

Научная статья
УДК 504.7: 665.7
doi: 10.17223/24135542/39/10

Трансформация насыщенных углеводородов при фитобиоремедиации нефтяного загрязнения

Юрий Валентинович Савиных¹, Софья Павловна Задорожных²

^{1, 2} Институт химии нефти Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия

² Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ savinykh@ipc.tsc.ru

² sony473949@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты лабораторной фитобиоремедиации се-
рой лесной почвы, загрязненной нефтью. Добавление бактерий, выделенных из
пластовых вод нефтяного месторождения, существенно повысило эффективность
очистки почвы. Степень деградации нефти в исходной почве составила 22%, тогда
как в почве с бактериями этот показатель достиг 48%. Проанализировано оста-
точное содержание нефти в почве после фитобиоремедиации и изменения в ее фрак-
ционном составе. В образцах остаточной нефти после биологической обработки
отмечены относительное снижение доли углеводородных фракций и увеличение
содержания полярных смолистых соединений. Хромато-масс-спектрометрический
анализ масляной фракции углеводородов показал изменения в профиле н-алканов
и изопренонидов. В модельных образцах зафиксировано снижение концентраций
 C_{17} и C_{18} , а также увеличение содержания пристана и фитана. Рост геохимических
коэффициентов (Pr/C_{17} , Ph/C_{18} , KI) в образцах с биодеградацией нефти в 3–4 раза
по сравнению с контрольными образцами свидетельствует о высокой степени
микробной активности. Эти данные указывают на преимущественное разрушение
менее стабильных линейных алканов. ИК-спектроскопия смолисто-асфальтеновых
компонентов остаточной нефти выявила значительные изменения в функциональ-
ном составе смол. Наблюдалось повышение интенсивности полос, соответствую-
щих ароматическим кольцам и карбонильным группам, при одновременном сни-
жении характеристик алифатических групп. Это интерпретируется как переход
от насыщенных структур к более окисленным и стабильным. Комплексное при-
менение физико-химических методов анализа позволило не только количе-
ственно оценить снижение содержания нефти в почве, но и проследить изменения
в ее составе и структуре. Полученные результаты подтверждают высокую эффек-
тивность биоремедиационного подхода, основанного на использовании растений-
фиторемедиантов и микроорганизмов-нефтедеструкторов.

Ключевые слова: почва, нефтеагрязнение, ремедиация, микроорганизмы,
остаточная нефть

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания
ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования
Российской Федерации (НИОКР 121031500046-7).

Для цитирования: Савиных Ю.В., Задорожных С.П. Трансформация насыщенных углеводородов при фитобиоремедиации нефтяного загрязнения // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 39. С. 138–146. doi: 10.17223/24135542/39/10

Original article

doi: 10.17223/24135542/39/10

Transformation of saturated hydrocarbons during phytobioremediation of oil pollution

Yuri V. Savinykh¹, Sofia P. Zadorozhnykh²

^{1, 2} *Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

² *Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *savinykh@ipc.tsc.ru*

² *sony473949@mail.ru*

Abstract. This paper presents the results of laboratory phytobioremediation of oil-contaminated gray forest soil. The addition of bacteria isolated from oil field formation waters significantly increased the effectiveness of soil remediation. Oil degradation in the original soil was 22%, while in the soil inoculated with bacteria, this figure reached 48%. The residual oil content in the soil after phytobioremediation and changes in its fractional composition were analyzed. Residual oil samples after biological treatment showed a relative decrease in the proportion of hydrocarbon fractions and an increase in the content of polar resinous compounds. Chromatographic mass spectrometric analysis of the oil fraction of hydrocarbons revealed changes in the profile of n-alkanes and isoprenoids. Model samples showed decreased concentrations of C₁₇ and C₁₈, as well as an increase in the content of pristane and phytane. The increase in geochemical coefficients (Pr/C₁₇, Ph/C₁₈, K_I) in samples with oil biodegradation by 3–4 times compared to control samples indicates a high degree of microbial activity. These data indicate the preferential degradation of less stable linear alkanes. IR spectroscopy of the resin-asphaltene components of residual oil revealed significant changes in the functional composition of the resins. An increase in the intensity of bands corresponding to aromatic rings and carbonyl groups was observed, while the characteristics of aliphatic groups decreased. This is interpreted as a transition from saturated structures to more oxidized and stable ones. The integrated use of physicochemical analytical methods allowed us not only to quantitatively assess the reduction in oil content in the soil but also to track changes in its composition and structure. The results confirm the high effectiveness of the bioremediation approach based on the use of phytoremediant plants and oil-degrading microorganisms.

