УГЛЕВОДОРОДЫ В ВОДАХ И ОСАДКАХ ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ РАЙОНОВ АРКТИКИ

И.А. Немировская

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН,
Россия, 117851 г. Москва, Нахимовский просп., 36; nemir@ocean.ru

Резюме. Обобщены многолетние данные (2007–2016 гг.) по изучению алифатических и полициклических ароматических углеводородов в воде и донных осадках в сопоставлении с содержанием липидов, C_{org} хлорофилла «а» на геохимическом барьере река (Северная Двина, Обь, Енисей) – море. Установлено резкое снижение концентраций и выпадение антропогенных углеводородов, так же как других органических соединений и взвеси, при смешении речных вод с морскими. В пелагические морские районы поступают сравнительно чистые воды. Несмотря на низкие арктические температуры, трансформация антропогенных углеводородов происходит настолько быстро, что в воде и донных осадках в основном доминируют природные соединения: в воде – автохтонные, в осадках – аллохтонные.

Ключевые слова. Углеводороды, липиды, C_{org} хлорофилл «а», взвесь, геохимический барьер река–море, Арктика, взвесь, донные осадки.

HYDROCARBONS IN WATERS AND SEDIMENTS OF COASTAL MARINE REGIONS OF ARCTIC

I.A. Nemirovskaja

P.P.Shirshov Institute of Oceanology RAS,
36, Nahimovsky av., 117851, Moscow, Russia; nemir@ocean.ru

Summary. It is summarized a long data (2007-2016) for the study of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in a relation to lipid content, TOC, chlorophyll "a" in water and bottom sediments at the geochemical barrier river (Severnaya Dvina, Ob, Yenisei) – Sea. It is established there is a sharp decrease in concentration and deposition of anthropogenic hydrocarbons as well as other organic compounds and particulates suspended matter, at the mixing of river and sea waters. Relatively clean water flows to pelagic marine areas. The anthropogenic transformation of the hydrocarbons takes place so quickly despite the low arctic temperatures, mainly natural compounds is dominated in water and sediments: in water – autochthonous, in the sediments – allochthonous.

Keywords. Hydrocarbons, lipids, TOC, chlorophyll "a", geochemical barrier river – sea, Arctic, suspended matter, bottom sediments.

Введение

Нефть и нефтепродукты (далее нефть) входят в перечень наиболее важных (приоритетных) веществ, загрязняющих морские среды. Основную массу (до 95%) нефти составляют углеводороды (УВ). Поэтому современная система экологического мониторинга из-за сложности анализа основана на определении содержания УВ, которые называют нефтяными (НУ) (Руководство ..., 1993; Израэль, Цыбань, 2009). Состояние окружающей среды Арктики до сих пор остается фрагментарно изученным и вызывает нарастающую озабоченность в связи с образованием «горячих точек», в которых масштабы деградации естественных экосистем достигли опасных значений (Диагностический анализ..., 2011).

С целью установления уровней и происхождения УВ приведены данные, полученные при исследовании алифатических углеводородов (АУВ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в воде и в донных осадках Белого и Карского морей. Необходимо отметить, что ежегодное поступление нефтяных УВ в океан (при отсутствии крупных аварийных разливов) оценивается в 1.3 млн. т, а путем фотосинтеза ежегодно продуцируется от 3 до 12 млн. т (АМАР, 2007; NAS, 2003), доля ПАУ составляет 2.7 тыс. т, а бенз(а)пирена – 0.025 тыс. т. Следовательно, распределение антропогенных УВ происходит на устойчивом природном углеводородном фоне.

Любой вид нефтегазовой деятельности представляет собой определенный риск загрязнения и экологическую угрозу для морской среды. Развитие индустрии в прибрежной зоне (в том числе разработка нефтяных месторождений на шельфе), интенсивное судоходство вызывает тревогу из-за потенциального загрязнения районов нефтедобычи. Умение корректно количественно оценивать загрязненность прибрежных акваторий, где существует множество природных и антропогенных источников УВ, воздействие антропогенных и природных поступлений на их динамику – ключевой фактор понимания экологических проблем морских сред. Поэтому актуальность рассматриваемой проблемы не вызывает сомнений.

