

УДК 504.4.054:550.47

## ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДЫ УГЛЕВОДОРОДОВ (НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ)

© 2022 г. И. А. Немировская<sup>1,\*</sup>, А. Ю. Иванов<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 21.06.2022 г.

Поступило 21.06.2022 г.

После доработки 25.07.2022 г.

Принято к публикации 25.07.2022 г.

Данные дистанционного зондирования, полученные спутниками Sentinel-1A и Sentinel-1B в 2016–2021 гг., установили локальное скопление нефтяных slicks в Баренцевом море на 53 радиолокационных изображениях в координатах 75.2–75.3° с.ш. и 31.5–31.8° в.д. Изучение ненарушенного керна в этом районе (ст. 7105, 84 рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”) показало аномальное распределение полициклических ароматических углеводородов – ПАУ, концентрации которых увеличивались в нижних горизонтах колонки, а в их составе доминировал 2-метилнафталин – маркер нефтяного генезиса; при этом в составе алканов повышалась доля легких гомологов. Все это указывает на природное образование углеводородов в осадочной толще моря, и можно утверждать, что группировка нефтяных пятен, обнаруженная по данным спутниковой радиолокации, является природным нефтепроявлением.

*Ключевые слова:* Баренцево море, спутниковый мониторинг, нефтяные слики, органическое вещество, алифатические и полициклические ароматические углеводороды, природные нефтепроявления

**DOI:** 10.31857/S2686739722601168

В последние годы Арктике уделяется все больше внимания, так как на ее шельфе сосредоточены большие ресурсы и запасы полезных ископаемых. Согласно энергетической стратегии, освоение углеводородного ресурсного потенциала континентального шельфа арктических морей и северных территорий – важнейший геополитический и технологический вызов для нефтегазового комплекса РФ [1]. На шельф Баренцева моря приходится 24% от суммарных запасов углеводородов [2]. Поэтому большое внимание уделяется проблеме загрязнения атмосферы, вод и осадков Баренцева моря [3–7]. Для углеводородов (УВ) – соединений природного и антропогенного происхождения – эти исследования особенно актуальны, так как репрезентативно оценить влияние загрязняющих веществ на существующий углеводородный фон весьма сложно [8].

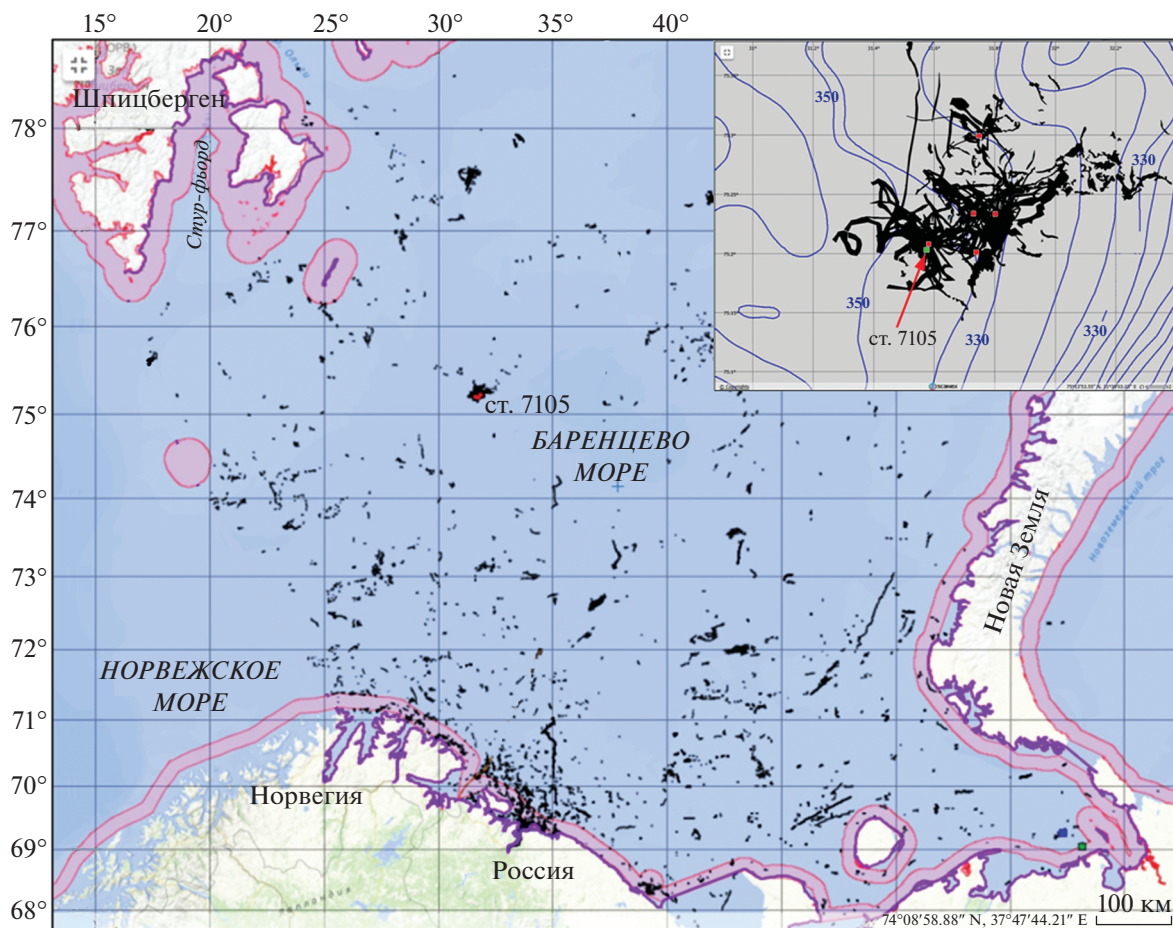
Климатические изменения, которые в Баренцевом море проявляются в большей степени по сравнению с другими районами Мирового океа-

