

УДК 574.635:504.05:502.2  
DOI: 10.7868/S25000640260209

## ВОДОРΟΣЛИ *FUCUS VESICULOSUS* КАК БИОСОРБЕНТ ДЛЯ БОРЬБЫ С ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ВОДНОЙ СРЕДЫ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

© 2026 г. Г.М. Воскобойников<sup>1</sup>, Д.В. Пуговкин<sup>1</sup>, Л.О. Метелькова<sup>2</sup>

**Аннотация.** Экспериментально показана значимая роль живых и сухих водорослей *Fucus vesiculosus* (Phaeophyceae) в очистке прибрежных акваторий от нефтяных углеводородов. Фукусы, как живые, так и высушенные, способны активно сорбировать нефтепродукты из среды и накапливать их внутри талломов. Водоросли можно эффективно использовать в обоих состояниях для профилактической повседневной очистки морской воды, когда содержание нефтяных углеводородов не превышает 3 мг/л (60 ПДК). Впервые определена перспектива использования сухого фукуса для биоремедиации морской воды в случае аварийных ситуаций, создающих концентрацию нефтепродуктов в воде 1 г/л (20000 ПДК). При помещении живых фукусов в морскую воду с содержанием дизельного топлива 1 г/л на 3–5 сутки отмечалось помутнение воды в результате отделения многочисленных волосков, выступающих из криптостом, и гибель водорослей. В случае применения живых растений для нейтрализации воздействия нефтяных углеводородов определяющая роль в процессе принадлежит симбиотической ассоциации водорослей и углеводородоокисляющих бактерий. Отмечено увеличение численности последних в ходе эксперимента и с живыми, и с сухими фукусами. При использовании сухих водорослей высушенные макрофиты представляют собой резервуар для накопления нефтяных углеводородов. Индекс аккумуляции, рассчитанный для сухих и для живых макрофитов, показал, что сухие водоросли активнее накапливают нефтепродукты. Данный результат демонстрирует возможность использования сухих водорослей как основу технологии для финишной очистки акваторий от нефтяного загрязнения. Основная работа по деструкции углеводородов, вероятно, приходится на углеводородоокисляющие бактерии, а также на физико-химические процессы. Метаболические процессы, присущие живым водорослям и приводящие к деструкции нефтяных углеводородов, в этом случае отсутствуют.

**Ключевые слова:** макрофиты, нефтяные углеводороды, биоремедиация, углеводородоокисляющие микроорганизмы.

### *FUCUS VESICULOSUS* AS A BIOSORBENT FOR COMBATING POLLUTION OF THE AQUATIC ENVIRONMENT BY PETROLEUM PRODUCTS

G.M. Voskoboinikov<sup>1</sup>, D.V. Pugovkin<sup>1</sup>, L.O. Metelkova<sup>2</sup>

**Abstract.** The role of alive and dried algae *Fucus vesiculosus* (Phaeophyceae) in the purification of coastal zones from petroleum products has been experimentally shown. Algae, both live and dried, are able to absorb petroleum products from the environment and accumulate them in thallus. It has been revealed that alive algae can be effectively used for preventive, daily purification of seawater when the content of petroleum hydrocarbons doesn't exceed 3 mg/l (60 MPC). For the first time, the prospect of using dried fucus for the bioremediation of seawater in emergency situations creating a concentration of petroleum hydrocarbons in water of 1 g/l (20000 MPC) has been determined. After the exposition of dried fucuses in water with diesel fuel (1 g/l) for 3–5 days the water in experimental volume became cloudy due to the detachment of numerous hairs

<sup>1</sup> Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: grvosk@mail.ru, pugovkin2005@yandex.ru

<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (D.I. Mendeleev Institute for Metrology, St Petersburg, Russian Federation), Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 19

from cryptostomes followed by the algae death. In the case of using living macrophytes for cleaning marine environment, the main role in the process belongs to the symbiotic association of hydrocarbon-oxidizing bacteria and algae. During the experiment the number of these bacteria increased both with live and dried fucuses. In case of using the dried algae the dehydrated macrophytes are acting as absorbers of oil products. The bioaccumulation index, calculated for dried and live fucuses showed that dried macrophytes accumulate oil product more actively. This result demonstrate the possibility of using dried algae as a basis of technologies for final purification of water areas after oil pollution. The main role in destruction of oil hydrocarbons is probably carried out by hydrocarbon-oxidizing bacteria as well as physico-chemical processes. However the metabolic processes in dried macrophytes are absent.

