

УГЛЕВОДОРОДЫ В ВОДЕ И В ДОННЫХ ОСАДКАХ НОРВЕЖЕСКО-БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО БАССЕЙНА

© 2023 г. И. А. Немировская^a, *, А. В. Храмцова^a

^aИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский просп., д. 36, Москва, 117997 Россия

*e-mail: nemir44@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2022 г.

После доработки 29.03.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

Результаты изучения углеводородов (УВ: алифатических – АУВ и полициклических ароматических углеводородов – ПАУ) в водах и донных отложениях (2019 и 2020 годы, 75 и 80 рейсы НИС “Академик Мстислав Келдыш”) в Норвежско-Баренцевом бассейне (хребет Мона, шельф архипелага Шпицберген, Стур-фьорд, Медвежинский желоб, центральная часть Баренцева моря, шельф Новой Земли, желоб Франца-Виктории) показали, что увеличение содержания УВ во взвеси поверхностных вод по сравнению с 2016–2017 гг. в среднем до 20–23 мкг/л обусловлен цветением фитопланктона у кромки льда. В донных отложениях распределение АУВ (3–186 мкг/г) и ПАУ (3–9934 нг/г) зависит не только от условий седиментации и гранулометрического состава осадков, но и от изменчивости окислительно-восстановительных условий в осадочной толще и молекулярной диффузии УВ из продуктивных горизонтов.

Ключевые слова: углеводороды (алифатические и полициклические ароматические), органическое вещество, донные осадки, флюидные потоки. Норвежское и Баренцево моря

DOI: 10.31857/S0016752523020073, EDN: CKZCHC

В условиях меняющегося климата в последние годы в экосистеме арктических морей и в частности Норвежско-Баренцевоморского бассейна под влиянием атлантических вод, произошли значительные изменения. С сокращением площади многолетних льдов, и освобождением шельфа от зимнего льда (Лапина и др., 2011) увеличилась первичная продукция (ПП) фитопланктона в среднем на 28% (Dalpadado et al., 2014; Arrigo, Dijkjen, 2015). Это вызвало рост концентраций органического вещества (ОВ) (Кодрян и др., 2017), а в их составе углеводородов (УВ) – соединений антропогенного и природного происхождения (Немировская, 2013).

С целью выявления геохимических особенностей в распределении и составе УВ в Норвежско-Баренцевоморском бассейне было проведено их изучение в водной взвеси и донных осадках летом 2019 и 2020 гг. в рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш”.

Ранее было установлено, что в структурных зонах этих морей в определенных геологических условиях, возможно, их нефтегазообразование (Григоренко, 2016; Глязнецова, Немировская, 2020; Романкевич, Ветров, 2021; Тиссо, Вельте, 1981). Кроме того получение новых данных о пространственном распределении и составе алифатиче-

ских (АУВ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) необходимо для определения вклада вертикальной миграции УВ в их общий углеводородный пул в море. Знание состава, распределения и генезиса УВ также необходимо для последующего геоэкологического контроля при разведочных и добычных работах (Немировская, 2013; Петрова, 2015; АМАР, 2007).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Воду для изучения УВ отбирали с поверхности ведром при приближении судна к станциям, а из толщи воды – батометрами (комплекс “Rosette”). Взвесь для анализа органических соединений (ОС): $C_{орг}$, липидов, УВ, хл *a*, выделяли на стекловолочные фильтры GF/F (размер пор 0.7 мкм, фирмы Whatman), а для изучения взвеси – на предварительно отмытые соляной кислотой и взвешенные поликарбонатные ядерные фильтры (размер пор 0.45 мкм, полотно производства ОИЯИ, г. Дубна).

Верхний слой донных осадков отбирали дночерпателем “Океан-25”, российского производства, а ненарушенных кернов – мультикорером, Mini Muc K/MT 410, KUM, (Германия).

Все растворители имели квалификацию высокой чистоты (о. с. ч.). Хлористый метилен исполь-

зовали для экстракции липидов на ультразвуковой бане. Отдельные фракции АУВ разделяли гексаном с помощью колоночной хроматографии на силикагеле. Концентрации липидов и АУВ (до и после хроматографии соответственно) определяли методом ИК-спектроскопии на приборе IR Affinity 1, (“Shimadzu”, Япония) (Коршенко, 2020; Немировская, 2013). В качестве эталона использовали смесь изооктана, гексадекана и бензола (37.5, 37.5 и 25 об. % соответственно), стандарт ГСО 7248-96. Чувствительность метода составила 3 мкг/мл экстракта (Немировская, 2013).

Содержание и состав полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония), с флуоресцентным детектором RF 20A и программируемыми длинами волн поглощения и возбуждения. Колонка Envirosep PP при 40°C в термостате в условиях градиента ацетонитрила в воде от 50 до 90% по объему, расход элюента — 1 см³/мин. Расчеты выполнены с помощью программы LC Solution. В качестве стандарта использовали индивидуальные ПАУ и их смеси производства “Supelco”. В результате были определены индивидуальные полиарены, рекомендованные ЕРА (Monitoring, 2011): нафталин (НАФ), 1-метилнафталин (1-Ме-НАФ), 2-метилнафталин (2-Ме-НАФ), аценафтен (АЦНФ), флуорен (ФЛР), фенантрен (ФЕН), антрацен (АНТР), флуорантен (ФЛТ), пирен (ПР), бенз(а)антрацен (БаА), хризен (ХР), бенз(е)пирен (БеП), бенз(к)флуорантен (БкФ), бенз(б)флуорантен (БбФ), перилен (ПРЛ), бенз(а)пирен (БаП), дибенз(а,h)антрацен (ДБаА), бенз(g,h,i)перилен (БПЛ), индено(1,2,3-с,d)пирен (ИНП).

Для анализа алканов использовали хроматограф Кристалл-Люкс 4000-М (РФ), оснащенный пламенно-ионизационным детектором, с капиллярной колонкой 30 м × 0.22 мм фирмы “Supelco”, с фазой: 5% фенила и 95% поликсилана, при программировании температуры от 60 до 300°C со скоростью 8°/мин, газ-носитель — гелий (скорость прохождения газа 1.5 л/мин). Для калибровки прибора и определения времени выхода идентифицируемых алканов, использовали смесь калибровочных стандартов *n*-C₁₀–C₄₀ фирмы “Supelco”, а в качестве внутреннего стандарта — сквалан, фирмы “Sigma Aldrich”.

Органический углерод (C_{орг}) в образцах взвеси определяли методом сухого сжигания на приборе ТОС-L, “Shimadzu”, Япония. Чувствительность метода составила 6 мкг углерода в образце при точности 3–6%. Для перевода концентраций АУВ в C_{орг} использован коэффициент 0.86. (Немировская, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поверхностные воды

В 2019 г. во взвеси поверхностных вод для всего массива данных содержание липидов изменялось в интервале 18–114, в среднем 51 мкг/л, а АУВ — 6–62, в среднем 23 мкг/л (табл. 1). Близкие результаты были получены и в 2020 г.: для липидов — 15–157, в среднем 64 мкг/л, и для УВ — 9–38, в среднем 20 мкг/л.

Распределение АУВ во взвеси и самого взвешенного вещества при одинаковых источниках обычно совпадают (Немировская, 2017). Действительно в общих чертах распределение УВ и взвеси было однотипным (рис. 1). Однако для всего массива данных в 2019 г. наблюдалась лишь слабая зависимость между концентрациями взвеси и УВ: ($r = 0.175$, $n = 53$). Лучшее соотношение между взвесью и хл $a - r = 0.50$, с наиболее высокими значениями в районе арх. Шпицберген, где $r = 0.75$. В южной части Баренцева моря зависимости между хл a и взвесью, хл a и УВ отсутствовали: $r(\text{Вз.} - \text{хл } a) = -0.14$; $r(\text{хл } a - \text{УВ}) = -0.22$, что, может указывать на разные их источники.

Концентрации АУВ, превышающие 50 мкг/л (ПДК для нефтяных УВ), или близкие к этой величине, установлены на судоходных путях в южной части Баренцева моря (рис. 1).

Донные осадки

Содержание АУВ в донных осадках изменялось в интервале 5–64 мкг/г (табл. 2).

Осадки разлома Ян-Майнен, благодаря их гидротермальной природе, на поверхности представлены агломератным илом с кусками темно-серого и голубоватого цвета. В поверхностном слое мягкого осадка были видны рыжие пятна ожелезнения, обломки пород, ракушки, галька. Концентрации АУВ колебались в интервале 5–51 мкг/г, с максимальной величиной в тонкодисперсном осадке ст. 6131 (рис. 2).

В Баренцевом море высокое содержание АУВ установлено на Восточном шельфе архипелага Шпицберген (51 мкг/г, ст. 6196), а максимальное — в южной части (64 мкг/г, ст. 6213) на Севере Канинской банки (рис. 2). В составе *n*-алканов поверхностного слоя донных осадков в большинстве районов незначительно преобладали легкие гомологи, так как отношение $L/H = \sum(C_{12}-C_{24})/\sum C_{25}-C_{37}$ в среднем составило 1.22, что может свидетельствовать об интенсивности автохтонных процессов.

