

УДК 550.47:556.54

ПРОИСХОЖДЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ В ГОЛОЦЕНОВЫХ ОСАДКАХ НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОГО БАССЕЙНА И БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2025 г. И. А. Немировская*, А. В. Медведева

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

** e-mail: nemir@ocean.ru*

Поступила в редакцию 18.04.2024 г.

После доработки 10.06.2024 г.

Принята к публикации 03.10.2024 г.

Определены концентрации и состав углеводородов (алифатических – АУВ и полициклических ароматических углеводородов – ПАУ) в голоценовых осадках Норвежско-Гренландского бассейна и Баренцева моря (по материалам 84-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, лето 2021 г.). Установлен большой диапазон концентраций в поверхностных донных осадках: $C_{орг}$ (0.25–2.71%), АУВ (7–182 мкг/г) и ПАУ (0–1918 нг/г). Распределение углеводородов определяют в основном процессы, происходящие в осадочной толще (изменение окислительно-восстановительного потенциала и флюидные потоки), в меньшей степени – литотип осадков. При этом в составе алканов наблюдается образование автохтонных гомологов, а в составе ПАУ – нафталинов.

Ключевые слова: алифатические и полициклические ароматические углеводороды, Норвежско-Гренландский бассейн, Баренцево море, донные осадки, флюидные потоки

DOI: 10.31857/S0030157425010068, **EDN:** DQAKHK

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместное распространение в водных объектах углеводородов (УВ), активное их участие в физико-химических и биохимических процессах, взаимодействие с водными организмами, а также поступление нефтяных УВ из различных источников приводит к сложностям в определении их происхождения [7, 17, 41–43]. Согласно данным дистанционного зондирования, полученным радиолокационными спутниками Sentinel-1A и Sentinel-1B, наличие нефтяных пленок на поверхности моря может указывать не только на антропогенный, но и на природный источник их поступления [8, 26].

При инвентаризации источников нефтяных УВ в Мировом океане был сделан вывод, что основная их доля (46% от суммы 1300 тыс. т) поступает в результате естественного высачивания на дне из подстилающей осадочной толщи [17]. Баренцево и Норвежское моря относятся к наиболее крупным нефтегазоносным бассейнам Арктики [3], на побережье которых, активно ведется хозяйственная деятельность [11, 20]. Здесь расположены урбанизированные территории, порты, нефтеперегрузочные терминалы и, соответствен-

но, концентрируются загрязняющие вещества, попадающие со стороны берега и образующиеся в самом море в результате хозяйственной деятельности человека [5, 18].

Для надежной оценки антропогенных УВ в морской среде необходимо установить места и масштабы природных нефтепроявлений в море, и оценить природный углеводородный фон, на который это загрязнение накладывается. Поэтому исследование УВ становится в настоящее время особенно актуальным и необходимым этапом в экологическом мониторинге морей Арктики для последующего геоэкологического контроля при геолого-разведочных работах и добыче полезных ископаемых [7, 12, 17, 18, 31]. Кроме того получение достоверных оценок характеристик УВ и их роли в углеродном балансе океана является одной из важных задач по созданию системы мониторинга климатических изменений [13].

Цель настоящего исследования – определить концентрации и состав УВ (алифатических – АУВ и полициклических ароматических углеводородов – ПАУ) в донных осадках Норвежско-Гренландского бассейна и Баренцева морей для установления их происхождения.

В августе 2021 г. в 84-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” исследованиями были охвачены следующие районы [4, 10]: глубоководная часть Гренландской котловины, северная часть Восточно-Гренландского хребта, приразломная зона в районе соединения хребтов Мона и Книповича, Западная и Северо-Западная оконечности континентального шельфа Шпицбергена (хребет Вестнеса, бассейн Софии и трог Хинлопен), пролив Фрама, район желоба Орли с пересечением трога Эрик-Эриксона и центральная часть Баренцева моря (рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы донных осадков отбирали дночерпателем “Океан-50”, а колонки ненарушенных осадков – с помощью мультикорера (Mini Muc K/MT 410, KUM, Германия), которые делили по слоям и замораживали до анализа в лаборатории. Мощность вскрытого слоя осадков варьировала от 1 см (дночерпатель) до 32 см (мультикорер). Пробы осадков сушили при 50°C, и из фракции осадка < 0.25 мм экстрагировали УВ ультразвуковым

методом метиленхлоридом (все используемые растворители имели квалификацию о. с. ч.).

Концентрацию АУВ определяли ИК-методом на спектрофотометре IRAffinity-1 фирмы Shimadzu, Япония; алканы – газохроматографическим методом на хроматографе Кристалл-Люкс 4000-М (Россия); концентрацию ПАУ – методом флуориметрии [15] на приборе “Trilogy” фирмы Turner (США), а их состав – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на приборе Shimadzu LC-20, Япония: колонка – “Envirosep PP”, при температуре термостата 40°C в градиентном режиме от 50% до 90% объемной доли ацетонитрила в воде, скорость потока элюента – 1 см³/мин. При этом использовали флуоресцентный детектор “RF-20A” с программируемыми длинами волн возбуждения и детектирования. Расчет проводили с помощью программного обеспечения “LC Solution”. Калибровали прибор при помощи индивидуальных ПАУ и их смесей производства фирмы “Supelco” (Merck, Германия). В результате были идентифицированы приоритетные полиарены,

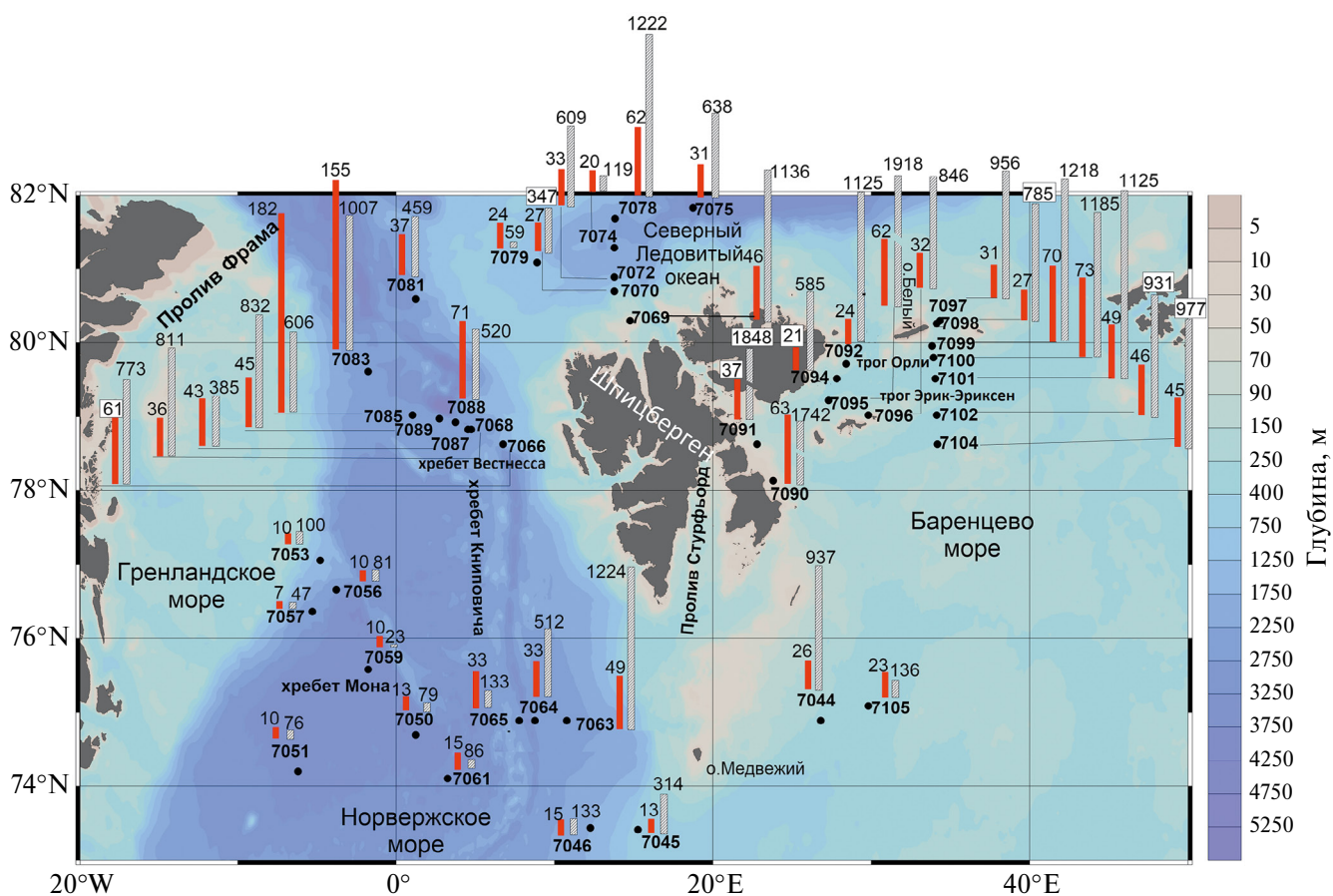


Рис. 1. Карта отбора проб и распределение АУВ (красные столбцы, мкг/г) и ПАУ (заштрихованные столбцы, нг/г) в поверхностном слое донных осадков в 84-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

рекомендованные при изучении загрязненности морских объектов ЕРА (Environmental Pollution Agency) [30]: НАФ–нафталин, МеНАФ – 1-метилнафталин, 2-МеНАФ – 2-метилнафталин, АЦНФ – аценафтен, ФЛР – флуорен, ФЕН – фенантрен, АНТР – антрацен, ФЛТ – флуорантен, ПР – пирен, БаА – бенз(а)антрацен, ХР – хризен, БеП – бенз(е)пирен, БбФ – бенз(б)флуорантен, БкФ – бенз(к)флуорантен, БаП – бенз(а)пирен, ДБА – дибенз(а, h)антрацен, БПЛ – бенз(g, h, i)перилен, ИНД – индено[1,2,3-с, d]пирен, ПРЛ – перилен.