на, способствовали сокращению площади льдов (–6.9% сут<sup>-1</sup>), где даже в зимние месяцы 2003 г. не превышали 50% от площади моря [9]. Запуск в 2014 и 2016 г. европейских радиолокационных спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B дал уникальную возможность получения информации о состоянии поверхности моря (нефтяном загрязнении и ледовой обстановке) с помощью космических данных. Благодаря этому регулярный спутниковый мониторинг Баренцева моря ведется с 2015 г. [10].

Важные особенности Баренцева моря – скопление крупных залежей УВ и наличие протяженных зон выходов метансодержащих растворов и газовых струй из осадочных толщ ([2, 6, 9, 11–14] и др.). Ежедневное всепогодное определение нефтяных пленок на поверхности Баренцева моря основано на сборе и анализе данных радиолокационного мониторинга европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B в режимах Interferometric Wide (IW) и Extra Wide (EW) с разрешением 10 и 40 м и полосой обзора 250 и 400 км [10, 15, 16]. Различия в интенсивности радиолокационного сигнала, рассеянного в области нефтяного пятна (выглаживание мелких ветровых волн) и на поверхности окружающей воды, позволяют выяв-

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: nemir44@mail.ru



**Рис. 1.** Сводная карта нефтяных пленок всех типов (выделены черным цветом), обнаруженных в Баренцевом море в ходе мониторинга в 2015–2021 гг. по данным спутниковой радиолокации. Врезка: пространственно-временная группировка пятен-сликов на поверхности моря, обнаруженных в исследуемом районе; красными точками показаны места выходов нефти на поверхность моря, зеленой — ст. 7105.

лять пленочные (нефтяные) загрязнения моря, включая пятна-слики природного происхождения [15].

В последние годы в ряде мест Баренцева моря с помощью анализа радиолокационных изображений (РЛИ) были обнаружены многочисленные поверхностные нефтепроявления [10, 16]. Скопления нефтяных пленок были обнаружены, как на судоходных путях и в зонах рыболовства (предположительно из-за загрязнения нефтепродуктами), так и в центральной и северной частях моря, которые были проинтерпретированы как природные нефтепроявления [16]. Согласно данным радиолокации характерная группировка пятен-сликов на поверхности Баренцева моря была установлена в 232 км к юго-востоку от о. Хопен и в 370 км к северо-востоку от о. Медвежий (рис. 1). Эти нефтепроявления впервые были обнаружены на РЛИ спутника Sentinel-1A в мае 2016 г., а затем — на последующих изображениях. Нефтепроявления в этом районе были зарегистрированы на

53 РЛИ. Большая часть пятен-сликов имела линейчатую форму, длину от 1 до 23 км; они появлялись в одном и том же месте моря, группируясь в пространстве и создавая характерные веерные структуры (рис. 1, врезка). Индивидуальная площадь пятен изменялась от 0.2 до 20 км<sup>2</sup>.