Наиболее низкие значения этого отношения установлены на шельфе Скандинавии (ст. 6203, 0.22) и в северной части Печорского моря (ст. 6217, 0.28), а максимальное (ст. 6179, 2.06) — в восточной части широтного разреза в желобе

Таблица 1. Результаты анализа органических соединений и взвеси

Кол-во проб	Район	Липиды, мкг/л		АУВ, мкг/л		Взвесь, мг/л		Средняя АУВ, мкг/мг взвеси
		интервал средняя	σ	интервал средняя	σ	интервал средняя	σ	
75 рейс АМК, 2019 г.								
56	Весь район	18–114 51	24	6–62 23	15	0.05–1.13 0.35	0.24	72
8	Норвежское море	18–114 53	27	6–35 17	17	0.05–0.56 0.29	0.14	73
15	Зап. Шпицберген	20–108 51	28	7–60 24	17	0.10–1.13 0.45	0.37	44
8	Вост. Шпицберген	21–43 30	7	6–19 11	4	0.20–0.38 0.26	0.06	36
7	Разрез к Сканди- навии	35–111 54	7	18–49 29	12	0.11–0.55 0.31	0.18	126
13	Юг Баренцева моря	32–75 55	13	11–62 32	17	0.1–0.35 0.25	0.09	134
80 рейс АМК, 2020 г.								
20	Весь район	15–157 64	37	9–38 20	10	0.10–15.90 1.10	3.32	22
19*		27–157 66	37	9–38 21	10	0.10–1.47 0.36	0.31	66
6	Норвежское море	15–58 34	14	17–37 26	7	0.21–15.9 3.42	6.22	65
5*		28–58 40	11	17–31 24	5	0.21–0.45 0.31	0.10	102
14	Баренцево море	28–156 74	38	14–58 24	11	0.10–1.47 0.37	0.35	94

* Без аномальной концентрации взвеси 15.9 мг/л на ст.6840.

Квейтола. В районе хребта Мона (ст. 6131), в Лофотенской котловине (ст. 6142) и в районе хребта Книповича (ст. 6154) в низкомолекулярной области преобладали микробиальные четные алканы, а в высокомолекулярной – серия нечетных гомологов C_{25} – C_{31} (рис. 3). Низкие значения СРІ (1.40–2.06, в среднем 1.64) и близкие концентрации изо-соединений (отношение пристан/фитан – в среднем 1.01) могут указывать на незначительную трансформацию алканов.

Распределение ПАУ в поверхностных осадках носит мозаичный характер, и их суммарное содержание изменялось в интервале 32–9934 нг/г. Столь широкий концентрационный диапазон, видимо, обусловлен не только разными литолого-фациальными условиями осадконакопления, но и относительной изменчивости основных геохимических параметров в осадочной толще.

В 2020 г. для различных районов диапазон концентраций АУВ был больше, чем в 2019 г. –

3–186 мкг/г (табл. 2, рис. 4). Тем не менее, в районе хребта Мона установлено довольно низкое содержание как АУВ (в среднем 14 мкг/г), так и $C_{орг.}$ (в среднем 0.44%). Здесь осадки представлены песчано-алевритопелитовым илом почти черного цвета с небольшой примесью гравийного и галечного материала вулканического происхождения. На поверхности осадка отмечены Fe–Mn корки размером от 1 до 10 см.

Наиболее высокие концентрации АУВ в 2020 г. в поверхностном слое установлены в Стур-фьорде (в среднем 90 мкг/г, табл. 2), с максимальным содержанием на ст. 6842 – 186 мкг/г. Значительно ниже были концентрации АУВ на восточном шельфе Шпицбергена (в среднем 52 мкг/г).

Состав алканов на шельфе Шпицбергена указывал на значительную роль автохтонных процессов в поверхностном слое осадков (станции 6844, 6847, 6849). В меньшей степени эти процессы

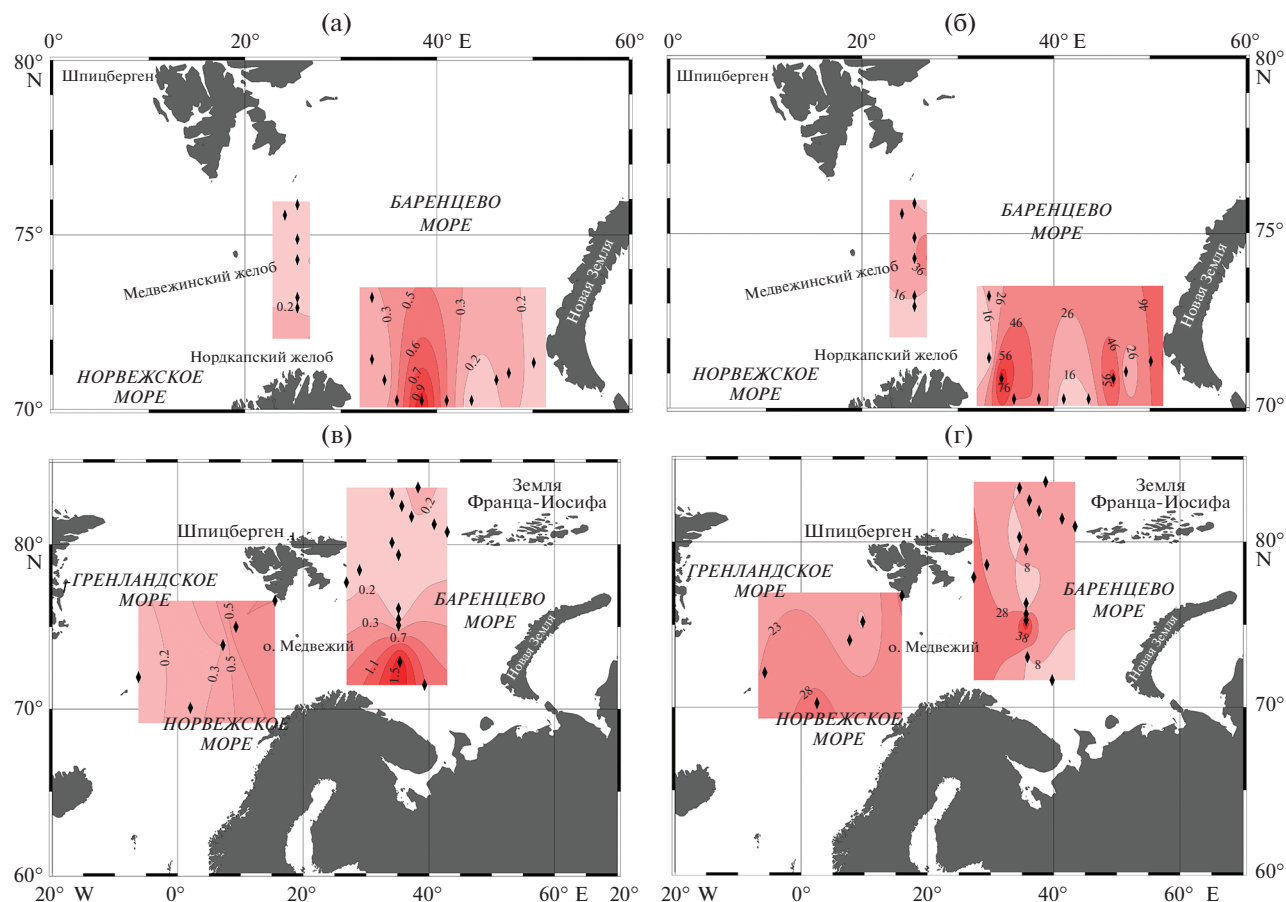


Рис. 1. Распределение взвеси (а, в, мг/л) и алифатических УВ (б, г, мкг/л) в районах работ в 2019 г. (75 рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”, (а и б) и в 80 рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”, (в, г).

происходят на севере Баренцева моря, на шельфе Земли Франца-Иосифа (рис. 5).

Благоприятная ледовая обстановка дала уникальную возможность провести исследования в пределах жолоба Франц-Виктория от глубин 3700 м (ст. 6860) до шельфа с глубиной 593 м (ст. 6864) и 403 м (ст. 6866), т.е. в пределах акватории обычно покрытой льдом. Здесь содержание АУВ (в среднем 25 мкг/г) в поверхностном слое осадков оказалось наиболее низким (табл. 2).

Суммарное содержание ПАУ изменялось, как и в 2019 г., в широком диапазоне: 3–2436 нг/г (рис. 4). Величины ПАУ, установленные в районе хребта Мона, в среднем 50 нг/г были довольно низкими. В Стур-фьорде содержание ПАУ на ст. 6842 (985 нг/г) с максимальным содержанием АУВ были значительно выше, чем на ст. 6841 (47 нг/г). Однако в отличие от АУВ наиболее высокие концентрации ПАУ приурочены к шельфу арх. Шпицберген. В северной части Баренцева в осадках жолоба Франц-Виктория их концентрации в поверхностном слое изменялись от 78 до 757 нг/г, с максимумом на ст. 6860 в наиболее глубоководном районе. Поэтому между этими углеводород-

ными классами отсутствует корреляция в распределении их концентраций в поверхностном слое: $r = 0.30$, $n = 21$ ($P = 0.95$).

В толще донных осадков концентрации, как $C_{орг}$, так и АУВ только на отдельных станциях уменьшались с глубиной захоронения. В большинстве районов происходило увеличение их содержания в отдельных горизонтах (рис. 6).

