УДК 544.723.21
DOI: 10.17277/voprosy.2026.02.pp.019-028

СОРБЕНТ ИЗ ШЕЛУХИ МИНДАЛЬНОГО ОРЕХА КАК СРЕДСТВО ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НЕФТИ

© А. В. Нистратов[1], Д. В. Шушпанова[2]✉, А. А. Курилкин[1], А. А. Воейко[1]

[1] *ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Российская Федерация;*
[2] *ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики», Мытищи, Российская Федерация*
✉ d.shushpanova@eipc.center

Ключевые слова: адсорбция; биоуголь; нефтепродукты; очистка воды; сорбенты; шелуха миндального ореха.

Аннотация: Для борьбы с нефтяными загрязнениями в водных объектах используются различные методы: механический сбор (для ликвидации основной массы разлива) и нанесение на поверхность воды углеродных сорбентов, полученных из растительных материалов (для удаления остаточного загрязнения). Предлагаемым в работе решением является применение биоугля, полученного пиролизом из шелухи миндального ореха при равномерном нагревании до 650 °С за 100 мин и изотермической выдержке в течение 40 мин. Адсорбционные свойства биоугля исследованы в лабораторных условиях. Испытания по очистке пресной и соленой воды от нефти проведены в чашке Петри нанесением пленки нефти на поверхность воды и последующим распределением сорбирующих материалов, включая биоуголь из шелухи миндального ореха. Применимость адсорбента оценена с учетом факторов среды – солености и температуры воды в арктических (полярных) областях. В результате исследования выявлено, что биоуголь из шелухи миндального ореха обладает высокой пористостью, ликвидирует пленку нефти в течение одного часа, а рекомендуемая доза поглотителя составляет 4 г/л (30 г/м^2). Отмечено, что в арктических (полярных) условиях применение сорбента в выбранной дозе обеспечивает видимую ликвидацию пленки нефти. Насыщенный нефтью сорбент сохраняет плавучесть в течение трех суток и легко собирается с поверхности механическим способом.

Введение

Разливы нефти – серьезная проблема для окружающей среды, оказывающая долгосрочное негативное воздействие на береговую линию, морские и наземные экосистемы [1]. В большинстве случаев причиной загряз-

нения морских акваторий нефтью и нефтепродуктами становятся аварии с участием судов, танкеров, бункеровка в портах и морских перевалочных пунктах. По разным оценкам, в Мировой океан ежегодно попадает от 0,5 до 11 млн т сырой нефти и нефтепродуктов [2].

При крушении в Керченском проливе танкеров, перевозивших более 9 тыс. т мазута в декабре 2024 года, разлив нефтепродуктов привел к введению в Крыму и Краснодарском крае режима ЧС федерального значения. Росприроднадзором рассчитан ущерб от крушения, который составил 85 млрд р.[1]

Разлив топлива под Норильском в 2020 году считается одним из самых крупных разливов нефтепродуктов в Арктике. Общая площадь загрязнения составила 180 тыс. кв. м, из 21 тыс. т нефтепродуктов в водные объекты попало порядка 15 тыс. т[2]. Оценка ущерба Росприроднадзором составила 146 млрд р.

Наибольший вред разлив нефтепродуктов наносит популяциям птиц, морских млекопитающих и донных организмов, включая редкие и охраняемые виды. Кроме того, экосистемы арктической зоны, в отличие от южных территорий, более хрупкие и требуют бережного отношения со стороны человека. Поэтому борьба с нефтяным загрязнением пресноводных и морских акваторий является особенно актуальной для недопущения повторных аварий, нарушения экосистем и гибели ценных видов живых организмов.

Одним из наиболее распространенных физико-химических методов очистки акваторий нефти и нефтепродуктов с поверхности воды считается сорбция. Сорбенты могут быть получены из разнообразных исходных материалов, включая природные, синтетические и гибридные. Несмотря на высокую нефтепоглощающую способность синтетических сорбентов, наиболее распространены и имеют более низкую стоимость природные поглотители. Они поддаются биологическому разрушению без значительного ущерба для окружающей среды [3]. Кроме того, сорбенты можно получить из промышленных отходов или побочных продуктов таких процессов.