Органический углерод ($C_{орг}$) в донных осадках определяли методом сухого сжигания на приборе ТОС–L (Shimadzu, Japan). Для пересчета концентраций УВ в концентрации $C_{орг}$ использовали коэффициент 0.86 [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В поверхностных донных осадках содержание АУВ изменялось от 7 мкг/г – ст. 7067 на шельфе Гренландии до 182 мкг/г на ст. 7085 в проливе Фрама (рис. 1), а $C_{орг}$ – от 0.25% на ст. 7053 (также на шельфе Гренландии) до 2.71% на ст. 7105 к востоку от о. Медвежий (табл. 1).

Концентрации $C_{орг}$ и АУВ в осадках пролива Фрама также изменялись в широком диапазоне: 0.81–1.87% и 20–182 мкг/г соответственно (табл. 1). Если в среднем доля АУВ в составе $C_{орг}$ всех изученных донных осадков составила 0.23%, то в проливе Фрама она возрастала на станциях 7083 и 7085 до 0.93%, что нетипично для фоновых районов Арктики, лежащих за пределами активной антропогенной деятельности [7]. Концентрации АУВ на станциях 7083 и 7085 были близкими (155 и 182 мкг/г). Тем не менее, содержание алканов (3.9 и 0.1 мкг/г), как и их состав сильно различались (рис. 2а). Действительно на ст. 7085 в составе алканов доминировал в низкомолекулярный

области гомолог $n-C_{16}$, имеющий микробальное происхождение [32, 34]. В результате отношение низкомолекулярных к высокомолекулярным алканам: $L/N = \sum(C_{12-24})/\sum(C_{25-35})$ возрастало до 2.0 (табл. 2). Напротив, в осадках ст. 7083 преобладали высокомолекулярные нечетные терригенные гомологи, и значение L/N уменьшалось до 0.37. Величина CPI (отношение нечетных к четным гомологам при $C > 25$) в осадках этих станций была наиболее высокой (4.10–6.37) по сравнению с другими изученными районами. Если на ст. 7083 содержание пристана и фитана практически равное ($Pr/Pf = 0.99$), то на ст. 7085 доминировал фитан ($Pr/Pf = 0.49$). Последнее, так же, как и другие маркеры указывают на разную природу алканов.

Разрез к западу от арх. Шпицберген проходил в зоне наиболее известного активного выхода метана со дна в Арктике [38, 39]. Максимальное содержание на этом разрезе $C_{орг}$ (2.25%), АУВ (49 мкг/г) и ПАУ (1224 нг/г) приурочено к ст. 7063, расположенной в зоне конуса выноса фьорда (залив Хорсунн) на глубине 319 м. Поверхностный слой (0–1 см) осадка содержал обломки раковин двусторчатых моллюсков, значительное количество хемосимбиотрофного бентоса – полихет семейства *Siboglinidae* и их трубок. В подстилающей толще осадка (глубже 1 см) при переходе от окисленных к восстановленным слоям содержание АУВ неравномерно увеличивалось (рис. 3). Наиболее высокие их концентрации установлены на горизонте 10–11 см (82 мкг/г) и 15–16 см (81 мкг/г), но и в нижних слоях колонки (22–24 см) их содержание также оставалось довольно высоким (49–66 мкг/г), как и содержание $C_{орг}$ (2.01–2.08%). В этих слоях рост концентраций АУВ происходил за счет деградации органического вещества, так как содержание $C_{орг}$ уменьшалось.

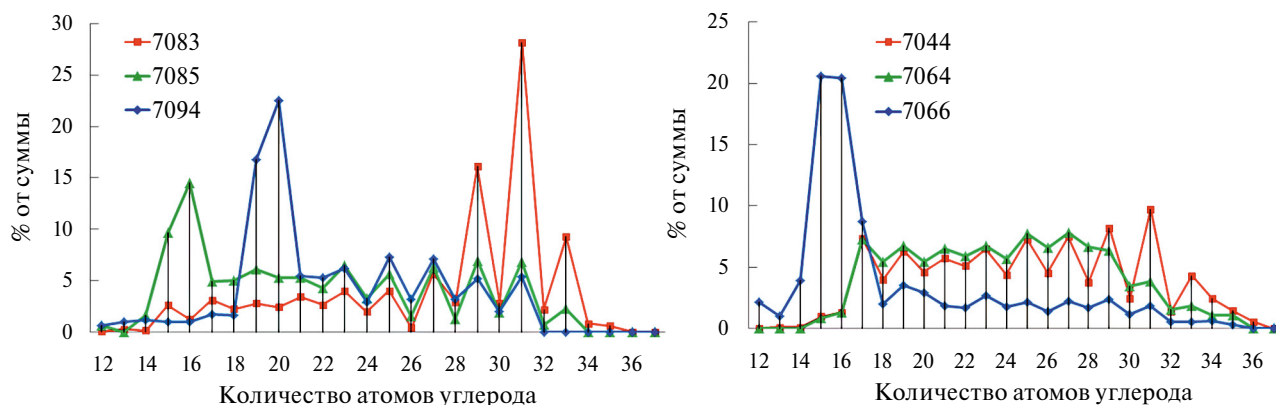


Рис. 2. Состав алканов в поверхностном слое донных осадков на отдельных станциях.

Таблица 1. Характеристика поверхностного слоя донных осадков Норвежского и Баренцева морей в разные годы исследования

Район	n*	АУВ, мкг/г		ПАУ**, нг/г		C _{орг} , %		Влажность, %	
		интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее
август 2021 г.									
Все районы	41	7–182	42	23–1918	663	0.25–2.41	1.56	36.8–82.4	58.2
Южная часть	12	7–61	20	23–1224	235	0.25–2.31	1.34	38.3–66.7	50.6
Пролив Фрама	13	20–182	50	59–1222	635	0.81–1.87	1.45	42.9–82.4	61.2
Северо-восточная часть	16	24–73	48	136–1918	1119	1.46–2.41	1.85	48.1–73.6	61.8
август–сентябрь 2016 г.									
Все районы	42	3–44	14	Не опред.	Не опред.	0.07–2.59	1.08	20.1–69.7	45.6
Штокманский полигон	7	9–27	15	Не опред.	Не опред.	0.67–2.57	1.81	23.7–69.7	53.0
Медвежинский желоб	10	6–44	17	Не опред.	Не опред.	0.25–1.71	0.79	27.0–58.5	40.6
Русская гавань	7	4–22	11	Не опред.	Не опред.	0.24–1.86	0.96	27.9–60.0	40.1
Шпицберген – ЗФИ	8	8–24	16	Не опред.	Не опред.	0.70–1.47	1.21	33.2–68.5	55.5
июль–август 2017 г.									
Все районы	48	3–57	12	Не опред.	Не опред.	0.03–2.38	1.02	17.0–72.1	49.5
Западная часть	16	15–37	10	Не опред.	Не опред.	0.30–1.69	0.65	30.4–60.7	49.6
Шпицберген – ЗФИ	14	4–37	13	Не опред.	Не опред.	0.72–2.38	1.52	37.6–72.0	54.3
Новая Земля	5	6–57	19	Не опред.	Не опред.	0.80–1.66	1.19	40.5–63.4	49.8
Центральная часть	13	4.4–17.2	10.8	Не опред.	Не опред.	0.03–1.94	0.93	17.0–63.4	49.1
май–июнь 2019 г.									
Все районы	49	6–64	25	24–9934	642	0.05–1.87	0.83	17.1–72.6	56.0
Хребет Мона	7	7–51	18	51–155	91	0.23–0.77	0.51	35.0–72.6	49.8
Лофотенская котловина	4	6–28	17	78–286	182	0.49–0.69	0.58	65.2–72.6	68.5
Хребет Книповича	7	14–37	27	186–751	552	0.52–1.32	0.96	60.1–71.2	66.1
Западный шельф Шпицбергена	6	15–35	27	186–9934	2920	0.58–1.66	0.88	35.3–71.2	54.1
Желоб Квейтола	5	7–59	23	24–660	170	0.47–0.80	0.63	34.1–61.0	47.2
Меридиональный р-з по 27.5° в.д.	6	28–53	40	183–867	472	1.31–1.87	1.70	50.0–76.2	64.3
Меридиональный р-з по 33° в.д.	14	10–64	23	37–254	109	0.05–1.51	0.52	17.1–68.2	64.3
июль–август 2020 г.									
Все районы	21	3–186	45	23–1697	311	0.30–1.56	0.92	22.2–72.9	58.6
Хребет Мона	7	3–27	14	42–65	50	0.30–0.51	0.44	38.5–61.5	49.9
Стурфьорд	4	36–186	90	23–830	235	0.69–1.36	1.12	22.2–66.2	46.3
Восточный шельф Шпицбергена	5	17–86	52	57–1697	780	1.07–1.56	1.29	59.5–72.9	69.6
Шельф ЗФИ***	5	17–30	25	78–757	178	0.68–0.87	0.83	67.6–69.6	68.6

