобранных с мидийной фермы, вид встречался круглогодично. При этом в рыхлых грунтах под фермой в апреле и с ноября 2015 по февраль 2016 г. вид не был обнаружен. Следует отметить, что исследование годовой динамики видового состава и количественных характеристик макроводорослей перифитона и эпизоона проводили в двух акваториях, находящихся на выходе из б. Карантинной, вблизи друг от друга (на расстоянии около 500 м) (рис. 1, б).



Р и с . 2. *Halamphora coffeiformis*: фотографии светового (*a–c*) и сканирующего электронного (*d*) микроскопов: живая клетка (*a*); панцирь с брюшной стороны (*b*); панцирь со стороны створки (*c, d*). Длина масштабного отрезка: 10 мкм (*a–c*), 2 мкм (*d*)

Fig. 2. *Halamphora coffeiformis*: images taken with a light (*a–c*) and scanning electron microscopes (*d*): alive cell (*a*); a frustule from the ventral side (*b*); a frustule from the valve side (*c, d*). Scale bar: 10 μm (*a–c*), 2 μm (*d*)

При анализе сезонной динамики численности и биомассы *H. coffeiformis* в эпизооне мидии были выявлены более высокие их значения в первом полугодии 2015 г.: N с февраля по июль с пиками в феврале и июле, а B – с февраля по июнь при наибольшем значении в апреле (рис. 3).

Наибольшая численность достигала $4.9 \cdot 10^3$ кл. $\cdot\text{см}^{-2}$, или 26 % общей численности диатомовых водорослей эпифитона, в феврале 2015 г., что близко к максимальному зарегистрированному за весь период мониторинга значению, отмеченному также для эпизоона мидии, выращенной на ферме близ пос. Кацивели. Наибольшая биомасса достигала 0.0011 мг. $\cdot\text{см}^{-2}$, или 5 % общей биомассы диатомовых водорослей эпизоона мидии, в апреле 2015 г. Кроме этого, *H. coffeiformis* была обнаружена в фекалиях культивируемой на ферме мидии.

Максимальные количественные показатели *H. coffeiformis* в гиперсоленых водоемах отмечены в зал. Сиваш: в эпифитоне кладофоры $N = 3.2 \cdot 10^3$ кл. $\cdot\text{см}^{-2}$, $B = 0.02292$ мг. $\cdot\text{см}^{-2}$ при $t = 19.5 \div 26.0$ °C, $S = 30 \div 82$ г. $\cdot\text{л}^{-1}$; для рыхлых грунтов $N = 253.6 \cdot 10^3$ кл. $\cdot\text{см}^{-3}$, $B = 0.66116$ г. $\cdot\text{см}^{-3}$ при $t = 10 \div 14$ °C, $S = 100$ г. $\cdot\text{л}^{-1}$.

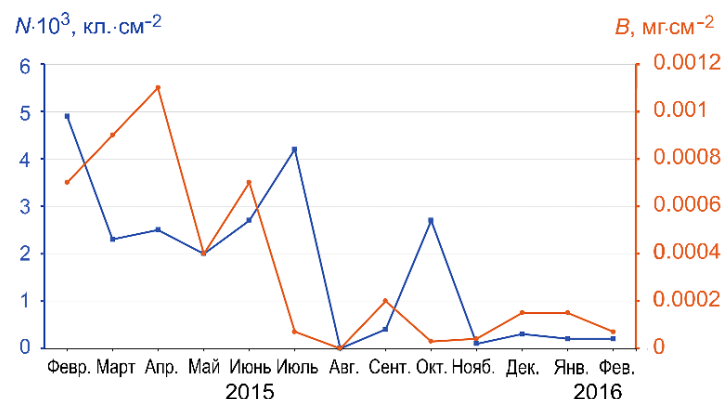


Рис. 3. Сезонная динамика численности N и биомассы B *Halamphora coffeiformis* в эпизооне мидии в 2015–2016 гг.