Для ликвидации последствий разливов нефти в качестве сорбента применяется биоуголь – пористый материал с высоким содержанием углерода, получаемый в результате пиролиза органических соединений в условиях недостатка кислорода [4]. Пористая структура, высокая адсорбционная способность и гидрофобные свойства биоугля делают его высокоэффективным адсорбентом для удаления нефти с поверхности воды. Следует отметить, что биоуголь как сырье доступен в больших количествах и может быть получен из любых растительных материалов и отходов [5, 6].

Цель исследования – получение в лабораторных условиях биоугля из шелухи миндального ореха и его испытание при поглощении разлитой нефти с поверхности воды в зависимости от условий процесса.

---

[1] URL: https://rg.ru/2025/04/04/reg-ufo/nazvany-prichiny-krusheniia-tankerov-v-kerchenskom-prolive-i-summa-ushcherba-ekologii.html (дата обращения: 30.04.2026)

[2] URL: https://www.forbes.ru/obshchestvo-photogallery/402193-krupneyshaya-katastrofa-v-arktike-chto-izvestno-o-razlive-topliva (дата обращения: 30.04.2026)

Объекты и методы исследования

Объект для получения углеродного адсорбента (активного угля) – шелуха миндального ореха (**ШМ**), получаемая в производственном процессе одного из подмосковных пищевых предприятий.

Шелуха миндального ореха (рис. 1, *а*) в исходном воздушно-сухом состоянии подвергалась пиролизу в трубчатом реакторе, закрытым с одной стороны, а с другой – с выходом и конденсацией летучих продуктов. Температурный режим – равномерное нагревание до 650 °С за 100 мин и изотермическая выдержка в течение 40 мин – обеспечивали регулированием мощности электрической печи трансформатором.

Выходы продуктов пиролиза составили: биоуголь (карбонизат) (см. рис. 1, *б*) – 23 масс. %; смола – 46 масс. %; газы – 31 масс. %.

Испытания по очистке воды от нефти (Нижнекамск, Татарстан) (плотность при 20 °С принята равной 0,86 г/см^3) проводились с исходной ШМ, карбонизатом ШМ с размером частиц 1…2 мм, активным углем БАУ (3…5 мм) и листовым полимерным материалом (**ПП**). Контакт фаз осуществлялся в чашках Петри посредством нанесения пленки нефти на поверхность воды и последующего распределения по ней сорбирующих материалов. Добавка нефти составляла 0,5 мл, масса адсорбентов 0,5 г на 50 мл водопроводной воды.

Нефтеемкость сорбентов определялась весовым методом после отделения от воды насыщенных нефтью сорбентов и высушивания их на воздухе (20 °С) до постоянной массы.

Оценка применимости адсорбента в условиях разлива нефти по морской акватории требует испытания с учетом факторов среды: минерализации и низкой температуры воды в полярных областях. С этой целью аналогичные испытания проведены на пробах воды с добавкой морской соли из расчета 35 г/л (модельная морская вода) с температурой 20 и 2 °С.

Количественные эксперименты проводили в трехкратной повторности, статистическую обработку результатов – с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010.



а) *б*)

Рис. 1. Внешний вид миндальной шелухи (*а*) и полученного из нее карбонизата (*б*)

Результаты и обсуждение

Первичная оценка пористой структуры полученного сорбента из ШМ (в таблице 1 приведены средние значения трех образцов) указывает на слабое развитие его микро- и мезопор (по йоду и метиленовому голубому соответственно). По ним продукт значительно уступает промышленным активным углям из древесины (в частности, марки БАУ), но его высокая общая пористость указывает на преобладание макропор, благоприятных для поглощения пленки нефти по принципу адгезии.

Результаты взаимодействия пленки нефти с сорбирующими материалами при (20 ± 2) °С в течение 3 суток без перемешивания показаны на рис. 2.

