

Водные биоресурсы и среда обитания
2023, том 6, номер 3, с. 15–29
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2023, vol. 6, no. 3, pp. 15–29
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК [551.35:552.578](268.52-18)

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_3_15

EDN: BUVKIC



КАЧЕСТВЕННЫЙ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ УГЛЕВОДОРОДОВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Ю. С. Ткаченко, Е. А. Тихонова

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей
имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБИОМ), Севастополь 299011, Россия
E-mail: yulechkatkachenko.90@mail.ru

Аннотация. Проведены исследования поверхностного слоя донных отложений (0–5 см) северо-восточной части Карского моря, отобранных в рейсе НИС «Академик Борис Петров» летом 2022 г. Получены данные о содержании и составе углеводородов (УВ) в донных осадках исследуемой акватории. Поскольку нефть и нефтепродукты являются одним из самых распространенных источников загрязнения морей и океанов, необходимо проводить регулярный мониторинг морских экосистем. Целью данной работы является качественная и количественная оценка УВ в донных отложениях северо-восточной части Карского моря и определение вероятных источников их происхождения. Определение качественного и количественного состава УВ производилось методом газовой хроматографии на хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором. Количественное определение суммарного содержания УВ проводили методом абсолютной калибровки ПИД с помощью смеси УВ, приготовленной гравиметрическим методом. Для обработки результатов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0». Установлено, что общее количество УВ в донных отложениях северо-восточной части Карского моря варьировало от 25,8 до 152,4 мг/кг, в среднем составляя $68,21 \pm 7,76$ мг/кг. По анализу хроматограмм отмечено преобладание высокомолекулярных фракций; максимальное распределение n-алканов приходилось на гомологи n-C₂₅–C₂₉, которые являются маркерами аллохтонного органического вещества. При сопоставлении с рассчитанными диагностическими индексами (CPI₁, CPI₂, ACL, LWH/HWH, TAR, C₃₁/C₂₉, P_{aq}, TMD, $\Sigma C_{25-35}/\Sigma C_{15-21}$, Pr/Ph) установлено, что повышенные концентрации УВ в основном обусловлены природными процессами и преобладанием аллохтонных органических веществ в донных осадках.

Ключевые слова: углеводороды, диагностические индексы, донные отложения, Карское море

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE COMPOSITION OF HYDROCARBONS IN BOTTOM SEDIMENTS IN THE NORTHEASTERN KARA SEA

Yu. S. Tkachenko, E. A. Tikhonova

*FSBIS Federal Research Center "A.O. Kovalevsky Institute of Biology
of the Southern Seas of RAS" (FRC IBSS), Sevastopol 299011, Russia*

E-mail: yulechkatkachenko.90@mail.ru

Abstract. The surface layer (0–5 cm) of the bottom sediments, which samples were collected during the expedition of the RV "Academician Boris Petrov" in the Northeastern Kara Sea in the summer of 2022, has been investigated. Data on the content and composition of hydrocarbons (HCs) in the bottom sediments of the investigated aquatic area have been obtained. Since oil and petroleum products are among the most common sources of pollution of the seas and oceans, it is necessary to conduct regular surveys of marine ecosystems. This work is aimed at a qualitative and quantitative assessment of HCs in the bottom sediments of the Northeastern Kara Sea and identification of their possible sources. Examination of the qualitative and quantitative composition of HCs was carried out by gas chromatography using the gas chromatograph "Crystal-5000.2" with a flame ionization detector. The quantitative determination of the total HC content was conducted by the method of absolute calibration of the FID using a mixture of HCs prepared by the gravimetric method. Chromatec Analytic 3.0 software was used to process the results. It has been found that the total amount of HCs in the bottom sediments of the Northeastern Kara Sea ranged from 25.8 to 152.4 mg/kg, being 68.21 ± 7.76 mg/kg on average. Based on analysis of the chromatograms, the predominance of high-molecular fractions has been identified; the maximum distribution of n-alkanes was represented by homologous compounds $n-C_{25}-C_{29}$, which are the markers of allochthonous organic matter. After comparison with the calculated diagnostic indices (CPI_1 , CPI_2 , ACL , LWH/HWH , TAR , C_{31}/C_{29} , P_{aq} , TMD , $\Sigma C_{25-35}/\Sigma C_{15-21}$, Pr/Ph), it was found that the increased concentrations of HCs mainly result from the natural processes and prevalence of allochthonous organic matter in bottom sediments.

Keywords: hydrocarbons, diagnostic indices, bottom sediments, Kara Sea

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению углеводородов (УВ) в донных отложениях Карского моря обусловлен высокой нефтегазоносностью высокоширотного региона [1]. Акватория данного моря является одной из самых нефтегазоперспективных на арктическом шельфе; на ее долю приходится порядка 25 % всех ресурсов УВ северных морей [1]. В отличие от южной части Карского моря, северная сторона данного региона не изучена глубоким бурением, и оценка перспектив нефтегазоносности исследуемого участка может базироваться только на геологических и геофизических данных [2]. В связи с этим повышен интерес к акватории северной части Карского моря, поэтому есть необходимость регулярно проводить исследования экологического состояния морской воды и донных отложений.

Важной и неотъемлемой частью мониторинга морских экосистем является оценка загрязнения вод и донных отложений нефтепродуктами, поскольку нефть и нефтепродукты относятся к

одним из самых распространенных источников загрязнения морей и океанов [3–5]. Более того, в высокоширотных районах процесс разложения нефтяных углеводородов замедлен из-за широкого спектра природно-климатических условий [6].

За последние годы произошла серьезная трансформация ледового покрова Арктики в связи с климатическими изменениями [7–11], что повлияло на природный углеводородный фон, поэтому изучение УВ в данном регионе приобретает особую актуальность. Для оценки антропогенной нагрузки на акваторию необходимо определить природный углеводородный фон, возникающий в результате естественной жизнедеятельности морских организмов и просачивания нефти с морского дна [6].

Изучение состава, распределения и генезиса УВ в донных отложениях позволяет не только прогнозировать нефтегазоносность недр, но и оценивать экологическое состояние акватории [12]. Нефтяные углеводороды накапливаются на дне водоемов за счет седиментации [13]. Поскольку процес-

сы биохимического окисления в донных осадках протекают гораздо медленнее, чем в воде, часто в них происходит концентрирование веществ антропогенного происхождения; таким образом, бентосные организмы могут накапливать токсичные вещества, в свою очередь являясь вредными для других живых организмов [13, 14]. По этим причинам изучение процессов загрязнения антропогенными УВ донных отложений является важной и неотъемлемой частью экологических исследований водных экосистем.

Целью данной работы является качественная и количественная оценка УВ в донных отложениях северо-восточной части Карского моря и определение вероятных источников их происхождения.

Для идентификации генезиса УВ использованы следующие диагностические индексы: соотношение аллохтонного вещества к автохтонным соединениям (*terrigenous/aquatic ratio*, *TAR*), средняя длина углеводородной цепи (*average chain length*, *ACL*) и отношение содержания низкомолекуляр-

ных *n*-алканов к высокомолекулярным (*low-molecular weight to high-molecular weight homologues ratio*, *LWH/HWH*) [15–19]. Некоторые маркеры позволяют определить, какой тип растительности преобладает в экосистеме, и выявить главный источник поступления УВ, а именно *ACL* (*average chain length*) и C_{31}/C_{29} (отношение вклада травянистой растительности к древесной) [18]. Для выявления нефтяного и биогенного происхождения УВ используются такие индексы, как индекс нечетности PI_1 , рассчитанный для более легких *n*-алканов, и CPI_2 , рассчитанный для высокомолекулярной части спектра, а также *ACL*, *LWH/HWH* [15, 18, 20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили пробы верхнего слоя (0–5 см) донных отложений, отобранные геологической трубкой в летний период 2022 г. на различных участках акватории северо-восточной части Карского моря. Всего было отобрано 16 проб (рис. 1). Глубина пробоотбора