При химическом мониторинге идентификация источников УВ основана на определении:

- нефтяных УВ (судоходство, прибрежная промышленность);
- петрогенных УВ (просачивание из донных осадков, потери при добыче и транспортировке), которые имеют сложный состав; для них характерно преобладание низкомолекулярных соединений;
- пирогенных УВ (неполное сгорание топлива), характерно преобладание высокомолекулярных УВ, особенно ПАУ;
- биогенных УВ (биосинтез организмами), преобладание молекул с нечетными числом УВ).

Методология проведения анализов

Воду отбирали с поверхности по ходу движения судна и при приближении к станциям ведром, пробы донных осадков – дночерпателем «Океан» или трубкой Неймисте. Взвесь для исследования органических соединений выделяли с помощью стекловолокнистых фильтров GF/F (рис. 1) и на ядерные фильтры – для исследования взвеси. УВ экстрагировали на борту судна (сразу после отбора проб) из воды специальной мешалкой, из влажных проб взвесей и подсушенных при 50°C проб донных осадков – на ультразвуковой бане «Сапфир». Предварительно из донных осадков для анализа ситованием выделяли фракцию 0.25 – 0.5 мм, которая обычно используется для определения УВ в органической геохимии (Немировская, 2013).

При анализе УВ нами было использовано сочетание интегральных (в основном ИК-метод) и дифференциальных (хроматографических) методов их определения (рис. 1). Для идентификации УВ определяли молекулярные маркеры, обладающие индикаторными функциями в сопоставлении с концентрациями взвеси, и органических соединений (ОС): $C_{орг}$ липидов и хлорофилла «а» (хл а). Соотношение индивидуальных УВ дает возможность установить их динамику под влиянием природных (физических, химических и биологических) и антропогенных факторов (внешних источников загрязнения среды). Подробности методических процедур описаны (Немировская, 2004, 2013).

Рисунок 1. Схема анализа УВ из фильтрационной взвеси и донных осадков

Результаты и обсуждение

До последнего времени считалось, что решающий вклад в суммарное поступление нефтяных УВ в моря Арктики принадлежит речному стоку, благодаря которому потоки нефти могут исчисляться десятками и сотнями тысяч

тонн в год (Диагностический анализ, 2012; Evseev, et al., 2000). В сентябре 2011 г. в поверхностных водах по маршруту движения судна (59 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») был сделан разрез от Архангельска до северной части Карского моря (рис. 2). Наиболее высокий диапазон концентраций АУВ приурочен к устьевым областям рек, с удалением в пелагиаль их содержание снижалось.

Рисунок 2. Распределение алифатических углеводородов (мкг/л) во взвешенной (а) и растворенной (б) формах в поверхностных водах по маршруту 59 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 2011 г.).

Для сравнения приведено распределение УВ в устье Оби в сентябре 2007 г.

В Белом море в устье Северной Двины во время половодья пробы отбирали в основном у причалов г. Архангельск: речной порт, порт Экономия, а также в районе о-ва Мудьюг; а во время межени – по ходу движения судна и на станциях в рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2007–2016 гг.

Полученные данные показали, что в зависимости от интенсивности половодья содержание АУВ в поверхностных водах различалось, однако их концентрации в среднем были в 2 раза выше, чем во время межени (рис. 2). При этом наблюдалось увеличение доли АУВ в составе липидов (>70%), и в пересчете на воздушно-сухую взвесь (>50 мкг/мг взвеси). В кутовой части Двинского залива в районе о. Мудьюг разница в концентрациях АУВ в значительной степени зависела от лунного цикла и определялась приливно-отливными явлениями. Поэтому в 2015 г. во время отлива их содержание было значительно выше, чем во время прилива в 2016 г. (рис. 3 б, в). Признаки, характерные для нефтяных алканов (плавное распределение гомологов в высокомолекулярной области и увеличение доли нафталина в составе полиаренов), установлено только в речных водах (Немировская, 2013). Однако уже в районе о. Мудьюг состав алканов соответствовал природным биогенным АУВ.