Keywords: soil, oil pollution, remediation, microorganisms, residual oil

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Physics and Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (R&D 121031500046-7).

For citation: Savinykh, Yu.V., Zadorozhnykh, S.P. Transformation of saturated hydrocarbons during phytobioremediation of oil pollution. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 39, 138–146. doi: 10.17223/24135542/39/10

Введение

Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений сопряжены с рисками аварийных разливов нефти. Восстановление нефтезагрязненных территорий важно не только для сохранения экосистем и поддержания биоразнообразия, но и для обеспечения экологической и промышленной безопасности. В последние годы активно развиваются биологические методы рекультивации с использованием растений, устойчивых к нефтяному загрязнению, – фиторемедиация [1, 2], и микроорганизмов, выделенных из пластовых вод, – биоремедиация [5–9]. В настоящее время наиболее перспективным методом рекультивации почв является использование объединенного метаболического потенциала микроорганизмов и растений, наиболее устойчивых к воздействию нефти, что способствует быстрому восстановлению почвенного покрова и возврату земель в хозяйственный оборот [10–12].

Ранее авторами проведено лабораторное исследование влияния нефтяного загрязнения на растения в присутствии микрофлоры, выделенной из пластовых флюидов нефтяных месторождений [13]. Из отобранных почвенных образцов были выделены и проанализированы остаточные нефтяные компоненты. Результаты данного исследования представлены в настоящей работе.

Объекты и методы

В качестве модели нефтезагрязнения использовалась нефть Самотлорского месторождения, вносимая в почву в концентрации 3,21 мас. % (образец Н6). Для изучения влияния углеводородокисляющих бактерий на процесс разложения нефти их вносили в почву с содержанием нефти 3,21 мас. % (образец НМ6). После сбора растительных образцов проводили экстракцию почвы хлороформом по стандартной методике [14]. Для оценки влияния состава почвы на эффективность экстракции нефти был выполнен контрольный эксперимент: в чистую почву добавляли нефть в концентрации 3,21 мас. % и экстрагировали хлороформом (образец Н0).

Определение группового состава экстрактов проводилось с помощью хроматографа «Градиент». Метод основан на элюировании с использованием последовательно подаваемых растворителей различной полярности [15].

Препартивное выделение компонентов нефти (насыщенные, ароматические углеводороды и смолы) проводили адсорбционной хроматографией на нейтральном оксиде алюминия, активированном при 450°C в течение 3 ч. В качестве элюентов использовали гексан + 7% толуола для десорбции насыщенных и ароматических углеводородов. Для десорбции смол – смесь этанола с толуолом (1:1).

Хромато-масс-спектрометрический анализ (ГХ-МС) углеводородного состава исходной и биодеградированных нефтей проводили на приборе Hewlett Packard 6890/5973 на колонке длиной 30 м, диаметром 0,25 мм с толщиной фазы DB 5MS 0,25 мкм. Газ-носитель – гелий при постоянном расходе 0,8 мл/мин. Программа термостата: начальная температура 80°C (3 мин),

подъем до 300°C (4 град./мин), выдержка при конечной температуре 30 мин. Количественные расчеты сделаны с использованием внутреннего стандарта дейтероаценафтина $C_{12}D_{10}$.

ИК-спектры смол регистрировали в пленке в диапазоне 400–4000 см^{-1} с помощью ИК-Фурье-спектрометра Thermo Scientific Nicolet 5700, оснащенного модулем Рамана (Thermo Electron Corporation, США). Полуколичественный анализ органических соединений проводится с помощью спектральных коэффициентов [16].

Результаты

В табл. 1 представлены результаты определения остаточной нефти в почвах после экстракции.

Таблица 1

Содержание остаточной нефти в образцах почвы после фитобиоремедиации

Образец	H0	H6	HM6
Остаток нефти, % от исходной	97	78	52

Данные показывают максимальную степень биодеградации нефти при использовании микробиального субстрата (образец HM6). Анализ группового состава экстрактов выявил изменение соотношения компонентов – масел и смол (табл. 2).