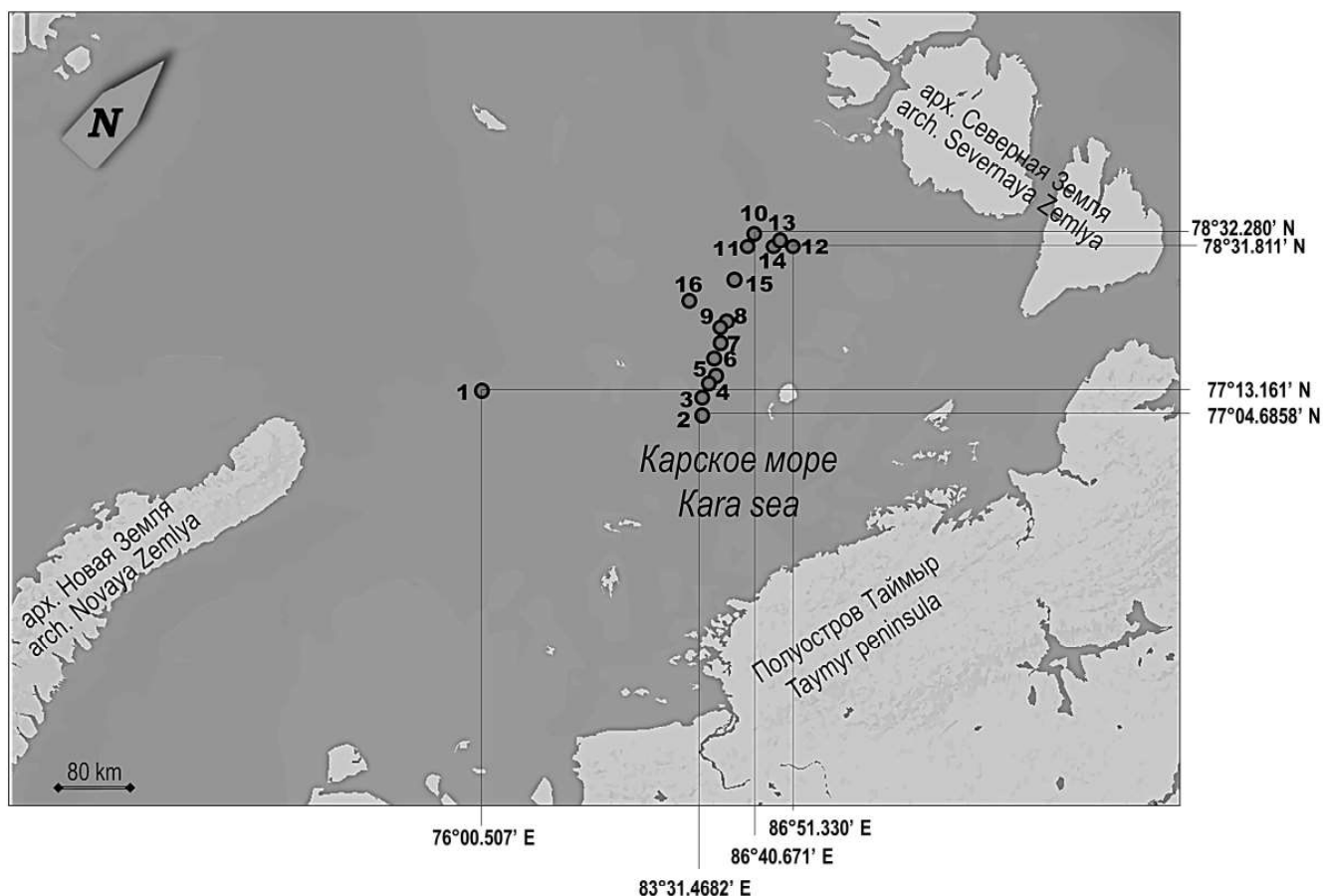


Рис. 1. Схема расположения станций пробоотбора донных отложений северо-восточной части Карского моря
Fig. 1. Outline map of bottom sediment sampling stations in the Northeastern Kara Sea

варьировала от 54 до 151 м. Температура верхнего слоя донных отложений колебалась в пределах от +0,3 до +1,8 °С, значение рН — от 7 до 8.

Отобранные образцы были очищены от камней, водорослей и др., после чего высушены до воздушно-сухого состояния в естественных условиях на судне. Затем пробы растирали в инертной ступке пестиком и просеивали через сито с диаметром ячеек 0,25 мм. После этого образцы помещали в zip-пакеты для дальнейшей транспортировки в лабораторию ФИЦ ИнБЮМ.

Определение УВ в донных отложениях проводили по методике, изложенной в [21]. В коническую колбу помещали навеску пробы (5–7 г), добавляли 20 мл н-гексана и встряхивали в течение 30 минут. После того как экстракт отстоялся (10 мин), его переносили в чистую коническую колбу. Экстракцию повторяли еще 2 раза, на выходе получали 60–70 мл экстракта. Для отделения полярных соединений экстракт пропускали через стеклянную колонку с оттянутым нижним концом, заполненную оксидом алюминия, полученный объем пробы концентрировали до 1 мл в вытяжном шкафу при комнатной температуре.

Определение качественного и количественного состава УВ и н-алканов в донных отложениях производилось на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом газовой хроматографии на хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД).

Аликвоту (1 мкл) полученного экстракта вводили с помощью микрошприца в нагретый до

250 °С испаритель газового хроматографа. Для разделения УВ использовали капиллярную колонку TR-1MS 30 м × 0,32 мм с толщиной неподвижной фазы 0,25 мкм (Thermo Scientific). Разделение УВ обеспечивали следующие условия хроматографической системы: температура детектора — 20 °С; температура колонки программировалась от 70 до 280 °С (скорость подъема температуры 8 °С мин⁻¹); поток газа-носителя (азот) в колонке — 2,5 мл мин⁻¹ без деления потока [21].

Количественное определение суммарного содержания УВ производили методом абсолютной калибровки ПИД с помощью смеси УВ, приготовленной гравиметрическим методом. Рабочий стандартный раствор с концентрацией 1 мг/мл готовили из исходного стандартного раствора разбавлением его н-гексаном. Для разделения углеводородной смеси использовали стандартный образец ASTM D2887 Reference Gas Oil (фирма SUPELCO, США).

Определение содержания н-алканов производили с помощью стандартного образца парафиновых УВ в гексане с массовой концентрацией каждого компонента 200 мкг·мин⁻¹, пристана+фитана — 100 мкг·мин⁻¹ в гексане (фирма SUPELCO, США).

Для обработки результатов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0». Концентрации УВ и н-алканов рассчитывали методом абсолютной калибровки и процентной нормализации.

Для идентификации происхождения УВ использованы следующие диагностические маркеры (табл. 1).

Таблица 1. Основные диагностические индексы для определения генезиса УВ

Table 1. Main diagnostic indices for identification of the genesis of hydrocarbons

Индекс Index	Формула Formula	Источник Reference
1	2	3
TAR	$\sum C_{27} + C_{29} + C_{31} / \sum C_{15} + C_{17} + C_{19}$	[15]
LWH/HWH	$\sum (C_{13} - C_{21}) / \sum (C_{22} - C_{37})$	[19]
ACL	$(27 \cdot C_{27} + 29 \cdot C_{29} + 31 \cdot C_{31} + 33 \cdot C_{33} + 35 \cdot C_{35} + 37 \cdot C_{37}) / (C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35} + C_{37})$	[16]
C_{31}/C_{29}	C_{31}/C_{29}	[18]
Pr/Ph	Pr/Ph	[6]
CPI_1	$(1/2) \{ (C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21}) / (C_{14} + C_{16} + C_{18} + C_{20}) + (C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21}) / (C_{16} + C_{18} + C_{20} + C_{22}) \}$	[20]

Таблица 1 (окончание)

Table 1 (finished)

1	2	3
CPI_2	$CPI_2 = (I/2) \{ (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34}) \}$ $(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33} + C_{35}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34} + C_{36}) \}$	[20]
P_{aq}	$(C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$	[17]
TMD	$(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19} + C_{21} + C_{23})$	[6]
$\Sigma C_{25-35} / \Sigma C_{15-21}$	$(C_{25} + C_{26} + C_{27} + C_{28} + C_{29} + C_{30} + C_{31} + C_{32} + C_{33} + C_{34} + C_{35}) /$ $(C_{15} + C_{16} + C_{17} + C_{18} + C_{19} + C_{20} + C_{21})$	[19]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Донные отложения северо-восточной части Карского моря были представлены плотными песчано-глинистыми алевритами, в основном темно-серого и бурого цвета. Общее содержание в них УВ составило от 25,8 до 152,4 мг/кг со средним значением $68,21 \pm 7,76$ мг/кг. Максимальная их концентрация отмечена на ст. 14, а минимальная — на ст. 3 (рис. 2). Известно, что максимум нефтяных углеводородов концентрируется в донных отложениях на участках с замедленным течением. Размыв загрязненных донных отложений вызывает вторичное загрязнение вод по всей акватории. Повы-

шенные концентрации УВ приводят к ухудшению жизнедеятельности гидробионтов, физиологическим нарушениям, изменению рождаемости, и возможному увеличению смертности; также меняется биомасса и численность организмов [6, 22].