Сравнительные испытания выявляют преимущество карбонизата ШМ как перед исходной шелухой, так и перед специальным нефтяным сорбентом ПП. Визуально он обеспечивает наиболее полную фиксацию разлитой пленки нефти. Следует отметить, что основное поглощение протекает в первый час контакта, и изучаемый материал сохраняет плавучесть в течение 3 суток, затем легко и полно собирается с поверхности воды.

Нефтеемкость насыщенных нефтью сорбентов в условиях эксперимента составила: шелуха миндаля – 0,18 г/г; карбонизат ШМ – 0,48 г/г; сорбент ПП – 0,64 г/г; активный уголь БАУ – 0,88 г/г. Исходя из результатов, полученный биоуголь имеет среднюю нефтеемкость среди других испытанных средств очистки.

Дальнейшие эксперименты направлены на выбор рациональной дозы и времени контакта полученного образца с загрязненной водой (рис. 3).

Наблюдается резкая, но закономерная зависимость эффективности фиксации нефти от дозы карбонизата ШМ: достаточное для визуально полной очистки количество – 0,3 г на 50 мл (6 г/л). Целесообразно рассмотреть дозу сорбента 0,2 г на 50 мл, изменяя толщину пленки нефти, которая при разливах может варьироваться в широких пределах (рис. 4).

Из наблюдений следует, что эффективность процесса определяется обоими факторами: при меньшей толщине (растекании) пленки карбонизат ШМ поглощает ее практически полностью в течение 1 часа.

Оценка применимости адсорбента в соленой воде, моделирующей морскую воду при температурах 20 °С и 2 °С, представлена на рис. 5.

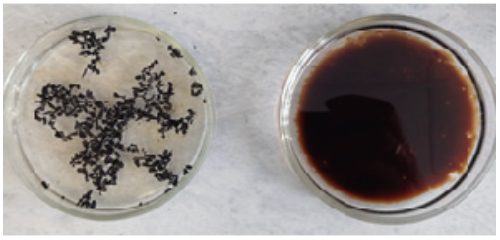
Таблица 1

Некоторые показатели пористой структуры используемых сорбентов

Сорбент	Пористость, %	Активность по йоду, %	Активность по метиленовому голубому, мг/г
Карбонизат ШМ	80	13	4,0
Активный уголь БАУ	40	110	110



Карбонизат ШМ Шелуха миндаля Сорбент ПП Контроль



Активный уголь Контроль

а)



Карбонизат ШМ Шелуха миндаля Сорбент ПП Контроль

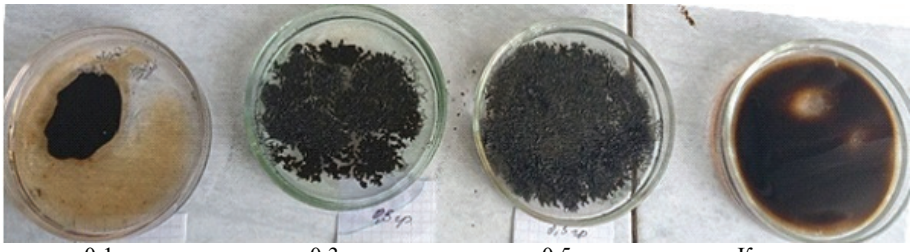
б)



Карбонизат ШМ Шелуха миндаля Сорбент ПП Контроль

в)

Рис. 2. Сравнение различных сорбентов при контакте с загрязненной нефтью водой:
а – 1 ч; *б* – 3 суток; *в* – вода после удаления сорбентов



0,1 г 0,3 г 0,5 г Контроль

Рис. 3. Выбор рациональной дозы сорбента (1 сутки)