Таблица 2

Групповой состав остаточной нефти в почве после фитобиоремедиации, % отн.

Образцы	Масла	Смолы	Асфальтены
H0	46	54	0,0
H6	43	57	0,0
HM6	40	60	следы

Уменьшение содержания масел, состоящих преимущественно из насыщенных углеводородов, указывает на их биодеградацию. Изменение содержания смол может быть связано с двумя противоположными процессами. Первый процесс характеризуется увеличением концентрации смол за счет окисления углеводородов из фракции масел и их перехода в полярные соединения, входящие в состав смол. Второй процесс – это биогенное окисление смолисто-асфальтеновых компонентов тяжелой нефти, что подтверждено в работах [17–19].

ГХ-МС-анализ выявил существенное снижение содержания алканов: на 93% в исходной почве и на 99,4% в почве, обогащенной бактериями (табл. 3). Кроме того, зафиксировано уменьшение концентраций изопренонидных алканов – пристана и фитана.

Для оценки степени биодеградации нефти широко распространена практика использования геохимических индексов парафинов по соотношению содержаний пристана, фитана и н-парафинов C_{17} и C_{18} [20]. Полученные результаты (табл. 4) показывают значительный рост изопренонидного

коэффициента Ki : в 4 раза для образца Н6 и в 3 раза для образца НМ6. Уменьшилось содержание н-алканов C_{17} и C_{18} . Меньшие значения Ki , Pr/C_{17} и Ph/C_{18} могут свидетельствовать о способности бактерий к деструкции изо-преноидных УВ. Индекс Wax показывает одинаковое снижение доли низкомолекулярных алканов в этих образцах.

Таблица 3

Изменение содержания алканов в процессе фитобиоремедиации

Алканы	Содержание, мкг		
	Н0	Н6	НМ6
н- C_{13}	492	0	0
н- C_{14}	1 535	14	2
н- C_{15}	1 967	21	2
н- C_{16}	1 876	24	3
Пристан	1 121	81	6
н- C_{17}	1 707	24	3
Фитан	1 541	71	5
н- C_{18}	1 009	12	1
н- C_{19}	1 035	24	3
н- C_{20}	678	20	2
н- C_{21}	666	29	4
н- C_{22}	652	35	4
н- C_{23}	591	47	6
н- C_{24}	580	59	6
н- C_{25}	450	84	10
н- C_{26}	498	89	7
н- C_{27}	306	144	17
н- C_{28}	233	97	6
н- C_{29}	190	117	11
н- C_{30}	144	64	3
н- C_{31}	122	74	5
н- C_{32}	84	36	1
Сумма	17 660	1 237	110

Таблица 4

Парафиновые геохимические индексы фракции масел

Образцы	Парафиновые геохимические индексы			
	$Ki = (Pr + Ph)/(C_{17} + C_{18})$	Pr/C_{17}	Ph/C_{18}	$Wax = 2C_{17}/(C_{17} + C_{27})$
Н0	0,98	0,66	1,53	0,85
Н6	4,17	3,35	5,78	0,14
НМ6	2,76	2,03	4,59	0,14

Гомологи циклогексана также подверглись деградации на 96% в исходной почве и на 99,3% в почве с бактериальной добавкой (табл. 5). Тriterпены и гопаны были полностью разрушены в обеих почвах.

Результаты, свидетельствующие о высокой степени биодеградации углеводородов нефти, обусловлены спецификой состава нефти Самотлорского

месторождения, характеризующейся низкой плотностью и малым содержанием смол. Микроорганизмы, выделенные из попутно добываемых вод данного месторождения, демонстрируют высокую степень адаптации к химическому составу нефти.