По данным авторов [23] в 2011 г. на разных участках акватории Карского моря среднее содержание УВ в поверхностном слое донных отложений колебалось в пределах 11,3–15,6 мг/кг. В настоящем исследовании среднее значение концентраций УВ превышает в 4 раза максимально зафиксированное в 2011 г. [23]. В 2016 г. в устье р. Обь концентрация данных веществ в донных отложе-

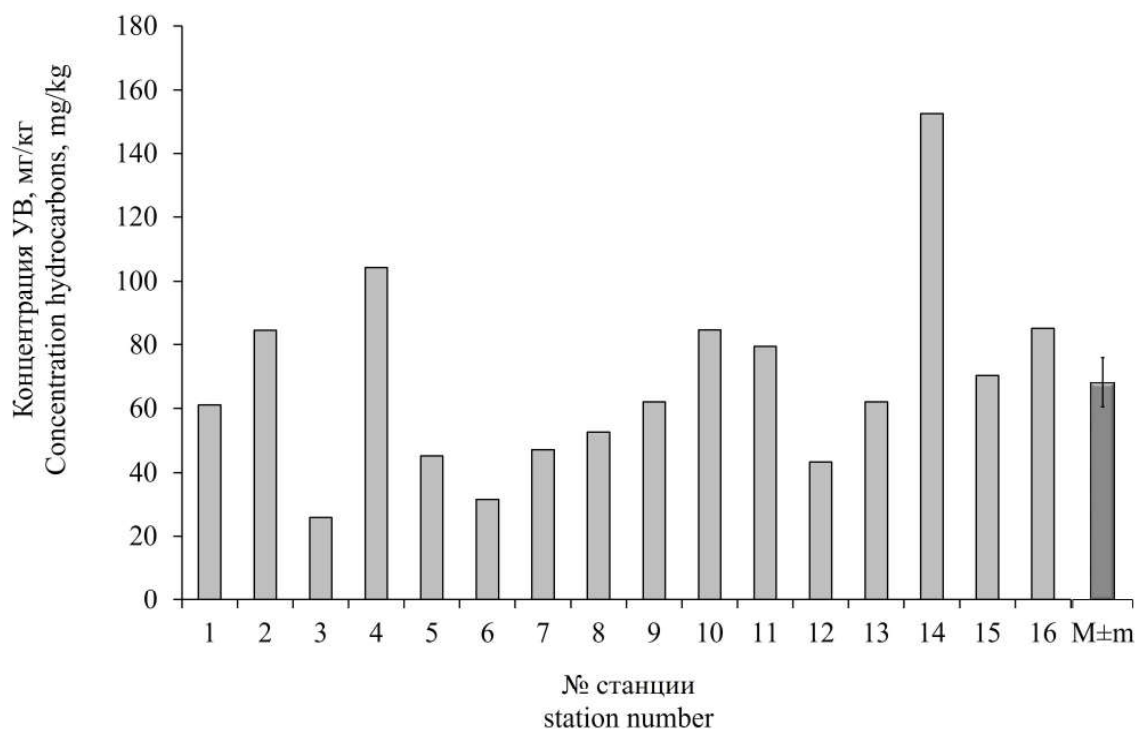


Рис. 2. Концентрация углеводородов в донных отложениях северо-восточной части Карского моря

Fig. 2. Hydrocarbon concentrations in the bottom sediments of the Northeastern Kara Sea

ниях находилась в интервале 3,5–42,6 мг/кг [24]. Так, максимальное значение УВ (42,6 мг/кг) в 1,6 раз меньше среднего значения, зафиксированного нами в настоящем исследовании.

Для сравнения, в Баренцевом море в 2016 г. в донных отложениях поверхностного слоя содержание УВ изменялось в интервале 3–44 мг/кг, а в 2017 г. составило 4–57 мг/кг [25]. К 2020 г. содержание УВ в донных отложениях Баренцева моря возросло и находилось в пределах 3–186 мг/кг [25]. В целом отмечена тенденция к увеличению концентраций УВ в Баренцевом море. Полученные нами величины для УВ в северо-восточной части Карского моря были выше, чем в 2016–2017 гг. в Баренцевом море, а в 2020 г. содержание УВ в Баренцевом море возросло и стало выше, чем в наших исследованиях.

По данным авторов [26, 27], с 2016 по 2022 г. наблюдается рост концентраций УВ как в воде, так и в донных отложениях арктических морей, но в целом превышение их концентраций незначительное и хроническое нефтяное загрязнение отсутствует. Увеличение содержания УВ в северных морях России может быть обусловлено природными процессами, которые важно учитывать [6], поскольку в последние годы существенно меняется климат, что приводит к сокращению площади многолетних льдов и изменению природного углеводородного фона [28, 29]. Ранее [29] в 2020 г. в Карском море было обнаружено аномально раннее освобождение его морского бассейна от сезонного льда. А в сентябре того же года в отдельных районах моря наблюдались очаги высокого обилия планктонных водорослей, находящихся на спорообразующей фазе развития, характерной для летнего сезона [29]. Эти явления могли привести к увеличению содержания УВ в донных отложениях.

Концентрация УВ в морских донных отложениях российскими нормативными документами не регламентируется, поэтому часто для оценки уровня загрязнения донных осадков УВ используют нормы, изложенные в так называемых голландских листах (Dutch Target and Intervention Values: Circular on target values and intervention values for soil remediation, 2000). В соответствии с данными нормами донные отложения северо-восточной части Карского моря превышают допустимый уровень (50 мг/кг) в 68 % проб.

В настоящее время существуют и другие отечественные классификации оценки уровня загряз-

нения донных отложений УВ. Одна из таких — классификация В.И. Уваровой [30]. В соответствии с ней донные осадки могут быть разделены на:

- чистые — 0–5,5;
- умеренно загрязненные — 25,6–55,5;
- загрязненные — 55,6–205,5;
- грязные — 205,6–500,0;
- очень грязные — свыше 500,0 мг/кг.

Согласно данной классификации, донные отложения северо-восточной части Карского моря относятся к умеренно загрязненным — 37 % и к загрязненным — 62 %.

Загрязнение донных осадков нефтяными углеводородами приводит к перестройке бентосных сообществ. Несмотря на то, что бентосные организмы являются более устойчивыми к нефтяному загрязнению, чем планктонные, при нефтяном загрязнении наблюдается бедность видового состава при высокой численности и биомассе выносливых к загрязнению форм. Повышенные уровни УВ могут вызывать изменение качественных и количественных характеристик донных сообществ, увеличение относительного, а иногда и абсолютного количества детритофагов, фитофагов и плотоядных [6, 22].

Также существует мнение о существовании четкой «концентрационной границы» (40–60 мг/кг) нефтяного загрязнения, которую выявляют бактериальные сообщества [31]. Ниже этой границы микробные ценозы «вода–грунт» еще справляются с поступающими в донные отложения органическими веществами и стабилизируют ситуацию. При избыточном количестве нефтепродуктов в донных осадках возрастает численность и биомасса бактерий, и в связи с активной трансформацией и деградацией нефтяных углеводородов изменяется их структура, получают более устойчивые к биологической переработке вещества либо токсичные продукты [31].