**Keywords:** macrophytes, petroleum hydrocarbons, bioremediation, hydrocarbon-oxidizing microorganisms.

1. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Лебедев М.П., Большаков А.М., Аммосов А.П., Сыромятникова А.С., Захарова М.И., Пермяков П.П., Глянцева Ю.С., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Зуева И.Н. 2014. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне России и пути их парирования на основе концепции риска. *Арктика: экология и экономика*. 1(13): 10–29.
2. Моисеенко Т.И., Денисов Д.Б. 2019. Возможно ли восстановление озерной арктической экосистемы после длительного загрязнения? *Арктика: экология и экономика*. 4(36): 16–25. doi: 10.25283/2223-4594-2019-4-16-25
3. Voskoboinikov G.M., Matishov G.G., Metelkova L.O., Zhakovskaya Z.A., Lopushanskaya E.M. 2018. Participation of the green algae *Ulvaria obscura* in bioremediation of sea water from oil products. *Doklady Biological Sciences*. 481: 139–141. doi: 10.1134/S0012496618040026
4. Voskoboinikov G.M., Ryzhik I.V., Salakhov D.O., Metelkova L.O., Zhakovskaya Z.A., Lopushanskaya E.M. 2020. Absorption and conversion of diesel fuel by the red alga *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta): the potential role of alga in bioremediation of sea water. *Russian Journal of Marine Biology*. 46(2): 113–118. doi: 10.1134/S1063074020020108
5. Воскобойников Г.М., Ильинский В.В., Лопушанская Е.М., Макаров М.В., Пуговкин Д.В., Рыжик И.В., Ляймер А., Йенсен Дж.Б. 2017. Санитарная водорослевая плантация для очистки прибрежных акваторий от нефтепродуктов: от теории к практике. *Вопросы современной альгологии*. 3(15). URL: <http://algology.ru/1184>.
6. Шошина Е.В. 1998. *Промысловые и перспективные для использования водоросли и беспозвоночные Баренцева и Белого морей*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 174–187.
7. Proc K., Bulak P., Kaczor M., Bieganski A. 2021. A new approach to quantifying bioaccumulation of elements in biological processes. *Biology*. 10(4): 345. doi: 10.3390/biology10040345
8. Ильинский В.В. 2006. Гетеротрофный бактериопланктон. В кн.: *Практическая гидробиология. Пресноводные экосистемы*. М., ПИМ: 331–365.
9. Mills A.L., Breuil C., Colwell R.R. 1978. Enumeration of petroleum-degrading marine and estuarine microorganisms by the most probably number method. *Canadian Journal of Microbiology*. 24(5): 522–527.
10. Коронелли Т.В., Ильинский В.В. 1984. Об учете численности углеводородоокисляющих бактерий в морской воде методом предельных разведений. *Вестник Московского университета. Серия 16. Биология*. 3: 54–56.
11. Mulligan C.N. 2005. Environmental applications for biosurfactants. *Environmental Pollution*. 133(2): 183–198. doi: 10.1016/j.envpol.2004.06.009
12. Ron E.Z., Rosenberg E. 2001. Natural roles of biosurfactants. *Environmental Microbiology*. 3(4): 229–236. doi: 10.1046/j.1462-2920.2001.00190.x
13. Walker C.H. 1990. Kinetic models to predict bioaccumulation of pollutants. *Functional Ecology*. 4(3): 295–301.
14. Paz-Alberto A.M., Sigua G.C. 2013. Phytoremediation: a green technology to remove environmental pollutants. *American Journal of Climate Change*. 2(1): 71–86. doi: 10.4236/ajcc.2013.21008
15. Egorova D.O., Korsakova E.S., Demakov V.A., Plotnikova E.G. 2013. Degradation of aromatic hydrocarbons by the *Rhodococcus wratislaviensis* KT112-7 isolated from waste products of a salt-mining plant. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 49(3): 244–255. doi: 10.1134/S0003683813030071
16. Ivanova A.E., Sukhacheva M.V., Kanat'eva A.Yu., Kravchenko I.K., Kurganov A.A. 2014. Hydrocarbon-oxidizing potential and the genes for *n*-alkane biodegradation in a new acidophilic mycobacterial association from sulfur blocks. *Microbiology*. 83(6): 764–772. doi: 10.1134/S0026261714060095
17. Muangchinda C., Chavanich S., Viyakarn V., Watanabe K., Imura S., Vangnai A.S., Pinyakong O. 2015. Abundance and diversity of functional genes involved in the degradation of aromatic hydrocarbons in Antarctic soils and sediments around Syowa Station. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(6): 4725–4735. doi: 10.1007/s11356-014-3721-y
18. Lu Z., Deng Y., Van Nostrand J.D., He Z., Voordeckers J., Zhou A., Lee Y.-J., Mason O.U., Dubinsky E.A., Chavarria K.L., Tom L.M., Fortney J.L., Lamendella R., Jansson J.K., D'haeseleer P., Hazen T.C., Zhou J. 2012. Microbial gene functions enriched in the Deepwater Horizon deep-sea oil plume. *The ISME Journal*. 6(2): 451–460. doi: 10.1038/ismej.2011.91
19. Zhou Y., Wang Y., Yang L., Kong Q., Zhang H. 2023. Microbial degradation mechanisms of surface petroleum contaminated seawater in a typical oil trading port. *Environmental Pollution*. 324: 121420. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121420
20. Zhou Y., Wang Y., Yao S., Zhao X., Kong Q., Cui L., Zhang H. 2024. Driving mechanisms for the adaptation and degradation