Fig. 3. Seasonal dynamics of abundance N and biomass B of *Halamphora coffeiformis* in the mussel epizoon in 2015–2016

В заливе это был часто встречаемый вид, иногда наблюдались массовые его поселения на талломах кладофоры. В оз. Херсонесском *H. coffeiformis* была обнаружена в кишечнике остракод [21].

В то время как в черноморском побережье Крыма *H. coffeiformis* встречалась в пробах достаточно часто, в Азовском море были отмечены единично лишь пустые панцири.

Обсуждение

Анализ накопленных данных о встречаемости диатомовой водоросли *H. coffeiformis* в крымском побережье подтвердил ее широкое распространение и выявил диапазоны температуры и солености, в которых она обитает. Согласно фитогеографической характеристике вид принадлежит к аркто-бореально-тропическим климатическим поясам и на данный момент не был обнаружен только в Антарктике ^{4), 5)}. В Черном море *H. coffeiformis* является массовым представителем микрофитобентоса. Например, для румынского побережья наибольшая численность N вида, достигала $14.8 \cdot 10^3$ кл.·см⁻², а в районе крымского побережья в эпизооне мидии из бух. Казачьей N составляла $1.4\text{--}8.7 \cdot 10^3$ кл.·см⁻² в марте 1996 г., когда вид доминировал [22]. Интересно отметить, что, и по собственным, и по литературным данным [5, 20, 22], *H. coffeiformis* часто встречалась в эпизооне мидии, где эта водоросль достигала достаточно высокой численности (см. приложение А).

⁴⁾ Рябушко Л. И., Бегун А. А. Диатомовые водоросли микрофитобентоса Японского моря (Синописис и Атлас) : в 2 т. Севастополь : ПК «КИА», 2016. Т. 2. 324 с.

⁵⁾ URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 11.11.2025).

В ходе нашего исследования в донных отложениях Азовского моря живые клетки *H. coffeiformis* не были обнаружены, что, возможно, связано с более низкой прозрачностью вод, чем в Черном море. Однако в чек-листе микроводорослей бентоса и планктона Азовского моря приведены упоминания данного вида более чем у десятка авторов [29]. Для крымского побережья Азовского моря *H. coffeiformis* указана в эпифитоне макрофитов у м. Казантип в июле – августе 2023 г. при солёности воды $13.6 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ на глубине 0.1–1.0 м, хотя и с низкой численностью ($N = 20 \text{ кл.} \cdot \text{см}^{-2}$) [30].

В литературе *H. coffeiformis* характеризуется как морской и солоноватоводный вид^{4), 5)}, однако в работах [31–33] отмечено ее присутствие и в пресноводных водоемах. Так, А. И. Прошкина-Лавренко⁶⁾ указывала его «как солоноватоводно-морской, широко распространенный у берегов опресненных районов моря и в континентальных солоноватоводных водоемах», а также «у берегов северо-западной части Черного моря, особенно близ Днепровско-Бугского лимана».

В Крыму Л. Н. Бухтиярова обнаружила *H. coffeiformis* в эфемерных пресноводных водоемах крымской лесостепи, горных ручьях, пресноводных родниках в районе бух. Сердоликовой (Восточный Крым) [32].

Вид встречается также в гиперсоленых водах, обнаружен в 16 из 29 исследованных водоемов с диапазоном солёности $20\text{--}320 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ [34]. В Крыму этот вид является массовым и доминирует по численности в двух гиперсоленых водоемах – в оз. Херсонесском и зал. Сиваш [24, 25, 35]. Кроме того, *H. coffeiformis* обнаружена в содовых озерах [36] и в альго-бактериальных матах б. Кратерной морского вулкана Ушишир (Курильские о-ва) на глубине 3–15 м при температуре $4\text{--}25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [37].

Таким образом, высокая экологическая пластичность *H. coffeiformis* и его широкое распространение в Мировом океане делают этот вид перспективным для экспериментальных исследований и биотехнологических разработок.

