

УДК 504.054

DOI: 10.15372/ChUR2024544

EDN: USLJUA

Моделирование контакта нефтяных систем с природными водными объектами

Н. А. МУХОРТИНА^{1,2}, О. В. СЕРЕБРЕННИКОВА¹, Н. А. КРАСНОЯРОВА¹¹Институт химии нефти СО РАН,
Томск, Россия

E-mail: natalyav95@mail.ru

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Томский филиал,
Томск, Россия

(Поступила 15.12.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Проведено лабораторное моделирование нефтяного загрязнения водных объектов с использованием системы “дизельное топливо – вода – минеральная фаза”. Методом газовой хромато-масс-спектрометрии изучены содержание и состав органических соединений в каждой из составляющих систему частей. Выявлен характер изменения состава присутствующих в дизельном топливе *n*-алканов, полициклических ароматических и нафтеновых углеводородов, циклогексанов, алкилбензолов и триметилалкилбензолов при переходе из дизельного топлива в водную и минеральную фазы.

Ключевые слова: загрязнение водной среды, состав органических соединений, дизельное топливо, природные воды, донные осадки

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение роста добычи нефти, масштабов ее транспортировки, переработки и потребления приводят в случае разлива к существенному ухудшению экологической ситуации в затронутых разливом районах. Следовательно становится актуальным вопрос о выявлении границ распространения загрязнения для последующей разработки концепции очистки территории и эффективной защиты окружающей среды. Органические соединения, входящие в состав нефти и продуктов ее переработки, пагубно воздействуют на все без исключения звенья биологической цепочки, вызывают серьезные нарушения деятельности основных жизненных экосистем, поэтому важен мониторинг содержания таких соединений в водной среде. Для решения проблемы применяются разные подходы, включающие разработку способов диагностики степени загрязнения объектов окружающей среды

всевозможными видами нефтяных загрязнителей и идентификацию источника загрязнения [1, 2]. Различные техногенные источники продуцируют отличающиеся друг от друга, присущие только им комбинации соединений [3], которые трансформируются и дифференцируются под воздействием разнообразных условий. Изменение состава некоторых нефтяных компонентов в водной среде изучено в работах [4, 5], но для более полного представления о дифференциации состава нефтяных соединений в водных объектах требуются дополнительные исследования.

Цель работы – оптимизация параметров мониторинга нефтяных загрязнений водной среды. Для этого нами проведен анализ закономерностей распространения загрязнителей при моделировании различных условий контакта с водой и донным осадком, а также изучены особенности изменения состава широкого набора нефтяных соединений при их поступлении в природные водные объекты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для моделирования нефтяного загрязнения водных объектов была использована выдержанная в лабораторных условиях в течение различного времени тройная система “поллютант – вода – минеральная фаза”. В качестве поллютанта этой системы было выбрано дизельное топливо (ДТ).

В модельную природную систему входили родниковая вода в объеме 3 дм³, дизельное топливо – 15 см³ и донные осадки (ДО), отобранные на незагрязненном участке русла реки в количестве 40 г. Эксперименты проводили в стеклянной емкости при температуре 25 °С с защитой от попадания прямых солнечных лучей на протяжении 3 и 6 месяцев (табл. 1). Сроки эксперимента выбраны на основе реальных периодов активного устранения последствий техногенных катастроф.

Параллельно был поставлен эксперимент с введением дополнительного фактора (перемешивание слоев), воспроизводящего движение водной массы. Стадию перемешивания осуществляли на протяжении 3 ч с последующим отстаиванием системы в течение 3 сут.

Дизельное топливо удаляли из системы с помощью делительной воронки через 3 ч, 3 или 6 мес в зависимости от условий эксперимента. Из воды органические компоненты экстрагировали хлороформом. Донные осадки предварительно высушивали, затем экстрагировали раствором (7 об. % метанола в хлороформе) при нагрева-

нии на водяной бане. Полученные экстракты из водной и минеральной фазы отгоняли с помощью вакуумного роторного испарителя досуха. В эксперименте с перемешиванием ДО были разделены на две части, одну экстрагировали хлороформ-метанольной смесью, а вторую часть промывали свежей порцией воды. Водную вытяжку из осадка экстрагировали хлороформом.

Все полученные экстракты, а также ДТ анализировали методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) с помощью хромато-масс-спектрометра Thermo Fisher Scientific DFS (Германия) в Томском региональном центре коллективного пользования ТНЦ СО РАН. Разделение компонентов экстрактов происходило на кварцевой капиллярной колонке фирмы Agilent с внутренним диаметром 0.25 мм, длиной 30 м и неподвижной фазой TR-5MS толщиной 0.25 мкм. Условия анализа: газ-носитель – гелий, температура испарителя – 250 °С, температура интерфейса – 250 °С, метод ионизации – электронный удар, энергия ионизирующих электронов – 70 эВ, температура ионизационной камеры – 250 °С, диапазон регистрируемых масс – 50–500 Da, длительность развертки спектра – 1 с. Программа нагрева термостата хроматографа: $T_{\text{нач}} = 80$ °С, изотермическая выдержка в течение 2 мин, затем нагрев со скоростью 4 °С/мин до $T_{\text{макс}} = 300$ °С, изотермическая выдержка в течение 35 мин.