Согласно этим данным, в 87 % проб превышена «концентрационная граница» нефтяного загрязнения. Отмечается [23], что обычно в морских донных отложениях фоновые концентрации УВ ниже 50 мг/кг в илистых и 10 мг/кг в песчаных. Если следовать этому правилу, то в 68 % проб концентрации УВ превышают фоновые уровни. Стоит отметить, что все указанные выше подходы не являются определяющими — они носят относительный характер и не позволяют с точностью определить природу нефтяных УВ.

Происхождение УВ отражает состав н-алканов [6]. В донных отложениях северо-восточной части Карского моря идентифицированы н-алканы в диапазоне C_{16} – C_{33} . Гомолог C_{16} был определен на двух станциях — ст. 1 и 5, н-алкан C_{33} идентифицирован во всех образцах, кроме ст. 6 и 7. Остальные гомологи были представлены повсеместно.

В составе н-алканов донных отложений (рис. 3) доминировали нечетные наиболее устойчивые терригенные гомологи n - C_{25} – C_{29} , связанные с наземной растительностью [24]. Количество автохтонных н-алканов в процессе седиментации уменьшается, так как они более подвержены биологическому разложению [32]. К тому же индекс LWH/HWH изменялся в интервале от 0,063 до 0,48 (в среднем 0,27) (табл. 2), что демонстрирует терригенное поступление органического вещества. Отношение C_{17}/C_{25} колебалось в интервале от 0,05

до 0,5 (в среднем 0,22), что указывает на преимущество аллохтонных гомологов [24].

Распределение н-алканов донных отложений на отдельных станциях представлено на рис. 4.

Отмечено преобладание высокомолекулярных фракций. Максимум распределения н-алканов приходится на гомологи C_{25} – C_{29} (рис. 4). При сопоставлении с рассчитанными маркерами (CPI , $\Sigma C_{25-35}/\Sigma C_{15-21}$) видно, что превалирует терригенное происхождение н-алканов.

Сумма гомологов C_{15} – C_{21} (ΣC_{15-21}) дает представление об автохтонных органических соединениях [19]. Сумма н-алканов C_{25} – C_{35} (ΣC_{25-35}) представляет собой преимущественно терригенные вещества. Соотношение этих групп позволяет наиболее точно идентифицировать происхождение органического вещества и при этом исключить влияние других факторов, таких как грануломет-

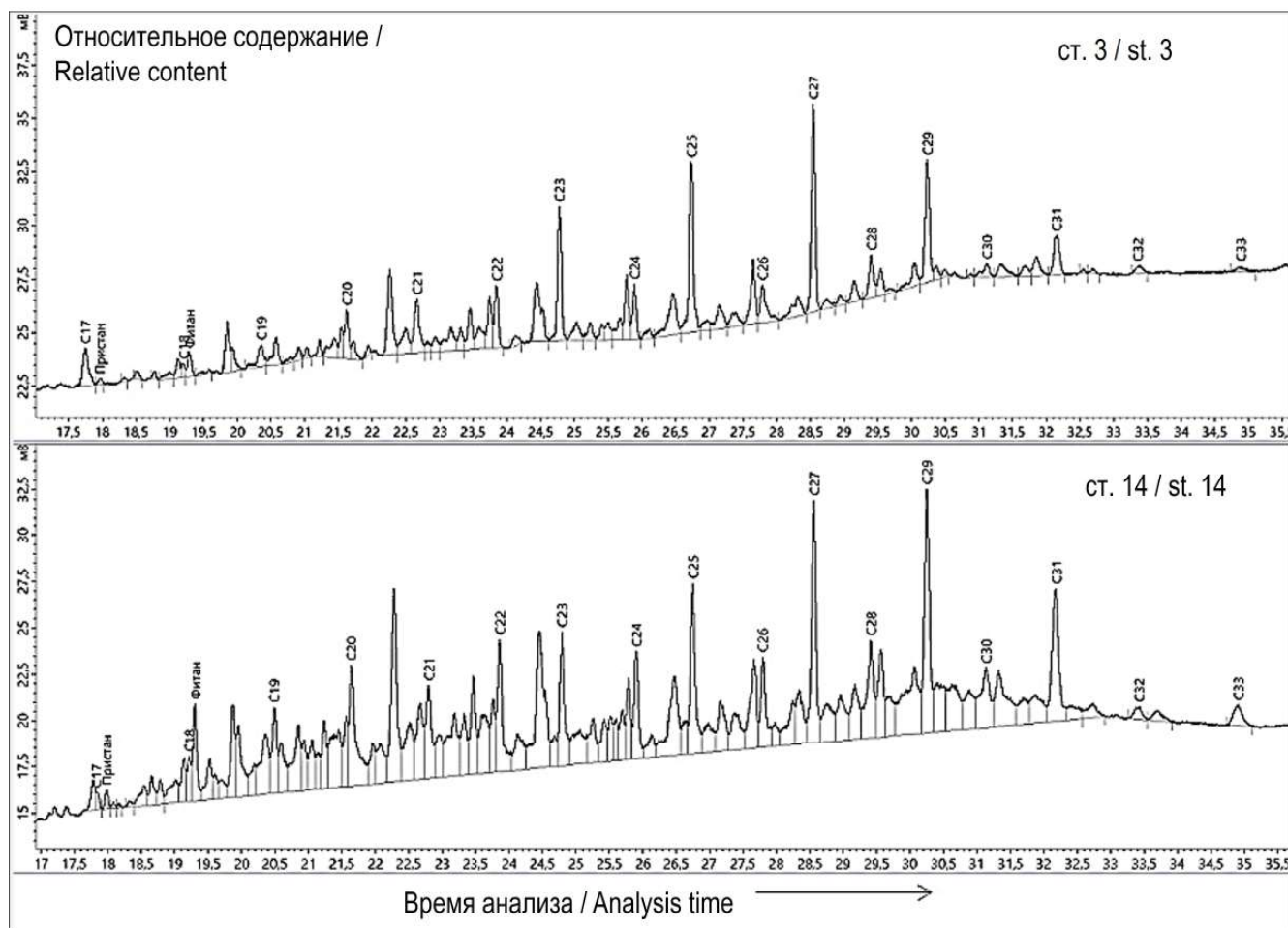


Рис. 3. Характерные хроматограммы н-алканов донных отложений северо-восточной части Карского моря, 2022 г.

Fig. 3. Typical chromatograms of n-alkanes for the bottoms sediments of the Northeastern Kara Sea, 2022

Таблица 2. Содержание n-алканов и диагностические индексы донных отложений северо-восточной части Карского моря
Table 2. Content of n-alkanes and diagnostic indices of the bottom sediments of the Northeastern Kara Sea

№ ст. Station No.	D	C	LWH/HWH	P_{aq}	TAR	ACL	TMD	Pr/Ph	$\Sigma C_{25-33} / \Sigma C_{15-21}$	CPI_1	CPI_2	C_{31}/C_{29}
1	16-33	21,24	0,45	0,625	1,73	27,45	1,36	1,15	1,55	1,23	2,01	0,31
2	17-33	28,09	0,26	0,46	4,61	27,99	2,12	0,08	2,82	0,9	1,61	0,58
3	17-33	11,45	0,23	0,625	4,28	27,31	2,01	0,23	3,23	2,05	3,59	0,42
4	17-33	43,23	0,18	0,5	11,32	27,83	2,82	0,12	4,32	1,17	3,22	0,6
5	16-33	13,69	0,39	0,45	8,85	27,87	2,72	0,6	1,85	0,4	2,12	0,46
6	17-32	12,6	0,16	0,62	4,29	27,12	2,42	0,14	4,72	3,86	2,81	0,47
7	17-32	18,4	0,24	0,66	7,69	27,09	1,78	0,09	3,01	1,49	2,17	0,36
8	17-33	21,33	0,25	0,53	6,66	27,6	2,05	0,04	3,09	1,5	1,91	0,52
9	17-33	19,12	0,32	0,54	4,69	28,15	2,04	0,48	2,4	0,9	1,89	0,64
10	17-33	26,71	0,063	0,37	8,4	28,25	4,38	0,07	12,6	7,04	1,84	0,56
11	17-33	27,56	0,18	0,51	13,81	27,61	3,09	0,25	4,16	0,85	2,43	0,48
12	17-33	14,38	0,38	0,47	4,55	27,94	1,87	0,09	1,94	1,07	3,43	0,55
13	17-33	21,38	0,48	0,52	2,13	27,77	1,28	0,05	1,51	1,69	2,25	0,6
14	17-33	46,18	0,25	0,4	7,33	28,3	2,66	0,15	3,11	0,8	2,11	0,7
15	17-33	22,66	0,25	0,43	4,8	27,88	2,66	0,22	3,26	0,97	1,99	0,46
16	17-33	30,66	0,17	0,38	10,7	28,3	3,29	0,04	4,6	1,41	2,99	0,58