Во время межени на разрезе Северная Двина – Белое море максимальный диапазон концентраций АУВ во взвеси установлен в августе 2015 г.: 161.6–29.4 мкг/л (табл. 1). Наиболее высокие концентрации АУВ и взвеси определены в речных водах при минимальной солености. При смешении речных вод с морскими с увеличением солености происходило не совсем равномерное

уменьшение концентраций АУВ синхронное с содержанием липидов и взвеси: коэффициенты корреляции (r) между взвесью и АУВ изменялись в разные сезоны от 0.67 до 0.88. В 2015 г. при изменении солёности от 0.4 до 1.4 psu количество АУВ уменьшалось в 1.8 раз. Далее в процессах флоккуляции и коагуляции происходило дальнейшее снижение концентраций ОС. Некоторый рост содержания ОС наблюдался в морских водах, так как с просветлением воды происходило развитие фитопланктона. Поэтому увеличивалось содержания АУВ с 102 до 111 мкг/л в интервале солёности 11.7–12.2 psu. Если в устье реки доля АУВ в составе липидов колебалась от 64 до 89%, то в открытых водах Белого моря доля АУВ составляли всего 14%. Повышенная концентрация АУВ в составе липидов может косвенно свидетельствовать о загрязнении вод Северной Двины нефтепродуктами.

Рисунок 3. Изменчивость концентраций в 2015 г.:

взвеси (а) и АУВ (б) и в 2016 г. АУВ (в) в устье Северной Двины во время паводка и межени; (г) – расположение станций отбора проб.

В 2016 г. содержание АУВ на этом разрезе от июля (6.7–22.5 мкг/л) к октябрю (11.2–87.2 мкг/л) в среднем увеличилось более чем в 2 раза (табл. 1), что, скорее всего, обусловлено тем, что в июле не были захвачены речные воды, так как пробы начали отбирать при более высокой солёности – 1.2 psu. Видимо поэтому распределение ОС, по сравнению с августом 2015 г. было более плавным (рис. 4б). Концентрации ПАУ во взвеси уменьшались от 46.9 до 3.65 нг/л (2016 г.). При этом изменялся состав ПАУ – увеличивалось количество природных соединений (фенантрена), который транзитом проходит область смешения, и уменьшалось количество пироженных полиаренов (пирена).

Таблица 1. Содержание липидов и углеводов (мкг/л) в поверхностных водах

Форма	n*	Липиды			АУВ			Потери АУВ, %
		мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	
р. Северная Двина–Белое море, 2011 г., август								
Раств.	5	24.6	50.3	31.0	11.7	28.9	17.0	59.5
Взвеш.	5	65.4	155.7	87.4	30.2	69.2	37.6	56.4
2015 г., август								
Взвеш.	10	18.6	220.0	12.1	10.0	161.6	84.2	93.4
2016 г., июль								
Взвеш.	6	25.7	65.9	43.5	6.7	22.6	15.6	70.4
2016 г., октябрь								
Взвеш.	9	32.4	134.7	84.3	11.2	87.2	46.8	87.2
р. Обь–Карское море, 2007 г., сентябрь								
Раств.	11	15.1	748.2	159.1	6.1	291.3	70.2	98.1
Взвеш.	11	24.8	427.1	182.3	9.7	310.2	101.0	96.9
2016 г., июль								
Взвеш.	21	14.4	332.9	163.7	3.4	102.1	39.9	96.7
р. Енисей–Карское море, 2011 г., сентябрь								
Раств.	15	21.6	133.8	40.2	4.8	69.0	17.6	93.0
Взвеш.	14	21.7	236.5	83.3	7.3	49.1	20.1	85.2
2016 г., июль								
Взвеш.	22	19.0	252.8	67.5	1.9	53.2	17.1	96.5
р. Лена– море Лаптевых, сентябрь								
Взвеш.	14	17.6	71.2	40.2	4.4	42.7	13.9	89.7

*n- количество проб.

Изучение взвеси на сканирующем электронном микроскопе показало, что в речных водах она состоит в основном (до 80%) из минеральных частиц, размером до 10 мкм, представленных глинами (монтморииллоном, смектитами), плагиоклазом, разрушенными полевыми шпатами. Встречались частицы зола (до 1 мкм) и сажа, волокна коры деревьев. Напротив, в морских водах во взвеси обнаружено большое количество колоний и волокон водорослей. Минеральные частицы (иллит, плагиоклаз, кварц, доломит, смектит) в морских водах встречались значительно реже.