Хроматограммы органических компонентов были получены по общему ионному току (TIC) и характеристическим фрагментным ионам (SIM).

ТАБЛИЦА 1

Характеристика условий проведения модельных экспериментов на системе “дизельное топливо – родниковая вода – осадок”

Шифр	Условия эксперимента	Время контакта	Описание образцов
Эксперимент 1			
1Вода	Стационарный контакт	3 мес.	Экстракт из водной части
2ДО	Стационарный контакт	3 мес.	Экстракт из ДО
Эксперимент 2			
3Вода	Стационарный контакт	6 мес.	Экстракт из водной части
4ДО	Стационарный контакт	6 мес.	Экстракт из ДО
Эксперимент 3			
5Вода	Перемешивание 3 ч, отстаивание	3 сут	Экстракт из водной части
6ДО	Перемешивание 3 ч, отстаивание	3 сут	Экстракт из части ДО
Эксперимент 4			
7Вода	Перемешивание 3 ч, отстаивание	3 сут	Экстракт повторной водной вытяжки из части ДО

Примечание. ДО – донный осадок (минеральная фаза).

Индивидуальные соединения идентифицировали по библиотеке масс-спектров NIST-5. Качественное и количественное определения проводили по соответствующим пикам на хроматограммах и их площадям с использованием дейтероаценафтена ($C_{12}D_{10}$) в качестве внутреннего стандарта [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для качественной и количественной оценки перехода компонентов ДТ в водную и минеральную фазы методом ГХ-МС (TIC) был определен его исходный состав (рис. 1).

По хроматограммам (SIM) в составе ДТ идентифицированы группы соединений: *n*-алканы состава C_{11} – C_{33} (*n*-Алк, m/z 57, где m/z означает отношение массы к заряду в масс-спектрах); изопреноидные алканы – C_{14} – C_{21} (и-Алк, m/z 57); гомологи циклогексана – C_{11} – C_{25} (ЦГ, m/z 83); гомологи фенантрена (Ф, m/z 178), представленные моно-, би- и триметилфенантренами (m/z 192, 206, 220 соответственно); гомологи нафталина (Нф), включающие моно-, би- и триметилнафталины; тетрациклические ароматические углеводороды (ТеЦ, m/z 202), в частности флуорантен и пирен. Присутствуют *n*-алкилбензолы – C_{12} – C_{25} (*n*-АБ, m/z 92) и триметилалкилбензолы с алкильным заместителем изопреноидного строения – C_{13} – C_{16} , C_{18} – C_{21} (ТМАБ, m/z 133). Обнаружены в небольшом количестве сесквитерпаны (СТ, m/z 123), включающие дриманы – C_{15} и гомодриманы – C_{16} , с преобладанием гомодриманов; полициклические нафте-

ны (ПЦН), среди которых стераны – C_{27} – C_{29} (С, m/z 217) и гопаны – C_{27} , C_{29} – C_{33} (Г, m/z 191). Относительное содержание компонентов приведено на рис. 2.

Основными соединениями ДТ являются *n*-алканы, молекулярно-массовое распределение (ММР) которых показано на рис. 3. Они характеризуются унимодальным распределением с максимумом, приходящимся на C_{11} – C_{12} . На долю C_{11} – C_{23} приходится около 80 % от суммы идентифицированных *n*-алканов.

Распределение алкилбензолов и циклогексанов имеет схожий характер с максимумами, приходящимися на C_{11} , C_{15} , C_{16} (рис. 4).

Отличительной особенностью ТМАБ является отсутствие в их составе гомолога C_{17} и неравномерное, характерное для изопреноидных структур, удерживание при хроматографическом разделении (рис. 5).

Величину соотношения суммы изопреноидных алканов (пристана (Pr) и фитана (Ph)) к *n*-алканам (K_i) рассчитывали по формуле:

$$K_i = (Pr + Ph) / (n-C_{17} + n-C_{18})$$

Значение K_i составляет 0.93, а соотношение Pr / Ph – 1.17. Среднюю молекулярную массу (M_{cp}) определяли как

$$M_{cp} = \frac{\sum(M_i \cdot \Sigma C_i)}{\Sigma C_i}$$

где M_i – молекулярная масса гомолога, C_i – содержание гомолога.

В дизельном топливе M_{cp} для *n*-алканов составляет 193, циклогексанов – 186, алкилбензолов – 201, триметилалкилбензолов – 215.