На основе анализа совокупности пятен в веб-картографическом приложении, обнаруженных на разновременных РЛИ в 2016–2021 гг., сделан вывод о наличии группы из трех–пяти подводных источников нефтяных УВ на дне (грифонов или сипов). Их положение было определено в глубинной части моря (330–345 м) в координатах 75.2°–75.3° с.ш. и 31.5°–31.8° в. д.

В августе 2021 г. в 84 рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в этом районе (ст. 7105, рис. 1) с помощью мультискора (Mini Mus K/MT 410, KUM, Германия) был отобран ненарушенный керн донного осадка. Цель исследования — верифицировать данные дистанционного зондирования, т.е. сопоставить результаты радиолокацион-

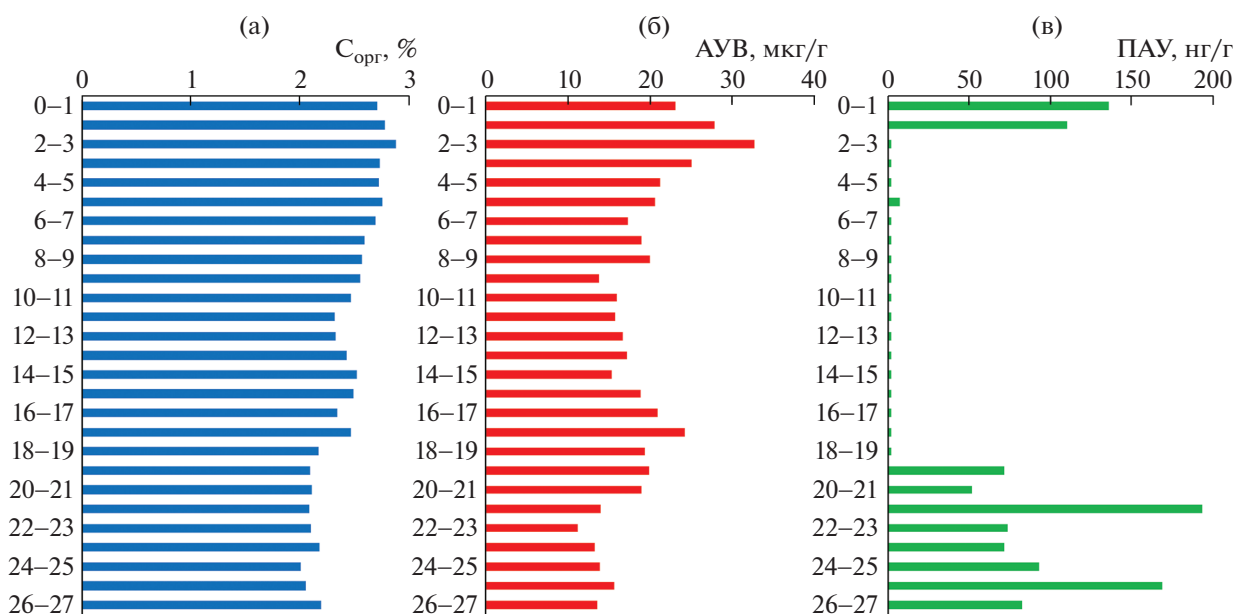


Рис. 2. Распределение (а) –  $C_{\text{орг}}$ , (б) – АУВ и (в) – ПАУ в толще донных осадков на ст. 7105.

ного спутникового мониторинга с результатами анализа содержания и состава УВ (алифатических – АУВ и полициклических ароматических углеводородов – ПАУ) в донных осадках.