Примечание: D — диапазон идентифицированных n-алканов; C — суммарная концентрация идентифицированных n-алканов, мг/кг
 Note: D — range of identified n-alkanes; C — total concentration of identified n-alkanes, mg/kg

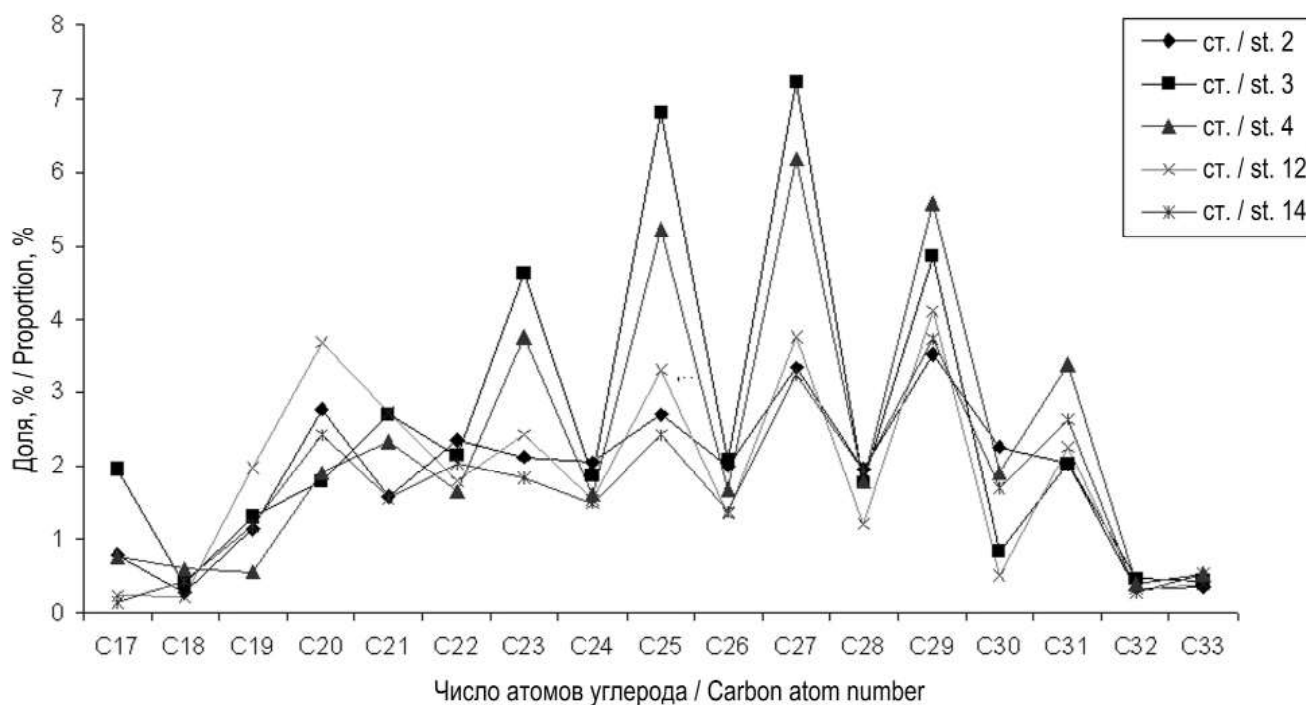


Рис. 4. Распределение n-алканов в донных отложениях на отдельных станциях северо-восточной части Карского моря, 2022 г.

Fig. 4. Distribution of n-alkanes in the bottom sediments at several sampling stations in the Northeastern Kara Sea

рический состав донных отложений и осадко-накопление [17].

Соотношение ($\Sigma C_{25-35} / \Sigma C_{15-21}$) более единицы указывает на сильное влияние терригенного вещества. В данной работе значения этого маркера колебались в интервале 1,55–12,65 (табл. 2). На всех станциях значения индекса значительно превышали единицу с максимумом на ст. 10 ($\Sigma C_{25-35} / \Sigma C_{15-21} = 12,65$), что показывает доминирование аллохтонных органических веществ в образцах.

Отношение изомеров (пристана к фитану), которое маркирует отношение автохтонных (пристан, *Pr*) к нефтяным (фитан, *Ph*) органическим веществам, колебалось в пределах 0,04–1,15 (табл. 2). Судя по значительным колебаниям отношений основных изопреноидов, в верхнем слое осадка интенсивно происходят микробиологические процессы преобразования органического вещества [26].

Еще одним параметром, позволяющим оценить соотношение автохтонных и аллохтонных алканов, является индекс *TAR*. Значения данного маркера варьировали в пределах 1,73–13,81 (табл. 2), в среднем составляя 6,61. Полученное значение

показывает преобладание аллохтонного вещества, поступающего с суши или приносимого с течением рек, поскольку такие крупные реки, как Обь и Енисей, имеют непосредственное влияние на акваторию [6].

При идентификации УВ проводят расчет такого важного показателя, как *CPI*, который указывает на соотношение сумм площадей n-алканов с нечетным числом углеродных атомов к четным [6, 33]. В основе расчета данного индекса используется принцип доминирования нечетных высокомолекулярных n-алканов, источником которых служат растительные объекты. Считается, что при преобладании нефтяных углеводородов значение *CPI* приближается к единице. Группы n-алканов с короткими цепочками обозначаются CPI_1 , а с длинными цепочками — CPI_2 . Индекс нечетности CPI_1 , рассчитанный для более легких n-алканов, колебался в широком диапазоне 0,4–7,04 (табл. 2) со средним значением 1,7. Значение маркера CPI_1 было низким на ст. 5, 11 и 14, на ст. 2, 9, 15 индекс нечетности приближался к 1, а на остальных станциях значение CPI_1 было выше 1. Высокое содержание низкомолекулярных четных n-алканов на указанных участках

акватории может быть результатом микробиологической деструкции органических веществ [6, 34].

Более информативным является маркер CPI_2 , т. к. известно, что при трансформации нефти первыми исчезают легкие *n*-алканы, а содержание более устойчивых высокомолекулярных соединений увеличивается. По этой причине соотношение именно *n*-алканов в высокомолекулярной области является более информативными для определения нефтяного загрязнения [6]. Значения CPI_2 колебались в пределах 1,61–3,59 (табл. 2), в среднем составляя 2,39. На всех станциях значения данного индекса превышали единицу, а следовательно, можно заключить, что нефтяного загрязнения в верхнем слое донных осадков северо-восточной части Карского моря не обнаружено и происхождение УВ имеет биогенную природу. Биогенными источниками поступления УВ в донные осадки являются процессы жизнедеятельности и метаболизма организмов [6].

Большое влияние на формирование качественного состава УВ оказывает древесная и травянистая растительность суши. Основной пик, связанный с травянистой растительностью, выпадает на гомолог C_{31} , а с древесной — в основном на C_{29} [18]. Соотношение этих показателей (C_{29}/C_{31}) варьировало в интервале 0,31–0,7 (табл. 2), в среднем составляя 0,52. Исходя из полученных данных, можно заключить, что в донных осадках в составе аллохтонных компонентов преобладает древесная растительность.