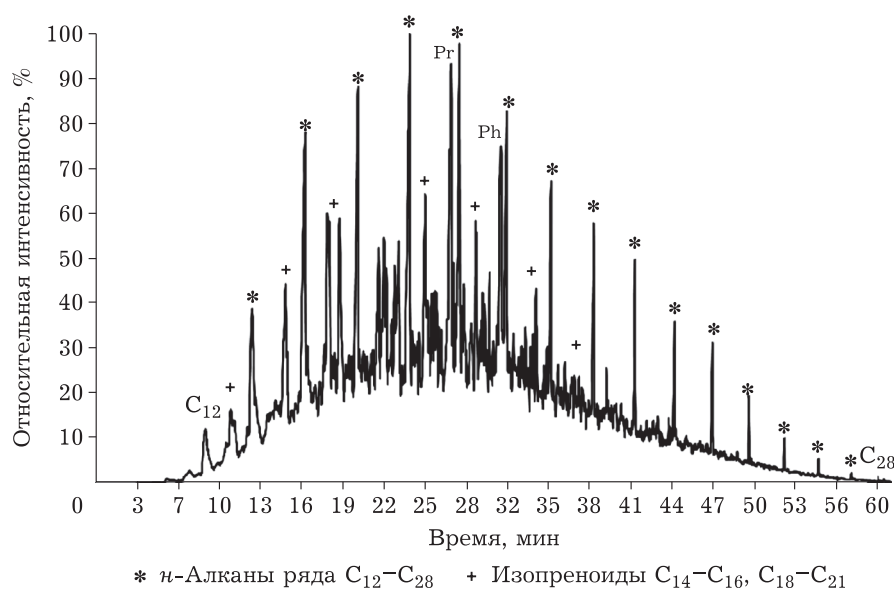


Рис. 1. Хроматограмма дизельного топлива по полному ионному току (TIC). Pr – пристан; Ph – фитан.

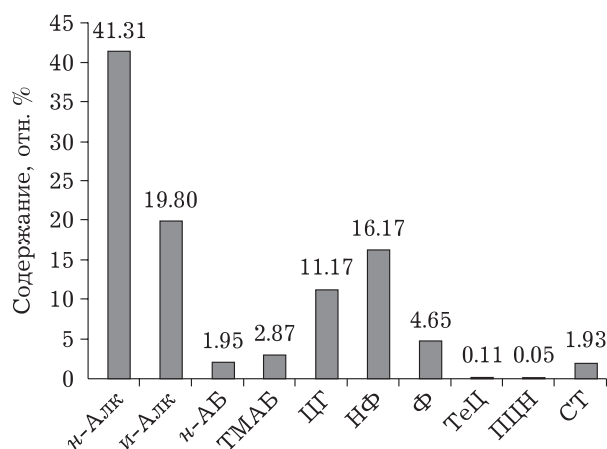


Рис. 2. Групповой состав дизельного топлива. *n*-Алк – нормальные алканы; и-Алк – изопреноидные алканы; *n*-АБ – *n*-алкилбензолы; ТМАБ – триметилалкилбензолы; ЦГ – гомологи циклогексана; Нф – гомологи нафталина; Ф – гомологи фенантрена; ТеЦ – тетрациклические ароматические углеводороды; ПНЦ – полициклические нафтенны; СТ – сесквитерпаны.

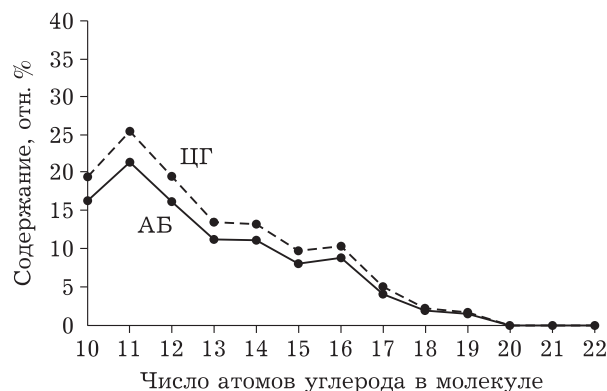


Рис. 4. Распределение алкилбензолов (АБ) и гомологов циклогексана (ЦГ) в дизельном топливе.

Проблема идентификации источника нефтяного загрязнения, поступающего в водные объекты, связана с изменением его состава, обусловленного различием в химических свойствах отдельных соединений. Модельный эксперимент в лабораторных условиях проведен для уточнения и детализации возможных процессов перехода компонентов ДТ в водную среду, а затем и в ДО, а также для уточнения изменения состава ДТ в системе “поллютант – вода – минеральная фаза”.