Примером такого распределения может служить осадочная толща Стур-фьорда на ст. 6841 (рис. 6а). Осадок на поверхности состоял из алевроито-пелитового ила оливково-коричневого цвета, который с глубиной захоронения становился более темным. При отборе осадка чувствовался запах сероводорода. В осадочной толще (>2 см), наблюдалось большое количество гидротроилитовых примазок и аутигенных карбонатных корок. Максимальная концентрация (218 мкг/г) установлена при изменении редокс-потенциала на гор. 6–7 см ($E_h = -80$), где содержание $C_{орг}$ резко уменьшалось, а АУВ наоборот увеличивалось, то есть образование АУВ происходило за счет разложения $C_{орг}$. При этом полностью отсутствова-

Таблица 2. Характеристика поверхностного слоя донных осадков Норвежского и Баренцева морей в разные годы исследования

Район	Станции	n	АУВ, мкг/г		C _{орг} , %		Влажность, %	
			интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее
Август—сентябрь 2016 г.								
Все районы	5405—5456	42	3—44	14	0.072—2.588	1.085	20.1—69.7	45.6
Штокманский полигон	5413—5421	7	9—27	15	0.667—2.568	1.812	23.7—69.7	53.0
Медвежинский желоб	5431—5441	10	6—44	17	0.253—1.707	0.791	27.0—58.5	40.6
Русская гавань	5422—5430	7	4—22	11	0.242—1.860	0.960	27.9—60.0	40.1
Шпицберген — ЗФИ	5447—5446	8	8—24	16	0.699—1.475	1.214	33.2—68.5	55.5
Июль—август, 2017 г.								
Все районы	5518—5581	48	3—57	12	0.032—2.377	1.023	17.0—72.1	49.5
Западная часть	5518—5532	16	15—37	10	0.302—1.695	0.647	30.4—60.7	49.6
Шпицберген — ЗФИ	5550—5564	14	4—37	13	0.720—2.377	1.525	37.6—72.0	54.3
Новая Земля	5565—5569	5	6—57	19	0.80—1.662	1.193	40.5—63.4	49.8
Центральная часть	5570—5581	13	4.4—17.2	10.8	0.032—1.937	0.926	17.0—63.4	49.1
Май—июнь 2019 г.								
Все районы	6131—6217	49	6—64	25	0.05—1.87	0.83	17.1—72.6	56.0
Хребет Мона	6131—6146	7	7—51	18	0.23—0.77	0.51	35.0—72.6	49.8
Лофотенская котловина	6139—6142	4	6—28	17	0.49—0.69	0.58	65.2—72.6	68.5
Хребет Книповича	6150—6157	7	14—37	27	0.52—1.32	0.96	60.1—71.2	66.1
Зап. шельф Шпицбергена	6152—6163	6	15—35	27	0.58—1.66	0.88	35.3—71.2	54.1
Желоб Квейтола	6164—6172	5	7—59	23	0.47—0.80	0.63	34.1—61.0	47.2
Меридиональный р-з по 27.5° с.ш.	6181—6196	6	28—53	40	1.31—1.87	1.70	50.0—76.2	64.3
Меридиональный р-з по 33° с.ш.	6197—6217	14	10—64	23	0.05—1.51	0.52	17.1—68.2	64.3
Июль—август 2020 г.								
Все районы	6821—6867	21	3—186	45	0.30—1.56	0.92	22.2—72.9	58.6
Хребет Мона	6821—6838	7	3—27	14	0.30—0.51	0.44	38.5—61.5	49.9
Стур-фьорд	6840—6843	4	36—186	90	0.69—1.36	1.12	22.2—66.2	46.3
Восточный шельф Шпицбергена	6844—6851	5	17—86	52	1.07—1.56	1.29	59.5—72.9	69.6
Шельф ЗФИ	6852—6867	5	17—30	25	0.68—0.87	0.83	67.6—69.6	68.6

ли связи в распределении C_{орг} и АУВ ($r = -0.16$), но наблюдалась зависимость в распределении АУВ и ПАУ ($r = 0.56$).

Состав алканов в толще осадка на ст. 6841 по содержанию и распределению гомологов резко отличался от ст. 6840 (рис. 7).

В составе алканов ст. 6841 доминировали низкомолекулярные гомологи, и отношение L/H с глубиной захоронения увеличивалось. Последнее свидетельствует об интенсивности автохтонных процессов в осадочной толще даже на горизонте 22–26 см. Величина CPI на ст. 6840 (в среднем 1.8, максимум 2.6) выше, чем на ст. 6841 (в среднем 1.4, максимум 1.8), что может указывать на мень-

шую трансформацию высокомолекулярных гомологов непосредственно в осадочной толще (табл. 3). С глубиной захоронения значения CPI обычно увеличиваются, так как в составе алканов при трансформации АУВ возрастает серия нечетных более устойчивых гомологов (Yamamoto, Polyak, 2009). Для сравнения в голоценовых шельфовых осадках Карского моря величины CPI_{22–33} изменялись в интервале 2.5–8.1, при средней 5.2 (Fernandes, Sicre, 2000).

На станциях в Стур-фьорде в составе ПАУ доминировали 2-х, 3-кольчатые арены: нафталин, 2-метил-нафталин (27–43% от суммы) и фенантрен (с 22 до 40%) (рис. 8).

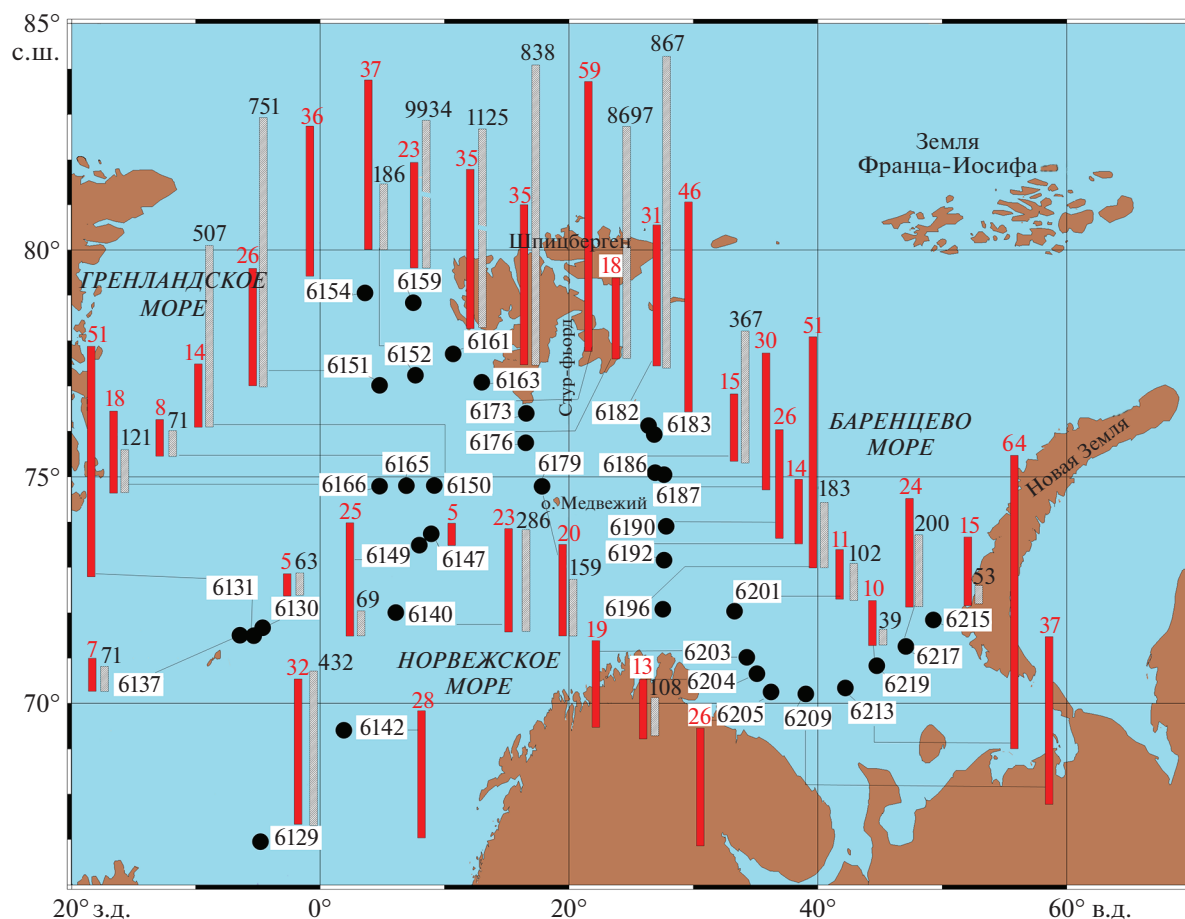


Рис. 2. Распределение в поверхностном слое донных отложений в 2019 г. АУВ (темные столбцы, концентрации над столбцами, мкг/г) и ПАУ (заштрихованные столбцы, нг/г). Черные кружки – номера станций.

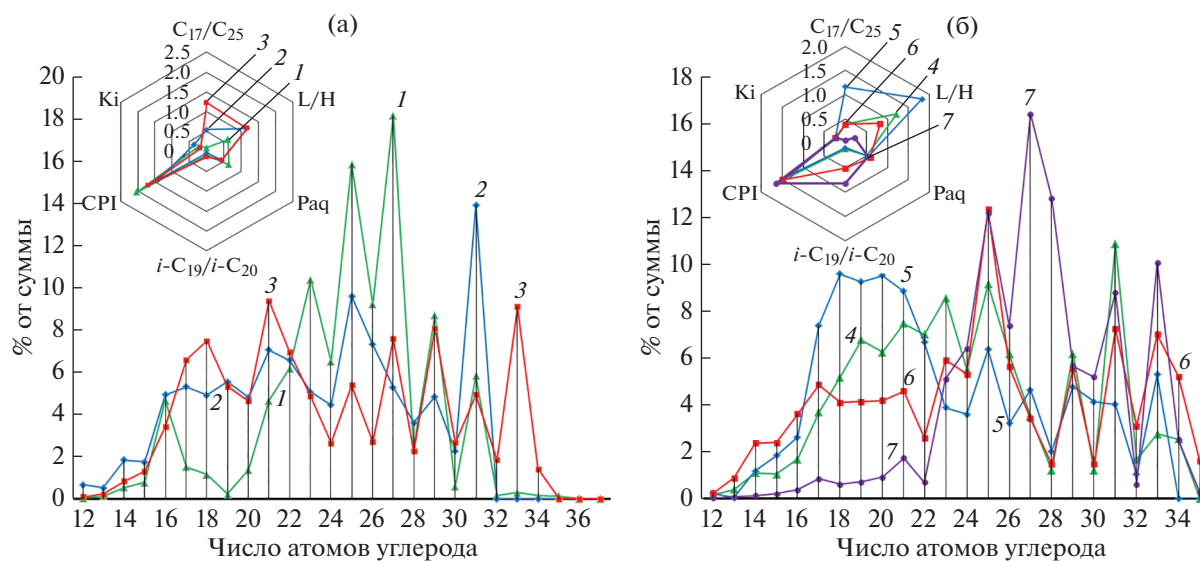


Рис. 3. Состав *n*-алканов в поверхностном слое донных отложений на отдельных станциях, отобранных в 75-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2019 г.): 1 – ст. 6131, 2 – ст. 6142, 3 – ст. 6154, 4 – ст. 6190, 5 – ст. 6192, 6 – ст. 6213, 7 – ст. 6217. На вставке показано распределение основных маркеров: $L/H = \Sigma(C_{12}-C_{24})/\Sigma(C_{25}-C_{37})$; $Paq = (C_{23} + C_{25})/(C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$; $CPI = \Sigma(\text{нечет.})/\Sigma(\text{чет.})$; $Ki = (i-C_{19} + i-C_{20})/(C_{17} + C_{18})$.