Еще одним индексом, характеризующим доминирование той или иной растительности, является ACL (средняя длина углеродной цепочки *n*-алканов). Высокие значения маркера ACL свидетельствуют о преобладании вклада травянистой растительности в формирование УВ, а низкие значения ACL характерны для УВ древесных растений [18]. Низкие значения ACL могут также являться показателем свежего нефтяного загрязнения [35]. Данный показатель варьировал от 27,06 до 28,3 (табл. 2), в среднем составляя 27,74, что отражает приблизительно одинаковый вклад древесных и травянистых растений в формирование органического вещества донных осадков акватории. Вместе с тем стоит учитывать, что данный подход применим только к «свежему» органическому веществу [6].

Индекс P_{aq} позволяет узнать, какой тип растительности преобладает в донных отложениях: терригенная, погруженные, плавающие или свежие макрофиты [36]. Данный индекс варьировал в пределах от 0,37 до 0,66 (табл. 2), в среднем составляя 0,5. Рассчитанный показатель указывает на наличие деградированной растительности в донных отложениях. Практически на всех станциях обнаружены *n*-алканы, образованные в результате трансформации макрофитов.

Резюмируя вышесказанное, можно заключить, что значения индексов, рассчитанных для донных отложений северо-восточной части Карского моря, указывают на преобладание аллохтонных УВ в верхнем слое донных осадков акватории. Наличие нефтяного загрязнения не обнаружено ни на одной из исследуемых станций.

ВЫВОДЫ

1. Общее количество УВ в донных осадках северо-восточной части Карского моря варьировало от 25,8 до 152,4 мг/кг, в среднем составляя $68,21 \pm 31,04$ мг/кг. Согласно классификации [30], донные отложения относятся к умеренно загрязненным — 37 % и к загрязненным — 62 %. В соответствии с так называемыми голландскими листами донные отложения превышают допустимый уровень (50 мг/кг) в 68 % проб.
2. В составе *n*-алканов донных отложений в основном преобладали высокомолекулярные гомологи, доминировали нечетные наиболее устойчивые терригенные алканы $n-C_{25}-C_{29}$, которые являются маркерами аллохтонного органического вещества.
3. Рассчитанные диагностические индексы указывают на аллохтонное происхождение органического вещества донных отложений, источником которого может служить речной сток, имеющий непосредственное влияние на акваторию. Изменчивость в распределении УВ в донных осадках северо-восточной части Карского моря в основном обусловлена природными процессами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образова-

ния Российской Федерации в рамках плана-программы экспедиционных исследований МГУ имени М.В. Ломоносова по теме «Особенности четвертичного седиментогенеза, рельефообразования и природной флюидоразгрузки на морском дне в северо-восточной части Карского моря» и «Обучения через исследования на Арктическом шельфе», гос. задания ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» «Дополнительное обеспечение системы образования в области морских наук — подготовка молодого кадрового резерва по научно-образовательной программе «Плавающий университет» на основе комплексных исследований морей России и Мирового океана», гос. задания ИО РАН «Обеспечение проведения научных исследований, а также экспериментальных разработок». Лабораторные работы выполнены в рамках гос. задания ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ 121031500515-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конторович А.Э. Пути освоения ресурсов нефти и газа российского сектора Арктики // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85, № 5/6. С. 420–430. doi: 10.7868/S0869587315060171.
2. Конторович В.А., Конторович А.Э. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности шельфа Карского моря // Доклады академии наук. 2019. Т. 489, № 3. С. 272–276. doi: 10.31857/S0869-56524893272-276.
3. Тихонова Е.А. Органическое вещество донных отложений крымского и кавказского побережий (Азовское и Черное моря) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 52–67. doi: 10.22449/2413-5577-2021-3-52-67.
4. Tikhonova E.A., Soloveva O.V., Burdiyan N.V. Assessment of the pollution by organic substances of water and sea bottom sediments of the Kerch Strait and the adjacent Azov-Black Sea water area // Processes in GeoMedia. Vol. 3. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021. Pp. 285–293. doi: 10.1007/978-3-030-69040-3_27.
5. Миронов О.А., Миронов О.Г. Современные данные по загрязнению прибрежной акватории Азово-Черноморского региона России нефтяными углеводородами // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15, № 3. С. 77–85. doi: 10.18470/1992-1098-2020-3-77-85.
6. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013. 432 с.
7. Flint M.V., Poyarkov S.G., Rimskii-Korsakov N.A., Miroshnikov A.Y. Ecosystems of the Siberian Arctic Seas — 2018 (Cruise 72 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh) // Oceanology. 2019. Vol. 59, no. 3. Pp. 460–463. doi: 10.1134/S0001437019030056.
8. Казеннов А.Ю., Нерсесов Б.А., Римский-Корсаков Н.А. Экспедиционные исследования экологии морей Российской Арктики. М.: Изд-во Аналитического центра Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 2018. 307 с.
9. Аксенов П.В., Иванов В.В. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 1 (115). С. 42–54. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54.
10. Алексеева Т.А., Сероветников С.С., Фролов С.В., Соколов В.Т. Ледовые условия плавания в арктическом бассейне в летний период 2018 года // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 31–40.
11. Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Саввичев А.С., Паутова Л.А., Лисицын А.П. Исследование седиментосистем Баренцева моря и Норвежско-Гренландского бассейна в 68-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2019. Т. 59, № 1. С. 173–176. doi: 10.31857/S 0030-157459173-176.
12. Тихонова Е.А., Соловьева О.В., Миронов О.А., Бурдиян Н.В. Санитарно-биологическая характеристика прибрежной акватории ландшафтного заказника «Ласпи» (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 95–106. doi: 10.22449/2413-5577-2020-3-95-106.
13. Котова В.Е. Определение компонентов нефтепродуктов в донных отложениях методом высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофлуориметрическим детектированием : автореф. дис. канд. хим. наук. Воронеж: Изд-во Гидрохимического института, 2020. 21 с.
14. Soloveva O.V., Tikhonova E.A., Gurov K.I., Kotelyanets E.A. Hydrocarbons composition of sea bottom sediments (Balaklava Bay, Black Sea) // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 20. Pp. 2405–2416. doi: 10.1007/s13762-022-04167-y.
15. Silliman J.E., Schelske C.L. Saturated hydrocarbons in the sediments of Lake Apopka, Florida // Organic Geochemistry. 2003. Vol. 34, issue 2. Pp. 253–260. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00169-9.
16. Zhang S., Li S., Dong H., Zhao Q., Lu X., Shi J. An analysis of organic matter sources for surface sediments