В табл. 1 приведены условия проведения модельных экспериментов и описание экстрактов органического вещества после 3 и 6 месяцев контакта с ДТ, отобранных для анализа. В рассматриваемых экспериментах модель трансформации ДТ в воде по сравнению с природными условиями существенно упрощена. Минимизи-

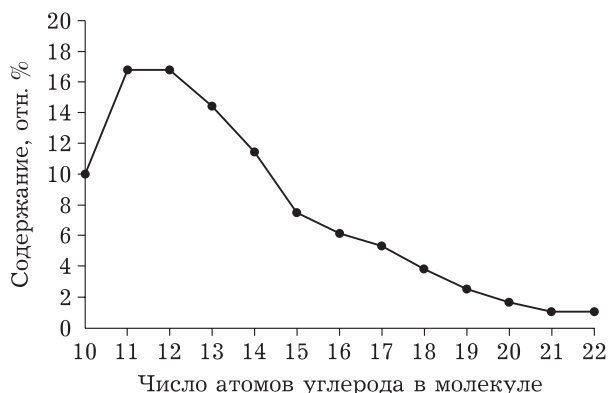


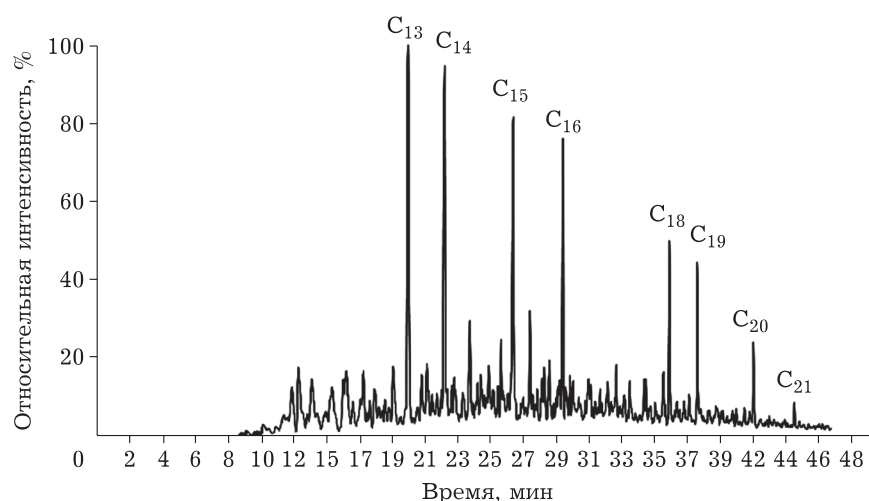
Рис. 3. Молекулярно-массовое распределение *n*-алканов в дизельном топливе.

рованы процессы испарения, эмульгирования и диспергирования, фотохимического окисления. Тем не менее модель позволяет оценить характер изменения состава ДТ при его взаимодействии с водной фазой и затем (через водную) – с минеральной фазой.

После разделения фаз ДО высушивали и компоненты ДТ, перешедшие в воду и сорбированные минеральной составляющей, экстрагировали соответствующими растворителями. Полученные экстракты исследовали методом ГХ-МС.

Анализ результатов экспериментов, моделирующих распределение компонентов ДТ в непроточной (типа затона) стационарной системе “поллютант – вода – минеральная фаза”, показал, что через 3 месяца контакта с поллютантом в застойную воду (1Вода) переходит 0.16 мас. % ДТ, а в минеральной фазе (2ДО) аккумулируется 0.19 мас. %. Дальнейшее взаимодействие (еще через 3 месяца) незначительно повлияло на долю компонентов ДТ в воде (0.19 мас. %), а в минеральной составляющей системы эта доля существенно увеличилась до 0.91 мас. %. В табл. 2 представлено содержание основных групп органических соединений в водной и минеральной фазах.

Суммарное содержание *n*-алканов (*n*-Алк), полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), алкилбензолов (АБ), триметилалкилбензолов (ТМАБ), циклогексанов (ЦГ) и гопанов, выделенных из водной и минеральной фаз через 3 месяца контакта с ДТ, составляет 4444.00 мкг/дм³ из воды (1Вода) и 666.39 мкг/г из минеральной компоненты (2ДО), а через 6 месяцев – 9313.76 мкг/дм³ (3Вода) и 1853.15 мкг/г (4ДО) соответственно. Таким образом, увеличение времени контакта ДТ с водой приводит к увеличению

Рис. 5. Масс-фрагментограмма триметилалкилбензолов (m/z 133) в дизельном топливе.

содержания компонентов ДТ как в водной, так и в минеральной фазе системы (табл. 3). В составе этих компонентов с увеличением времени взаимодействия с ДТ возрастает доля n -алканов в водной фазе от 55 до 67 отн. % и в меньшей степени в минеральной – от 68 до 72 отн. %. С увеличением времени контакта в перешедшей в воду части ДТ возрастает также доля изопреноидных алканов (от 8.5 до 12.1 отн. %), но в ДО, в отличие от n -алканов, их содержание снижается от 20.3 до 14.5 отн. %. Обратная ситуация наблюдается в случае полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), представляющих сумму гомологов нафталина, фенантрена и тетрациклических соединений, доля которых в экстрактах существенно выше по сравнению с ДТ, их количество со временем снижается в водной фазе от 25 до 11 отн. %, а в ДО – возрастает от 2.4 до 7.4 отн. %.