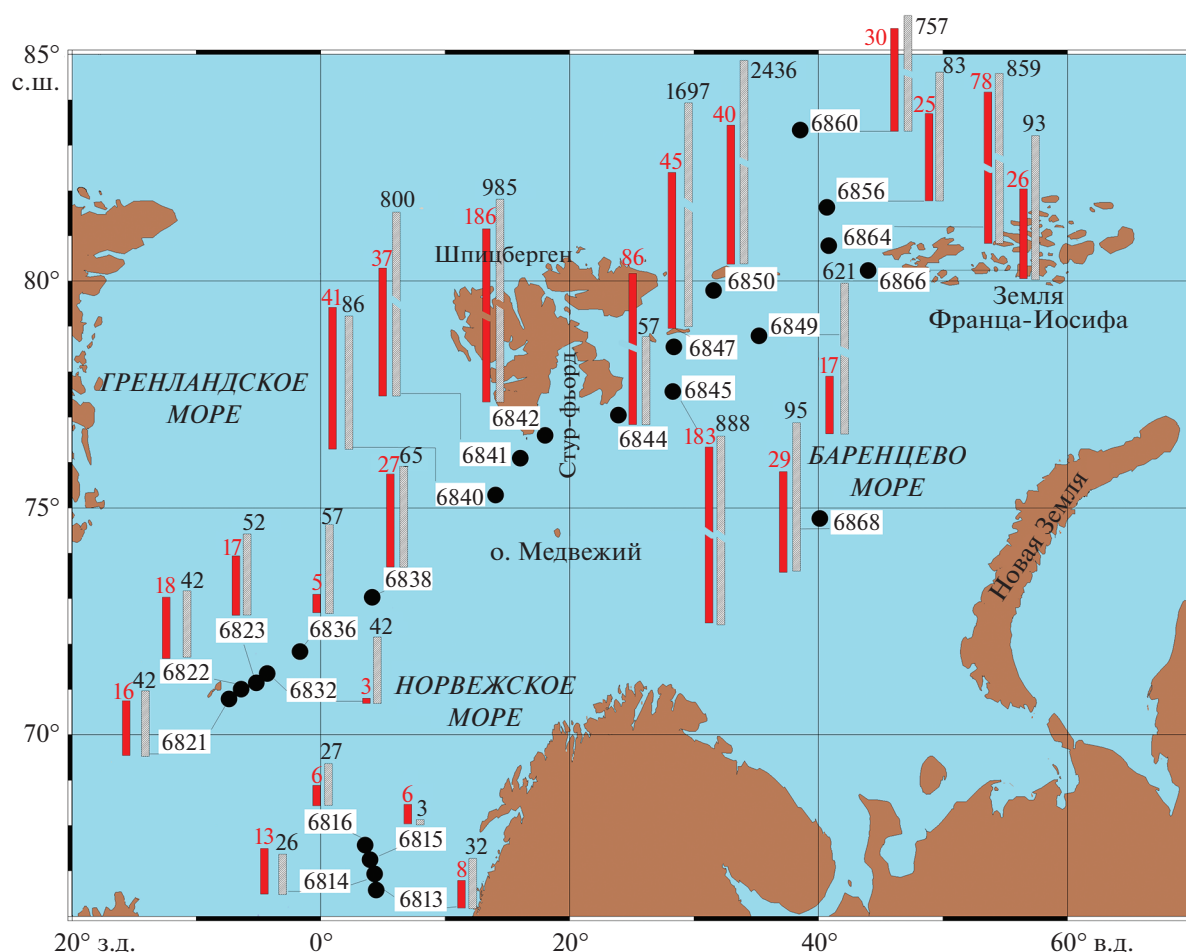


Рис. 4. Распределение в поверхностном слое донных отложений в 2020 г. АУВ (темные столбцы, мкг/г) и ПАУ (заштрихованные столбцы, нг/г). Черные кружки – номера станций.

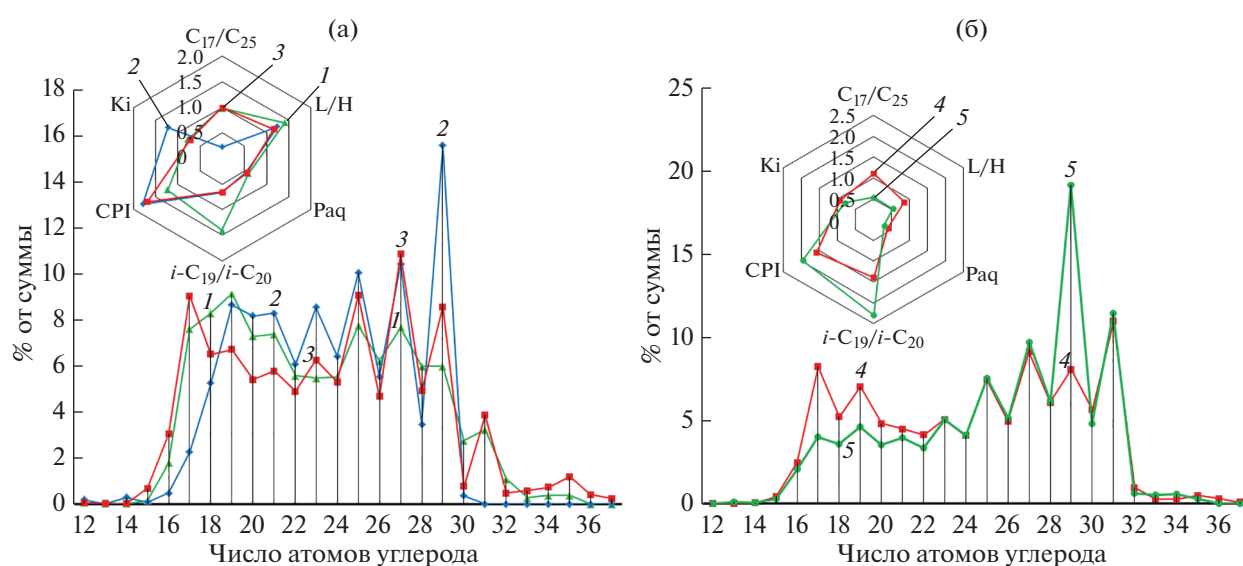


Рис. 5. Состав *n*-алканов в поверхностном слое донных отложений на отдельных станциях, отобранных в 80-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (а) – 1 – ст. 6844, 2 – ст. 6845, 3 – ст. 6847. (б) – 4 – ст. 6849, 5 – ст. 6860. Расположение станций приведено на рис. 4.

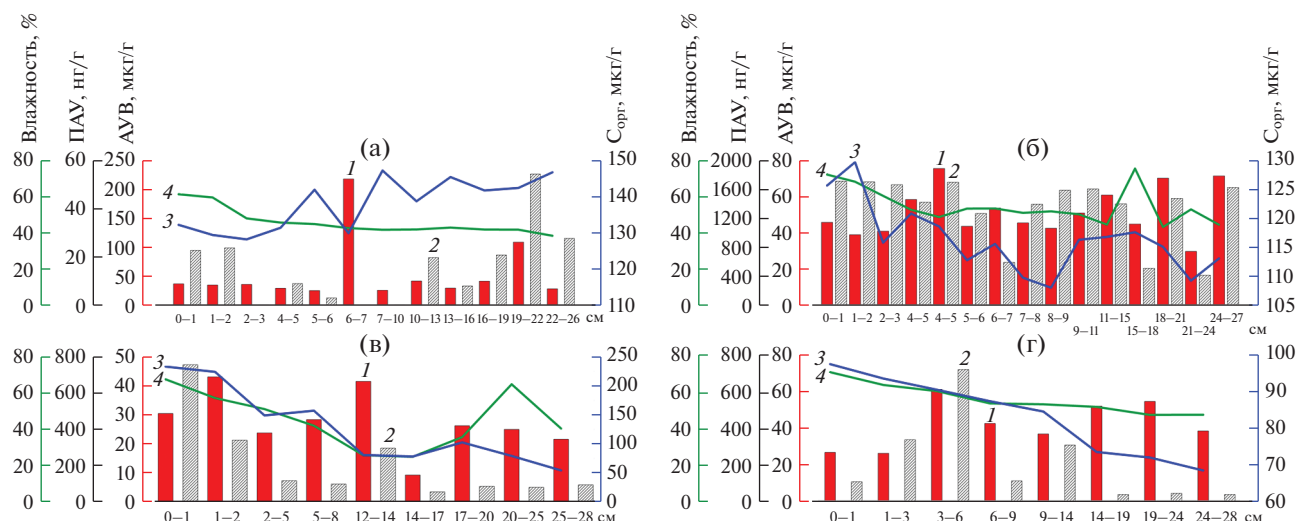


Рис. 6. Изменение концентраций АУВ (1), ПАУ (2), Сорг (3) и влажности (4) осадков с глубиной захоронения на ст. 6841 (а), ст. 6847 (б), 6860 (в) и 6866 (г). Расположение станций приведено на рис. 3 (80 рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”).