Отобранную колонку осадка делили по слоям через 1 см и замораживали до анализа в лаборатории, где пробы сушили при 50°C. Из фракции осадка 0.25 мм экстрагировали УВ ультразвуковым методом метиленхлоридом. Концентрацию АУВ определяли ИК-методом (на спектрофотометре IRAffinity-1 фирмы “Shimadzu”, Япония), алканы – газохроматографическим методом (на хроматографе Кристалл-Люкс 4000-М, РФ), суммарную концентрацию ПАУ – флуоресцентным методом (на приборе “Trilogy”, США), а их состав – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии – ВЭЖХ (на приборе Lab Alliance “Shimadzu”, Япония).  $C_{\text{орг}}$  в донных осадках определяли на приборе ТОС-L, (“Shimadzu”, Япония). Подробности методики описаны в [6].

Отобранный восстановленный донный осадок до глубины 13 см состоял из алевроито-пелитового ила темно-оливкового цвета, переходящий в серый, а глубже прослеживались единичные включения галечного материала. На поверхности и в толще осадка наблюдалось большое количество погонуфоров и их трубок. Осадок на глубине 5 см становится комковатым, с 7 см – в осадке появляются гидротроилитовые примазки и микропрослойки, количество которых увеличивалось с глубиной; с 15 см – осадок уплотнялся, а с 20 см – в осадке появлялся запах сероводорода.

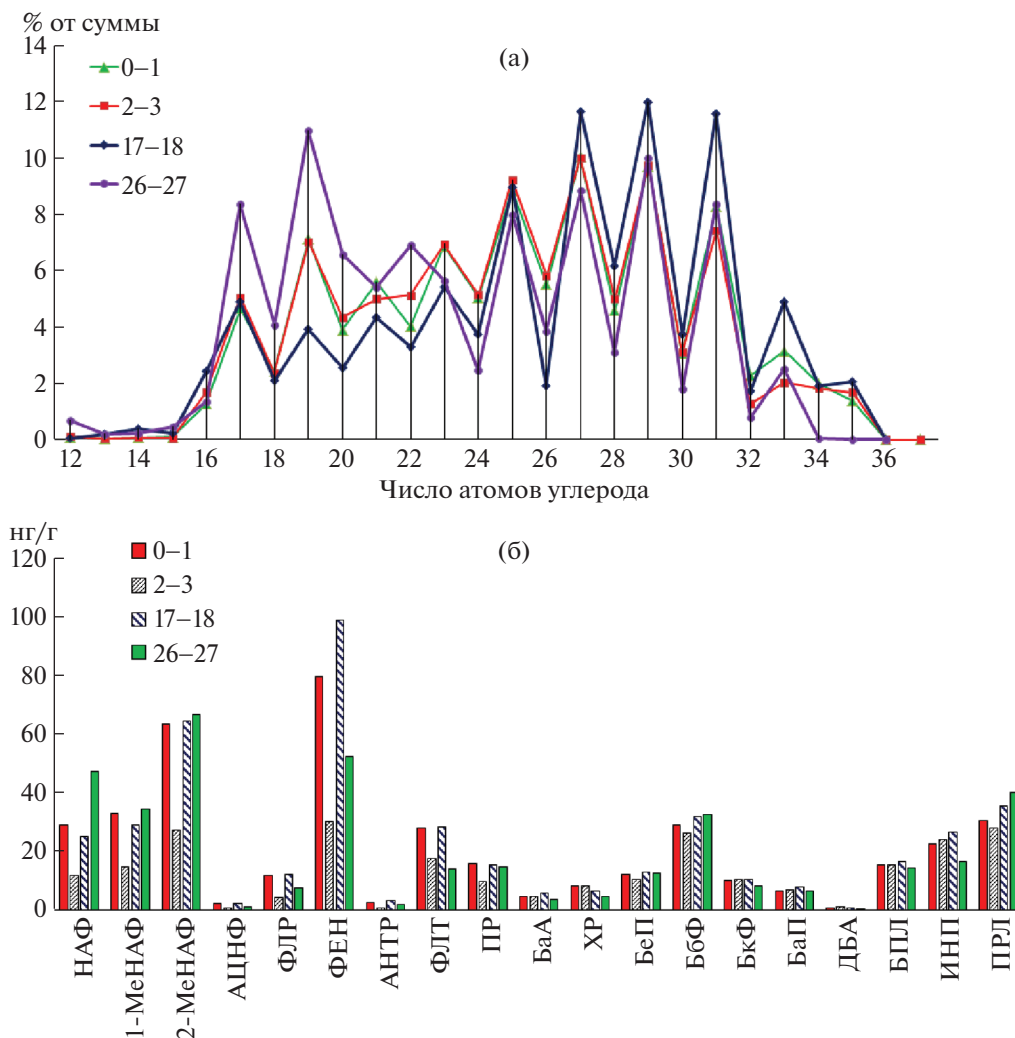
Содержание  $C_{\text{орг}}$  в осадке было довольно высоким как в поверхностных горизонтах, так и в