Это может быть обусловлено преимущественной сорбцией ПАУ минеральной составляющей и накоплением в ней этих, более полярных по сравнению с остальными соединений. Изменение относительного содержания ЦГ, АБ и ТМАБ в водной фазе и ДО с увеличением времени контакта с ДТ не превышает 1 %.

Гопаны появляются в воде (3Вода) через 6 месяцев и составляют 0.01 отн. % от суммы всех идентифицированных соединений. В составе сорбированных породой компонентов они зафиксированы уже через 3 месяца (2ДО), а через 6 месяцев (4ДО) их доля резко падает от 0.18 до 0.002 отн. %.

Введение в систему “поллютант – вода – минеральная фаза” дополнительного фактора (перемешивания) продемонстрировало большую по

ТАБЛИЦА 2

Групповой состав органического вещества в водной (мкг/дм³) и минеральной (мкг/г) фазах

Углеводороды	Выдерживание 3 месяца		Выдерживание 6 месяцев		Перемешивание		
	1Вода	2ДО	3Вода	4ДО	5Вода	6ДО	7Вода
n -Алканы	2474.12	450.48	6275.60	1341.36	8192.62	862.64	4542.18
i -Алканы	377.03	135.38	1130.86	268.63	964.40	182.92	1336.22
ЦГ	355.80	44.93	670.43	52.85	1111.24	95.59	500.42
n -АБ	57.43	8.28	104.81	23.32	192.12	19.67	84.31
ТМАБ	82.61	10.38	147.86	29.81	253.68	28.59	100.80
ПАУ	1097.01	15.74	983.28	137.15	2630.64	278.42	1032.52
Гопаны	0	1.20	0.93	0.03	0.23	0.06	0.60
Сумма	4444.00	666.39	9313.76	1853.15	13344.94	1467.89	7597.06

Примечания. 1. i -Алканы – изопреноидные алканы; ЦГ – циклогексаны; АБ – алкилбензолы; ТМАБ – триметилалкилбензолы; ПАУ – полициклические ароматические углеводороды (сумма гомологов нафталина, фенантрена и тетрациклических ароматических углеводородов). 2. Обозн. модельных систем см. табл. 1.

сравнению со стационарной системой массовую долю компонентов ДТ, переходящих в водную (5Вода) и минеральную фазы (6ДО), – 0.93 и 1.68 мас. % соответственно. При этом соотношение основных групп соединений не изменилось, в образцах доминируют *n*-алканы. На долю АБ приходится 2 отн. %, ТМАБ – 3 отн. %, доля ЦГ несколько выше в воде – 8 отн. %, а гопанов больше в донных осадках (0.006 отн. %).

Рассматривая перемешивание как приближенную модель реки, представляющую собой лабильную систему, можно предположить, что из ДО могут вымываться сорбированные ранее загрязняющие компоненты. Для моделирования проточности системы через часть донных отложений, загрязненных ДТ (6ДО), нами была пропущена порция родниковой воды (7Вода), которая экстрагировала часть сорбированных компонентов.

Показано, что свежая порция воды (7Вода), которая вымывает из донных отложений сорбированные компоненты ДТ, содержит их меньше, чем вода (5Вода), контактировавшая с ДТ (условия проведения эксперимента см. табл. 1). Суммарное содержание *n*-алканов, АБ, ТМАБ, ЦГ и гопанов, выделенных из этой порции воды составляет 7597.06 мкг/дм³. Процентное соотношение этих компонентов в смеси распределяется следующим образом: *n*-алканы / ПАУ / ЦГ / АБ / ТМАБ / гопаны = 59.8 : 13.6 : 6.6 : 1.1 : 1.3 : 0.01,

что практически идентично долям большинства этих соединений в ДО. Исключением являются гопаны и ПАУ. Доля первых в водной вытяжке (7Вода) в 2 раза выше, а доля вторых – в 1.4 раза ниже, чем в составе соединений, сорбированных минеральной фазой (6ДО). Это согласуется с данными, показавшими снижение относительного содержания гопанов в ДО при увеличении времени проведения эксперимента в стационарных условиях. Видимо, при увеличении времени взаимодействия “вода – осадок” активизируется процесс десорбции пентациклических нафтенных структур гопанов, в то время как процессы сорбции и десорбции циклических соединений с длинным алкильным заместителем (ЦГ, АБ, ТМАБ) в системе “вода – осадок” находятся в равновесии, а скорость десорбции в случае ПАУ минимальна.

При сопоставлении различных нефтей и получаемых из них нефтепродуктов обычно используют коэффициенты, основанные на соотношениях изопреноидных и нормальных алканов, величина которых зависит от условий формирования и преобразования исходной нефтематеринской породы.