Заключение

Анализ обобщенных многолетних данных о встречаемости *H. coffeiformis* в крымском побережье показал широкое распространение вида и выявил его высокую толерантность к широкому диапазону температуры и солёности. Исследование сезонной динамики *H. coffeiformis* в эпизооне культивируемой мидии показало, что при максимальных значениях численности и биомассы вклад вида в общую численность сообщества превышает его вклад в биомассу ввиду небольших размеров его клеток. Такие виды, как правило, играют важную экологическую роль: они способствуют поддержанию гомеостаза в сообществах и заселению новых субстратов в экстремальных условиях.

Обзор литературных источников выявил только одно свидетельство продуцирования домоевой кислоты видом *H. coffeiformis*. В то же время большинство авторов, не выявив токсины в его биомассе, указывают на ценные биотехнологические свойства вида.

⁶⁾ Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли бентоса Черного моря. Москва ; Ленинград : Наука, 1963. С. 171.

Учитывая широкое распространение *H. coffeiformis* в прибрежных водах Крыма, его потенциальную биотехнологическую значимость и трудности таксономической идентификации, можно рекомендовать данный вид для выделения в альгологически чистую культуру с целью последующего генетического анализа и изучения биохимических, токсикологических и экологических свойств, а также оценки его биотехнологического потенциала.

Приложение А

Количественные показатели *Halamphora coffeiformis* и характеристики места отбора проб
Quantitative indicators of *Halamphora coffeiformis* and characteristics of sampling points

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>B</i>
<i>Черное море / Black Sea</i>								
Искусственная акватория у бухты Карантинной / Artificial water area near Karantinnaya Bay	22.08. 2011	Экспериментальные стеклянные пластины / Experimental glass plates	2	22	24	—	—	—
Мидийная ферма, поселок Качивели / Mussel farm, village of Katsiveli	04.08. 2011	Раковины мидии / Mussel shells	4	24	—	26.4 × 17.6	5.5	0.0196
Озеро Джарылгач / Dzharylgach Lake	01.08. 2011	<i>Cladophora</i> sp.	0.2	26	125	26.4 × 13	В массе / Abundant	—
Мидийная ферма на выходе из бухты Карантинной / Mussel farm at the mouth of Karantinnaya Bay	27.02. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	9.7	17.9	23.5 × 10.3	4.9	0.0007
	19.03. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	8.4	7.9	24.9 × 13.2	2.3	0.0009
		Рыхлые грунты / Sediments	17	8.4	17.9	30.8 × 17.6	3.5	0.0010
	15.04. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	10.3	17.9	33.4 × 15.0	2.5	0.0011
	20.05. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	15.8	17.9	26.4 × 13.2	2.0	0.0004
		Рыхлые грунты / Sediments	17	9.9	17.9	44.0 × 8.8	6.4	0.0013

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>B</i>
Мидийная ферма на выходе из бух- ты Карантинной / Mussel farm at the mouth of Karantinnaya Bay	17.06. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	19.2	17.9	33.7 × 13.2	2.7	0.0007
		Рыхлые грун- ты / Sediments	17	16.2	17.9	52.8 × 13.2	6.9	0.0025
	15.07. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	21.4	17.9	32.3 × 13.2	4.2	0.00007
		Рыхлые грун- ты / Sediments	17	12.3	17.9	30.8 × 13.2	9.4	0.0020
	12.08. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	25.5	17.9	—	<i>Sp</i>	—
		Рыхлые грун- ты / Sediments	17	25.5	17.9	35.2 × 17.6	1.8	0.0006
	10.09. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	23.7	17.9	31.9 × 13.2	0.4	0.0002
		Рыхлые грун- ты / Sediments	17	23.4	17.9	35.2 × 13.2	3.1	0.0008
	16.10. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	19.3	17.9	19.8 × 8.8	2.7	0.00003
		Рыхлые грун- ты / Sediments	17	19.3	17.9	39.6 × 13.2	1.6	0.0004
	18.11. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	12.9	17.9	19.8 × 11.0	0.1	0.00004
	16.12. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	6	10.3	17.9	28.6 × 13.2	0.3	0.00015
	13.01. 2016	Раковины мидии / Mussel shells	6	9.5	17.9	28.6 × 13.2	0.2	0.00015
	15.02. 2016	Раковины мидии / Mussel shells	6	8.9	17.9	19.8 × 11.0	0.2	0.00007
		Фекалии мидии / Mussel feces	6	9.5	17.9	—	—	—