12,5 мкм 31,5 мкм 63 мкм 126 мкм

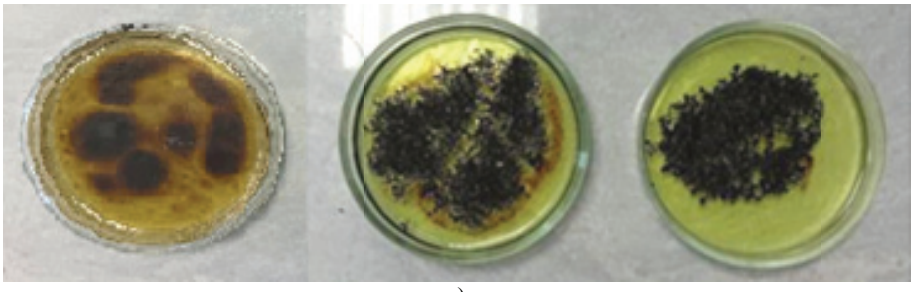
а)



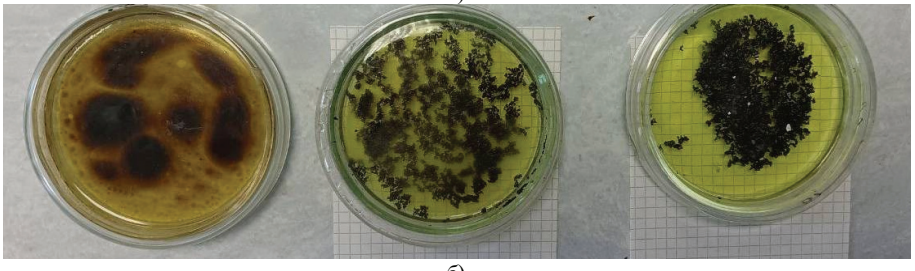
12,5 мкм 31,5 мкм 63 мкм 126 мкм

б)

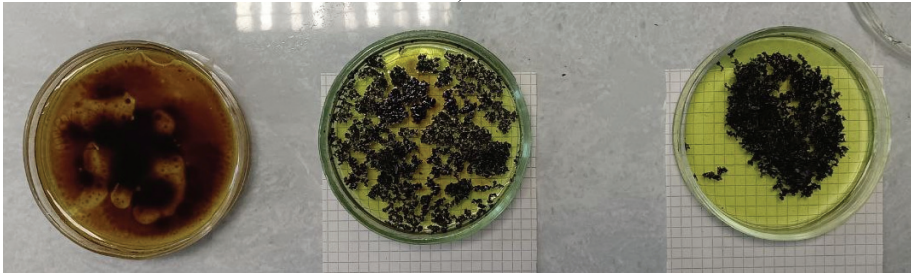
Рис. 4. Влияние толщины пленки нефти на процесс очистки:
а – 15 мин; *б* – 60 мин



а)



б)



в)

Рис. 5. Испытания адсорбента при очистке моделей морской воды:
а – начало; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин (начало)