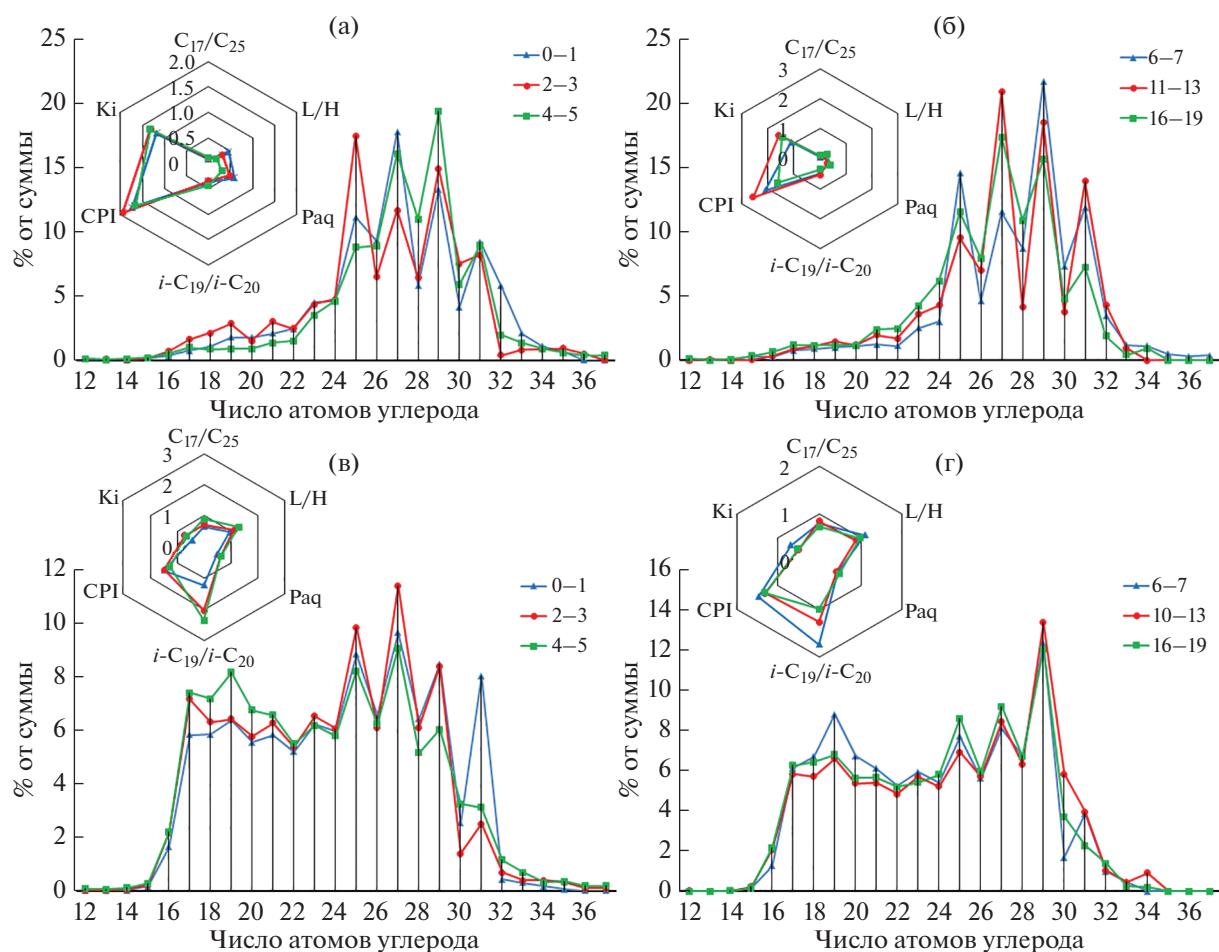


Рис. 7. Изменение состава алканов с глубиной захоронения на станциях 6840 (а, б) и 6841 (в, г). На вставках распределение основных маркеров в их составе.

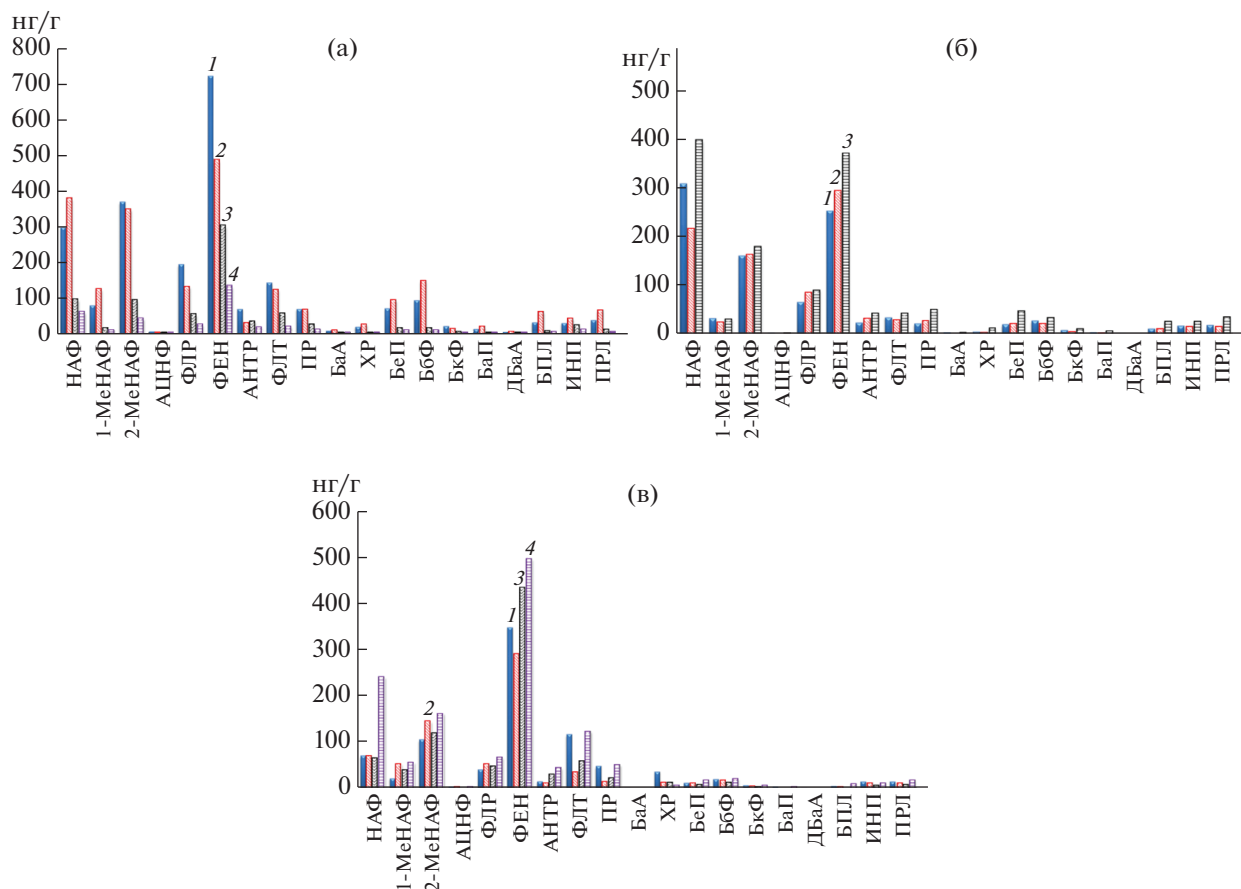


Рис. 8. Изменение состава ПАУ с глубиной захоронения (а) — на ст. 6841: 1 — 0–1, 2 — 3–4, 3 — 5–6, 4 — 7–8 см; (б) — ст. 6847: 1 — 1–2, 2 — 5–6, 3 — 24–27 см; (в) — ст. 6864: 1 — 0–1, 2 — 3–4, 3 — 13–16, 4 — 24–26 см (2020 г.).

Осадки восточного шельфа арх. Шпицберген, представлены сильно биотурбированными алевритопелитовыми илами темно-желтовато-коричневого цвета, окисленными до 8 см. В них также не происходило плавного уменьшения концентраций $C_{\text{орг}}$, АУВ и ПАУ. Повышенные концентрации нафталинов и фенантрена приурочены не к поверхностному горизонту, а к слою 19–22 см (рис. 8). В осадочной толще отсутствовала зависимость в распределении АУВ и $C_{\text{орг}}$ ($r = 0.07$). Если распределение $C_{\text{орг}}$ зависело от гранулометрического состава осадков — $r(C_{\text{орг}} - \text{Вл}) = 0.58$, то в противоположность этому между АУВ и Вл. не наблюдалась обратная зависимость — $r = -0.57$.

В желобе Франц-Виктория в наиболее глубоководной части на ст. 6860 (глубина 3703 м) в керне осадка (рис. 6в) происходило резкое уменьшение содержания АУВ (в 4.5 раз) и ПАУ (в 5.4 раза) на горизонте 14–17 см, а концентрация $C_{\text{орг}}$ возросла практически в 2 раза (с 1.142 до 2.107%). При этом изменялся состав осадка, и в слое 13 см появлялись линзы плотного песчанистого материала, а с 19 см — наблюдалась биотурбация. На шельфе в этом районе (станции 6864 и 6866 с глу-

биной 594–403 м) в толще осадка на фоне уменьшения содержания $C_{\text{орг}}$ происходило неравномерное снижение концентраций АУВ. На горизонте 3–6 см содержание АУВ возрастало более, чем в 2 раза (до 60 мкг/г) и ПАУ (до 638 нг/г). Аналогичное распределение органических соединений наблюдалось в толще осадка на ст. 6864, где при переходе от окисленного к восстановленному слою количество нафталинов увеличивалось с 29 до 36%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рост концентраций АУВ в 2019–2020 гг. в поверхностных водах может быть обусловлен исследованиями в разные сезоны, так как пробы отбирали в июне, сразу после ледостава. При таянии льдов происходит не только освобождение принесенного ими материала, но и в краевых зонах льдов создаются благоприятные условия для развития ПП. В результате величины ПП в этих районах сопоставимы с зонами апвеллингов (Мельников, Семенова, 2013). В июне 2019 г. на ст. 6180 у кромки плавучих льдов количество взвеси воз-