Продолжение таблицы / Continued

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>B</i>
Искусственная акватория близ бухты Карантинной / Artificial water area near Karantinnaya Bay	26.08. 2016	<i>Cladophora</i> sp.	0	26.0	–	–	–	–
Мыс Феофан / Cape Feofan	12.08. 2015	Раковины мидии / Mussel shells	4	25.4	–	–	–	–
Сары-Булатский лиман / Sary-Bulatsky Lagoon	30.10. 2015	Камни / Rocks	0.5	–	20.9	26.4 × 8.8	0.8	0.00009
	27.10. 2015	Ил / Silt	0.5	–	19.8 – 21.4	–	–	–
	19.11. 2015							
Лебяжьи острова / Lebyazhi Islands	06.10. 2016	Рыхлые грунты / Sediments	0.5	17.9	–	–	–	–
	20.05. 2016							
Каркинитский залив / Karkinit Bay	29.03. 2017	Рыхлые грунты / Sediments	18	6.2	18.4	41 × 14	EF	–
			38					
Каламитский залив / Kalamita Bay	28.03. 2017	Раковины мидии / Mussel shells	20	8.3	18.4	–	EF	–
Бухта Мартынова / Martynova Bay	02.09. 2019	Камни / Rocks	1–2	22	16–18	–	3.3	–
Бухта Инкерманская / Inkerman Bay						16.3 × 7.4	7.1	–
Бухта Южная / Yuzhnaya Bay			6.0			31.1 × 9.5	0.1	–
Озеро Херсонесское / Lake Chersonesskoye	30.03. 2018	Кишечник <i>Eucypris mareotica</i> (Ostracoda) / Intestines of <i>Eucypris mareotica</i> (Ostracoda)	до 0.3	–	35–120	16.8 × 3	Sp	–

Окончание таблицы / End of table

Район / Study area	Дата / Date	Субстрат / Substrate	<i>h</i>	<i>t</i>	<i>S</i>	<i>d</i>	<i>N</i>	<i>B</i>	
Озеро Херсонесское / Lake Chersonesskoye	29.05. 2018	Рыхлые грун- ты / Sediments	0.3			–	11.2	0.006	
	20.06. 2018	<i>Cladophora</i> spp.	0– 0.3			17.6–39.6 × × 8.8–17.6	0.12– 2.5	0.00001 –0.0007	
	13.09. 2018								
Бухта Ласпинская / Laspi Bay	27.06. 2023	<i>Laurencia</i> <i>obtusa</i>	0.5	17	–	–	0.8	–	
Азовское море / Sea of Azov									
Арабатский залив / Gulf of Arabat	02.04. 2017	Рыхлые грун- ты / Sediments	9–12	6–7	14– 14.5	–	<i>Sp</i>	<i>EF</i>	
Мыс Казантип / Cape Kazantip									
Мыс Фонарь / Cape Fonar									
Залив Сиваш / Sivash Bay	Май – июнь 2018 / May– June 2018	<i>Cladophora</i> <i>siwaschensis</i>	0.2– 0.6	19.5 – 26.0	30– 82	12.5–35 × × 5–20	3.2	0.02292	
		Рыхлые грун- ты / Sediments				30–37.5 × × 12.5–15	3.5	0.06988	
	09.11. 2018	Рыхлые грун- ты / Sediments		10– 14	100	16–27.5 × × 6–16	253.6	0.66116	
	19.12. 2020	<i>Cladophora</i> <i>siwaschensis</i>		3–5	30– 112	16.0–37.0 × × 8.5–14	0.37	0.00131	
		Рыхлые грун- ты / Sediments				11.0–23.0 × × 7.7–11	38.5	0.03129	
	16.07. 2020	<i>Cladophora</i> <i>siwaschensis</i>		0– 0.3	25– 36	60– 126	16.0–32.0 × × 6.0–16.0	0.12	0.00024
	03.08. 2021	<i>Cladophora</i> <i>siwaschensis</i>		0– 0.6	25.4 – 33.9	33.9 – 88.2	16.0–32.9 × × 6.0–15.8	0.1	0.00002
		Рыхлые грун- ты / Sediments		0.2– 0.6	32.3 – 88.2	88.2 – 133.7	9.3–29.0 × × 9.5–13.7	94.1	0.0147