Примечание. * n – Количество проб. ** Результаты получены флуоресцентным методом. *** ЗФИ – Земля Франца-Иосифа.

Таблица 2. Распределение основных маркеров в составе алканов донных отложений на отдельных станциях

Гори- зонт	АУВ, мкг/г	Алканы, мкг/г	Алканы, % от АУВ	L/H*	CPI	$\frac{i-C_{19}}{i-C_{20}}$	Raq	Доминирующие пики
Станция 7044								
0–1	26	0.1	0.56	0.87	2.38	1.73	0.43	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₁ –C ₃₁
Станция 7046								
0–1	15	0.1	0.53	1.07	1.67	0.19	0.39	C ₁₉ , C ₂₉ , C ₃₁
3–4	47	0.01	0.03	0.87	2.74	0.32	0.35	C ₁₉ , C ₂₁ , C ₂₉ , C ₃₁
12–14	25	0.05	0.19	0.75	1.84	0.30	0.34	C ₁₉ , C ₂₉ , C ₃₁
16–18	49	0.1	0.16	0.57	4.47	0.06	0.38	Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
Станция 7063								
0–1	49	0.2	0.43	0.95	1.39	0.53	0.53	C ₁₉ , C ₂₁ , C ₂₃ , C ₂₅
1–2	39	0.3	0.80	1.18	1.37	0.46	0.61	C ₁₉ , C ₂₁ , C ₂₃ , C ₂₅
6–7	42	0.1	0.16	1.37	1.20	0.10	0.60	C ₁₉ , C ₂₁ , C ₂₃ , C ₂₅
10–11	82	0.3	0.35	1.34	1.20	0.46	0.57	C ₁₇ , C ₁₉ , C ₂₁
14–15	71	0.3	0.40	1.54	1.38	0.48	0.59	C ₁₇ , C ₁₉ , C ₂₁
19–20	66	0.2	0.33	1.52	1.37	0.34	0.60	C ₁₇ , C ₁₉ , C ₂₁
23–24	49	0.6	1.28	1.85	1.47	0.85	0.57	C ₁₇ , C ₁₉ , C ₂₁
Станция 7064								
0–1	33	0.3	0.85	1.08	1.29	1.06	0.59	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₁ –C ₂₉
Станция 7066								
0–1	61	0.1	0.20	4.97	1.54	9.28	0.54	C ₁₅ , C ₁₆
Станция 7069								
0–1	49	0.4	0.84	1.09	2.13	2.40	0.45	C ₁₉ , C ₂₅ –C ₃₁
4–5	66	0.5	0.78	1.01	2.23	0.89	0.45	C ₁₉ , C ₂₅ –C ₃₁
10–11	76	0.4	0.47	1.16	2.72	1.48	0.43	C ₁₉ , C ₂₅ –C ₃₁
Станция 7083								
0–1	155	3.9	2.50	0.37	6.47	0.99	0.15	C ₂₉ , C ₃₁ , C ₃₃
Станция 7085								
0–1	182	0.1	0.06	2.02	4.10	0.49	0.47	C ₁₅ , C ₁₆
Станция 7094								
0–1	21	0.2	0.75	2.04	2.60	0.31	0.56	C ₁₉ , C ₂₀
1–2	52	0.2	0.37	1.29	2.78	0.85	0.49	C ₁₉ , C ₂₀ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
7–8	87	0.1	0.10	1.45	2.71	5.93	0.43	C ₁₈ , C ₂₀
14–15	72	0.1	0.14	1.76	2.93	2.90	0.44	C ₁₈ , C ₂₀
19–20	47	0.4	0.87	1.19	2.37	1.54	0.50	C ₁₉ , Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
31–32	42	0.1	0.36	1.73	2.35	1.78	0.80	C ₁₉ , Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
Станция 7102								
0–1	46	0.4	0.9	1.39	2.05	1.44	0.55	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
1–2	48	0.2	0.4	1.37	2.12	1.02	0.54	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
2–3	48	0.3	0.6	1.24	2.20	1.47	0.55	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
3–4	47	0.2	0.5	0.88	1.73	0.72	0.44	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁

Таблица 2. Продолжение

Гори- зонт	АУВ, мкг/г	Алканы, мкг/г	Алканы, % от АУВ	L/H*	СРІ	$\frac{i-C_{19}}{i-C_{20}}$	Рaq	Доминирующие пики
4–5	43	0.1	0.2	1.29	2.03	1.36	0.54	C ₁₇ , C ₂₀ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
5–6	36	0.2	0.7	1.14	1.84	0.81	0.57	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
6–7	28	0.1	0.4	3.39	2.79	0.77	0.69	C ₁₉ , C ₂₀
7–8	39	0.2	0.5	1.45	1.94	0.28	0.58	C ₁₉ , C ₂₀ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
8–9	39	0.2	0.5	1.52	1.88	1.20	0.62	C ₁₉ , C ₂₀ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
9–10	30	0.1	0.2	1.51	1.79	1.11	0.57	C ₂₀
10–11	29	0.2	0.6	1.66	2.42	0.82	0.53	C ₁₇ , C ₁₉
11–12	29	0.1	0.5	1.46	2.21	1.33	0.54	C ₁₇ , C ₁₉
12–13	28	0.2	0.7	1.58	2.09	0.67	0.56	C ₁₇
13–14	29	0.2	0.7	1.41	2.09	2.74	0.56	C ₁₇
14–15	24	0.2	0.6	1.15	2.08	4.34	0.53	C ₁₇
15–16	24	0.2	0.6	1.30	2.05	4.03	0.53	C ₁₇ , C ₁₉
16–17	21	0.0	0.1	1.32	1.85	2.26	0.52	C ₁₇ , C ₁₉
17–18	35	0.3	0.8	1.20	1.92	4.79	0.54	C ₁₇ , C ₁₉
18–19	29	0.1	0.5	1.25	2.09	1.75	0.49	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
19–20	29	0.2	0.6	0.97	2.01	1.08	0.45	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
20–21	20	0.1	0.6	1.25	2.31	1.88	0.52	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
21–22	19	0.2	0.9	1.20	2.09	3.73	0.52	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
22–23	32	0.2	0.6	1.04	2.01	0.89	0.52	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
23–24	25	0.1	0.6	1.02	1.57	1.70	0.57	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
24–25	28	0.2	0.7	1.00	1.88	1.39	0.52	Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
25–26	23	0.2	0.8	1.57	1.76	9.99	0.52	C ₁₅
26–27	31	0.1	0.5	0.98	2.03	0.74	0.48	Нечет. C ₂₃ –C ₃₁
27–28	25	0.2	0.6	1.07	2.36	3.20	0.47	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
28–29	27	0.2	0.7	1.01	1.88	34.94	0.48	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
29–30	33	0.1	0.3	1.03	2.01	0.63	0.48	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
30–31	22	0.2	0.8	1.08	1.96	6.12	0.49	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
Станция 7104								
0–1	45	0.2	0.36	1.44	2.00	0.21	0.50	C ₁₇
Станция 7105								
0–1	23	0.1	0.37	0.71	2.13	2.05	0.47	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
1–2	28	0.1	0.35	0.75	1.49	12.98	0.53	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
2–3	33	0.1	0.18	0.76	2.07	0.30	0.49	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
3–4	25	0.2	0.76	0.29	0.81	4.63	0.31	Нечет. C ₂₇ –C ₃₁
4–5	21	0.1	0.56	1.13	2.27	1.12	0.48	C ₁₉
5–6	21	0.1	0.35	0.60	3.39	1.02	0.41	Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
6–7	17	0.1	0.37	0.85	2.86	4.10	0.42	C ₁₅ , C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
7–8	19	0.1	0.37	0.52	2.28	1.21	0.33	C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
8–9	20	0.1	0.43	0.54	2.71	4.34	0.37	C ₁₅ , C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
9–10	14	0.04	0.27	0.68	3.54	3.46	0.36	C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁

Таблица 2. Окончание

Горизонт	АУВ, мкг/г	Алканы, мкг/г	Алканы, % от АУВ	L/H*	CPI	$\frac{i-C_{19}}{i-C_{20}}$	Paq	Доминирующие пики
10–11	16	0.1	0.53	0.65	2.66	15.80	0.39	C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
11–12	16	0.1	0.58	0.57	2.86	1.34	0.37	C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
12–13	17	0.1	0.59	0.53	2.85	1.62	0.37	Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
13–14	17	0.1	0.53	0.59	3.85	3.23	0.35	Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
14–15	15	0.1	0.62	0.53	2.99	0.92	0.37	Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
15–16	19	0.1	0.38	0.92	1.96	0.71	0.45	C ₂₀ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
16–17	21	0.1	0.50	0.96	1.61	1.04	0.51	C ₁₅ Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
17–18	24	0.2	0.68	0.50	3.01	1.77	0.38	C ₁₇ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
18–19	19	0.1	0.67	2.25	1.92	0.13	0.48	C ₁₅
19–20	20	0.1	0.31	0.60	2.33	2.90	0.43	C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
20–21	19	0.0	0.10	0.59	2.30	2.86	0.39	Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
21–22	14	0.1	0.41	0.62	3.13	0.01	0.35	C ₁₇ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
22–23	11	0.1	0.67	0.77	0.36	1.72	0.52	C ₁₅ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
23–24	13	0.2	1.27	6.34	3.40	5.33	0.47	C ₁₅
24–25	14	0.1	0.50	0.61	3.02	24.42	0.41	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁
26–27	14	0.01	0.05	1.15	3.54	2.90	0.43	C ₁₇ , C ₁₉ , Нечет. C ₂₅ –C ₃₁

* $(L/H - \sum(C_{12-24})/\sum(C_{25-35}))$; CPI – $[(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})] / 2$; Paq – $(C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$.

Состав алканов указывал на интенсивные автотонные процессы, происходящие в осадочной толще на ст. 7063 (рис. 4): отношение L/H возрастало с глубиной захоронения от 0.95 до 1.85 (табл. 2), достигая максимума на горизонте 23–24 см, так же как отношение пристан/фитан (0.85).

Иное распределение в толще осадка на ст. 7063 наблюдалось для ПАУ (рис. 3). Их концентрации резко уменьшались в поверхностных горизонтах (от 1224 нг/г до аналитического нуля), а в слое 7–8 см, возрастали, достигая 75 нг/г на гор. 10–11 см. В нижней части колонки (20–24 см) полиарены отсутствовали. При этом в составе ПАУ к гор. 10–11 см уменьшалось количество 2–4 кольчатых на фоне увеличения 5–6 кольчатых гомологов (рис. 5), и отношение $\sum$ легких/ $\sum$ тяжелых уменьшалось с 1.6 до 1.0 (табл. 3).

В поверхностном слое осадков на станциях 7068 и 7087, отобранных в покмарках Луми и Лунде, содержание АУВ было довольно низким, как в пересчете на сухую массу (36–43 мкг/г), так и в составе C_{орг} (0.19–0.26%). На поверхности и в толще осадков наблюдалось большое количество трубок полихет семейства *Siboglinidae*, а также каверн выхода углеводородных газов, количество которых возрастало с глубиной осадка.

В составе алканов преобладали низкомолекулярные гомологи, что определяется образованием их так же, как метана [4], в толще осадков.

Для поверхностных осадков бассейна Софии в Северном Ледовитом океане концентрации АУВ были еще ниже: 24–30 мкг/г (рис. 1). Тем не менее, в окисленном алевроито-пелитовом иле темно-коричневого цвета на ст. 7078 увеличивалось содержание как АУВ (62 мкг/г), так и ПАУ (1222 нг/г). Однако в составе C_{орг} доля АУВ в этом районе не превышала 0.39%.

Содержание УВ повышалось на севере Баренцева моря в трогах Орли и Эрик-Эриксен (рис. 1): для АУВ до 73 мкг/г (ст. 7100), а для ПАУ до 1125 нг/г (ст. 7101). В этом районе на акустических разрезах были выявлены многочисленные признаки неотектонической активности [6].

Наиболее высокое содержание ПАУ (1848–191 нг/г), на фоне сравнительно низких концентраций АУВ (21–63 мкг/г), приурочено к шельфу Шпицбергена (станции 7059, 7069, 7090, 7091, 7094, 7095). Эта аномалия была отмечена ранее [9, 18, 23–25, 28, 31]. В составе ПАУ доминировали нафталин и его гомологи, образующиеся в осадочной толще, так как их количество практически не изменялось с глубиной захоронения (рис. 5, ст. 7094).

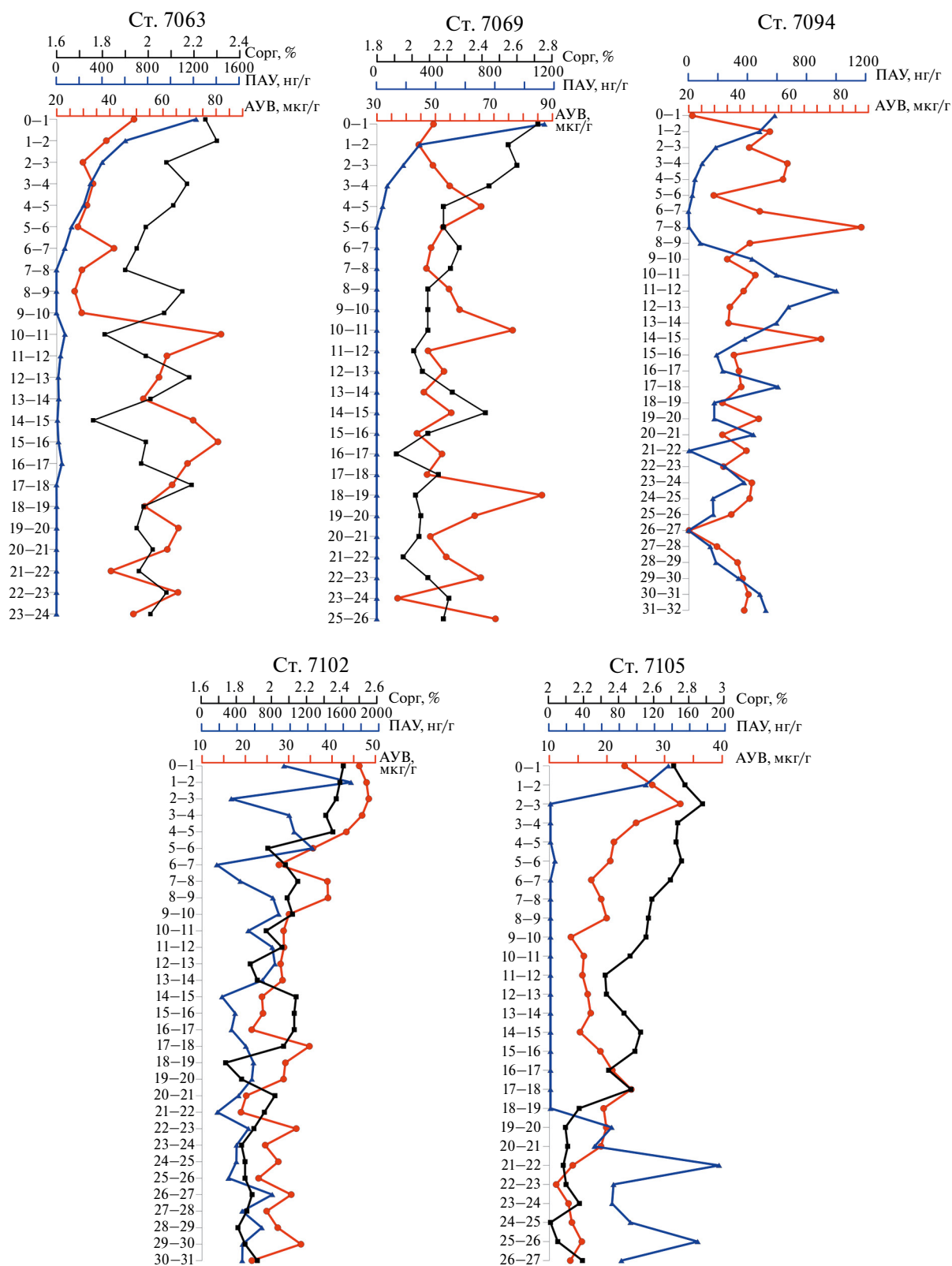


Рис. 3. Изменение концентраций органических соединений в осадочной толще отдельных станций (местоположение станций приведено на рис. 1).