В Карском море в устье Оби изменчивость в содержании АУВ наиболее значительна в диапазоне солености 0.05 – 9.3 psu. В кутовой части Обской губы доля АУВ в составе органического вещества (ОВ) понижена по сравнению с мористой частью разреза и в осаждающемся ОВ, их можно отнести к минорным компонентам. В акваториях, удаленных от промышленных центров, и в продуктивных районах в свежееобразованном ОВ доля УВ ниже, чем

в импактных районах (Немировская, 2013). Если в устье Оби содержание АУВ в 2007 г. составило 0.18%, а ПАУ – 0.15×10^{-3} % от $C_{орг}$, то на конечной станции разреза их концентрации увеличивались до 0.27 и 0.55×10^{-3} % соответственно.

Рисунок 4. Распределение концентраций различных соединений в устье Северной Двины в августе 2015 г. (а) и в июле 2016 г. (б)

1 – взвесь, 2 – липиды, 3 – АУВ, 4 – хл а, 5 – соленость, на вставках – расположение станций.

В толще осадков на разрезе Обская губа – Карское море концентрации ОС изменялись синхронно (значения коэффициента корреляции колебались в интервале 0.54–0.94). В Обской губе черный сапропелевый ил лишь незначительно уплотнялся с глубиной (слой 0–35 см); исследуемые параметры изменялись: влажность – от 71 до 64.5%, АУВ – от 25 до 17 мкг/г, $C_{орг}$ – от 1.68 до 1.72%. Значения Eh в толще осадков оставались постоянными – +20 мВ. Однако уже на станции в области лавинной седиментации ($S=1.5$ psu) содержание АУВ в слое 0–14 см уменьшалось почти в 3 раза (от 42.4 до 14.9 мкг/г)

с минимумом (11 мкг/г) в слое 2–4 см, где наблюдался переход от окисленных к восстановленным осадкам.

В последующих исследованиях донных осадков на этом разрезе диапазон концентраций АУВ был близким (табл. 2). Исключение установлено в 2013 г., где среднее содержание АУВ составило всего 9 мкг/г, синхронно с пониженной концентрацией $C_{орг}$.

Таблица 2. Содержание органических соединений в поверхностном слое донных осадков

Месяц/год	n	АУВ, мкг/г		Сорг, %		Влажность, %	
		Интервал	Сред- нее	Интервал	Сред- нее	Интервал	Сред- нее
р. Обь–Карское море							
сентябрь, 2007	12	3.7–42.4	13.7	0.21–2.36	1.01	21.5–85.6	57.03
август, 2013	6	5.9–11.7	9.0	0.30–1.22	0.73	37.2–63.5	51.6
август, 2014	18	3.7–45.8	19.5	0.17–1.34	0.87	19.3–64.7	41.9
июль, 2016	14	3.5–42.6	16.7	0.17–1.38	0.77	25.8–75.2	57.6
р. Енисей–Карское море							
сентябрь, 2011	17	7.3–31.7	15.6	0.69–0.83	0.76	55.8–57.0	56.5
июль, 2016	6	15.2–33.2	23.3	1.26–1.76	1.47	59.4–79.0	69.5
р. Лена–море Лаптевых							
сентябрь, 2015	10	3.2–39.9	13.8	0.35–3.05	1.15	27.1–67.5	51.2

Изменчивость состава АУВ при переходе от поверхностных вод в донные осадки отражает распределение алканов. В водах Оби во взвеси доминировали легкие гомологи фитопланктона $n-C_{13}-C_{17}$ (рис. 5а), а в донных осадках – серия нечетных гомологов $C_{27}-C_{31}$. В области смешения пресных и соленых вод ($S=0.6-1.5$ psu) вклад автохтонных алканов меньше, но в низкомолекулярной области выделяется пик $n-C_{17}$, характерный для алканов фитопланктона (рис. 5б). В шельфовой зоне увеличивается вклад микробиальных процессов, так как доминирует гомолог $n-C_{21}$ (рис. 5в). При переходе из поверхностных вод в осадки вклад автохтонных гомологов уменьшался, и преобладала серия нечетных гомологов $n-C_{23}-C_{31}$. Особенно это характерно для песчанистых осадков Обской губы.