нижнем (25–27 см) – >2% (рис. 2 а). Их концентрации определялись гранулометрическим составом осадка, и между влажностью осадка и  $C_{\text{орг}}$  установлена зависимость с высоким коэффициентом корреляции ( $r = 0.94$ ,  $n = 26$ ,  $p < 0.05$ ).

Напротив, содержание АУВ было довольно низким (рис. 2 б). Их величины изменялись с 33 мкг/г (гор. 2–3 см) до 11 мкг/г (гор. 22–23 см) и неравномерно снижались с глубиной захоронения. В составе  $C_{\text{орг}}$  доля АУВ не превышала 0.10%, с более высокими величинами на гор. 2–3 и 17–18 см, и между распределением  $C_{\text{орг}}$  и АУВ в толще осадка наблюдалась зависимость ( $r = 0.70$ ,  $n = 26$ ,  $p < 0.05$ ).

В составе алканов (рис. 3 а) доминировали низкомолекулярные гомологи, и отношение L/H (низко- к высокомолекулярным алканам) на горизонте 26–27 см было почти в 2 раза выше (1.21), чем на горизонте 24–25 см (0.61). При этом доминировали n-алканы над изо-соединениями, особенно в нижних горизонтах ( $n-C_{17}/i-C_{19} = 7.92$ ), и пристан в основном преобладал над фитаном –  $i-C_{19}/i-C_{20} = 0.13$  (гор. 18–19 см), 24.4 (гор. 23–25 см). Все это указывает на нетипичный, автохтонный, мало преобразованный состав АУВ в глубинных горизонтах осадков.

Содержание ПАУ в керне осадка изменялось от 2 до 193 нг/г (рис. 3 б). Их концентрации на горизонте 2–3 см уменьшались практически до аналитического нуля, что соответствует обычному их распределению в осадочной толще, так как считается, что главный источник полиаренов – атмосфера [3, 4]. В нижних горизонтах 19–27 см про-



**Рис. 3.** Состав в керне донного осадка на ст. 7105 на разных горизонтах: (а) – алканов и (б) ПАУ: нафталин (НАФ), 1-метилнафталин (1-МеНАФ), 2-метилнафталин (2-МеНАФ), аценафтен (АЦНФ), флуорен (ФЛР), фенантрен (ФЕН), антрацен (АНТР), флуорантен (ФЛТ), пирен (ПР), бенз(а)антрацен (БаА), хризен (ХР), бенз(с)пирен (БеП), бенз(б)флуорантен (БбФ), бенз(к)флуорантен (БкФ), бенз(а)пирен (БаП), дибенз(а,h)антрацен (ДБА), бенз(g,h,i)перилен (БПЛ), индено[1,2,3-c,d]пирен (ИНП), перилен (ПРЛ).

исходило их неравномерное увеличение. Максимальная концентрация ПАУ оказалась не в поверхностном слое, как это обычно наблюдается [4], а в толще донных осадков на горизонте 21–22 см (рис. 2 в).