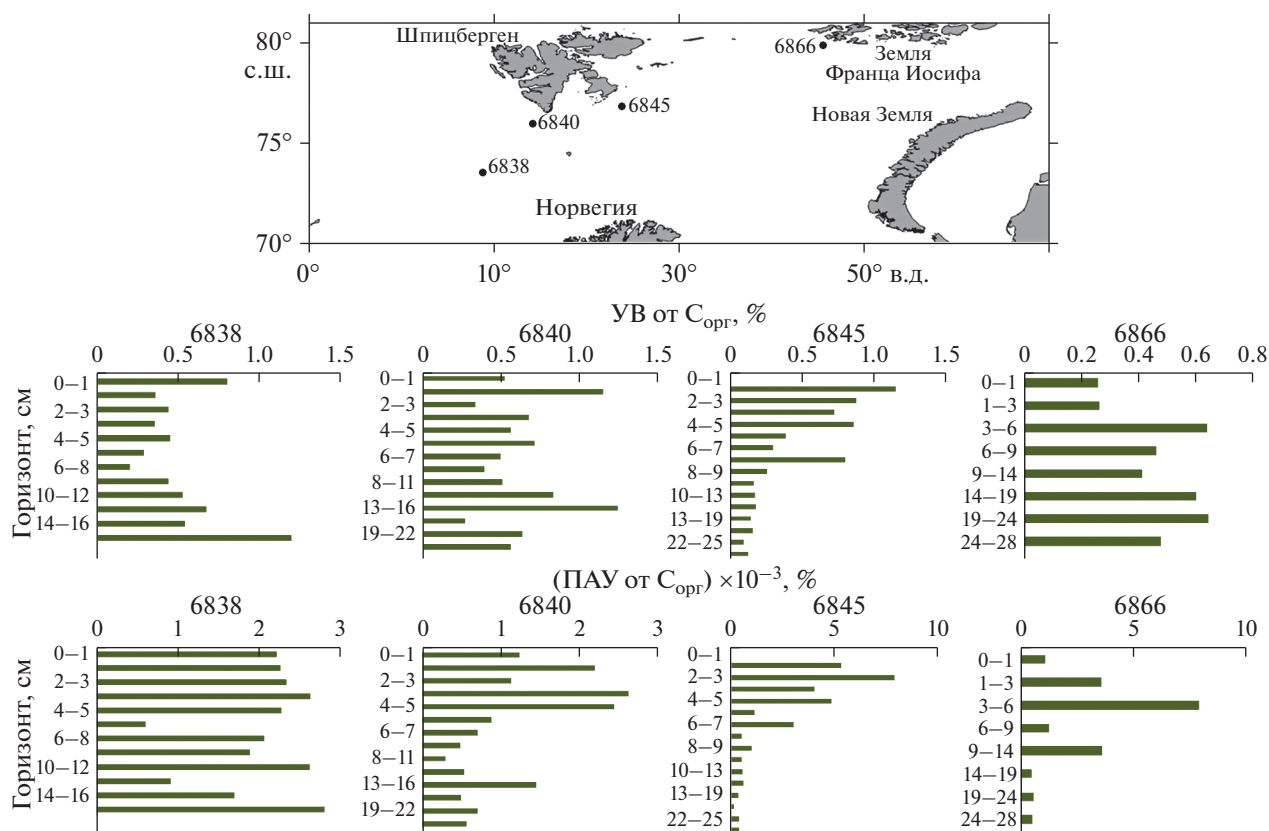


Рис. 9. Изменение содержания АУВ и ПАУ в составе C_{org} (%) с глубиной захоронения на отдельных станциях (2020 г.). 6838, 6840 и т.д. — номера станций.

росло до 0.92 мг/л, концентрации хл *a* — до 2.163 мкг/л, на соседних станциях еще больше — до 3.372 и 4.690 мкг/л соответственно. При этом концентрация АУВ составила 28 мкг/л, что было значительно выше их концентраций в 2016 и 2017 гг. (≤ 8 мкг/л, Немировская, 2020). Кроме того в южных районах, возможно, УВ могут поступать с нефтяным загрязнением, так как, согласно данным из космоса, в этой акватории Баренцева моря сосредоточено максимальное количество нефтяных пленок (Кучейко и др., 2020). Тем не менее, максимальное содержание (58 мкг/л, 170 мкг/мг взвеси) на ст. 6870 обусловлено коколитифоридным цветением, а не нефтяным загрязнением. При этом в растворенной форме концентрация УВ была значительно ниже — всего 24 мкг/л.

Полученные данные в 2019–2020 гг. показали, что антропогенное поступление УВ в донные осадки ограничено прибрежными районами, где увеличивается их содержание в составе C_{org} . В частности, в 2019 г. при концентрации АУВ 64 мкг/г, а ПАУ 600 нг/г (рис. 2) в песчаных осадках Канинской банки (Вл. 17.4%), их доля достигала аномально высокого значения в составе C_{org} — для АУВ — 11.7%, для ПАУ — 0.13%. Обычно в донных осадках содержание АУВ в составе C_{org} бы-

ли меньше 0.5%, а ПАУ $< 0.002\%$ (рис. 9). Считается, что фоновая концентрация АУВ в грубодисперсных осадках составляет 10 мкг/г, а в тонкодисперсных — 50 мкг/г (Немировская, 2013; Tolosa et al., 2004). Только в акваториях с антропогенными нефтяными поступлениями, грязевым вулканизмом, эндогенной миграцией концентрации АУВ повышались и превышали 1% в составе C_{org} (Немировская, 2013). Поэтому рост величины АУВ относительно фоновой концентрации как в пересчете на сухой осадок, так и в составе C_{org} , скорее всего, обусловлены антропогенными источниками.

Согласно данным, полученным в 2020 г. в прибрежных песчаных осадках (влажность 11–14%) в районе Мурманска при содержании АУВ 54–73 мкг/г, их доля в составе C_{org} колебалась в диапазоне 3.4–3.6%. Однако состав алканов не соответствовал плавному нефтяному распределению гомологов (Немировская, 2013; Yunker et al., 2015), так как в низкомолекулярной области доминировали нечетные гомологи $n-C_{15}-C_{19}$, а в высокомолекулярной — C_{25} , C_{27} . Обусловлено это быстрой трансформацией низкомолекулярных нефтяных алканов и влиянием терригенного органического вещества (Hou et al., 2021). Даже после разлива дизельного топлива в Норильске в

мае 2020 г., через 2 месяца после аварии, несмотря на довольно низкие арктические температуры, в поверхностном слое донных осадков состав алканов не соответствовал составу разлившегося нефтепродукта (Глянцева, Немировская, 2021).

Концентрация ПАУ в осадках мурманского шельфа также была высокой — 11900–13600 нг/г, но их содержание в составе $C_{орг}$ составили 0.8–0.9%, а в морских осадках — в основном меньше 0.002%. Для ПАУ установить фоновые концентрации сложнее, так как их величины зависят от количества определяемых индивидуальных полиаренов. В поверхностном слое осадков Баренцева моря ($\Sigma 22$ ПАУ) их содержание изменялось от 82 до 3076 нг/г с наиболее высокими величинами на шельфе Шпицбергена (Eide et al., 2011). В поверхностном слое осадков юго-западной части Баренцева моря содержание ПАУ изменялись от 10 до 1799 нг/г, и в осадках норвежских фьордов имели преимущественно пирогенное происхождение (Boitsov et al., 2009; Boitsov et al., 2013).

Известно, что пористость и влажность осадка характеризует его гранулометрический состав (Гавшин, 1988). Осадки с высоким значением влажности (до 90% и более) образованы, как правило, тонкодисперсной взвесью биогенного происхождения (например, фрагментами отмирающих планктонных организмов). Наоборот, низкие значения влажности (менее 40%) характерны для крупнодисперсных донных осадков, сформированных литогенным материалом, поступающим в водоемы в результате эрозии береговой зоны и со склоновым стоком воды.

Согласно нашим данным 2020 г. в поверхностном слое донных осадков концентрация $\Sigma 19$ ПАУ изменялась от 2 до 2436 нг/г, что укладывается в интервал их величин, определенных в осадках Баренцева моря ранее, с наиболее высоким содержанием на шельфе Шпицбергена (рис. 4). Следовательно, специфика этой аномалии имеет устойчивый характер (Boitsov et al., 2009a, 2013; Dahle et al., 2006, 2009; Boitsov et al., 2009, 2013; Eide et al., 2011; Jiao et al., 2009; Zaborska et al., 2011 и др.). В качестве источника полиаренов предполагают эрозию углистых отложений западной части арх. Шпицберген. Высокие концентрации пирогенных ПАУ здесь обусловлены их естественным образованием в толще осадков в низкотемпературных процессах, так как в их составе преобладали низкомолекулярные соединения: нафталины и фенантрен (рис. 7). При этом статистически значимые различия в концентрациях и в составе ПАУ в осадках, отобранных в 1991–1998 и 2001–2005 гг. (Dahle et al., 2006), а также в сравнении с нашими данными отсутствовали. Нафталины, наименее устойчивые соединения, которые должны разлагаться в процессе седиментации (Tolosa et al., 2004). Поэтому довольно высокое их содержание

может быть обусловлено образованием непосредственно в толще осадков. При этом на ст. 6841 в нижнем горизонте керна содержание ПАУ было выше, чем в поверхностном (2633 и 2164 нг/г, соответственно).

Ян-Майенский гидротермальный район располагается на самом южном сегменте хребта Мона и состоит из трех активных и одного неактивного полей (Pedersen et al., 2010a, b). К активным гидротермальным полям относятся “Стенка троллей” (Troll Wall), “Сориа Мориа” (Soria Moria), обнаруженные в 2005 г. и “Перле и Брюс” (Perle, Bruce), найденное в 2013 г., к неактивным — “Сад Каллионелл” (Callionella Garden).