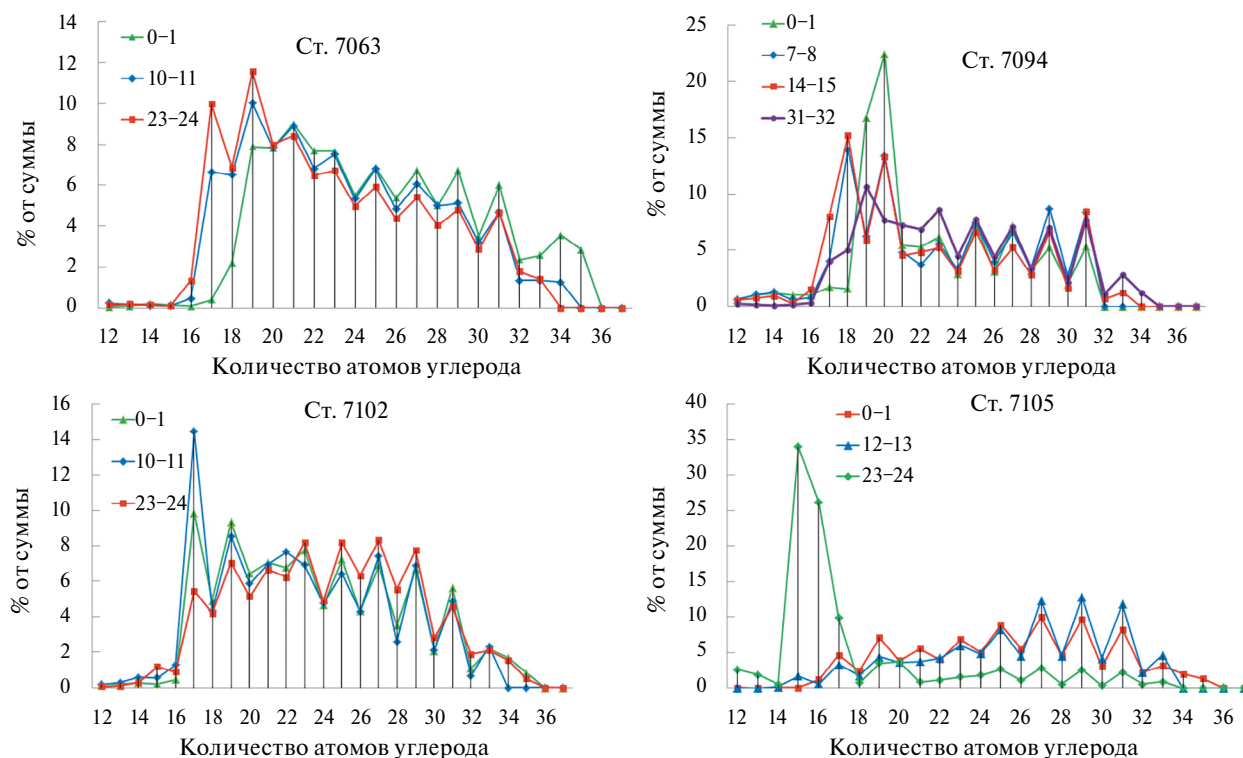


Рис. 4. Состав алканов в осадочной толще отдельных станций (местоположение станций приведено на рис. 1).

Необычное распределение УВ в толще осадков (колонка 31 см) установлено на ст. 7102, расположенной на севере Баренцева моря восточнее о. Белый при пересечении трога Эрик-Эриксен (рис. 1). Здесь в алевро-пелитовом биотурбированном иле содержание $C_{орг}$ неравномерно уменьшалось с глубиной захоронения от 2.65 до 2.0%, в среднем 2.24%, так же как и АУВ — 22–47 мкг/г, в среднем 31 мкг/г (рис. 5). В составе алканов при переходе от окисленного к восстановленному осадку и изменение Eh от 175 (гор. 0–1 см) до –137 (горизонт 10–11 см) происходило образование автохтонного гомолога $n-C_{17}$ (рис. 4), и отношение C_{17}/C_{25} (2.25) возрастало в 4.7 раз по сравнению с горизонтом 9–10 см.

Содержание ПАУ на ст. 7102 уменьшалось в 2 раза в толще осадка: от 931 до 459 нг/г. Тем не менее, их концентрация резко возрастала при переходе от поверхностного окисленного слоя к подстилающему восстановленному слою (1–2 см, до 1690 нг/г, рис. 5, табл. 3). В отличие от ст. 7063 нафталины здесь не относились к доминирующим гомологам (рис. 5). В составе ПАУ преобладал фенантрен, наиболее устойчивый и распространенный полиарен в донных осадках [7, 14, 18, 41].

Аномальное распределение концентраций ПАУ, которые увеличивались в нижних горизонтах колонки (рис. 3) и в составе которых доминировал 2-метилнафталин (рис. 5) — маркер

нефтяного генезиса [14, 16, 18] было установлено в осадках ст. 7105, расположенной в восточной части Медвежинского желоба [8]. Осадок на этой станции отличали довольно высокие концентрации $C_{орг}$ как в поверхностном (2.71%) так и в нижнем (2.19%, 25–26 см) горизонтах (рис. 3). Напротив, содержание АУВ было довольно низким, и их величины неравномерно уменьшались от 23 мкг/г в поверхностном слое до 14 мкг/г в нижнем слое. Тем не менее, в составе алканов в нижних горизонтах колонки происходило образование автохтонных алканов (рис. 4) и отношение L/H (табл. 2) на горизонте 26–27 см было почти в 2 раза выше (1.21), чем на горизонте 24–25 см (0.61). Все это указывает на природное образование УВ в осадочной толще. Кроме того, в нижних горизонтах керна происходило образование ПАУ (рис. 3), в составе которых возрастала доля нафталинов (рис. 5).

Осадок на ст. 7044, расположенный в кратере на месте залпового выброса метана в результате диссоциации газогидратов в осадочной толще в послеледниковое время, содержал большое количество полихет и их трубок, а также сланцевого щебня и дресвы [10]. Подобные структуры весьма характерны для рельефа дна арктических морей и связаны с тем, что во время оледенений, метан из подземного резервуара концентрировался в массивных курганах под ледниковым щитом [19].

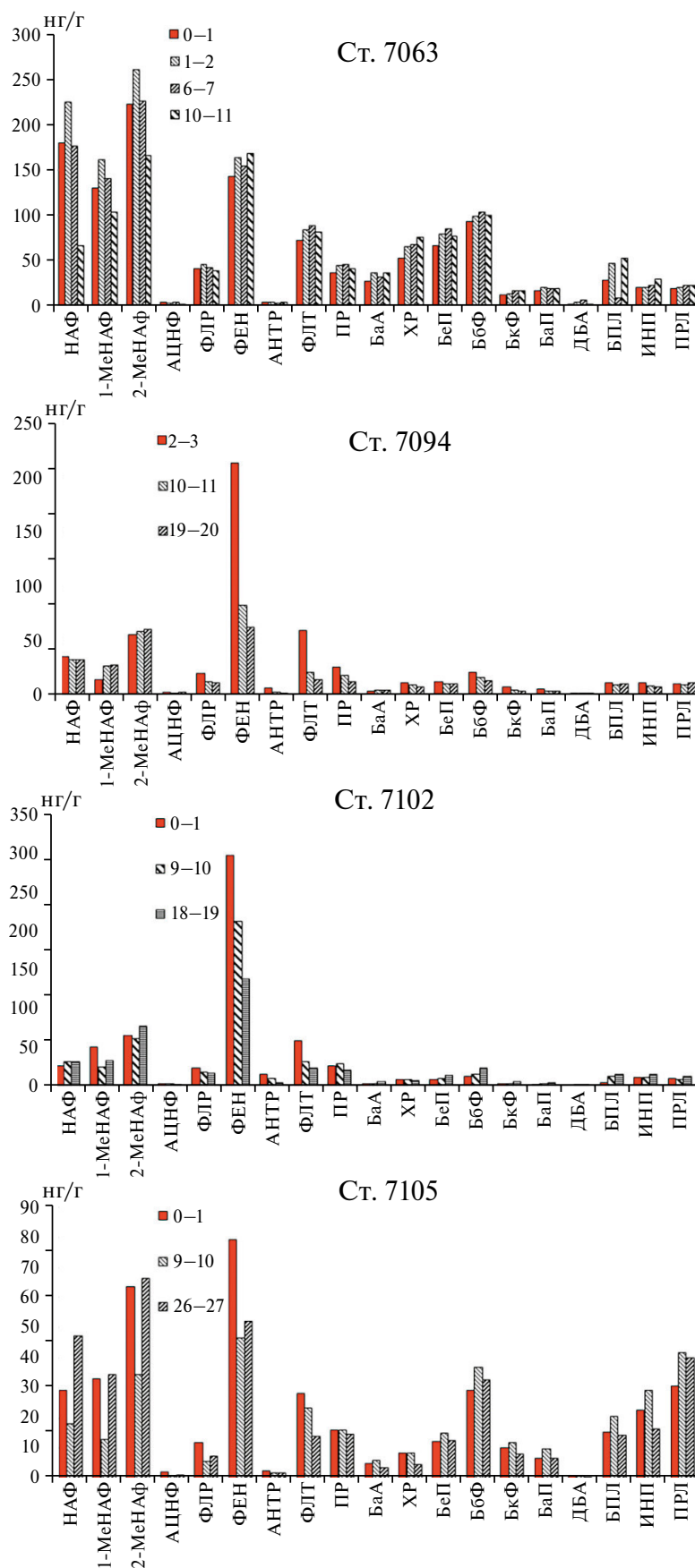


Рис. 5. Состав ПАУ в осадочной толще отдельных станций (местоположение станций приведено на рис. 1).