В устье Енисея не происходило плавного уменьшения концентраций ОС и взвеси при переходе от речных вод к морским (рис. 6), что обусловлено приливо-отливными явлениями во время отбора проб. Близкие концентрации АУВ (50–60 мкг/л) были установлены в разных зонах разреза и не коррелировали с содержанием взвеси ($r=0.21$) и хл a ($r=0.40$). Примечательно, что распределение хл a также слабо зависело от общего содержания взвеси ($r=0.44$), из-за терригенного характера последней. Только в морских водах (ст. 5350, рис. 6) с ростом хл a происходило также синхронное увеличение концентраций АУВ. Поэтому состав алканов в поверхностных водах был преимущественно автохтонным.

Рисунок 5. Состав алканов взвеси и донных осадков: (а) – Обская губа, (б) – область смешения пресных и соленых вод, (в) – конечная часть разреза в Карском море
1 – поверхностные воды, 2 – донные осадки

Донные осадки на разрезе Енисей–Карское море представлены на поверхности окисленными коричневатыми, а с глубиной восстановленными зеленовато-серыми алевропелитами с примесью песка. В 2011 г. среднее содержание АУВ как в пересчете на сухую массу (15.6 мкг/г), так и в составе $C_{\text{орг}}$ (0.76%) было ниже, чем в июле 2016 г.: 23.3 мкг/г (табл. 2) и 1.47% соответственно. Распределение ОВ в большей степени, по сравнению с АУВ, зависит от гранулометрического типа осадка, так как происходило симбатное распределение $C_{\text{орг}}$ в осадках с их влажностью: $r(C_{\text{орг}}\text{--Вл.})=0.83$ (2011 г.). Ниже коэффициенты корреляции между этими параметрами и АУВ: $r(C_{\text{орг}}\text{--АУВ})=0.47$ и $r(\text{Вл.}\text{--АУВ})=0.44$, что обусловлено скоростью утилизации или синтеза вещества в процессе метаболизма морской экосистемы (Агатова и др., 2012). Аккумуляция АУВ в донных осадках, так же как и в поверхностных водах, происходило при смешении речных вод с морскими.

Рисунок 6. Распределение концентраций различных соединений в июле 2016 г. на разрезе р. Енисей – Карское море:

(а) – в поверхностных водах во взвеси, (б) – в донных осадках.
 (в) – расположение станций 1 – АУВ, 2 – липиды, 3 – хл а, 4 – взвесь, 5 – соленость, 6 – C_{org} , 7 – влажность

Таким образом, общим для всех изученных устьевых областей (Северной Двины, Оби, Енисея) при смешивании речных вод с морскими – резкое уменьшение концентраций ОС в поверхностных водах (как в растворенной, так и взвешенной формах) в узкой прибрежной полосе. «Потери» в концентрациях на геохимическом барьере река – море могут достигать 98% (табл. 1). При этом в речных водах во многих случаях содержание АУВ превысило ПДК для нефтяных УВ – 50 мкг/л. В морских водах их концентрации снижались до фоновых значений 10–20 мкг/л.

Геохимический барьер река – море выступает в качестве фильтра, который предотвращает попадание в открытые морские воды терригенных частиц взвеси и связанных с ними загрязнений. В частности, при удалении на 40 км от устья Северной Двины количество терригенных частиц снижалось от 77–71% до 32–26%, соответственно, при этом биогенная часть возросла до 74%. (Кравчишина, 2009). Основные характеристики взвеси определяются сочетанием процессов поступления терригенного минерального вещества и биогенного – остатков организмов и их жизнедеятельности. Все это влияет и на поведение ОС во взвеси.

В донных осадках наиболее высокие концентрации АУВ, так же, как ОВ, приурочены к отложениям с повышенным содержанием илистой фракции. Максимумы ОС тяготеют к станциям, находящимся в области смешения реч-

ных вод с морскими, в зоне лавинной седиментации. Здесь с изменением заряда коллоидных частиц ($S=0.6-4$ psu) происходит переход взвешенных форм ОС в нижележащие воды и осадок.