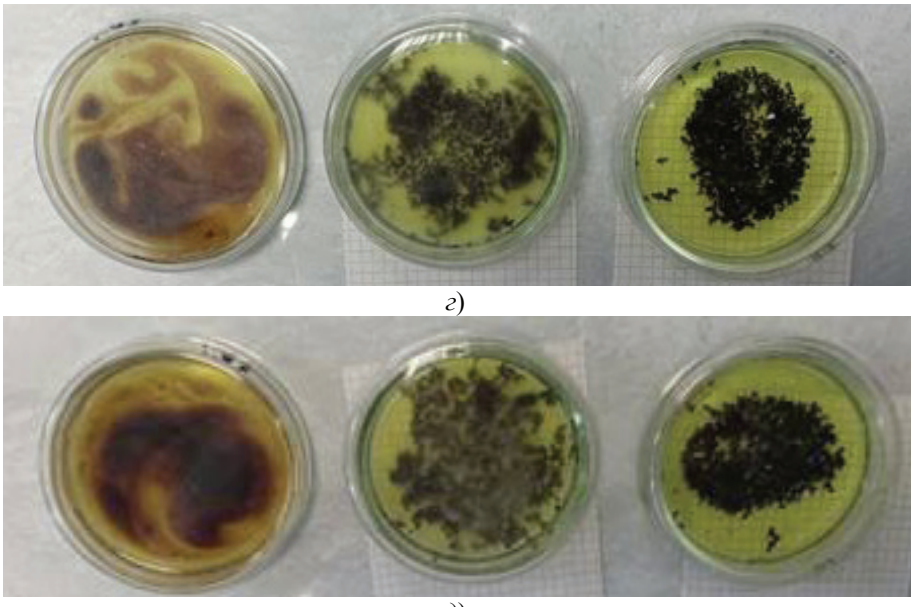


Рис. 5. Испытания адсорбента при очистке моделей морской воды:
г – 30 мин; *д* – 60 мин (окончание)

Наблюдения действия адсорбента в данном опыте свидетельствуют о том, что соленость и низкая температура воды имеют минимальное влияние на степень фиксации пятна нефти за 60 мин, но в холодной воде данный процесс ожидаемо протекает медленнее в связи с замедлением диффузионных явлений. Тем не менее его применение в выбранной дозе 0,2 г на 50 мл или 30 г на 1 м^2 поверхности воды обеспечивает видимую ликвидацию пленки нефти. Отработанный материал легко убирается с поверхности воды механическими устройствами, в частности, сеткой с размером ячейки 0,5 мм.

В связи с малым масштабом производства (килограммы) сорбент из шелухи миндального ореха применим для локальных разливов нефти или очистных сооружений (десятки-сотни м^2). Расчетная доза нанесения сорбента составляет 38…64 г/м^2, что соответствует лабораторным дозам 0,3…0,5 г на чашку Петри.

Заключение

В работе представлена перспектива переработки промышленного отхода (миндальной шелухи) в углеродный сорбент, предназначенный для очистки воды от разливов нефти. Благодаря высокой общей пористости он эффективно ликвидирует пленку нефти, превосходя даже полимерный сорбент ПП, а гидрофобность обеспечивает его плавучесть. Рекомендуемая доза поглотителя – 4 г/л (30 г/м^2), время фиксации нефти – 1 час. Возможное усовершенствование сорбента связано с повышением его выхода при пиролизе или развитием пористой структуры.

Список литературы

1. Oil Spill Response: Existing Technologies, Prospects and Perspectives / M. D. Jayarathna, A. U. Rajapaksha, S. Samarasekara, M. Vithanage // Clean Mat. – 2024. – Vol. 1, No. 20. – P. 78–96. doi: 10.1002/clem.17

2. Lisichkin, G. V. Elimination of Emergency Oil Spills: State of the Art and Problems / G. V. Lisichkin, I. I. Kulakova // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2023. – Vol. 95, No. 9. – P. 1263–1289. doi : 10.1134/S1070427222090014

3. Introduction to Oil Spill And Sorbents // In book: Bio-based Foam Sorbents: For Oil Spill Cleanups / A. A. Lubguban, R. M. Malaluan, G. Dumancas, A. Alguno. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2025. – P. 1–17. doi: 10.1007/978-981-96-1460-8_1

4. Oni, B. A. Significance of Biochar Application to the Environment and Economy / B. A. Oni, O. Oziegbe, O. O. Olawole // Annals of Agricultural Sciences. – 2019. – Vol. 64, No. 2. – P. 222–236. doi: 10.1016/j.aoas.2019.12.006

5. Biochar-Based Engineered Composites for Sorptive Decontamination of Water: A review / K. S. D. Premarathna [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2019. – Vol. 372. – P. 536–550. doi: 10.1016/j.cej.2019.04.097

6. Нистратов, А. В. Разработка основ технологии активных углей на основе отходов полимеров и растительного сырья / А. В. Нистратов, В. Н. Клушин // Proceeding of XVI International Scientific Conference «Machines / Technologies. Maqtewrials 2019». – Borovets, Bulgaria, 2019. – Vol. 1. – P. 115–119.

