

УДК 504.054

УГЛЕВОДОРОДЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД
НА ТРАНСАРКТИЧЕСКОМ РАЗРЕЗЕ

И. А. Немировская*, З. Ю. Реджепова, академик РАН А. П. Лисицын

Поступило 25.10.2018 г.

Представлены результаты определения содержания и состава алифатических углеводородов (УВ) во взвеси на геохимическом барьере река (Обь, Енисей, Лена, Хатанга, Индигирка, Колыма) — море (Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское), полученные в 2015–2017 гг. Показано, что распределение УВ совпадает в общих чертах с содержанием взвеси. Потери в концентрациях УВ в зоне смешения речных вод с морскими превышали в отдельных случаях 90% от их выноса рекой. В пелагиале морей содержание УВ близко к фоновому (2–7 мкг/л). Поведение и состав УВ зависит от особенностей водосбора рек, сезона отбора проб и времени суток (прилив, отлив). Влияние антропогенных поступлений установлено только в Обской губе, где состав алканов близок к нефтяному при содержании УВ 86 мкг/мг взвеси. В остальных пробах доминируют природные УВ.

Ключевые слова: Арктика, геохимическая барьерная зона, река, море, взвесь, углеводороды, алканы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863345-349>

На формирование природной среды арктических морей большое влияние оказывают выносы рек, с водами которых поступает огромное количество взвешенных частиц и органических соединений как природного, так и антропогенного происхождения [1, 2]. Перед масштабной добычей нефти на арктическом шельфе необходимо определить влияние речного стока на распределение и формирование регионального углеводородного фона в различных районах. Проведённые ранее исследования показали, что при смешении речных вод с морскими происходит коренная перестройка потока речного осадочного вещества, его массовое осаждение [1]. Вместе с ним оседает основное количество растворённых и взвешенных органических соединений, в том числе и углеводородов (УВ) [1–3]. Поэтому область река–море была названа маргинальным фильтром [4].

Большинство имеющихся данных по поведению УВ на геохимическом барьере река–море относится к донным осадкам [5–8]. Органические соединения в воде и, особенно, во взвешенной форме изучали гораздо реже [1, 3, 9].

В 2015 (август–сентябрь), 2016 (июль–август) и 2017 (август–сентябрь) гг. в 63, 66 и 69 рейсах нис “Академик Мстислав Келдыш” на трансарктическом

разрезе в Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском морях было проведено исследование алифатических углеводородов (УВ) во взвеси поверхностных вод (рис. 1). Цель исследования: определить особенности поведения УВ в геохимической барьерной зоне река (Обь, Енисей, Лена, Хатанга, Индигирка, Колыма) — море. Исследование УВ проводили в зависимости от солёности в сопоставлении с содержанием взвеси, липидов, хлорофилла “а” (хл а).

Поверхностные воды отбирали по ходу движения судна и при приближении к станциям. Взвесь выделяли на стекловолокнистые фильтры GF/F для определения УВ, $C_{орг}$ и хл а и на ядерные фильтры для определения её количества гравиметрически. Концентрацию УВ определяли методом ИК-спектрофотометрии, содержание и состав алканов — газовой хроматографией, хлорофилл — флуоресцентным методом, состав взвеси — на сканирующем электронном микроскопе. Подробности методических процедур описаны в [3].

Полученные данные показали, что на разрезах река–море максимальный диапазон концентраций УВ установлен в Карском море в устьевой области р. Обь (табл. 1). При этом наблюдалась значительная межгодовая изменчивость их концентраций. Углеводороды, благодаря гидрофобным свойствам, легко сорбируются взвесью, и во многих случаях, особенно при одинаковых источниках, распределение их кон-