Таблица 3. Распределение маркеров в составе ПАУ (метод ВЭЖХ) донных отложений на некоторых станциях

Горизонт	АУВ, мкг/г	ΣПАУ, нг/г	ΣНаф / ΣПАУ, %	ФЛТ/ ПР	ΣНаф / ФЕН	(ПР + ФЛТ) / (ФЕН + ХР)	ФЕН / АНТР	Σ2–3 кол. / Σ5–6 кол.	ФЛТ / (ФЛТ + ПР)
Станция 7044									
0–1	26	681	30.8	1.7	1.7	0.4	25.3	1.2	0.6
Станция 7046									
0–1	15	81	29.6	1.8	1.5	0.4	25.8	1.1	0.6
2–3	78	90	44.1	2.2	2.4	0.3	32.6	2.0	0.7
3–4	47	70	58.1	4.3	3.5	0.3	39.3	3.9	0.8
16–18	49	466	52.5	0.9	7.3	0.4	33.8	1.6	0.5
Станция 7063									
0–1	49	1170	45.7	2.0	3.7	0.6	39.5	1.6	0.7
1–2	39	1400	46.3	1.9	3.9	0.6	42.1	1.6	0.7
6–7	42	1270	42.9	2.0	3.5	0.6	47.0	1.4	0.7
10–11	82	1100	30.5	2.0	2.0	0.5	42.2	1.0	0.7
Станция 7069									
0–1	49	450	23.5	2.2	0.9	0.5	36.1	1.2	0.7
1–2	44	517	29.0	2.6	1.4	0.5	39.0	1.2	0.7
4–5	66	579	30.2	2.5	1.9	0.6	44.6	1.0	0.7
10–11	76	513	27.5	2.6	1.8	0.6	44.9	0.9	0.7
Станция 7078									
0–1	62	1222	35.2	2.0	1.8	0.4	41.3	1.4	0.7
Станция 7090									
0–1	63	387	37.3	1.3	2.2	0.4	31.8	1.4	0.6
Станция 7091									
0–1	148	626	37.6	1.1	2.5	0.4	14.1	1.4	0.5
Станция 7092									
0–1	24	366	38.8	2.2	1.8	0.4	24.5	2.0	0.7
2–3	44	520	19.8	2.3	0.5	0.4	38.1	1.9	0.7
3–4	58	505	24.2	2.1	0.6	0.3	40.8	2.5	0.7
6–7	48	603	25.1	1.6	0.6	0.3	30.5	2.3	0.6
Станция 7094									
10–11	46	327	35.9	1.2	1.4	0.4	34.3	1.9	0.5
11–12	41	353	31.8	1.2	1.0	0.3	15.0	2.5	0.5
14–15	72	313	36.5	1.3	1.2	0.3	19.6	2.9	0.6
19–20	47	294	40.9	1.1	1.9	0.4	34.6	2.1	0.5
Станция 7095									
0–1	62	441	31.5	1.5	1.3	0.3	21.6	1.6	0.6
Станция 7099									
0–1	70	400	30.9	1.5	1.2	0.4	13.2	1.7	0.6
Станция 7101									
0–1	49	1125	32.7	1.2	1.2	0.3	16.8	2.0	0.5

Таблица 3. Окончание

Горизонт	АУВ, мкг/г	ΣПАУ, нг/г	ΣНаф / ΣПАУ, %	ФЛТ/ ПР	ΣНаф / ФЕН	(ПР + ФЛТ) / (ФЕН + ХР)	ФЕН / АНТР	Σ2–3 кол. / Σ5–6 кол.	ФЛТ / (ФЛТ + ПР)
Станция 7102									
0–1	46	625	22.8	2.3	0.5	0.3	19.4	3.4	0.7
6–7	28	804	20.6	1.6	0.4	0.3	14.3	3.3	0.6
8–9	39	614	23.3	1.2	0.5	0.3	16.0	2.8	0.5
9–10	30	502	23.6	1.1	0.6	0.3	21.7	2.6	0.5
18–19	29	455	31.4	1.1	1.0	0.3	31.6	2.0	0.5
Станция 7104									
0–1	45	710	32.7	1.8	1.1	0.2	18.2	2.4	0.6
Станция 7105									
0–1	23	406	31.0	1.8	1.6	0.5	31.8	1.2	0.6
1–2	28	335	22.0	1.9	1.8	0.8	29.9	0.6	0.7
2–3	33	256	21.2	1.8	1.8	0.7	30.5	0.6	0.6
3–4	25	317	19.2	1.7	1.6	0.8	27.0	0.5	0.6
4–5	21	303	24.7	1.7	2.3	0.8	23.0	0.6	0.6
5–6	21	316	16.7	1.8	1.3	0.8	25.4	0.5	0.6
6–7	17	331	19.5	1.7	1.6	0.9	23.5	0.5	0.6
7–8	19	375	19.2	1.7	1.1	0.7	23.9	0.6	0.6
8–9	20	351	19.8	1.6	1.2	0.7	21.9	0.6	0.6
9–10	14	342	19.3	1.5	1.4	0.7	26.0	0.5	0.6
10–11	16	318	25.1	1.6	1.7	0.6	26.3	0.8	0.6
11–12	16	344	21.2	1.6	1.3	0.7	30.6	0.7	0.6
12–13	17	296	22.4	1.4	1.7	0.7	24.8	0.6	0.6
13–14	17	287	19.4	1.4	1.3	0.7	26.2	0.6	0.6
14–15	15	286	19.2	1.4	1.3	0.7	30.3	0.6	0.6
15–16	19	299	18.5	1.5	1.5	0.8	27.9	0.5	0.6
16–17	21	397	25.1	1.5	1.7	0.6	24.8	0.8	0.6
17–18	24	437	27.2	1.9	1.2	0.4	28.3	1.2	0.6
18–19	19	203	26.3	0.8	2.0	0.6	24.2	0.7	0.5
19–20	20	240	29.3	0.9	2.2	0.6	22.7	0.8	0.5
20–21	19	246	35.3	0.9	2.7	0.6	21.4	1.0	0.5
21–22	14	294	36.2	1.0	2.8	0.6	23.7	1.1	0.5
22–23	11	344	41.8	0.9	2.6	0.4	27.9	1.6	0.5
23–24	13	323	36.0	0.9	2.2	0.5	26.1	1.2	0.5
24–25	14	349	35.8	0.7	2.8	0.5	26.5	1.1	0.4
25–26	16	377	39.5	0.8	2.3	0.4	32.3	1.5	0.5
26–27	14	381	39.0	0.9	2.8	0.5	27.6	1.2	0.5

При отступании оледенений метан резко высвобождался, образуя взрывные кратеры. Здесь поверхностный слой осадка (рис. 1) отличался довольно высокой концентрацией $C_{\text{орг}}$ (2.65%), сравнительно низким содержанием АУВ (26 мкг/г) и повышенной концентрацией ПАУ (937 нг/г). Тем не менее, в составе алканов в низкомолекулярной области выделялись пики, характерные для фитопланктоногенного ОВ (рис. 2), и фитан доминировал над пристаном ($i\text{-}C_{19}/i\text{-}C_{20} = 1.73$, табл. 2), что может указывать на активные биогеохимические процессы в осадке [34].

Таким образом, для всего массива данных, полученных в 2021 г., наблюдалась зависимость ($r = 0.52$, $n = 41$) между влажностью осадков, которая изменялась в интервале 31.6–82.4% и $C_{\text{орг}}$. Известно, что пористость и влажность осадка, в определенной степени, обусловлены его гранулометрическим составом [2]. Осадки с высоким значением влажности (до 80% и более) образуются, как правило, тонкодисперсной взвесью с высокой долей биогенного вещества (например, фрагментами отмирающих планктонных организмов). Низкие значения влажности (менее 40%) характерны для крупнодисперсных донных осадков, сформированных литогенным материалом, поступающим в моря в результате эрозии береговой зоны и со склоновым стоком воды.