Трансформация антропогенных УВ, транспортируемых реками, несмотря на низкие температуры в морской среде, происходит довольно быстро. Микропланктон высоких широт активно усваивает и перерабатывает ОВ из-за низких величин энергии активации основных реакций метаболизма (3–6 ккал/М), сопоставимых с интенсивностью обмена в теплых водах (Агатова и др., 2012). В процессе седиментации количество автохтонных алканов уменьшается. Поэтому в осадках преобладают, как правило, более устойчивые аллохтонные (терригенные) алканы, связанные с наземной растительностью (Немировская, 2013; Yunker et al, 2011). Терригенный характер алканов был также установлен в осадках разреза р. Макензи – море Бофорта и в осадках моря Лаптевых и Чукотского (Yunker et al., 2011). В отдельных случаях состав алканов осадков становился бимодальным, то есть имел смешанный генезис: с максимумами в низкомолекулярной и высокомолекулярной областях из-за активных процессов на границе вода – дно.

Низкомолекулярные полиарены транзитом проходят зону смешения речных вод с морскими. На фоне уменьшения концентраций ПАУ возрастает доля фенантрена (Dahle et al. 2003; Fernandes, Sicre, 1999). С глубиной захоронения содержание АУВ и ПАУ уменьшалось даже быстрее, чем ОВ, в отдельных случаях максимум АУВ соответствовал минимуму C_{org} .

Рисунок 7. Распределение концентраций ПАУ (нг/л) во взвеси в поверхностных водах Обской губы в летний (а) и осенний (б) периоды наблюдений

Полученные данные противоречат распространенному мнению, что в прибрежной полосе арктических морей существуют многочисленные «горячие точки» с максимальным загрязнением Обь-Енисейского района (Диагностический анализ..., 2011; Evseev, et al., 2000). Возможно, они существуют в водосборе рек Карского моря. Поэтому в 2002–2003 гг. в период проведения буровых работ в Обской губе концентрации АУВ в поверхностном слое осад-

ков повысились до 55–205 мкг/г (Петрова и др., 2010). Детальное исследование ПАУ в растворенной и взвешенной формах и в осадках в Обской губе (в августе и сентябре 2010 г.) установило, что на их распределение оказывает влияние не загрязнение, связанное с эксплуатацией месторождений, а природные факторы: прибрежная абразия и высачивание из донных осадков (Немировская, Монько, 2013). Наиболее высокие концентрации ПАУ так же, как и других ОБ локализуются на двух участках – на юге при смешении вод Оби и Таза и на севере – в зоне маргинального фильтра Оби (рис. 7).

Доминирование в составе ПАУ в акватории месторождений нафталина и его гомологов может свидетельствовать о том, что на их концентрации и состав оказывает влияние природное высачивание легких полиаренов из осадков (Tolosa et al, 2004). Качественный и количественный состав ОБ в воде и осадках указывает на быструю утилизацию не только компонентов, поступающих с речным стоком, но и продуцируемых в самой губе.

Видимо, более значимым процессом загрязнения донных осадков становится дальний перенос загрязняющих веществ с водами протоков, пересекающих районы нефтедобычи (Галимов и др., 2006; Хорошавин, Моисеенко, 2014). Уменьшение их концентраций в последующие годы может свидетельствовать, как о разложении нефтяных УВ, так и о погребении донных осадков слоем поступающих новых, относительно чистых. Нефтяные УВ повышают в воде и осадках их уровень, создавая тем самым современный углеводородный фон.

Выводы

Геохимический барьер река–море в значительной степени предотвращает попадание нефтяных УВ в открытые морские воды. В последние годы не произошло увеличения концентраций АУВ и ПАУ в воде и осадках арктических морей.

В речных водах концентрации АУВ во многих случаях превышают ПДК для нефтяных УВ. Процессы, происходящие в области смешения речных вод с морскими, способствуют осаждению основного количества загрязняющих веществ (особенно высокомолекулярных). Такое поведение ОС и взвеси характерно не только для рек Арктики, но и для рек в других климатических зонах.