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва*

*E-mail: nemir44@mail.ru

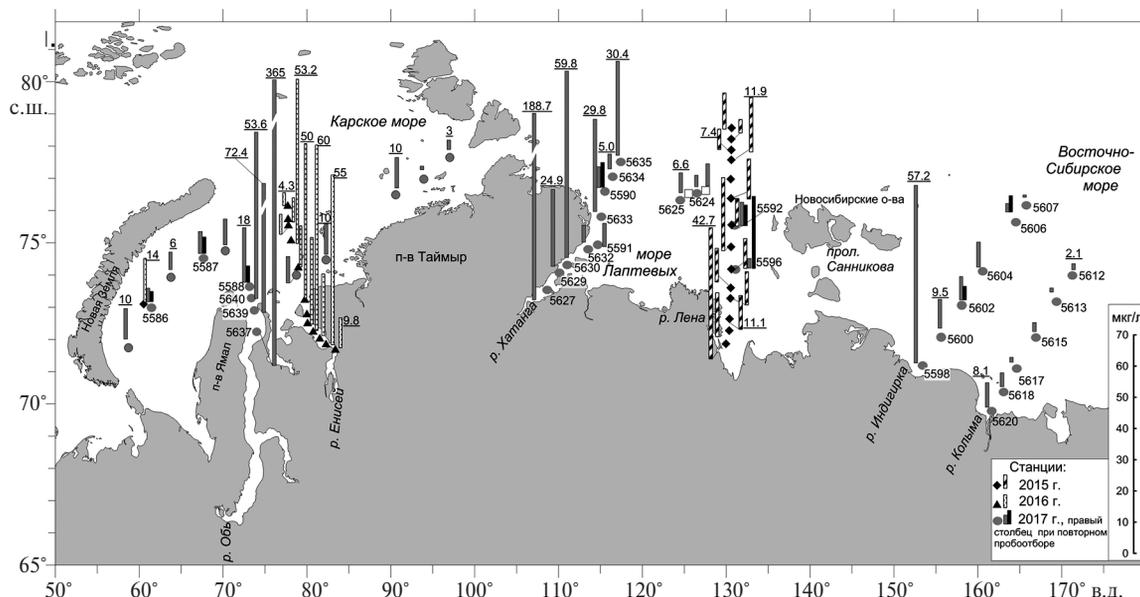


Рис. 1. Распределение углеводородов во взвеси поверхностных вод в разные годы исследования.

центраций и взвеси совпадало [9], так как содержание взвеси также уменьшалось на границе река–море (рис. 2). Однако в июле 2016 г. в Обской губе, несмотря на повышенные концентрации взвеси, содержание УВ было ниже, чем в сентябре 2017 г. (табл. 1). Среднее содержание взвеси в 2016 г. (10,3 мг/л) практически осталось на уровне 2007 г. (11,6 мг/л), но в самой губе её концентрация возросла до 106,4 мг/л. В отличие от предыдущих лет, исследования проводили в июле во время позднего паводка, когда воды реки насыщены взвесью. Кроме того строительство на западном берегу Обской губы

порта Сабетта, где в летний период начиная с 2014 г. проводили активные дноуглубительные работы, должно было оказать влияние на количество взвеси в воде. Общий объём выбранного грунта составил около 70 млн м³ [https://www.sabetta-yanao.ru/]. При максимальной концентрации УВ (364,9 мг/л в 2017 г.) состав алканов указывал на нефтяной генезис, так как характеризовался плавным распределением гомологов (рис. 3). В морской части разреза с уменьшением содержания УВ возрастала роль микробиальных алканов. Изменялся также состав взвеси. В Обской губе взвесь преимущественно состояла из