- in the central South Yellow Sea, China: Evidence based on macroelements and *n*-alkanes // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 88, issues 1–2. Pp. 389–397. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.07.064.
17. Duan Y. Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nansha Sea, China // *Organic Geochemistry*. 2000. Vol. 31, issues 2–3. Pp. 159–167. doi: 10.1016/S0146-6380(99)00135-7.
 18. Huang X., Meyers P.A., Wu W., Jia C., Xie S. Significance of long chain *iso* and *anteiso* monomethyl alkanes in the Lamiaceae (mint family) // *Organic Geochemistry*. 2011. Vol. 42, issue 2. Pp. 156–165. doi: 10.1016/j.orggeochem.2010.11.008.
 19. Blumer M., Guillard R.R.L., Chase T. Hydrocarbons of marine phytoplankton // *Marine Biology*. 1971. Vol. 8, no. 3. Pp. 183–189. doi: 10.1007/BF00355214.
 20. Lu X., Zhai S. The distribution and environmental significance of *n*-alkanes in the Changjiang River estuary sediments // *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2008. Vol. 28, issue 6. Pp. 1221–1226. (In Chinese).
 21. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов : практическое руководство. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2020. 273 с.
 22. Миронов О.Г., Алемов С.В., Щекатурина Т.Л., Осадчая Т.С., Соловьева О.В., Бурдиян Н.В., Тихонова Е.А., Миронов О.А., Дорошенко Ю.В., Гусева Е.В., Муравьева И.П., Витер Т.В., Волков Н.Г. Санитарно-биологические исследования прибрежных акваторий юго-западного Крыма в начале XXI века. Симферополь: Изд-во Федерального научного центра «Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН», АРИАЛ, 2018. 276 с. doi: 10.21072/978-5-907118-89-8.
 23. Немировская И.А. Изменчивость концентраций и состава углеводородов во фронтальных зонах Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 4. С. 552–562. doi: 10.7868/S0030157415040127.
 24. Немировская И.А. Распределение и происхождение углеводородов на трансарктическом разрезе через моря Сибири // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 2. С. 209–219. doi: 10.31857/S0030157421020155.
 25. Немировская И.А., Храмова А.В., Халиков И.С., Колтовская Е.В., Соломатина А.С. Углеводороды в воде и осадках Норвежского и Баренцева морей // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2021. № 4. С. 94–107. doi: 10.17076/lim1382.
 26. Немировская И.А., Титова А.М., Храмова А.В. Углеводороды в водной толще и донных осадках Баренцева моря // *Система Баренцева моря / Под ред. А.П. Лисицына*. М.: Изд-во Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, ГЕОС, 2021. С. 531–547. doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(35).
 27. Немировская И.А., Реджепова З.Ю., Лисицын А.П. Углеводороды поверхностных вод на трансарктическом разрезе // *Доклады академии наук*. 2019. Т. 483, № 3. С. 345–349. doi: 10.31857/S0869-56524863345-349.
 28. Флинт М.В., Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Мирошников А.Ю. Экосистемы морей Сибирской Арктики — 2019: весенние процессы в Карском море (76-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 1. С. 154–157. doi: 10.31857/S0030157420010104.
 29. Флинт М.В., Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Мирошников А.Ю. Экосистемы морей сибирской Арктики — 2020: Карское море (81-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 2. С. 330–333. doi: 10.31857/S0030157421020040.
 30. Уварова В.И. Современное состояние уровня загрязнения вод и грунтов некоторых водоемов Обь-Иртышского бассейна // *Сборник научных трудов ГосНИОРХ*. 1989. Вып. 305. С. 23–33.
 31. Кузнецова И.А., Дзюбан А.Н. Бактериобентосные сообщества под воздействием нефтяного загрязнения водоемов // *Гидробиологический журнал*. 2006. Т. 42, № 5. С. 88–92.
 32. Беляев Н.А., Поняев М.С. Органическое вещество пограничных зон Карского моря // *Экосистема Карского моря — новые данные экспедиционных исследований : матер. науч. конф. (г. Москва, 27–29 мая 2015 г.)*. М.: Изд-во Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, АПР, 2015. С. 227–231.
 33. Валиев В.С., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р. Нефтяные углеводороды в донных отложениях: состав, идентификация, механизмы трансформации (обзор) // *Российский журнал прикладной экологии*. 2020. № 1 (21). С. 41–51. doi: 10.24411/2411-7374-2020-00001.
 34. Nishimura M., Baker E.W. Possible origin of *n*-alkanes with a remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1986. Vol. 50, issue 2. Pp. 299–305. doi: 10.1016/0016-7037(86)90178-X.
 35. Jeng W.-L. Higher plant *n*-alkane average chain length as an indicator of petrogenic hydrocarbons contamination in marine sediments // *Marine Chemistry*. 2006. Vol. 102, issues 3–4. Pp. 242–251. doi: 10.1016/j.marchem.2006.05.001.
 36. Ficken K.J., Li B., Swain D.L., Eglinton G. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes // *Organic Geochemistry*. 2000. Vol. 31, issues 7–8. Pp. 745–749. doi: 10.1016/S0146-6380(00)00081-4.

REFERENCES

1. Kontorovich A.E. Puti osvoeniya resursov nefti i gaza rossiyskogo sektora Arktiki [Ways of developing oil and gas resources in the Russian sector of the Arctic]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk [Herald of the Russian Academy of Sciences]*, 2015, vol. 85, no. 5/6, pp. 420–430. doi: 10.7868/S0869587315060171. (In Russian).
2. Kontorovich V.A., Kontorovich A.E. Geological structure and petroleum potential of the Kara Sea Shelf. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 489, issue 1, pp. 1289–1293. doi: 10.1134/S1028334X19110229.
3. Tikhonova E.A. Organicheskoe veshchestvo donnykh otlozheniy krymskogo i kavkazskogo poberezh'iy (Azovskoe i Chernoe morya) [Organic matter of bottom sediments of the Crimean and Caucasian coasts (Azov and Black Seas)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 2021, no. 3, pp. 52–67. doi: 10.22449/2413-5577-2021-3-52-67. (In Russian).
4. Tikhonova E.A., Soloveva O.V., Burdiyan N.V. Assessment of the pollution by organic substances of water and sea bottom sediments of the Kerch Strait and the adjacent Azov-Black Sea water area. In: *Processes in GeoMedia. Vol. 3*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021, pp. 285–293. doi: 10.1007/978-3-030-69040-3_27.
5. Mironov O.A., Mironov O.G. Sovremennye dannye po zagryazneniyu pribrezhnoy akvatorii Azovo-Chernomorskogo regiona Rossii neftyanymi uglevodorodami [Current level of oil hydrocarbons in Russian coastal waters of the Black Sea and Azov Sea]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie [South of Russia: Ecology, Development]*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 77–85. doi: 10.18470/1992-1098-2020-3-77-85.
6. Nemirovskaya I.A. Neft' v okeane (zagryaznenie i prirodnye potoki) [Oil in the ocean (pollution and natural flows)]. Moscow: Nauchnyy mir [Scientific World], 2013, 432 p. (In Russian).
7. Flint M.V., Poyarkov S.G., Rimskii-Korsakov N.A., Miroshnikov A.Y. Ecosystems of the Siberian Arctic Seas — 2018 (Cruise 72 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh). *Oceanology*, 2019, vol. 59, no. 3, pp. 460–463. doi: 10.1134/S0001437019030056.
8. Kazennov A.Yu., Nersesov B.A., Rimskiy-Korsakov N.A. Ekspeditsionnye issledovaniya ekologii morey Rossiyskoy Arktiki [Expeditionary surveys of the ecology of the Russian Arctic Sea]. Moscow: Analiticheskiy tsentr Ministerstva nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoy Federatsii [Analytical Center of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation] Publ., 2018, 307 p. (In Russian).
9. Aksenov P.V., Ivanov V.V. “Atlantifikatsiya” kak veroyatnaya prichina sokrashcheniya ploshchadi morskogo l'da v bassejne Nansena v zimniy sezon [“Atlantification” as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen Basin in winter]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2018, vol. 64, no. 1 (115), pp. 42–54. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54. (In Russian).
10. Alekseeva T.A., Serovetnikov S.S., Frolov S.V., Sokolov V.T. Ledovye usloviya plavaniya v arkticheskom bassejne v letniy period 2018 goda [Ice conditions of navigation in the Arctic Basin in summer 2018]. *Rossiyskaya Arktika [Russian Arctic]*, 2018, no. 2, pp. 31–40. (In Russian).
11. Kravchishina M.D., Novigatskii A.N., Savvichev A.S., Pautova L.A., Lisitsyn A.P. Studies on sedimentary systems in the Barents Sea and Norwegian–Greenland Basin during Cruise 68 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh. *Oceanology*, 2019, vol. 59, no. 1, pp. 158–160. doi: 10.1134/S0001437019010053.
12. Tikhonova E.A., Solovyeva O.V., Mironov O.A., Burdiyan N.V. Sanitarno-biologicheskaya kharakteristika pribrezhnoy akvatorii landshaftnogo zakaznika “Laspi” (Chernoe more) [Sanitary and biological characteristics of the Laspi Reserve coastal waters (the Black Sea)]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 2020, no. 3, pp. 95–106. doi: 10.22449/2413-5577-2020-3-95-106. (In Russian).
13. Kotova V.E. Opredelenie komponentov nefteproduktov v donnykh otlozheniyakh metodom vysoko-effektivnoy zhidkostnoy khromatografii so spektrofluorimetriceskimi detektirovaniem : avtoref. dis. kand. khim. nauk [Determination of components of oil products in bottom sediments by high-performance liquid chromatography with spectrofluorimetric detection. Extended abstract of Candidate’s (Chemistry) Thesis]. Voronezh: Gidrokhimicheskiy institut [Hydrochemical Institute] Publ., 2020, 21 p. (In Russian).
14. Soloveva O.V., Tikhonova E.A., Gurov K.I., Kotelyanets E.A. Hydrocarbons composition of sea bottom sediments (Balaklava Bay, Black Sea). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, vol. 20, pp. 2405–2416. doi: 10.1007/s13762-022-04167-y.
15. Silliman J.E., Schelske C.L. Saturated hydrocarbons in the sediments of Lake Apopka, Florida. *Organic Geochemistry*, 2003, vol. 34, issue 2, pp. 253–260. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00169-9.
16. Zhang S., Li S., Dong H., Zhao Q., Lu X., Shi J. An analysis of organic matter sources for surface sediments in the central South Yellow Sea, China: Evidence based