Примечание. Обозначения: *N* – численность, кл.·см^{–2} (в рыхлых грунтах – мг·см^{–3}); *B* – био-
масса, мг·см^{–2} (в рыхлых грунтах – мг·см^{–3}); *h* – глубина, м; *d* – размеры, мкм; *S* – соленость,
г·л^{–1}; *t* – температура, °С. Прочерк в ячейках обозначает, что измерений не проводили. *Sp* –
единично, *EF* – пустые панцири.

Note: *N* – abundance, cells·cm^{–2} (cells·cm^{–3} in sediments); *B* – biomass, mg·cm^{–2} (cells·cm^{–3} in sedi-
ments); *h* – depth, m; *d* – dimensions, μm, *S* – salinity, g·L^{–1}; *t* – temperature, °C. The dash denotes
that no measurements were taken. *Sp* – sporadically, *EF* – empty frustules.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms / Edited by P. M. Glibert [et al.]. Baltimor ; Paris : SCOR & IOC, 2001. 86 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70069-4>
2. Рябушко Л. И. Потенциально опасные микроводоросли Черного и Азовского морей. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 288 с.
3. Орлова Т. Ю. Мониторинг токсичных микроводорослей как основа биологической безопасности прибрежных акваторий и морепродуктов // Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации : материалы Целевой комплексной программы ориентированных фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН на 2007–2012 гг. / Отв. ред. А. В. Адрианов. Владивосток : Дальнаука, 2014. Глава 3. С. 354–369.
4. Advancements in biological strategies for controlling harmful algal blooms (HABs) / H. M. Anabtawi [et al.] // Water. 2024. Vol. 16, iss. 2. 224. <https://doi.org/10.3390/w16020224>
5. Investigation of the source of domoic acid in mussels / L. Maranda [et al.] // Toxic marine phytoplankton / Edited by E. Granéli [et al.]. New York : Elsevier, 1990. P. 300–304.
6. Bates S. S. Domoic-acid-producing diatoms: Another genus added! // Journal of Phycology. 2008. Vol. 36, iss. 6. P. 978–983. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.03661.x>
7. Lundholm N., Daugbjerg N., Moestrup Ø. Phylogeny of the Bacillariaceae with emphasis on the genus *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) based on partial LSU rDNA // European Journal of Phycology. 2002. Vol. 37, iss. 1. P. 115–134. <https://doi.org/10.1017/S096702620100347X>
8. Dinoflagellate and other microalgal toxins: Chemistry and biochemistry / Y. Shimizu [et al.] // Pure and Applied Chemistry. 1989. Vol. 61. P. 513–516. <https://doi.org/10.1351/pac198961030513>
9. Molecular, morphological, and toxinological characterizations of an Argentinean strain of *Halamphora coffeaeformis* with potential biotechnological applications / S. E. Sala [et al.] // Journal of Applied Phycology. 2021. Vol. 33. P. 799–806. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02353-4>
10. Sala S. E., Sar E. A., Ferrario M. E. Review of materials reported as containing *Amphora coffeaeformis* (Agardh) Kützinger in Argentina // Diatom Research. 1998. Vol. 13, iss. 2. P. 323–336. <https://doi.org/10.1080/0269249X.1998.9705454>
11. Morphogenetic and toxin composition variability of *Alexandrium tamarense* (Dinophyceae) from the east coast of Russia / T. Y. Orlova [et al.] // Phycologia. 2007. Vol. 46, iss. 5. P. 534–548. <https://doi.org/10.2216/06-17.1>
12. Biofuel and biochemical analysis of *Amphora coffeaeformis* RR03, a novel marine diatom, cultivated in an open raceway pond / M. G. Rajaram [et al.] // Energies. 2018. Vol. 11, iss. 6. 1341. <https://doi.org/10.3390/en11061341>
13. Bio and phyto-chemical effect of *Amphora coffeaeformis* extract against hepatic injury induced by paracetamol in rats / A. E. B. El-Sayed [et al.] // Molecular Biology Reports. 2018. Vol. 45. P. 2007–2023. <https://doi.org/10.1007/s11033-018-4356-8>
14. Potential of the marine diatom *Halamphora coffeaeformis* to simultaneously produce omega-3 fatty acids, chrysolaminarin and fucoxanthin in a raceway pond / C. A. Popovich [et al.] // Algal Research. 2020. Vol. 51. 102030. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102030>