Таблица 5

Изменение содержания циклогексанов в процессе фитобиоремедиации

Циклогексаны, Сп	Содержание, мкг		
	Н0	Н6	НМ6
13	32	0,0	0
14	56	0,0	0
15	72	0,0	0
16	62	0,7	0
17	36	1,0	0,3
18	30	2,2	0,4
19	25	1,4	0,5
20	7	2,2	0,2
21	13	1,5	0,3
22	11	1,4	0,4
23	10	1,4	0,3
24	5	1,8	0
25	4	0,9	0
26	4	0,0	0
27	2	0,0	0
Сумма	366	14,7	2,5

Результаты инфракрасной спектроскопии смолистых фракций представлены в табл. 6. Анализ показал снижение алифатичности смол, что выражается в уменьшении коэффициента С4. Это сопровождается увеличением доли ароматических структур, о чем свидетельствуют коэффициенты А1 и А6. Такие изменения указывают на окислительную деструкцию алифатических компонентов смол под воздействием углеводородокисляющих бактерий. В результате данного процесса возрастает относительное содержание простых (Сэф1) и сложных эфиров (Сэф2). Схожие тенденции наблюдаются при биодеградации смол нефти Ашальчинского месторождения [17], где в ходе биодеградации происходят уменьшение доли алкильных фрагментов и увеличение содержания ароматических и кислородсодержащих структур.

Таблица 6

Спектральные коэффициенты фракций смол

Спектральные коэффициенты	Образцы		
	Н0	Н6	НМ6
$A1 = D_{1610}/D_{725}$ – коэффициент ароматичности	2,04	2,05	2,22
$A6 = D_{1610}/D_{1465}$ – содержание ароматических структур	0,34	0,36	0,43
$C_{\text{эф}1} = D_{1170}/D_{1465}$ – содержание простых эфирных групп	0,29	0,40	0,46
$C_{\text{эф}2} = D_{1740}/D_{1465}$ – содержание сложно-эфирных групп	0,44	0,82	0,61
$C4 = (D_{720} + D_{1380})/D_{1600}$ – степень алифатичности	2,27	2,34	1,97

Выводы

1. Внесение микробиального препарата снижает содержание остаточной нефти в почве на 45% по сравнению с исходной почвой.
2. При фитобиоремедиации в остаточной нефти уменьшается содержание насыщенных углеводородов, растет содержание смол.
3. ГХ-МС-анализ выявил существенное снижение содержания алканов: на 93% в исходной почве и на 99,4% в почве, обогащенной бактериями.
4. При фитобиоремедиации в смолах остаточной нефти увеличивается доля ароматических и кислородсодержащих структур, уменьшается доля алкильных фрагментов.

Список источников

1. Зильберман М.В., Порошина Е.А., Зырянова Е.В. Биотестирование почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Пермь : УралНИИ «Экология», 2005. 110 с.
2. Корчагина Л.Е. Функциональные особенности растений верховых болот в условиях нефтяного загрязнения на территории Среднего Приобья // Вестник Нижневартовского государственного университета. Биология и экология. 2015. № 1. С. 14–21.
3. Заболотских В.В., Васильев А.В., Танких С.Н., Карпович Е.Е. Экспериментальные исследования эффективности фиторемедиации почв, загрязненных нефтью, нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Академический вестник ELPIT. 2020. № 5 (12). С. 25–47.
4. Ларionova Н.Л. Устойчивость растений к загрязнению почвы углеводородами и эффект фиторемедиации : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2005. 22 с.
5. Вельков В.В. Биоремедиация: принципы, проблемы, подходы // Биотехнология. 1995. № 3-4. С. 20–27.
6. Овсянникова В.С., Филатов Д.А., Алтунина Л.К., Сваровская Л.И. Биодеструкция углеводородов нефти почвенной микрофлорой // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. № 22. С. 489–495.
7. Тоганбай А.Н., Сарсенбаев С.О., Мусина У.Ш., Джамалова Г.А. Обзор способов биоремедиации нефтезагрязненных почв // Научное обозрение : реферативный журнал. 2018. № 2. С. 16–27.
8. Сулейманов Р.Д., Марыкова А.Л. Оценка метода биоремедиации для восстановления нефтезагрязненных почв // Геолого-инералогические науки. 2022. № 10. С. 5–12.
9. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. № 260. С. 297–312.
10. Ivanova A.A., Vetrova A.A., Filonov A.E., Boronin A.M. Oil biodegradation by microbial-plant associations // Applied Biochemistry and Microbiology. 2015. Vol. 51 (2). P. 196–201.
11. Хайруллина Г.Г., Зайнутдинова Э.М. Очистка почв от нефтепродуктов при помощи растений и ассоциированных с ними микроорганизмами // Актуальные проблемы науки и техники : сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Уфа, 2012. С. 107.
12. Назаров А.В., Иларионов С.А. Потенциал использования микробно-растительного взаимодействия для биоремедиации // Биотехнология. 2005. № 5. С. 58–62.
13. Savinykh Yu.V., Zadorozhnykh S.P., Ovsyannikova V.S. Resistance of different plant species to oil pollution // Contemporary Problems of Ecology. 2025. Vol. 18 (4). P. 570–577.
14. Волкова К.В., Успенская М.В., Глазачева Е.Н. Химия нефти и моторного топлива. СПб. : Ун-т ИТМО, 2015. 89 с.
15. Соколова В.И., Колбин М.А. Жидкостная хроматография нефтепродуктов. М. : Химия, 1984. 139 с.