Между АУВ и влажностью ($r = 0.24$) и $C_{\text{орг}}$ и АУВ ($r = 0.22$) эти связи были значительно слабее. Распределение УВ определяет не столько литотип донных осадков, а уровень первичной продукции в акватории, вклад терригенного ОВ, а также влияние бентосных макро- и микроорганизмов [21, 22]. Поэтому во многих исследованных районах отсутствовали связи в распределении $C_{\text{орг}}$ и АУВ, АУВ и ПАУ. Разная природа образования АУВ (фитопланктон и нефтяное загрязнение) и ПАУ (процессы сжигания топлива, в меньшей степени нефтяное загрязнение) приводят к отсутствию связи в распределении этих углеводородных классов: $r(\text{АУВ-ПАУ}) = -0.23$.

В большинстве кернов происходит снижение концентраций $C_{\text{орг}}$ в верхней части активной зоны (10–12 см) и незначительное изменение в нижних горизонтах. Эта закономерность соответствует общей тенденции изменения органического вещества в отложениях арктического шельфа [31] и довольно низкие величины СРІ в составе алканов (<3 , табл. 2) в изученных акваториях указывают на увеличение поступления биогенных УВ. Их образование происходило непосредственно в осадочной толще, которая из-за большого количества неразложившихся органических соедине-

ний зачастую имела запах сероводорода (станции 7063, 7068, 7087, 7105).

В проливе Фрама столь большой диапазон концентраций обусловлен в значительной степени особенностями условий гидрологического режима [33, 36, 39]. Здесь взаимодействуют два основных течения: теплое Западно-Шпицбергенское и холодное Восточно-Гренландское. Благодаря этим течениям происходит обмен между арктическими и атлантическими водными массами [38]. В краевой зоне таяния морских льдов (Marginal Ice Zone, MIZ), согласно данным, полученным в 2021 г., увеличивается продуктивность фитопланктона до $450\text{--}650 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ [29]. Повышенные концентрации питательных веществ, хлорофилла “а”, высокий уровень продукции фитопланктона в поверхностных водах, а также высокие скорости вертикального потока вещества приводят к накоплению органических соединений в осадках на отдельных участках дна. Последнее приводит к мозаичности в распределении и составе органического вещества в поверхностном слое. Ранее считалось, что основной источник УВ в донных осадках пролива Фрама — фитопланктон (ледовые водоросли), а также биогеохимические процессы на границе вода–дно [22]. Вклад УВ наземного происхождения был минимальным. Однако наши исследования показали, что на ст. 7082 в осадках преобладали терригенные высокомолекулярные алканы. Поэтому значения СРІ были выше по сравнению с другими районами (табл. 2).

Изучение дифференциации молекулярного состава ПАУ при переносе через пролив Фрама позволило установить, что более летучие/легкие полиарены, которые образуются в выбросах в низких широтах, переносятся в атмосфере на большие расстояния. Напротив, высокомолекулярные ПАУ осаждаются преимущественно в прибрежных шельфовых акваториях в результате газообмена между атмосферой и водой [27, 41].

Хребет Вестнеса представляет собой дрейф, юго-восточная часть которого осложнена многочисленными выходами углеводородных газов [37, 40, 43]. При этом в толще осадков происходит миграция глубинных флюидов и образование не только метана, но и высокомолекулярных УВ. Поэтому на ст. 7063 в осадочной толще наблюдалась зависимость между распределением $C_{\text{орг}}$ и влажностью осадков ($r = 0.58$, $n = 25$), и полностью отсутствовали связи между распределением АУВ и $C_{\text{орг}}$ ($r = -0.38$). Последнее, скорее всего, обусловлено наличием источника органических соединений генетически не связанного с взвесью

и седиментационными процессами. Это подтверждает распределение молекулярных маркеров в составе АУВ и ПАУ.

В зависимости от условий в нефтегазоносных горизонтах и геологических структурах под морским дном газово-жидкие потоки метана и других УВ из осадочных толщ могут активизироваться, временно прекращать свою активность, либо вообще исчезать, а затем появляться вновь [11, 35]. Этим можно объяснить разницу в концентрациях АУВ и ПАУ в разные годы исследования в одном и том же районе (табл. 1).

Происхождение УВ существенно различалось в зависимости от района исследования. Оказалось, что более устойчивые терригенные алканы доминировали в осадках лишь в отдельных районах. Поэтому столь низкими оказались величины С_{орг} в составе алканов (табл. 2). Распределение районов разгрузки метана выявляет чрезвычайно широкий и разнообразный диапазон обстановок седиментации: ландшафтно-морфологических, геодинамических, и климатических [1]. Отсутствие связи между концентрациями С_{орг} и АУВ, увеличение доли АУВ в составе С_{орг} с глубиной захоронения осадка, а также распределение маркеров в составе алканов могут свидетельствовать в пользу глубинной природы АУВ [1, 9]. На локальный характер этих процессов указывает латеральная изменчивость концентраций АУВ в осадках.

На шельфе Шпицбергена уровни концентраций и состав полиаренов формируют эродированные угольные породы архипелага [25, 31]. Поэтому здесь установлены наиболее высокие концентрации ПАУ.

Глубинные процессы оказывают влияние на формирование современной морфоструктуры и рельефа трогов Эрик-Эриксен и Орли [6]. Общая картина размещения разгрузок выявляет чрезвычайно широкий и разнообразный диапазон обстановок их распространения — ландшафтно-морфологических, геодинамических и климатических. Последнее подтверждается аномально высокими значениями теплового потока, в частности, в трог Орли более 300 мВт/м². Активность глубинных процессов отмечается в различных сегментах трогов из-за тектонической природы данных структур. Западная часть трога Орли является перспективной в плане обнаружения областей выходов метана, что подтвердил судовой эхолот, установивший профиль с нахождением факела [10]. Поэтому здесь в осадках были столь высокие концентрации УВ, особенно ПАУ. Уникальность отбора проб в этом районе состояла также

в том, что в недавнем прошлом трог севера Баренцева моря, были малодоступны для исследований из-за ледяного покрова и сложной ледовой ситуации в короткий летний сезон.

В заключение следует подчеркнуть, что изучение состава УВ и биогеохимических процессов в донных осадках в настоящее время становится неотъемлемой частью исследований для оценки последствий влияния на экосистемы меняющихся среды и климата в Арктике.

ВЫВОДЫ

Источники УВ существенно различались для изученных акваторий Норвежско-Гренландского бассейна и Баренцева моря с разными условиями седиментации и потоками глубинных флюидов со дна. Поэтому установлены большие диапазоны изменения концентраций органических соединений в поверхностном слое осадков, которые составили для С_{орг} 0.25–2.71%, АУВ — 7–182 мкг/г и ПАУ — 0–1918 нг/г.

Полученные корреляционные связи между влажностью осадков и содержанием С_{орг} свидетельствуют о совместном содержании в них биогенной и литогенной составляющих. Отсутствие корреляционных зависимостей между содержанием С_{орг} и концентрацией УВ, а также между концентрациями АУВ и ПАУ указывают на одновременное присутствие в осадках разных источников, которые формируют эти органические соединения.

В проливе Фрама столь большой диапазон концентраций обусловлен в значительной степени гидрологическими условиями акватории. В составе АУВ преобладали как микробиальные, так и терригенные алканы, а в составе ПАУ — высокомолекулярные гомологи.

Во многих исследованных голоценовых осадках поведение органических соединений обусловлено в основном микропросачиванием природных УВ (хребет Вестнеса, район желоба Орли, центральная часть Баренцева моря и др.). Состав алканов и состав ПАУ указывали на интенсивные глубинные флюидные потоки, происходящие в осадочной толще, которые в отдельных случаях (ст. 7105) могут приводить к образованию нефтяных пленок на поверхности моря, регистрирующихся из космоса с помощью радиолокационных спутников.

Состав специфических биомаркеров (например, ст. 7963) отражает латеральную и вертикальную изменчивость источников УВ в толще осадков. В акваториях покмарков и сипов

выявлено обогащение вскрытой осадочной толщи легкими алканами в составе АУВ и нафталинами в составе ПАУ.

Благодарность. Авторы благодарят М.Д. Кравчишину, А.А. Ключиткина — группу руководства 84-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, а также Д.Ф. Будько за организацию и отбор проб донных осадков.

Источники финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания, тема № FMWE-2024-0020.