15. Assessment of *Halamphora coffeaeformis* growth and biochemical composition for aquaculture purposes / P. G. S. Bilbao [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering 2020. Vol. 8, iss. 4. 282. <https://doi.org/10.3390/jmse8040282>
16. Some key metalloproteinases by nano-naringenin and *Amphora coffeaeformis* as a novel strategy for treatment of osteoarthritis in rats / N. S. Shaban [et al.] // Pharmaceuticals. 2023. Vol. 16, iss. 2. 260. <https://doi.org/10.3390/ph16020260>
17. Jastaniah S. D., Albaqami N. M. Dietary *Amphora coffeaeformis* enhanced growth performance, body composition, biochemical parameters, gene expression on red tilapia (*Oreochromis niloticus* and *O. mossambicus*), and resistance to *Saprolegnia* infection // Journal of Applied Phycology. 2024. Vol. 36, iss. 6. P. 3353–3366. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03363-2>
18. Oil assessment of *Halamphora coffeaeformis* diatom growing in a hybrid two-stage system for biodiesel production / L. A. Martín [et al.] // Renewable Energy. 2016. Vol. 92. P. 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.078>
19. Potential of Benthic Diatoms *Achnanthes longipes*, *Amphora coffeaeformis* and *Navicula* sp. (Bacillariophyceae) as Antioxidant Sources / S.-H. Lee [et al.] // Algae. 2009. Vol. 24, iss. 1. P. 47–55. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2009.24.1.047>
20. Поспелова Н. В., Балычева Д. С., Рябушко Л. И. Микроводоросли в спектре питания культивируемых мидий (Крым, Черное море) // Морские исследования и образование (MARESEDU–2016) (Москва, 18–21 октября 2016 г.) : труды V Международной научно-практической конференции. Москва : Феория, 2016. С. 434–438. EDN XMSWUH.
21. Microalgae in the diet of *Eucypris mareotica* (Crustacea, Ostracoda) in the hypersaline lake Chersonesskoye (Crimea) / E. V. Anufrieva [et al.] // Ecologica Montenegrina. 2018. Vol. 17. P. 100–104. <https://doi.org/10.37828/em.2018.17.11>
22. Рябушко Л. И. Микрофитобентос Черного моря / Ред. А. В. Гаевская. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. 416 с. EDN CRMFZU.
23. Балычева Д. С., Рябушко Л. И. Микроводоросли бентоса заповедника «Лебяжий острова» (Черное море) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2017. Т. 2, № 2 (Suppl. 2). С. 9–18. <https://doi.org/10.24189/ncr.2017.027>
24. Shadrin N., Balycheva D., Anufrieva E. Spatial and temporal variability of microphytobenthos in a marine hypersaline lake (Crimea): Are there some general patterns? // Journal of Sea Research. 2021. Vol. 177. 102121. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2021.102121>
25. Shadrin N., Balycheva D., Anufrieva E. Microphytobenthos in the hypersaline water bodies, the case of Bay Sivash (Crimea): Is Salinity the Main Determinant of Species Composition? // Water. 2021. Vol. 13, iss. 11. 1542. <https://doi.org/10.3390/w13111542>
26. Seasonal dynamics of microphytobenthos distribution in three ecotopes on a mussel farm (Black Sea) / L. Ryabushko [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 11. 2100. <https://doi.org/10.3390/jmse11112100>
27. Levkov Z. *Amphora* sensu lato // Diatoms of Europe: diatoms of the European inland waters and comparable habitats / Edited by H. Lange-Bertalot. Ruggell : A. R. G. Gantner Verlag K. G., 2009. Vol. 5. 916 p.
28. Stepanek J. G., Kociolek J. P. Molecular phylogeny of the diatom genera *Amphora* and *Halamphora* (Bacillariophyta) with a focus on morphological and ecological evolution // Journal of Phycology. 2019. Vol. 55. P. 442–456. <https://doi.org/10.1111/jpy.12836>
29. Рябушко Л. И., Бондаренко А. В. Микроводоросли планктона и бентоса Азовского моря (Чек-лист, синонимика, комментарий). Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 211 с.