- of petroleum hydrocarbons by native microbiota from seas prone to oil spills. *Journal of Hazardous Materials*. 476: 135060. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135060
21. Патин С.А. 2008. *Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы*. М., изд-во ВНИРО: 508 с.
  22. Воскобойников Г.М., Ильинский В.В., Лопушанская Е.М., Пуговкин Д.В. 2008. О возможной роли морских макрофитов в очистке поверхности воды от нефтяного загрязнения. В кн.: *Нефть и газ Арктического шельфа – 2008: Материалы Международной конференции (Мурманск, 12–14 ноября 2008 г.)*. Мурманск, ММБИ КНЦ РАН: 63–65.
  23. Ryzhik I., Pugovkin D., Makarov M., Roleda M.Y., Basova L., Voskoboinikov G. 2019. Tolerance of *Fucus vesiculosus* exposed to diesel water-accommodated fraction (WAF) and degradation of hydrocarbons by the associated bacteria. *Environmental Pollution*. 254(B): 113072. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113072
  24. Махутов Н.А., Лебедев М.П., Большаков А.М., Захарова М.И., Глязнецова Ю.С., Зуева И.Н., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х. 2016. Прогнозирование возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса и ликвидация последствий аварийных разливов нефтепродуктов в арктических климатических условиях. *Арктика: экология и экономика*. 4(24): 90–99.
- REFERENCES
1. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Lebedev M.P., Bolshakov A.M., Ammosov A.P., Syromyatnikova A.S., Zakharova M.I., Permyakov P.P., Glyaznetsova Yu.S., Chalaya O.N., Lifshits S.Kh., Zueva I.N. 2014. [The features of emergencies in the Arctic zone of Russia and a way to response on the basis of risk concept]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 1(13):10–29. (In Russian).
  2. Moiseenko T.I., Denisov D.B. 2019. [Is it possible to restore the Arctic lake ecosystems after long-term pollution?]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 4(36): 16–25. (In Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2019-4-16-25
  3. Voskoboinikov G.M., Matishov G.G., Metelkova L.O., Zhakovskaya Z.A., Lopushanskaya E.M. 2018. Participation of the green algae *Ulvaria obscura* in bioremediation of sea water from oil products. *Doklady Biological Sciences*. 481: 139–141. doi: 10.1134/S0012496618040026
  4. Voskoboinikov G.M., Ryzhik I.V., Salakhov D.O., Metelkova L.O., Zhakovskaya Z.A., Lopushanskaya E.M. 2020. Absorption and conversion of diesel fuel by the red alga *Palmaria palmata* (Linnaeus) F. Weber et D. Mohr, 1805 (Rhodophyta): the potential role of alga in bioremediation of sea water. *Russian Journal of Marine Biology*. 46(2): 113–118. doi: 10.1134/S1063074020020108
  5. Voskoboinikov G.M., Il'inskiy V.V., Lopushanskaya E.M., Makarov M.V., Pugovkin D.V., Ryzhik I.V., Liaimer A.V., Jensen J.B. 2017. [Sanitary algae plantation for the bioremediation of coastal waters from oil: from theory to practice]. *Voprosy sovremennoy al'gologii*. 3(15). Available at: <http://algology.ru/1184>. (In Russian).
  6. Shoshina E.V. 1998. *Promyslovye i perspektivnye dlya ispol'zovaniya vodorosli i bespozvonochnye Barentseva i Belogo morey*. [Commercial and promising algae and invertebrates of the Barents and White seas]. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: 174–187. (In Russian).
  7. Proc K., Bulak P., Kaczor M., Bieganski A. 2021. A new approach to quantifying bioaccumulation of elements in biological processes. *Biology*. 10(4): 345. doi: 10.3390/biology10040345
  8. Il'inskiy V.V. 2006. [Heterotrophic bacterioplankton]. In: *Prakticheskaya gidrobiologiya. Presnovodnye ekosistemy*. [Applied hydrobiology. Freshwater ecosystems]. Moscow, PIM: 331–365. (In Russian).
  9. Mills A.L., Breuil C., Colwell R.R. 1978. Enumeration of petroleum-degrading marine and estuarine microorganisms by the most probably number method. *Canadian Journal of Microbiology*. 24(5): 522–527.
  10. Koronelli T.V., Il'inskiy V.V. 1984. [On accounting for the number of hydrocarbon-oxidizing bacteria in seawater by the method of marginal dilutions]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16. Biologiya*. 3: 54–56. (In Russian).
  11. Mulligan C.N. 2005. Environmental applications for biosurfactants. *Environmental Pollution*. 133(2): 183–198. doi: 10.1016/j.envpol.2004.06.009
  12. Ron E.Z., Rosenberg E. 2001. Natural roles of biosurfactants. *Environmental Microbiology*. 3(4): 229–236. doi: 10.1046/j.1462-2920.2001.00190.x
  13. Walker C.H. 1990. Kinetic models to predict bioaccumulation of pollutants. *Functional Ecology*. 4(3): 295–301.
  14. Paz-Alberto A.M., Sigua G.C. 2013. Phytoremediation: a green technology to remove environmental pollutants. *American Journal of Climate Change*. 2(1): 71–86. doi: 10.4236/ajcc.2013.21008
  15. Egorova D.O., Korsakova E.S., Demakov V.A., Plotnikova E.G. 2013. Degradation of aromatic hydrocarbons by the *Rhodococcus wratislaviensis* KT112-7 isolated from waste products of a salt-mining plant. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 49(3): 244–255. doi: 10.1134/S0003683813030071
  16. Ivanova A.E., Sukhacheva M.V., Kanat'eva A.Yu., Kravchenko I.K., Kurganov A.A. 2014. Hydrocarbon-oxidizing potential and the genes for *n*-alkane biodegradation in a new acidophilic mycobacterial association from sulfur blocks. *Microbiology*. 83(6): 764–772. doi: 10.1134/S002626171406009
  17. Muangchinda C., Chavanich S., Viyakarn V., Watanabe K., Imura S., Vangnai A.S., Pinyakong O. 2015. Abundance and diversity of functional genes involved in the degradation of aromatic hydrocarbons in Antarctic soils and sediments around Syowa Station. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(6): 4725–4735. doi: 10.1007/s11356-014-3721-y
  18. Lu Z., Deng Y., Van Nostrand J.D., He Z., Voordeckers J., Zhou A., Lee Y.-J., Mason O.U., Dubinsky E.A., Chavarria K.L., Tom L.M., Fortney J.L., Lamendella R., Jansson J.K., D'haeseleer P., Hazen T.C., Zhou J. 2012. Microbial gene functions enriched in the Deepwater Horizon deep-sea oil plume. *The ISME Journal*. 6(2): 451–460. doi: 10.1038/ismej.2011.91
  19. Zhou Y., Wang Y., Yang L., Kong Q., Zhang H. 2023. Microbial degradation mechanisms of surface petroleum contaminated seawater in a typical oil trading port. *Environmental Pollution*. 324: 121420. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121420
  20. Zhou Y., Wang Y., Yao S., Zhao X., Kong Q., Cui L., Zhang H. 2024. Driving mechanisms for the adaptation and degradation of petroleum hydrocarbons by native microbiota from seas