Расчет этих коэффициентов (Pr/Ph и K_i) для модельных систем показал различие значений по сравнению с ДТ (табл. 3). Если для большинства водных и минеральных фаз величина K_i меньше, чем в ДТ, то величина Pr / Ph повы-

ТАБЛИЦА 3

Расчетные соотношения для модельных систем

Расчетное соотношение	ДТ	Выдерживание 3 месяца		Выдерживание 6 месяцев		Перемешивание		
		1Вода	2ДО	3Вода	4ДО	5Вода	6ДО	7Вода
Pr/Ph	1.17	1.41	1.24	1.42	1.35	1.50	1.40	1.24
K_i	0.93	0.87	0.83	0.82	0.78	0.91	0.84	0.87
Средняя молекулярная масса, M_{cp} :								
<i>n</i> -Алк	193	222	231	250	233	210	234	248
ТМАБ	215	199	227	210	213	192	208	232
ЦГ	186	228	228	223	230	231	221	238
АБ	201	203	217	200	200	194	213	237
Нф	159	151	155	150	154	161	169	173
Ф	197	193	198	192	191	199	196	201
$\Sigma(C_{13}-C_{15})/\Sigma(C_{16}-C_{25})$:								
<i>n</i> -Алк	2.91	1.25	0.19	0.77	0.62	2.05	1.50	0.20
ТМАБ	2.71	3.09	0.51	1.75	1.44	4.45	1.97	0.43
ЦГ	5.32	1.42	0.82	0.94	0.92	3.21	1.11	0.29
АБ	5.1	1.91	0.79	2.10	1.93	3.25	1.10	0.29

Примечания. 1. Pr – пристан; Ph – фитан; $K_i = (Pr + Ph)/(n-C_{17} + n-C_{18})$; *n*-Алканы – изопреноидные алканы; ТМАБ – триметилалкилбензолы; Нф, Ф, ЦГ – гомологи нафталина, фенантрена и циклогексана соответственно; АБ – алкилбензолы. 2. Обозн. модельных систем см. табл. 1.

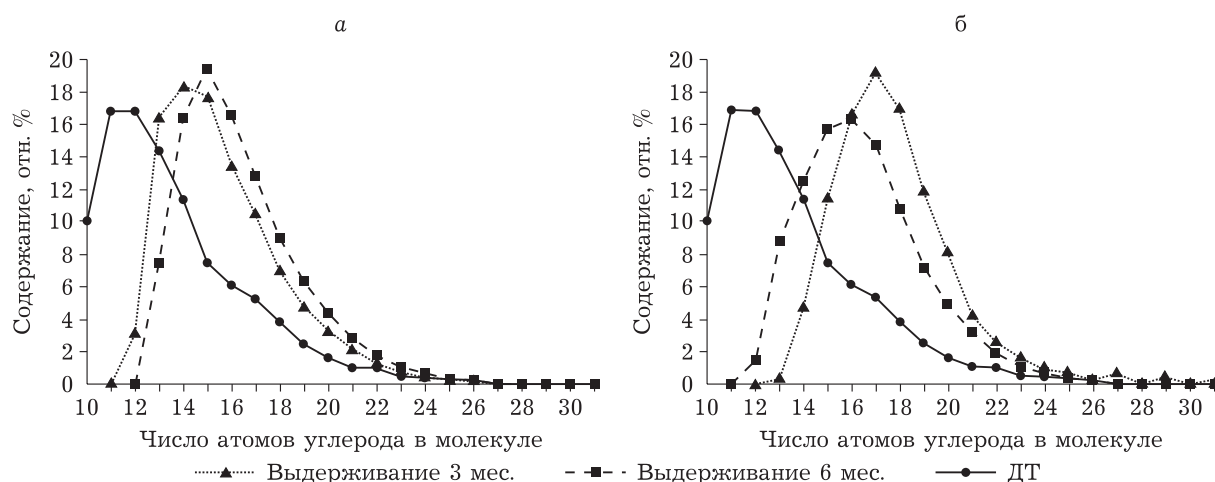


Рис. 6. Типичное молекулярно-массовое распределение n -алканов через 3 и 6 месяцев выдерживания в водной (а) и минеральной (б) фазах после контакта с дизельным топливом (ДТ) в стационарных условиях.

шена. Меняется также средняя молекулярная масса $M_{\text{ср}}$ и соотношение низко- и высокомолекулярных гомологов (НМ/ВМ) для каждой группы идентифицированных соединений. Анализ индивидуального состава каждой из идентифицированных групп соединений показал более высокую среднюю молекулярную массу n -алканов, АБ и ТМАБ, сорбированных ДО после 3 месяцев контакта с ДТ (2ДО), по сравнению с присутствующими в водной фазе (1Вода) и самим ДТ, т. е. изменение их индивидуального состава в системе “дизельное топливо – вода – донный осадок”. Через 6 месяцев характер молекулярно-массового распределения среди этих групп соединений в водной и твердой фазах выравнивается. На рис. 6 представлено типичное смещение максимумов n -алканов в сторону высокомолекулярных гомологов в водной (а) и минеральной (б) фазах по сравнению с ДТ.