16. Васильев В.В. Геохимические исследования при поисках нефти и газа : метод. указания. Ухта : УГТУ, 2013. 85 с.
17. Чешкова Т.В., Сагаченко Т.А., Мин Р.С., Коваленко Е.Ю. Биогенное окисление смолисто-асфальтеновых компонентов тяжелой нефти. Сообщение 2. Смолы // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2023. № 66 (11). С. 110–118.
18. Борисова Л.С., Фурсенко Е.А. Влияние процессов биодеградации на состав и строение асфальтенов нефтей Западной Сибири // Георесурсы / Georesources. 2018. № 20 (4), ч. 1. С. 301–307.
19. Сазыкин И.С., Сазыкина М.А., Чистяков В.А., Кленкин А.А., Павленко Л.Ф. Утилизация углеводородов, смол и асфальтенов нефтеокисляющими микроорганизмами Керченского пролива // Вода: химия и экология. 2011. № 1. С. 29–34.
20. Туров Ю.П., Гузяева М.Ю. Идентификация источников нефтяного загрязнения компонентов окружающей среды // Безопасный Север – чистая Арктика : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Сургут : Изд-во СГУ, 2020. С. 211–217.

References

1. Zilberman M.V., Poroshina E.A., Zyryanova E.V. *Bioteстирование почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами* [Biotesting of soils contaminated with oil and oil products]. Perm: FGU UralNII “Ekologiya”, 2005. 110 p.
2. Korchagina L.E. Funktsionalnye osobennosti rastenii verkhoviykh bolot v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya na territorii Srednego Priobya [Functional features of plants in raised bogs under oil pollution conditions in the Middle Ob region]. *Vestnik NGSU. Biologiya i ekologiya*. 2015. No. 1. P. 14-21.
3. Zabolotskikh V.V., Vasiliev A.V., Tankikh S.N., Karpovich E.E. Eksperimentalnye issledovaniya effektivnosti fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh neftyu, nefteproductami i tyazhelyimi metallami [Experimental studies of the effectiveness of phytoremediation of soils contaminated with oil, oil products and heavy metals]. *Akademicheskiy vestnik ELPIT*. 2020. Vol. 5 (12). P. 25-47.
4. Larionova N.L. *Ustoychivost rasteniy k zagryazneniyu pochvy uglevodorodami i effekt fitoremediatsii* [Plant resistance to soil hydrocarbon contamination and phytoremediation effect]: Abstract of Cand. Biol. Sci. diss. Kazan: KSU, 2005. 22 p.
5. Velkov V.V. Bioremediatsiya: printsipy, problemy, podkhody [Bioremediation: principles, problems, approaches]. *Biotehnologiya*. 1995. No. 3-4. P. 20-27.
6. Ovsyannikova V.S., Filatov D.A., Altunina L.K., Svarovskaya L.I. Biodestruktsiya uglevodorodov nefti pochvennoy mikrofloroy [Biodegradation of oil hydrocarbons by soil microflora]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2014. Vol. 22. P. 489-495.
7. Togbay A.N., Sarsenbaev S.O., Musina U.Sh., Dzhamalova G.A. Obzor sposobov bioremediatsii neftezagryaznennykh pochv [Review of bioremediation methods for oil-contaminated soils]. *Nauchnoe obozrenie. Referativnyy zhurnal*. 2018. No. 2. P. 16-27.
8. Suleymanov R.D., Marykova A.L. Otsenka metoda bioremediatsii dlya vosstanovleniya neftezagryaznennykh pochv [Assessment of bioremediation method for restoration of oil-contaminated soils]. *Geologo-mineralogicheskie nauki*. 2022. No. 10. P. 5-12.
9. Sozina I.D., Danilov A.S. Mikrobiologicheskaya remediatiya neftezagryaznennykh pochv [Microbiological remediation of oil-contaminated soils]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2023. Vol. 260. P. 297-312.
10. Ivanova A.A., Vetrova A.A., Filonov A.E., Boronin A.M. Oil biodegradation by microbial-plant associations. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2015. Vol. 51(2). P. 196-201.
11. Khayrullina G.G., Zaynudinova E.M. Ochistka pochv ot nefteproduktov pri pomoshchi rasteniy i assotsiirovannykh s nimi mikroorganizmov [Soil cleaning from oil products using plants and associated microorganisms]. *Aktualnye problemy nauki i tekhniki. Sbornik nauchnykh trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh*. Ufa, 2012. P. 107.