Содержание АУВ и ПАУ, выносимых реками, зависит от сезона исследования (половодье или межень) и от лунного цикла (прилив, отлив). В поверхностных водах основной источник АУВ – фитопланктон. В процессе седиментации нефтяные и автохтонные алканы разлагаются, и в донных осадках доминируют терригенные наиболее устойчивые гомологи. Особенности распределения ПАУ в изученных осадках отражают доминирующую роль терригенного стока в их формировании. Композиционный состав свидетельствует о преимущественно биогенном генезисе, так как преобладали фенантрен и хризен и перилен.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-05-00356) и госзадания 0149-2014-0038 «Геолого-геохимические исследования природных и антропогенных процессов в воде, взвесах и донных осадках морских акваторий, в том числе в окраинных районах Мирового океана».

Список литературы

Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова Н.И. 2012. Органическое вещество Белого моря. – В кн.: Белое море. Т.2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. – М., Научный мир, с. 492-598.

Галимов Э.М., Кодина Л.А., Степанец О.В. 2006. Биогеохимия и проблемы радиоактивного загрязнения морей России (на примере Карского моря) – В кн.: Фундаментальные исследования океанов и море. Т. 2. – М., Наука, с. 440–465.

Диагностический анализ состояния окружающей среды арктической зоны Российской Федерации (расширенное резюме). 2011. – М., Научн. Мир, 124 с.

Израэль Ю.А., Цыбань А.В. 2009. Антропогенная экология океана. – М., Флинта: Наука, 532 с.

Кравчишина М.Д. 2009. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. – М., Науч. мир, 264 с.

Немировская И.А. 2004. Углеводороды в океане (снег–лед–вода–взвесь–донные осадки). – М., Науч. мир, 328 с.

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

Немировская И.А., Монько А.Н. 2013. Трансформация углеводородов в седиментационных процессах на геохимическом барьере река-море в Арктике. – В сб.: Материалы VII Всероссийского литологического совещания «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. – Новосибирск, т. 2, с. 304-308.

Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В. и др. 2010. Органическое вещество донных осадков Обской губы: распределение, природа, источники. – Геохимия. № 2, с. 151–163.

Руководство по методам анализа морских вод. РД 52.10. 243-92. 1993. – СПб., Гидрометеиздат, 264 с.

Хорошавин В.Ю., Моисеенко Т.И. 2014. Вынос нефтяных углеводородов реками с территорий нефтегазодобывающих районов севера Западной Сибири. – Водные ресурсы, т. 41, № 5, с. 518–529.

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). *Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic*. 2007.– Oslo, AMAP, 87 p.

Dahle S., Savinov V., Matishov G.G. et al. 2003. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bottom sediments of the Kara Sea shelf, Gulf of Ob and Yenisei Bay. – Science of the Environment, vol. 36, pp. 57-71.

Evseev A.V., Belousova A.P., Ivanov V.V. et al. 2000. Environmental hot spots and impact zones of the Russian Arctic. ACOPS, GEF PDF-B Project No.GF/1100-99-13. – Moscow, UNEP, 51 p.

Fernandes M.B., Sicre M.A. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Arctic: Ob and Yenisei Estuaries and Kara Sea Shelf. – *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 48, pp. 725–737.

NAS (National Academy of Sciences). Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. 2003. National Research Council. Washington, D.C. – The National Academies Press, 265 p.

Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R., Villeneuve J., Bartocci J., Cattini C. 2004. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments. – *Mar. Pollut. Bull.* vol. 48, pp. 44–60.

Yunker M.B., Macdonald R.W., Snowdon L.R., Brian R. F. 2011. Alkane and PAH biomarkers as tracers of terrigenous organic carbon in Arctic Ocean sediments. – *Organic Geochemistry*, vol. 42, pp. 1109–1146.

References

Agatova A.I., Lapina N.M., Torgunova N.I. 2012. *Organicheskoe veshchestvo Belogo moria*. – *V kn.: Beloe more. T.2. Vodnaia tolshcha i vzaimodeistviushchie s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera* [Organic matter in the White sea. In the book: The white sea. Vol. 2. Water column and interacting with it the atmosphere, the cryosphere, river discharge and the biosphere]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., pp. 492–598.