В донных осадках хребтов Мона и Книповича характерные структуры — осевые вулканические поднятия (ОВП), которые приурочены к рифтовой долине (Кохан и др., 2012; Черкашев и др., 2001; Geli et al., 1994; Reimers, 2017). В пределах ОВП находятся рифовые вулканические постройки с гидротермальной активностью, а выделение газа (флюида) создает над этими полями гидроакустические аномалии (Pedersen et al., 2010 a, b; Pedersen, Bjerkgaard, 2016). В этом районе из-за грубодисперсного состава осадков, в поверхностном слое нами установлены довольно низкие концентрации АУВ, $C_{орг}$ и ПАУ (рис. 2, 4, табл. 2). При этом средние концентрации АУВ в разные годы исследования в районе хребта Мона были близкими: 10–18 мкг/г, с довольно низким содержанием в составе $C_{орг}$ — 0.13–0.28%. Эти результаты совпадают с исследованием гидротермального плюма поля Тролльвеген, расположенного к востоку от осевой зоны хребта Мона вблизи Ян-Майенской горячей точки (Кравчишина и др., 2019). Плюм этого района характеризовался умеренной концентрацией метана и низкой концентрацией взвеси вблизи дна, а осадки — довольно низким содержанием $C_{орг}$ — 0.35% (Немировская, 2020). Тем не менее, при максимальном содержании на ст. 6131 (51 мкг/г, рис. 2), доля АУВ в составе $C_{орг}$ повышалась до 1.9%, а в составе алканов в низкомолекулярной области выделяется пик $n-C_{16}$ (рис. 3а) указывающий на микробиальную природу АУВ. В песчано-алеврито-пелитовых илах на ст. 6838, расположенной в районе древних вулканических построек, рост концентраций АУВ приурочен к нижнему горизонту колонки (16–18 см) до величины 36 мкг/г, 1.2% в составе $C_{орг}$ (рис. 8). На этой станции был поднят базальт валунной размерности, предположительно отобранный с борта вулканической постройки.

В Баренцевом море природа голоценовых осадков в основном терригенно-морская с заметным влиянием аллювиальных фаций в прибрежной части шельфа и ледово-морских на севере акватории (Тарасов, Алексеев, 1987). Большинство изученных нами отложений представлено терри-

генными бескарбонатными алевритовыми и алеврито-пелитовыми илами с примесью грубообломочного материала. Ранний диагенез протекает в условиях термодинамической неравновесности, а биотурбация усложняет эти процессы (Andreassen et al., 2017).

На склоне желоба Стур-фьорд на глубине 392 м (ст. 6842, рис. 4) при максимальном содержании АУВ (186 мкг/г) их доля в составе $C_{орг}$ также оказалась повышенной — 1.18%. В этом районе на ст. 6841, согласно гидрофизическим данным, был установлен наиболее значительный флюидный поток. Газовый факел поднимался над дном на высоту более 100 м (Клювтин и др., 2021). Содержание АУВ в поверхностном слое составило всего 37 мкг/г (0.24% от $C_{орг}$). Однако состав алканов в осадках ст. 6841 резко отличался от их состава на ст. 6840, прежде всего, по содержанию легких гомологов (рис. 5). В северной части Медвежинского желоба, где имеются кратеры, образовавшиеся в результате разложения газогидратов (Andreassen et al., 2017) также было установлено повышенное содержание АУВ — до 44 мкг/г, с увеличенной долей низкомолекулярных гомологов (отношение L/H изменялось в интервале 0.84–1.42) (Немировская, 2020). В толще осадка при переходе от окисленного к восстановленному слою состав алканов становился более “автохтонным”, чем в поверхностном горизонте.

Аномальное распределение и состав УВ был установлен в осадках возвышенности Персея в 2017 г. (на глубинах 107–200 м) (Глязнецова, Немировская, 2020; Немировская, 2020). Здесь в осадочной толще при переходе от слоя 0–5 к слою 5–10 см концентрация АУВ возросла в 53 раза, а в составе $C_{орг}$ — в 66 раз (от 0.03 до 2.0%). Максимальные величины АУВ на этой станции в пересчете на сухой осадок (272 мкг/г) и в составе $C_{орг}$ (2.2%) были приурочены к горизонту 15–20 см. Такие изменения в толще осадков могут происходить при трансформации высачивающихся нефтяных УВ (Ehrhardt, 1992), так как осадки этого района отличаются высоким нефтегазогенерационным потенциалом (Кравчишина и др., 2019).

Флюидные потоки и их трансформация в поверхностном слое донных осадков рассматривались в качестве основного источника УВ при исследовании донных осадков в районе Штокмановской площади (Немировская, 2013; Петрова и др., 2015). Состав алканов осадков в этом районе имел смешанный генезис: в низкомолекулярной области доминировали автохтонные гомологи ($n-C_{16}$ – C_{17}), а в высокомолекулярной — нефтяные; в составе полициклических ароматических углеводородов — легкие полиарены. Предполагалось, что довольно низкие концентрации АУВ в пересчете на сухую массу (в поверхностном слое 4.4–18.6 мкг/г, а на горизонте 10–20 см — 7.8–84.6 мкг/г) и в составе

$C_{орг}$ (в среднем $\leq 1\%$) в этом районе обусловлены снижением интенсивности флюидных потоков в последние годы. Необходимо учитывать, что углеводородные залежи Штокманского месторождения перекрыты непроницаемой толщей преимущественно глинистых пород (Леин и др., 2012).

Таким образом, в Норвежско-Баренцевоморского бассейне на фоне латеральной изменчивости молекулярных маркеров донных осадков выделяются углеводородные аномалии, характеризующиеся различным генезисом. В юго-западной части Баренцева моря аномалии связаны с антропогенной составляющей, обусловленной влиянием атлантических вод, берегового стока, береговой абразии, аэрозольного потока и ростом судоходства. Поэтому в осадках юго-западной части Баренцева моря в составе ПАУ были обнаружены соединения, указывающие на выбросы в атмосферу от алюминиевых заводов при сжигании угля и древесины (Zaborska et al., 2011).

Аномалии в распределении УВ в донных осадках на шельфе арх. Шпицберген, Медвежинского желоба и Стур-фиорда предполагают их природное образование в осадочной толще, что определяет специфику их поведения. В качестве источника УВ здесь можно рассматривать их поступление из нижележащих горизонтов, так как они в большинстве проб возрастают в составе $C_{орг}$ (рис. 9). Учитывая высокий нефтегазоносный потенциал Баренцева моря и особенности поверхности морского дна (воронки покмарков) делают данное предположение вполне обоснованным (Judd et al., 2007; Rise et al., 2017; Plassen, Knies, 2009). Существование периодов быстрого погружения, а также существование битуминозных пород является достоверным признаком возможного накопления значительного количества УВ.

Считается, что высокомолекулярные УВ могут двигаться во флюидных потоках как отдельная фаза по порам осадочных пород и оставлять геохимический след в поверхностных осадках благодаря аккумуляции, особенно в местах газовой разгрузки (Pau et al., 2014; England et al., 1987). Низкие величины CPI, свидетельствующие о слабой степени дегградации алканов, а также наличие низкомолекулярных ПАУ может служить подтверждением этого предположения. Если принять газовый флюид за газ-носитель, а осадочные породы и содержащееся в них ОВ за сорбент, легко представить, что извлекаться газовым потоком будут преимущественно низкомолекулярные УВ неразветвленного, компактного строения (АМАР, 2007).

ВЫВОДЫ

В поверхностных водах произошел рост концентраций алифатических УВ во взвеси с 2.8–8.3

(2016–2017 гг.) до 20–23 мкг/л (2019–2020 гг.), обусловленный прикромочным цветением. Климатические изменения, вызвавшие увеличение ПП в Баренцевом море, привели также к росту концентраций УВ.

Повышенное содержание АУВ в южной части Баренцева моря (до 58 мкг/л, 2020 г.) связано с коколитовидным цветением, т.е., природные процессы могут приводить к формированию более высоких концентраций АУВ.

В прибрежных районах на судоходных путях органо-геохимический фон донных отложений формируется за счет процессов седиментации, что приводит к увеличению концентраций УВ в поверхностном слое и в составе $C_{орг}$ (на Канинской банке до 64 мкг/г для АУВ и 600 нг/г для ПАУ). Однако антропогенное поступление в донные отложения Баренцева моря имеет подчиненное значение по сравнению с их естественным поступлением во флюидных потоках.

В толще осадков отсутствие корреляции в распределении УВ с гранулометрическим типом осадков и содержанием $C_{орг}$, а также изменение молекулярных маркеров в их составе может свидетельствовать об эндогенном влиянии на большинство исследованных участков (в частности, на шельфе архипелага Шпицберген в Стур-фьорде и Медвежинском желобе). При этом происходит обогащение осадочного разреза легкими алканами в составе АУВ и нафталинами в составе ПАУ.

Авторы благодарят А.С. Соломатину и В.А. Чернова за помощь в отборе проб и первичную обработку результатов в экспедиции, И.С. Халикова – за помощь в проведении анализов ПАУ.

Экспедиции проведены в рамках госзадания Минобрнауки России (тема № FMWE-2022-0003), геохимические исследования и обобщение материалов при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00234-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисова Л.С. (2017). Геохимия, состав и структура протоасфальтенов в органическом веществе в современных осадках. *Геология и геофизика*. **58**, 294–298.

Гавшин В.М., Лапухов С.В., Сараев С.В. (1988). *Геохимия литогенеза в условиях сероводородного загрязнения (Черное море)*. Наука: Москва, Россия, 194 с.

Глязнецова Ю.С., Немировская И.А., Флинт М.В. (2021). Изучение последствий аварийного разлива дизельного топлива в Норильске. *ДАН*. **501**(1), 113–118.

Глязнецова, Ю.С., Немировская И.А. (2020). Особенности распределения битумоидов в донных осадках Баренцева моря. *Океанология*. **60**(6), 831–839

Григоренко Ю.Н. (2016). Зоны нефтенакопления как объект изучения и прогноза. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. **11**(4), 1–11.

Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Немировская И.А. (2020). Исследование седиментосистем европейской

Арктики в 75-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”. *Океанология*. **60**(3), 485–487.