12. Nazarov A.V., Ilarionov S.A. Potentsial ispolzovaniya mikrobro-nastitelnogo vzaimodeystviya dlya bioremediatsii [Potential of using microbial-plant interaction for bioremediation]. *Biotehnologiya*. 2005. No. 5. P. 54.
13. Savinykh Yu.V., Zadorozhnykh S.P., Ovsyannikova V.S. Resistance of different plant species to oil pollution. *Contemporary Problems of Ecology*. 2025. Vol. 18(4). P. 570–577.
14. Volkova K.V., Uspenskaya M.V., Glazacheva E.N. *Khimiya nefti i motornogo topliva* [Chemistry of oil and motor fuel]. SPb: Universitet ITMO, 2015. 89 p.
15. Sokolova V.I., Kolbin M.A. *Zhidkostnaya khromatografiya nefteproduktov* [Liquid chromatography of petroleum products]. Moscow: Khimiya, 1984. 136 p.
16. Vasiliev V.V. *Geokhimicheskie issledovaniya pri poiskakh nefti i gaza* [Geochemical research in oil and gas exploration]: Methodological guidelines. Ukhta: UGTU, 2013. 85 p.
17. Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S., Kovalenko E.Yu. Biogennoye okisleniye smolisto-asfaltenovykh komponentov tyazheloy nefti. Soobshcheniye 2. Smoly [Biogenic oxidation of resin-asphaltene components of heavy oil. Report 2. Resins]. *ChemChemTech*. 2023. Vol. 66(11). P. 119–125.
18. Borisova L.S., Fursenko E.A. Vliyaniye protsessov biodegradatsii na sostav i stroeniye asfaltenov neftey Zapadnoy Sibiri [Influence of biodegradation processes on the composition and structure of asphaltenes in West Siberian oils]. *Georesursy/Georesources*. 2018. Vol. 20(4), Part 1. P. 301–307.
19. Sazykin I.S., Sazykina M.A., Chistyakov V.A., Klenkin A.A., Pavlenko L.F. Utilizatsiya uglevodorodov, smol i asfaltenov nefteokislyayushchimi mikroorganizmami Kerchenskogo proliva [Utilization of hydrocarbons, resins and asphaltenes by oil-oxidizing microorganisms of the Kerch Strait]. *Voda: Khimiya i Ekologiya*. 2011. No. 1. P. 29–34.
20. Turov Yu.P., Guznyaeva M.Yu. Identifikatsiya istochnikov neftyanogo zagryazneniya komponentov okruzhayushchey sredy [Identification of sources of oil pollution of environmental components]. *Bezopasnyy Sever — chistaya Arktika: Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Surgut: Izdatelstvo SGU, 2020. P. 211–217.

Сведения об авторах:

Савиных Юрий Валентинович – академик РАЕ, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: savinykh@ipc.tsc.ru

Задорожных Софья Павловна – техник 1-й категории Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия); аспирант Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sony473949@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Savinykh Yurii V. – Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Doctor of Chemical Sciences, Leading Researcher, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: savinykh@ipc.tsc.ru

Zadorozhnykh Sofia P. – 1st Category Technician, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); Graduate Student at Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sony473949@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.10.2025; принята к публикации 07.11.2025
The article was submitted 01.10.2025; accepted for publication 07.11.2025