Galimov E.M., Kodina L.A., Stepanets O.V. 2006. *Biogekhimiia i problemy radioaktivnogo zagriazneniia morei Rossii (na primere Karskogo moria) – V kn.: Fundamental'nye issledovaniia okeanov i more. T. 2* [Biogeochemistry and problems of radioactive contamination of the seas of Russia (on the example of the Kara sea). In book: Fundamental studies of the oceans and the sea. Vol.2]. Moscow, Nauka Publ., pp. 440–465.

Diagnosticeskii analiz sostoiianiia okruzhaiushchei sredy arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii (rasshirennoe reziume) [Diagnostic analysis of the environmental state of the Arctic zone of the Russian Federation (extended summary)]. 2011. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 124 p.

Izrael' Iu.A., Tsyban' A.V. 2009. *Antropogennaia ekologiia okeana* [Anthropogenic ecology of the ocean]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 532 p.

Kravchishina M.D. 2009. *Vzveshennoe veshchestvo Belogo moria i ego granulometricheskii sostav* [The suspended matter in the White sea and its grain size]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 264 p.

Nemirovskaia I.A. 2004. *Uglevodorody v okeane (sneg–led–voda–vzves'–donnye osadki)* [Hydrocarbons in the ocean (snow–ice–water–suspended matter–bottom sediments)]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 328 p.

Nemirovskaia I.A. 2013. *Neft' v okeane (zagriaznenie i prirodnye potoki)* [Oil in the ocean (pollution and natural streams)]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 432 p.

Nemirovskaia I.A., Mon'ko A.N. 2013. *Transformatsiia uglevodorodov v sedimentatsionnykh protsessakh na geokhimicheskom bar'ere reka-more v Arktike*.

– *V sb.: Materialy VII Vserossiiskogo litologicheskogo soveshchaniia «Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoi istorii* [Transformation of hydrocarbons in sedimentary processes on the geochemical barrier river-sea in the Arctic. In collection: Proceedings of the VII all-Russian lithological meeting "Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentary processes in the geological history.]. Novosibirsk, vol. 2, pp. 304-308.

Petrova V. I., Batova G. I., Kursheva A. V. i dr. 2010. Organicheskoe veshchestvo donnykh osadkov Obskoi guby: raspredelenie, priroda, istochniki [Organic matter of bottom sediments of the Obskoi Bay: distribution, nature, sources]. *Geokhimiia – Geokhimiia*, no 2, pp. 151–163.

Rukovodstvo po metodam analiza morskikh vod. RD 52.10. 243-92 [Manual of methods of analysis of marine waters. RD 52.10. 243-92]. 1993. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 264 p.

Khoroshavin V.Iu., Moiseenko T.I. 2014. Vynos neftiannykh uglevodorodov rekami s territorii neftegazodobyvaushchikh raionov severa Zapadnoi Sibiri [The removal of petroleum hydrocarbons by rivers from areas of oil and gas fields of Northern West Siberia]. *Vodnye resursy – Water resources*, vol. 41, no 5, pp. 518–529.

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). *Chapter 4 Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic*. 2007. – Oslo, AMAP, 87 p.

Dahle S., Savinov V., Matishov G.G. et al. 2003. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in bottom sediments of the Kara Sea shelf, Gulf of Ob and Yenisei Bay. – *Science of the Environment*, vol. 36, pp. 57-71.

Evseev A.V., Belousova A.P., Ivanov V.V. et al. 2000. Environmental hot spots and impact zones of the Russian Arctic. ACOPS, GEF PDF-B Project No.GF/1100-99-13. – Moscow, UNEP, 51 p.

Fernandes M.B., Sicre M.A. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the Arctic: Ob and Yenisei Estuaries and Kara Sea Shelf. – *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 48, pp. 725–737.

NAS (National Academy of Sciences). *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. 2003. National Research Council. Washington, D.C. – The National Academies Press, 265 p.

Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R., Villeneuve J., Bartocci J. Cattini C. 2004. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments. – *Mar. Pollut. Bull.* vol. 48, pp. 44–60.

Yunker M.B., Macdonald R.W., Snowdon L.R., Brian R. F. 2011. Alkane and PAH biomarkers as tracers of terrigenous organic carbon in Arctic Ocean sediments. – *Organic Geochemistry*, vol. 42, pp. 1109–1146.

Статья поступила в редакцию: 26.03.2017

После переработки: 23.04.2017