Изучение состава ПАУ методом ВЭЖХ (рис. 3 б) установило повышенную долю нафталинов, с максимумом на горизонте 26–27 см (39% от суммы ПАУ). Это в достаточной степени неожиданно, так как нафталины – наименее устойчивые соединения в составе ПАУ, которые должны разлагаться в процессе седиментации [17]. Поэтому можно также считать, что они образовались непосредственно в осадочной толще. Причем содержание 2-метилнафталина (маркера нефтяного происхождения полиаренов) превышало в отдельных горизонтах даже концентрацию фенан-

трена, наиболее распространенного полиарена в донных осадках (рис. 3 б) [8, 17]. Повышенные концентрации перилена, содержание которого обычно увеличивается с глубиной захоронения [8], в нижней части колонки осадка ( $\geq 40$  нг/г) было незначительно выше, чем в верхней. Последнее также подтверждает миграционное флюидное образование УВ.

Данные, полученные в 2019–2020 гг., показали, что антропогенное поступление УВ в донные осадки ограничено прибрежными районами, где увеличивается их содержание в составе  $C_{орг}$  [6]. В частности, в 2019 г. при концентрации АУВ 64 мкг/г, а ПАУ – 600 нг/г в песчанистых осадках Канинской банки (при влажности 17.4%), их доля достигала аномально высокого значения в составе  $C_{орг}$ : для АУВ – 11.7%, для ПАУ – 0.13%. Со-

гласно анализу РЛИ в прибрежных районах Баренцева моря было обнаружено большое количество нефтяных пленок, источником которых считается увеличение судоходства, а наибольшее их количество тяготеет к Кольскому заливу [10] (см. также рис. 1).

Кроме того, в 2020 г. на склоне желоба Стурфьорд (Юго-восточный Шпицберген) на глубине 392 м при максимальном содержании АУВ (186 мкг/г) их доля в составе  $C_{орг}$  также оказалась повышенной – 1.18% [6]. В этом районе, согласно гидрофизическим данным, был установлен наиболее мощный флюидный поток. Газовый факел поднимался над дном на высоту более 100 м [18]. Тем не менее на ст. 7105, несмотря на повышенное содержание в осадках  $C_{орг}$ , определены низкие концентрации АУВ. Однако состав алканов и ПАУ был аномальным, что предполагает молекулярную диффузию, т.е. флюидный поток УВ из нижних горизонтов.

Необходимо учитывать, что практически половина (600 тыс. т, 46%) от суммарного поступления в Мировой океан нефтяных УВ составляют не антропогенные источники, а природные, благодаря высачиванию УВ со дна в нефтегазоносных районах [3]. Сведения о составе и фоновых концентрациях этих высачивающихся УВ довольно противоречивы. Предполагается существование нескольких типов систем, в которых может происходить поступление УВ из толщи осадков. Обычно высачивается нефть с низкой температурой застывания и в ее составе обнаружены, как и на ст. 7105, низкомолекулярные биогенные УВ.

Таким образом, результаты исследования УВ в донных осадках на ст. 7105, выполненные в месте обнаружения нефтепроявлений, указывают на их природное образование в осадочной толще, что определяет специфику их поведения. В связи с этим можно утверждать, что наличие группы сликов, обнаруженных по данным спутниковой радиолокации, имеет природное происхождение. Это заключение подтверждено независимыми исследованиями содержания и состава УВ в осадочной толще. Кроме того, известно, что в акваториях, где возможны потоки нефти со дна, скорость их высачивания значительно меняется во времени и пространстве [19]. Скорее всего, этим обусловлена изменчивость в количестве нефтяных пятен-сликов на поверхности в этом районе Баренцева моря от года к году.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят руководство 84 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” М.Д. Кравчишину и А.А. Ключиткина за организацию отбора проб на