В составе ПАУ водной и минеральной фаз были определены нафталин, фенантрен и их метил-, диметил-, триметилзамещенные гомологи, а также флуорантен и пирен. Как и в ДТ, гомологи нафталина преобладают над остальными ПАУ. Их доля в водной фазе выше, чем в минеральной. При этом во всех экспериментах в воде преобладают диметилзамещенные гомологи нафталина, а в ДО – триметилзамещенные. С увеличением времени контакта с ДТ среди гомологов нафталина (в воде и ДО) возрастает относительное содержание метилнафталинов, появляется незамещенный нафталин. Среди фенантронов, накапливающихся в ДО в большей мере, чем в воде, в максимальной концентрации (в воде и ДО) присутствуют метилфенантроны,

а доля диметилфенантронов и незамещенного фенантрена выше в ДО. Как и в случае нафталинов, средняя молекулярная масса фенантронов в водной фазе ниже, чем в ДТ. В ДО, наоборот, она незначительно повышена. С увеличением времени контакта с ДТ в ДО исчезают триметилзамещенные соединения, средняя молекулярная масса фенантронов снижается, а в водной фазе состав фенантронов меняется незначительно, и средняя молекулярная масса приближается к зафиксированной в ДО.

Голоядерные и метилзамещенные тетрациклические арены присутствуют в водной фазе в близких концентрациях, в ДО преобладают незамещенные. На рис. 7 показано перераспределение ТМАБ в ДО с течением времени при проведении эксперимента в стационарных условиях и в эксперименте с перемешиванием. С увеличением времени контакта с ДТ до 6 месяцев возрастает количество низкомолекулярных гомологов C_{13} – C_{17} , при этом в системе с перемешиванием сорбция происходит значительно быстрее, а распределение гомологов соответствует распределению в ДТ.

Соотношение суммы низкомолекулярных ТМАБ к сумме высокомолекулярных ($\Sigma(C_{13}$ – $C_{15})/\Sigma(C_{16}$ – $C_{25})$) в ДО с течением времени (6 месяцев) приближается к составу в ДТ (рис. 8). Это может быть связано с тем, что высокомолекулярные гомологи плохо растворяются и быстрее сорбируются на ДО, в то время как низкомолекулярные соединения находятся в растворенном состоянии в воде, сорбируясь на ДО пролонгировано во времени.

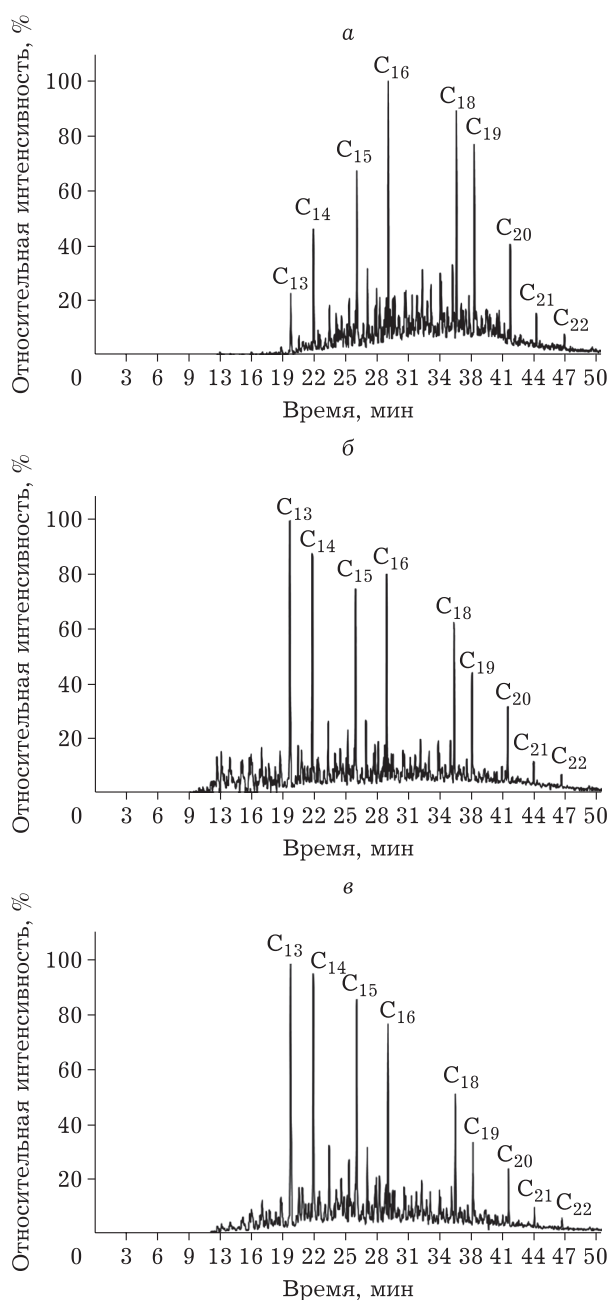


Рис. 7. Масс-фрагментограммы триметилалкилбензолов (m/z 133) в минеральной фазе модельных систем: после 3 (а) и 6 месяцев (б) выдерживания в стационарных условиях, а также после эксперимента с перемешиванием (в).