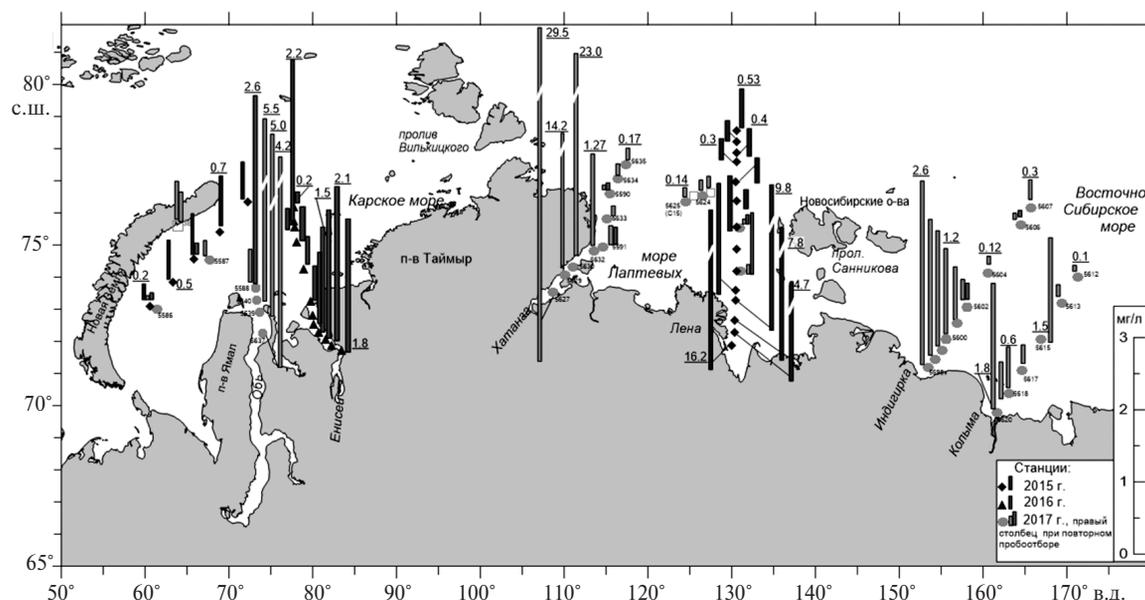


Рис. 2. Распределение взвеси в поверхностных водах в разные годы исследования.

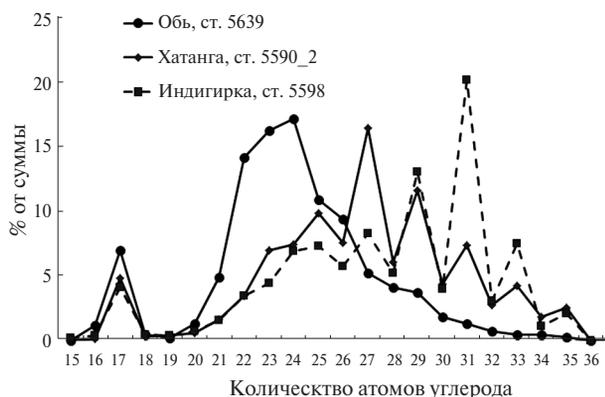


Рис. 3. Состав алканов во взвеси поверхностных вод.

глинистых минеральных частиц (сметит, мусковит, кварц, альбит), которые вносят основной вклад в сильную изменчивость концентраций взвеси на северной границе Обской губы. В мористой части разреза взвесь состояла в основном из биогенных частиц (диатомовые водоросли, волокна фитопланктона). Реже наблюдались отдельные минералы, такие как барит, мусковит, кварц, полевые шпаты, корка из глинистых минералов с пленкой гидроокислов железа. Севернее минералы практически не встречались и преобладали диатомовые водоросли.

На ст. 5317_2 небольшая часть этой взвеси, возможно, осела на склоне, так как уже на ст. 5315 её содержание уменьшалось до 2,94 мг/л, а далее на север — до 1,66 мг/л (рис. 2).

На разрезе Енисей—Карское море в июле 2016 г. в поверхностных водах интервал изменчивости концентраций УВ был близок к данным 2011 г. и был ниже, чем в устье Оби (табл. 1). Так же как и ранее [9] не наблюдалось плавного изменения содержания УВ с увеличением солёности. Близкие их концентрации (50–60 мкг/л) были установлены в разных зонах смешения енисейских вод с морскими и не коррелировали с содержанием взвеси ($r = 0,21$, $n = 14$). Примечательно, что распределение хлорофилла (хл *a*) также слабо зависело от общего содержания взвеси ($r = 0,44$) из-за терригенного характера последней. Только во внешней области зоны смешения с ростом хл *a* [10] происходило также синхронное увеличение концентраций УВ. Новообразование органических соединений за счёт биоассимиляции углерода в устье Енисея отмечали и ранее по изотопному составу ^{13}C [11]. Состав алканов был преимущественно автохтонным.

В море Лаптевых в устье р. Лены разрез начинался при солёности 6,8 psu, т.е. исследования проводили на взморе. Но и здесь с увеличением солёности

Таблица 1. Содержание органических соединений и взвеси в поверхностных водах на разрезах река—море

Год, месяц	<i>n</i>	Липиды, мкг/л		УВ мкг/л		Взвесь, мг/л		S, psu
		Интервал	средн.	интервал	средн.	интервал	средн.	
р. Обь — Карское море								
2007,09	12	25–427	182	10–310	101	0,32–34,37	11,6	0,1–20,7
2016,07	13	14–333	163	3–102	40	0,25–106,35	10,3	0,0–31,5
2017,09	5	22,1–484	166	5–365	100	0,17–5,47	3,5	2,7–25,3
р. Енисей — Карское море								
2011,09	11	21–237	83	7–49	20	0,34–2,93	1,3	0,07–27,9
2016,07	22	19–253	68	2–53	17	0,18–2,20	1,1	0,4–31,4
р. Лена — море Лаптевых								
2015,09	14	18–71	40	4–43	14	0,28–16,23	3,4	2,7–30,1
2017,09	2	22–76	—	7–23	—	0,14–0,86	—	6,8–17,8
р. Хатанга — море Лаптевых								
2017,09	17	12–452	108	4–189	39	0,1–29,5	7,5	3,5–32,2
р. Индигирка — Восточно-Сибирское море								
2017,09	13	14–188	49	1–61	16	0,09–2,54	0,7	14,8–30,1
р. Колыма — Восточно-Сибирское море								
2017,09	7	11–50	22	2–8	4	0,09–1,7	0,7	17,0–29,4