Конфликт интересов. У авторов данной работы отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беленицкая Г.А.* Флюидное направление литологии: состояние, объекты, задачи // Ученые записки Казанского университета. 2011. Т. 153. № 4. С. 97–112.
2. *Гавшин В.М., Лапухов С.В., Сараев С.В.* Геохимия литогенеза в условиях сероводородного заражения (Черное море). Новосибирск: Наука, 1988. 194 с.
3. *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.
4. *Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Володин В.Д. и др.* Системные исследования осадкообразования в Европейской Арктике в 84-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 660–663.
5. *Куришева А.В., Моргунова И.П., Петрова В.И. и др.* Углеводороды в литоральных осадках и маршевых почвах юго-западного побережья Баренцева моря // Геохимия. 2023. Т. 68. № 9. С. 964–981. <https://doi.org/10.31857/S0016752523090078>
6. *Мороз Е.А.* Новейшая тектоника северо-западной окраины баренцевоморского шельфа // Мониторинг. Наука и технологии. Науки о Земле. 2016. № 4 (29). С. 6–13.
7. *Немировская И.А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научн. мир, 2013. 432 с.
8. *Немировская И.А., Иванов А.Ю.* Верификация данных дистанционного зондирования для определения природы углеводородов (на примере Баренцева моря) // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 104–109. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601168>
9. *Немировская И.А., Храпцова А.В.* Углеводороды в воде и в донных осадках Норвежско-Баренцевоморского бассейна // Геохимия. 2023 Т. 61 № 2. С. 173–186. <https://doi.org/10.31857/S0016752523020073>
10. *Новичкова Е.А., Матуль А.Г., Козина Н.В. и др.* Литологические и палеоокеанологические исследования Гренландской котловины и континентальной окраины Шпицбергена в 84-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2021 г. // Геология океанов и морей. М.: ИОРАН, 2022. Т. 4. С. 118–122.
11. *Патин С.А.* Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО. 2017. Т. 1. 327 с.
12. *Петрова В.И., Батова Г.И., Куришева 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
13. *Решетников М.Г.* Климатическая политика в России: Наука, технологии, экономика // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 6–10.
14. *Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 224 с.
15. Справочники и руководства. МОК/ВМО. Париж: Юнеско, 1984. № 13. 34 с.
16. *Хаустов А.П., Редина М.М.* Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах // Геохимия. 2017. № 1. С. 57–67.
17. AMAP. Assessment 2007: Chapter 4. Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo, 2010. 87 p.
18. AMAP. Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. Oslo, 2017. 353 p.
19. *Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al.* Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor // Science. 2017. V. 356 (6341).
20. *Bambulyak A., Frantzen B., Rautio R.* Oil transport from the Russian part of the Barents region. Status Report. The Norwegian Barents Secretariat and Akvaplan-niva: Norway, 2015. 105 p.
21. *Bianchi T.S., Schreiner K.M., Smith R.W. et al.* Redox effects on organic matter storage in coastal sediments during the Holocene: a biomarker/proxy perspective // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2016. V. 44. P. 295–319.
22. *Birgel D., Stein R., Hefter J.* Aliphatic lipids in recent sediments of the Fram Strait/Yermak Plateau (Arctic Ocean): composition, sources and transport processes // Marine Chemistry. 2004. V. 88. № 3–4. P. 127–160.
23. *Boitsov S., Klungsøyr J., Jensen H.* Background concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in deep core sediments from the Norwegian Sea and the Barents Sea: a proposed update of the OSPAR commission background values for these sea areas // Chemosph. 2020. № 251. P. 1–12.

24. *Boitsov S., Klungsøyr J., Jensen H.* Background concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in deep core sediments from the Norwegian Sea and the Barents Sea: a proposed update of the OSPAR commission background values for these sea areas // *Chemosph.* 2020. № 251. P. 1–12.
25. *Dahle S., Savinov V., Klungsøyr J. et al.* Polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in the Barents Sea sediments: small changes over the recent 10 years // *Mar. Biol. Res.* 2009. № 5. P. 101–108.
26. *Ivanov A.Y., Ivonin D.V., Terleeva N.V. et al.* Oil spills in the Barents Sea: the results of multiyear monitoring with synthetic aperture radar // *Mar. Pollut. Bull.* 2022. 179. 113677.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113677>.
27. *Keyte I.J., Harrison R.M., Lammel G.* Chemical reactivity and long-range transport potential of polycyclic aromatic hydrocarbons – A review // *Chemical Society Reviews*, 2013. V. 42 (24), 9333–9391.
<https://doi.org/10.1039/C3CS60147A>
28. *Koltovskaya E.V., Nemirovskaya I.A.* Concentration and composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of the Barents and Norwegian seas // *Oceanology*. 2023. V. 63. M. Suppl. 1. P. 144–155.
29. *Kudryavtseva E., Kravchishina M., Pautova L. et al.* Sea Ice as a Factor of Primary Production in the European Arctic: Phytoplankton Size Classes and Carbon Fluxes // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. V. 11. № 11. 2131.
<https://doi.org/10.3390/jmse11112131>
30. Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Co-ordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP) Tromsø: Akvaplan-niva, 2011. 71p.
31. *Morgunova I.P., Petrova V.I., Litvinenko I.V. et al.* Hydrocarbon molecular markers in the Holocene bottom sediments of the Barents Sea as indicators of natural and anthropogenic impacts // *Mar. Poll. Bull.* 2019. V. 149. № 12. P. 110587.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110587>
32. *Nishumura M., Baker E.W.* Possible origin of n-alkanes with remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1986. V. 50. № 2. P. 299–305.
33. *Olli K., Wexels Riser, Wassmann C. et al.* Seasonal variation in vertical flux of biogenic matter in the marginal ice zone and the central Barents Sea // *Journal of Marine Systems*. 2002. V. 38. № 1–2. P. 189–204.
34. *Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M.* The Biomarker Guide: Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history. V. 2. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 1155 p.
35. *Rise L., Bellec V.K., Chand S. et al.* Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords // *Norwegian Journal of Geology*. 2015. V. 94. P. 263–282.
36. *Rudels B., Meyer, R., Fahrbach E. et al.* Water mass distribution in Fram Strait and over the Yermak Plateau in summer 1997 // *Ann. Geophys.*, 2000. V. 18. № 6. P. 687–705.
37. *Schauer U., Fahrbach E., Osterhus S. et al.* Arctic warming through the Fram Strait: oceanic heat transport from 3 years of measurements // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. C06026.
<https://doi.org/10.1029/2003JC001823>
38. *Schneider A., Panieri G., Lepland A. et al.* Methane seepage at Vestnesa Ridge (NW Svalbard) since the Last Glacial Maximum // *Quat. Sci. Rev.* 2018. V. 193. P. 98–117.
39. *Sztybor K., Rasmussen T.L.* Diagenetic disturbances of marine sedimentary records from methane-influenced environments in the Fram Strait as indications of variation in seep intensity during the last 35 000 years // *International Journal of Quaternary research*. 2016. V. 46. № 2. P. 212–228.
<https://doi.org/10.1111/bor.12202>
40. *Sztybor K., Rasmussen T.L.* Late glacial and deglacial palaeoceanographic changes at Vestnesa Ridge, Fram Strait: Methane seep versus non-seep environments // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2017. V. 476. P. 77–89.
41. *Zhang L., Ma Y., Vojta, S. et al.* Presence, sources and transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2022. № 50. GL101496.
<https://doi.org/10.1029/2022GL101496>
42. *Yunker M.B., Macdonald R.W., Ross P.S. et al.* Alkane and PAH provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada // *Org. Geochem.* 2015. № 89–90. P. 80–116.
43. *Walczowski W., Piechura J., Osinski R. et al.* The West Spitsbergen Current volume and heat transport from synoptic observations in summer // *Deep-Sea Res. Part I*. 2005. V. 52. № 8. P. 1374–1391.

ORIGIN OF HYDROCARBONS IN HOLOCENE SEDIMENTS OF THE NORDIK SEAS AND BARENTS SEA

I. A. Nemirovskaya*, A. V. Medvedeva

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

** e-mail: nemir@ocean.ru*

The concentrations and composition of hydrocarbons (aliphatic – AHCs and polycyclic aromatic hydrocarbons – PAHs) were determined using molecular markers in Holocene sediments of the Nordik Seas and the Barents Sea (cruise 84 of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh*, 2021). A wide range of concentrations in surface bottom sediments has been established: C_{org} (0.25–2.71%), AHCs (7–182 $\mu\text{g/g}$) and PAHs (0–1918 ng/g). The distribution of hydrocarbons is determined mainly by the processes occurring in the sedimentary strata (changes in Eh and fluid flows), and to a lesser extent by the lithotype of sediments. At the same time, the formation of autochthonous homologues is observed in the composition of alkanes, and in the composition of PAHs – naphthalenes.

Key words: aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons, Nordik Seas, Barents Sea, bottom sediments, fluid flows