- prone to oil spills. *Journal of Hazardous Materials*. 476: 135060. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135060
21. Patin S.A. 2008. *Neftyanye razlivy i ikh vozdeystvie na morskuyu sredu i bioresursy*. [Oil spills and their impact on the marine environment and living resources]. Moscow, All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography: 508 p. (In Russian).
22. Voskoboynikov G.M., Ilyinsky V.V., Lopushanskaya E.M., Pugovkin D.V. 2008. [Possible role of marine macrophytes in water surface purifying of oil pollution]. In: *Neft' i gaz Arkticheskogo shel'fa – 2008: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii*. [Oil and gas of the Arctic Shelf – 2008: Materials of the International conference (Murmansk, Russia, 12–14 November 2008)]. Murmansk, Murmansk Marine Biological Institute of Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: 63–65. (In Russian).
23. Ryzhik I., Pugovkin D., Makarov M., Roleda M.Y., Basova L., Voskoboynikov G. 2019. Tolerance of *Fucus vesiculosus* exposed to diesel water-accommodated fraction (WAF) and degradation of hydrocarbons by the associated bacteria. *Environmental Pollution*. 254(B): 113072. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113072
24. Makhutov N.A., Lebedev M.P., Bolshakov A.M., Zakharova M.I., Glyaznetsova Yu.S., Zueva I.N., Chalaya O.N., Lifshits S.Kh. 2016. [Forecast of emergencies at oil and gas facilities and elimination of consequences of emergency oil spills in arctic climate]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 4(24): 90–99. (In Russian).

Поступила 20.11.2025

Принята 14.12.2025