References

1. Jayarathna M.D., Rajapaksha A.U., Samarasekara S., Vithanage M. Oil Spill Response: Existing Technologies, Prospects and Perspectives, *Clean Mat*., 2024, vol. 1, no. 20, pp. 78-96. doi: 10.1002/clem.17

2. Lisichkin G.V., Kulakova I.I. Elimination of Emergency Oil Spills: State of the Art and Problems, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2023, vol. 95, no. 9, pp. 1263-1289. doi : 10.1134/S1070427222090014

3. Lubguban A.A., Malaluan R.M., Dumancas G., Alguno A. Introduction to Oil Spill And Sorbents, In book: *Bio-based Foam Sorbents: For Oil Spill Cleanups*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2025, pp. 1-17. doi: 10.1007/978-981-96-1460-8_1

4. Oni B. A., Oziegbe O., Olawole O.O. Significance of Biochar Application to the Environment and Economy, *Annals of Agricultural Sciences*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 222-236. doi: 10.1016/j.aoas.2019.12.006

5. Premarathna K.S.D. [et al.]. Biochar-Based Engineered Composites for Sorptive Decontamination of Water: A review, *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 372. pp. 536-550. doi: 10.1016/j.cej.2019.04.097

6. Nistratov A.V., Klushin V.N. *Proceeding of XVI International Scientific Conference "Machines/ Technologies. Maqtewrials 2019"*, Borovets, Bulgaria, 2019, vol. 1, pp. 115-119. (In Russ.)

Almond Husk Sorbent as a Means for Oil Removal from Water

© **A. V. Nistratov[1], D. V. Shushpanova[2]✉,**
A. A. Kurilkin[1], A. A. Voeiko[1]

[1] *D. I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation;*
[2] *Research Institute "Center for Environmental Industrial Policy", Mytishchi, Russian Federation*
✉ d.shushpanova@eipc.center

Keywords: adsorption; biochar; petroleum products; water purification; sorbents; almond husk.

Abstract: Various methods are used to combat oil spills in water bodies: mechanical collection (to eliminate the bulk of the spill) and application of carbon sorbents derived from plant materials to the water surface (to remove residual contaminants). The proposed solution is the use of biochar obtained by pyrolysis of almond husks with uniform heating to 650°C for 100 minutes and isothermal holding for 40 minutes. The adsorption properties of the biochar were studied under laboratory conditions. Tests to remove oil from fresh and salt water were conducted in a Petri dish by applying an oil film to the water surface followed by distributing sorbent materials, including biochar from almond husks. The applicability of the adsorbent was assessed taking into account environmental factors such as salinity and water temperature in Arctic (polar) regions. The study revealed that almond husk biochar has high porosity and removes oil film within one hour, while the recommended absorbent dose is 4 g/L (30 g/m^2). It was noted that under Arctic (polar) conditions, the use of the sorbent at the selected dose ensures visible removal of the oil film. The oil-saturated sorbent remains buoyant for three days and is easily collected from the surface mechanically.

Сведения об авторах

Нистратов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-6089-5497; e-mail: nistratov.a.v@muctr.ru

Шушпанова Джемма Викторовна – научный сотрудник отдела методологии ресурсосбережения, ФГАУ «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»; Мытищи, Московская область, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1722-8744; e-mail: d.shushpanova@eipc.center

Курилкин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-7200-6108; e-mail: kurilkin.a.a@muctr.ru

Воейко Анна Александровна – студент, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Российская Федерация; e-mail: annavoeiko@yandex.ru

About the author

Aleksey V. Nistratov – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology, D. I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-6089-5497; e-mail: nistratov.a.v@muctr.ru

Dzhemma V. Shushpanova – researcher, Resource Saving Methodology Department, Research Institute Environmental Industrial Policy Centre, Mytishchi, Moscow region, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1722-8744; e-mail: d.shushpanova@eipc.center

Alexandr A. Kurilkin – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology, D. I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-7200-6108; e-mail: kurilkin.a.a@muctr.ru

Anna A. Voeiko – student, D. I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: annavoeiko@yandex.ru



© Нистратов А. В., Шушпанова Д. В., Курилкин А. А., Воейко А. А., 2026. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/