- on macroelements and *n*-alkanes. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 88, issues 1–2, pp. 389–397. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.07.064.
17. Duan Y. Organic geochemistry of recent marine sediments from the Nansha Sea, China. *Organic Geochemistry*, 2000, vol. 31, issues 2–3, pp. 159–167. doi: 10.1016/S0146-6380(99)00135-7.
 18. Huang X., Meyers P.A., Wu W., Jia C., Xie S. Significance of long chain *iso* and *anteiso* monomethyl alkanes in the Lamiaceae (mint family). *Organic Geochemistry*, 2011, vol. 42, issue 2, pp. 156–165. doi: 10.1016/j.orggeochem.2010.11.008.
 19. Blumer M., Guillard R.R.L., Chase T. Hydrocarbons of marine phytoplankton. *Marine Biology*, 1971, vol. 8, no. 3, pp. 183–189. doi: 10.1007/BF00355214.
 20. Lu X., Zhai S. The distribution and environmental significance of *n*-alkanes in the Changjiang River estuary sediments. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, vol. 28, issue 6, pp. 1221–1226. (In Chinese).
 21. Drugov Yu.S., Rodin A.A. *Ekologicheskie analizy pri razlivakh nefi i nefteproduktov : prakticheskoe rukovodstvo* [Environmental analyses of oil and petroleum product spills. Practical guide]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy [Binomial. Laboratory of Knowledge], 2020, 273 p. (In Russian).
 22. Mironov O.G., Alemov S.V., Shchekaturina T.L., Osadchaya T.S., Solovyeva O.V., Burdiyan N.V., Tikhonova E.A., Mironov O.A., Doroshenko Yu.V., Guseva E.V., Muravyeva I.P., Viter T.V., Volkov N.G. *Sanitarno-biologicheskie issledovaniya pribrezhnykh akvatoriy yugo-zapadnogo Kryma v nachale XXI veka* [Sanitary and biological studies of the South-Western Crimea coastal waters at the beginning of XXI century]. Simferopol: Federal'nyy nauchnyy tsentr "Institut biologii yuzhnykh morey imeni A.O. Kovalevskogo RAN" [Federal Research Center "A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS"] Publ., ARIAL, 2018, 276 p. doi: 10.21072/978-5-907118-89-8. (In Russian).
 23. Nemirovskaya I.A. Variability of concentration and composition of hydrocarbons in frontal zones of the Kara Sea. *Oceanology*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 497–507. doi: 10.1134/S0001437015040128.
 24. Nemirovskaya I.A. Distribution and origin of hydrocarbons on a Transarctic transect. *Oceanology*, 2021, vol. 61, no. 2, pp. 183–192. doi: 10.1134/S0001437021020144.
 25. Nemirovskaya I.A., Khrantsova A.V., Khalikov I.S., Koltovskaya E.V., Solomatina A.S. *Uglevodorody v vode i osadkakh Norvezhskogo i Barentseva morey* [Hydrocarbons in water and sediments of the Norwegian and Barents Seas]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences], 2021, no. 4, pp. 94–107. doi: 10.17076/lim1382. (In Russian).
 26. Nemirovskaya I.A., Titova A.M., Khrantsova A.V. *Uglevodorody v vodnoy tolshche i donnykh osadkakh Barentseva morya* [Hydrocarbons in the water column and bottom sediments of the Barents Sea]. In: *Sistema Barentseva morya* [System of the Barents Sea]. A.P. Lisitsyn (Ed.). Moscow: Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN [P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences] Publ., GEOS, 2021, pp. 531–547. doi: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(35). (In Russian).
 27. Nemirovskaya I.A., Redzhepova Z.Yu., Lisitzin A.P. Hydrocarbons of the surface waters in the Transarctic section. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, no. 1, pp. 562–567. doi: 10.1134/S1028334X19050246.
 28. Flint M.V., Poyarkov S.G., Rimsky-Korsakov N.A., Miroshnikov A.Y. *Ecosystems of Siberian Arctic Seas — 2019: Spring processes in the Kara Sea (Cruise 76 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)*. *Oceanology*, 2020, vol. 60, no. 1, pp. 134–137. doi: 10.1134/S0001437020010105.
 29. Flint M.V., Poyarkov S.G., Rimsky-Korsakov N.A., Miroshnikov A.Y. *Ecosystems of Siberian Arctic Seas — 2020: The Kara Sea (Cruise 81 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh)*. *Oceanology*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 292–294. doi: 10.1134/S0001437021020041.
 30. Uvarova V.I. *Sovremennoe sostoyanie urovnya zagryazneniya vod i gruntov nekotorykh vodoemov Ob'-Irtyskogo basseyna* [The current state of the level of pollution of waters and soils of the Ob–Irtys Basin]. *Sbornik nauchnykh trudov GosNIORKH* [Collection of Scientific Papers of the State Research Institute of Lake and River Fisheries], 1989, issue 305, pp. 23–33. (In Russian).
 31. Kuznetsova I.A., Dzyuban A.N. Bacteriobenthic communities influenced by oil pollution of water bodies. *Hydrobiological Journal*, 2007, vol. 43, issue 1, pp. 90–94. doi: 10.1615/HydrobJ.v43.i1.70.
 32. Belyaev N.A., Ponyaev M.S. *Organicheskoe veshchestvo pograniichnykh zon Karskogo morya* [Organic matter of the boundary zones of the Kara Sea]. In: *Ekosistema Karskogo morya — novye dannye ekspeditsionnykh issledovaniy : materialy nauchnoy konferentsii (g. Moskva, 27–29 maya 2015 g.)* [Ecosystem of the Kara Sea — New data collected during expeditionary surveys. Proceedings of the Scientific Conference (Moscow, 27–29 May, 2015)]. Moscow: Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN [P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences] Publ., APR, 2015, pp. 227–231. (In Russian).
 33. Valiev V.S., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. *Neftyanye uglevodorody v donnykh otlozheniyakh: sostav,*

- identifikatsiya, mekhanizmy transformatsii (obzor) [Oil hydrocarbons in bottom sediments: composition, identification, transformation mechanisms (review)]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [*Russian Journal of Applied Ecology*], 2020, no. 1 (21), pp. 41–51. doi: 10.24411/2411-7374-2020-00001. (In Russian).
34. Nishimura M., Baker E.W. Possible origin of *n*-alkanes with a remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, vol. 50, issue 2, pp. 299–305. doi: 10.1016/0016-7037(86)90178-X.
35. Jeng W.-L. Higher plant *n*-alkane average chain length as an indicator of petrogenic hydrocarbons contamination in marine sediments. *Marine Chemistry*, 2006, vol. 102, issues 3–4, pp. 242–251. doi: 10.1016/j.marchem.2006.05.001.
36. Ficken K.J., Li B., Swain D.L., Eglinton G. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 2000, vol. 31, issues 7–8, pp. 745–749. doi: 10.1016/S0146-6380(00)00081-4.

Поступила 02.03.2023

Принята к печати 27.06.2023