30. Diatoms of the macroalgae epiphyton and bioindication of the protected coastal waters of the Kazantip Cape (Crimea, the Sea of Azov) / A. Bondarenko [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, iss. 7. 1211. <https://doi.org/10.3390/jmse12071211>
31. Stoermer E. F., Kreis, R. G. Preliminary Checklist of Diatoms (Bacillariophyta) from the Laurentian Great Lakes // Journal of Great Lakes Research. 1978. Vol. 4, iss. 2. P. 149–169. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(78\)72180-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(78)72180-5)
32. Bukhtiyarova L. N. Diatoms of Ukraine. Inland waters. Kyiv : M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 134 p.
33. Genkal S. I., Eremkina T. V. Diatom algae of reservoirs of different types in the Middle Urals (Sverdlovsk Oblast, Russia) // Inland Water Biology. 2023. Vol. 16, iss. 3. P. 385–393. <https://doi.org/10.1134/S1995082923030082>
34. Salinity-dependent species richness of Bacillariophyta in hypersaline environments / D. Balycheva [et al.] // Water. 2023. Vol. 15, iss. 12. 2252. <https://doi.org/10.3390/w15122252>
35. *Cladophora* spp. (Chlorophyta) modulate environment and create a habitat for microalgae in hypersaline waters / A. Prazukin [et al.] // European Journal of Phycology. 2021. Vol. 56, iss 3. P. 231–243. <https://doi.org/10.1080/09670262.2020.1814423>
36. *Halamphora* taxa in Hungarian soda pans and shallow soda lakes detected via metabarcoding and microscopic analyses / E. Acs [et al.] // Metabarcoding and Metagenomics. 2023. Vol. 7. <https://doi.org/10.3897/mbmg.7.111679>
37. Рябушко Л. И., Тарасов В. Г. Качественный состав диатомовых водорослей микрофитобентоса бухты Кратерной // Биология моря. 1989. № 3. С. 83–88.

Поступила 17.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 21.03.2025 г.; принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

Об авторе:

Балычева Дарья Сергеевна, старший научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-9955-4182**, **Scopus Author ID: 56297496300**, **ResearcherID: C-5534-2016**, **SPIN-код: 2545-0169**, balycheva@ibss.su

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.