ст. 7105, А.В. Храмову за помощь в проведении анализов и оформлении статьи.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ: тема № FMWE-2021-0006 – геохимические исследования, тема № FMWE-2021-0001 – обработка и анализ спутниковых данных; обобщение материала – при поддержке Российского научного фонда: проект № 19-17-00234-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена Правительством РФ № 1523-р от 9.06 2020 г.
2. Каминский В.Д., Супруненко О.И., Смирнов А.Н. и др. Современное ресурсное состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы шельфовой области Российской Арктики // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 136–142.
3. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Ch. 4. Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo, 2007. 87 p.
4. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme): Chemicals of Emerging Arctic Concern. 2016. Oslo, 2017. 353 p.
5. Dahle S., Savinov V., Petrova V., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Norwegian and Russian Arctic marine sediments: concentrations, geographical distribution and sources // Norwegian J. Geol. 2006. V. 86. № 1. P. 41–50.
6. Nemirovskaya I.A., Khramtsova A.V. Features of the Hydrocarbon Distribution in the Bottom Sediments of the Norwegian and Barents Seas // Fluids. 2021. 6 (456). <https://doi.org/10.3390/fluids6120456>
7. Raut J.-C., Law K.S., Onishi T., et al. Impact of shipping emissions on air pollution and pollutant deposition over the Barents Sea // Environ. Poll. 2022. V. 298. 118832. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118832>
8. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Науч. мир, 2013. 432 с.
9. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Углерод в Мировом океане. М.: ГЕОС, 2021. 352 с.
10. Ivanov A.Yu., Kucheiko A.Yu., Ivonin D.V., et al. Oil spills in the Barents Sea: The results of multiyear monitoring with synthetic aperture radar // Mar. Poll. Bull. 2022. 179. 113677. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113677>
11. Глянцева Ю.С., Немировская И.А. Особенности распределения битумоидов в донных осадках Баренцева моря // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 945–953. <https://doi.org/10.31857/S0030157420050068>
12. Григоренко Ю.Н. Зоны нефтегазоаккумуляции как объект накопления и прогноза // Нефтегазовая

- геология. Теория и практика. 2016. № 4. [http://www.ngtp.ru/rub/6/49\\_2016.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/6/49_2016.pdf).
13. Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В. и др. Углеводороды в донных осадках Штокмановской площади – распределение, генезис, временные тренды // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2015. Т. 10. № 3. URL: [http://www.ngtp.ru/rub/1/35\\_2015.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/1/35_2015.pdf).
  14. Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю. и др. Поиск и обнаружение естественных нефте проявлений в морях России по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 43–62. <https://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
  15. Матросова Е.Р., Ходаева В.Н., Иванов А.Ю. Определение характеристик естественных нефте проявлений и их подводных источников по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 2. С. 3–27.
  16. Иванов А.Ю. Естественные нефте проявления в Каспийском и Баренцевом морях: обнаружение и анализ по данным дистанционного зондирования // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 5. С. 52–64.
  17. Tolosa I., Mora S., Sheikholeslam M.R., et al. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // Mar. Pollut. Bull. 2004. 48. P. 44–60. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00255-8)
  18. Кловиткин А.А., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Кравчишина М.Д. Исследования Европейской Арктики в 80-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 156–158. <https://doi.org/10.31857/S0030157421010093>
  19. Патин С.А. Нефтяные разливы и их воздействие на морскую среду и биоресурсы. М.: ВНИРО, 2008. 507 с.

## VERIFICATION OF REMOTE SENSING DATA FOR DETERMINING THE NATURE OF HYDROCARBONS (ON THE EXAMPLE OF THE BARENTS SEA)

I. A. Nemirovskaya<sup>a,#</sup> and A. Yu. Ivanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: [nemir44@mail.ru](mailto:nemir44@mail.ru)

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovskiy June 21, 2022

Remote sensing data obtained by the Sentinel-1A and Sentinel-1B satellites in 2016–2021 established a local accumulation of oil slicks in the Barents Sea on 53 SAR images at the area with coordinates 75.2–75.3° N and 31.5–31.8° E. The study of an undisturbed core in this area (station 7105, 84th cruise of the R/V Akademik Mstislav Keldysh) showed an anomalous distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons – PAHs, the concentrations of which increased in the lower horizons of the column, and 2-methylnaphthalene dominated in their composition – a marker of oil genesis; at the same time, the proportion of light homologues in the composition of alkanes increased. All this points to their natural formation of hydrocarbons in the sea sediments, and it can be argued that the group of oil slicks, detected by satellite radar data, is a natural oil seep.

**Keywords:** Barents Sea, satellite monitoring, oil slicks, organic matter, aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons, natural oil flow