Аналогичное изменение соотношений низко- и высокомолекулярных соединений в ДО отмечено также и для n -алканов, ЦГ, АБ. При этом для водной части подобного изменения выявлено не было. Поэтому для обнаружения загрязнения природных объектов, целесообразно исследовать не только суммарное содержание отдельных групп углеводородов, но и соотношение низко- и высокомолекулярных соединений в них.

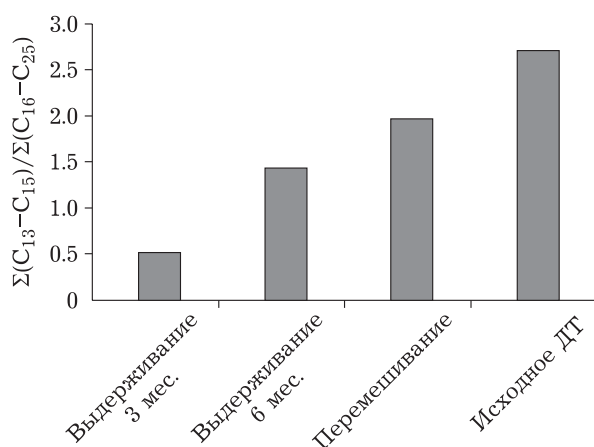


Рис. 8. Соотношение низкомолекулярных и высокомолекулярных триметилалкилбензолов ($\Sigma(C_{13}-C_{15})/\Sigma(C_{16}-C_{25})$) в образцах донных отложений в модельных экспериментах (выдерживание 3 и 6 месяцев, перемешивание) и исходном дизельном топливе (ДТ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эксперименты, моделирующие распределение органических соединений в системе “дизельное топливо – вода – минеральная фаза”, впервые показали, что присутствующие в дизельном топливе n -алканы, ПАУ, алкилбензолы, триметилалкилбензолы, гомологи циклогексана и гопаны частично переходят в водную и минеральную фазы, при этом доля компонентов, сорбированных донными осадками выше, чем их содержание в водной фазе. В воде и донных осадках сохраняется характерное для дизельного топлива преобладание n -алканов, но в более высоком относительном содержании (до 67 %), чем в дизельном топливе. Перешедшие в воду и сорбированные донными осадками n -алканы, алкилбензолы, триметилалкилбензолы и гомологи циклогексана отличаются большими значениями средней молекулярной массы по сравнению с присутствующими в дизельном топливе, а гопаны характеризуются более узким набором гомологов и отсутствием соединений с длиной углеродной цепи более C_{30} . Величина Pr/Ph в дизельном топливе при переходе в водную и минеральную фазы возрастает в среднем на 15 отн. %, а значение K_1 снижается в среднем на 8 отн. %.

Полученные результаты, показывающие характер изменения состава нефтяных поллютантов в водной среде и донных отложениях, позволяют предложить алгоритм исследования, который включает изучение показателей для оценки экологического состояния поверхностных водных

объектов и идентификацию источников их загрязнения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Устинкина Е. С. Оценка антропогенного воздействия на качество вод поверхностных водных объектов в районах нефтедобычи Томской области // Вестн. Томского гос. ун-та. 2015. № 400. С. 420–425.
- 2 Никаноров А. М., Страдомская А. Г. Загрязнение водных объектов в районах воздействия топливно-энергетического комплекса // Метеорология и гидрология. 2003. № 4. С. 81–90.
- 3 Волкова Н. А., Серебренникова О. В., Русских И. В., Красноярова Н. А. Распространение в донных отложениях и почве арктической территории компонентов дизельного топлива после разлива // Химия в интересах устойчивого развития. 2023. Т. 31, № 2. С. 171–178.
- 4 Кульков М. Г., Артамонов В. Ю., Коржов Ю. В., Углев В. В. Индивидуальные органические соединения нефти как индикаторы техногенного нефтяного загрязнения водной среды // Изв. Томского политехн. ун-та. 2010. Т. 317, № 1. С. 195–200.
- 5 Кульков М. Г., Коржов Ю. В., Артамонов В. Ю., Углев В. В. Состав и особенности изменения со временем водорастворимого комплекса органических веществ нефтезагрязненной водной среды // Изв. Томского политехн. ун-та. 2012. Т. 320, № 1. С. 193–199.