Клювиткин, А.А., Кравчишина М.Д., Боев А.Г. (2021). Потоки осадочного вещества на гидротермальных полях южной части хребта Мона. *ДАН*. **497**(1), 16–22.

Кодрян К.В., Торгунова Н.И., Агатова А.И. (2017) Растворенное и взвешенное органическое вещество в период изменчивости ледового покрова Баренцева моря. *Труды ВНИРО*. **169**, 191–203.

Кохан А.В., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. (2012). Геодинамические особенности структурообразования в спрединговых хребтах Арктики и Полярной Атлантики. *Вестник Камчатской региональной ассоциации “Учебно-научный центр”*. Серия: Науки о Земле. **19**(1), 59–77.

Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Боев А., Прокофьев В.Ю., Стародымова Д.П., Дара О.М., Новигатский А.Н., Лисицын А.П. (2019). Гидротермальные минеральные ассоциации на 71° с.ш. Срединно-Атлантического хребта (первые результаты) *Океанология*. **59**(6), 1039–1057.

Кучейко А.Ю., Иванов А.Ю., Евтушенко Н.В., Филимонова Н.А., Терлеева Н.В., Ивонин Д.В., Александрова А.Г. (2020). Пленочные загрязнения Баренцева моря по данным радиолокационного мониторинга 2017–2019 гг. *Экология и промышленность России*. **24**(7), 48–55.

Лапина Н.М., Торгунова Н.И., Агатова А.И. (2011). Органическое вещество во льдах Северного Ледовитого океана. *Вопросы промысловой океанологии*. **8**(2), 156–172.

Леин А.Ю., Немировская И.А., Иванов М.В. (2012) Изотопный состав органического и карбонатного углерода поверхностных горизонтов донных отложений в районе Штокмановского месторождения и на “поле покмарков” в Баренцевом море. *ДАН*. **446**(1), 67–70.

Немировская И.А. (2013) Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научн. мир, 432 с.

Немировская И.А. (2017) Осадочное вещество и органические соединения в аэрозолях и в поверхностных водах на трансатлантическом разрезе. *Геохимия*. (4), 344–357.

Nemirovskaya I.A. (2017) Sedimentary Matter and Organic Compounds in the Aerosols and Surface Waters along the Transatlantic Section. *Geochem. Int.* **55**(4), 367–379.

Немировская И.А. (2020) Углеводороды в водах и донных осадках Баренцева моря в период изменчивости ледового покрова. *Геохимия*. **65**(7), 822–824.

Nemirovskaya I.A. (2020) Hydrocarbons in the Water and Bottom Sediments of the Barents Sea during Ice Cover Variability *Geochem. Int.* **58**(7), 822–834.

Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В., Моргунова И.П. (2015) Углеводороды в донных осадках Штокмановской площади – распределение, генезис, временные тренды. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. **10**(3), 1–21.

Романкевич Е.А., Ветров А.А. (2021). Углерод в океане М.: ГЕОС, 352 с.

Ступакова А.В. (2011). Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий. *Геология нефти и газа*. (6), 99–115.

Тарасов Г.А., Алексеев В.В. (1987). Литолого-геологические особенности среды обитания организмов. Палеогеография и палеоэкология Баренцева и Белого морей в четвертичный период. Апатиты: КНЦ РАН, 24–43.

- Тиссо Б., Вельте. Д. (1981). Образование и распространение нефти: Пер. с англ. М.: Мир, 501 с.
- Хаустов А.П., Редина М.М. (2017) Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах. *Геохимия*. (1), 57-67
- Khaustov A.P., Redina M.M. (2017). Geochemical Markers Based on Concentration Ratios of PAH in Oils and Oil-Polluted Areas. *Geochem. Int.* **55**(1), 98-107.
- Черкашев Г.А., Тамаки К., Баранов Б.В., Герман К., Гусев Э.А., Егоров А.В., Жирнов Э.А., Журавль К., Куревин Д., Окино К., Сато Г., Сушевская Н.М. (2001). Рифтовая зона хребта Книповича: материалы экспедиции Книпович-2000. *Доклады Наук о Земле*. **378**, 420-423.
- АМАР (Arctic Monitoring and Assessment Programme) (2007). 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: АМАР, 87 p.
- Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkupuliyambatta S., Faverola P. A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., Mattingdal R., Mienert J., Bünz S. (2017). Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*. **356**, 948-953.
- Arrigo K.R., Dijken G.L. (2015). Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progr. Oceanog.* **136**, 60-70.
- Boitsov S., J., Klungsoyr J.H. (2007). Concentrations of petroleum hydrocarbons in sediments and seawater from the Barents and Norwegian Seas 2003–2005. *Fisken og Havet*. **3**, 52 p.
- Boitsov S., Petrova, V., Jensen, H.K., Kursheva, A., Litvinenko I., Klungsoyr, J. (2013). Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments from southern and northern areas of the Norwegian continental shelf. *Marine Environmental Research*. **87**, 73-84.
- Chand S., Thorsnes T., Rise L., Brunstad H., Stoddart D. (2016). *Geol. Society. London, Memoirs*, **46**, 295-296.
- Dalpadado P., Ingvaldsen R.B., Stige L.C., Bogstad B., Knutsen T., Ottersen G., Ellertsen B. (2012). Climate effects on Barents Sea ecosystem dynamics ICES. *J. Mar. Sci.* **69**(7), 1303-1316.
- Ehrhardt J.D. (1992). Negative-ion mass spectra of methylated diuretics. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **6**(5), 349-351.
- Eide M.S., Longva T., Hoffmann P., Endresen O., Stig B.D. (2011). Future cost scenarios for reduction of ship CO₂ emissions. *Maritime Policy & Management*. **38**(1), 11-37.
- England W.A., MacKenzie A.S., Mann D.M., Quigley T.M. (1987). The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface, *J. Geol. Soc.* **144**, 327-347.
- Fernandes M.B., Sicre M.A. (2000). The importance of terrestrial organic carbon inputs on Kara Sea shelves as revealed by n-alkanes, OC and $\delta^{13}C$ values. *Organic Geochemistry*. **31**, 363-374.
- Geli L., Renard V., Rommevaux C. (1994). Ocean crust formation processes at very slow spreading centers: A model for the Mohns Ridge, near 72 N, based on magnetic, gravity, and seismic data. *JGR*. **99**, 2995-3013.
- Hou P., Eglinton T.I., Montlucon D.B., Haghipour N., Zhang H., Jin G., Zhao M. (2021). Degradation and Aging of Terrestrial Organic Carbon within Estuaries: Biogeochemical and Environmental Implications. *Environ. Sci. Technol.* **55**(15), 10852-10861.
- Jafarabadi A.R., Bakhtiari A.R., Aliabadian M., Toosi A.S. (2017). Spatial distribution and composition of aliphatic hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons and hopanes in superficial sediments of the coral reefs of the Persian Gulf, Iran. *Environ. Pollut.* **224**, 195-223.
- Jiao L., Zheng G.J., Minh T.B., Richardson B., Chen L., Zhang Y., Yeung L.W., Lam J.C., Yang X., Lam P.K. Persistent toxic substances in remote lake and coastal sediments from Svalbard, Norwegian Arctic: Levels, sources and fluxes. *Environ. Pollut.* **157**, 1342-1351.
- Judd A., Hovland M. (2007). Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge University Press, **442**.
- Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP)* Tromsø: Akvaplan-niva. 2011, 71 p.
- NAS (National Academy of Sciences) (2003) *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. Washington, D.C.: NRC, 265 p.
- Nemirovskaya, I.A., Khramtsova, A.V. (2021). Features of the Hydrocarbon Distribution in the Bottom Sediments of the Norwegian and Barents Seas. *Fluids*. **6**, 456.
- Pau M., Hammer Ø., Chand S. (2014). Constraints on the dynamics of pockmarks in the SW Barents Sea: Evidence from gravity coring and high-resolution, shallow seismic profiles. *Marine Geology*. **355**(1), 330-345.
- Pedersen R.B., Rapp H.T., Thorseth I.H., Lilley M.D., Barriga F.J., Baumberger T., Flesland K., Fonseca R., Früh-Green G.L., Jorgensen S.L. (2010a). Discovery of a black smoker vent field and vent fauna at the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Nat. Commun.* **23**(11), 1-126.
- Pedersen R.B., Thorseth I.H., Nygaard T.E., Lilley M.D., Kelley D.S. (2010b). Hydrothermal activity at the Arctic Mid-Ocean Ridge. In *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges*; Rona P., Devey C., Murton B., Eds.; Geophysical Monograph 188; American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 67-89.
- Pedersen R.B., Bjerkgård T. (2016). Seafloor massive sulphides in Arctic waters. *Mineral Resources In The Arctic*. **1**, 209-216.
- Plassen L., Knies J. (2009). Fluid flow structures and processes; indications from the North Norwegian continental margin. *Norsk Geologisk Tidsskrift*. **89**, 57-64.
- Reimers H. (2017). The Morphology of the Mohn's Ridge. *Nor. Univ. Sci. Technol.* 1-114.
- Rise L., Bellec V.K., Chand S., Bøe R. (2015). Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords. *Norwegian J. Geology*. **94**, 263-282.
- Tolosa I., Mora S., Sheikholeslam, M.R. (2004). Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in Coastal Caspian Sea Sediments. *Mar. Pollut. Bul.* **48**, 44-60.
- Yamamoto M., Polyak L. (2009). Changes in terrestrial organic matter input to the Mendeleev Ridge, western Arctic Ocean, during the Late Quaternary. *Glob. Planet. Chang.* **68**, 30-37.
- Yunker M.B., Macdonald R.W., Ross P.S., Sophia C., Johannessen B., Nei D. (2015). Alkane and PAH provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada. *Org. Geochem.* **89-90**, 80-116.
- Zaborska A., Carroll J., Pazdro K., Pempkowiak J. (2011). Spatio-temporal patterns of PAHs, PCBs and HCB in sediments of the western Barents Sea. *Oceanologia*. **53**, 1005-1026.