содержание УВ снижалось с 23 до 7 мкг/л (табл. 1). В 2015 г. в интервале солёности от 2,65 до 9,62 psu концентрации УВ уменьшались от 43 до 14 мкг/л [3], а в морских водах с солёностью 30,1 psu — до 4 мкг/л. Эти концентрации значительно ниже полученных ранее в воде губы Буор-Хоя в районе п. Тикси, где содержание УВ достигало 80 мг/л, при средней 40 мкг/л [12].

Подробные исследования в море Лаптевых были проведены в 2017 г. в устьевой области р. Хатанга, где на разрезе (600 км) было сделано 17 станций в интервале солёности 3,5–32,2 psu при перепаде глубин от 14 до 850 м. С увеличением солёности происходило неравномерное уменьшение концентраций УВ (рис. 1). В устье Хатанги наблюдалась высокая горизонтальная стратификация вод. Повышенные концентрации УВ и взвеси зафиксированы в начале разреза. Затем их содержание резко уменьшалось: для УВ в 7,5 раз (с 189 до 25 мкг/л), для взвеси — в 2 раза (с 29,53 до 14,15 мг/л). Наибольшая стратификация вод приурочена к центральной части разреза между станциями 5630 и 5632, где их содержание изменялось в 10,5 раз (59,8–5,7 мкг/л, рис. 1). К этому району приурочены максимальные градиенты по температуре, солёности и хл *a*. Зона высоких значений взвеси резко уменьшалась перед ст. 5631, скорее всего, из-за хребта между ст. 5631 и 5632. В результате речной вынос сместился на восток севернее о. Большой Бегичев. На мористых станциях разреза концентрации УВ и взвеси монотонно синхронно уменьшались (рис. 1). Поэтому наблюдалась связь в их распределении: $r(\text{УВ}-\text{взвесь}) = 0,76$.

В Восточно-Сибирском море диапазон концентраций УВ в области влияния рек Индигирки и Колымы был меньше по сравнению с устьевыми областями других исследованных рек. Возможно это связано с тем, что разрезы начинались на взморье рек при солёности 14,8 и 17 psu соответственно (табл. 1). По данным непрерывных измерений термосоленографа, в приповерхностном слое температура и солёность монотонно изменялись в противофазе. Явно выраженных фронтальных зон на протяжении разрезов не наблюдали. Вынос Колымы в виде плюма распространялся на северо-восток на расстояние ~ 350 км — до ст. 5615. При этом содержание взвеси в плюме возросло в 8,5 раз (с 0,17 до 1,15 мг/л), а концентрации УВ — в 2 раза (с 1,6 до 3,2 мкг/л), но оставались низкими. Состав алканов был преимущественно терригенным (рис. 3).

Таким образом, общим для всех устьевых районов оказалось резкое уменьшение концентраций УВ на геохимическом барьере река—море с увеличением

солёности. Потери в концентрациях превышали в отдельных случаях 90% от выноса УВ рекой. Если в пелагиале морей содержание УВ близко к фоновому (2–7 мкг/л), то в водах, находящихся под влиянием рек, содержание УВ значительно выше. При этом большое значение имеет сезон отбора проб, так как в паводок в реки поступает большое количество загрязнений, накопленных за зиму. Кроме того, на их распределение оказывает влияние направление ветра. В частности, в Обской губе по данным снимков спутниковых наблюдений в начале сентября 2017 г. опреснённый поверхностный слой был прижат к восточному берегу. Через месяц из-за изменения ветровых условий опреснённый слой распространился на север и северо-запад, неся с собой дополнительное количество взвешенного вещества. Поэтому на ст. 5588_2 по сравнению со ст. 5588в поверхностном слое содержание взвеси увеличилось с 0,46 до 2,60 мг/л, а количество УВ наоборот снизилось с 18 до 6 мкг/л, возможно, из-за разложения при выветривании. Поэтому взвесь здесь не являлась контролирующим фактором: $r(\text{взвесь}-\text{УВ}) = 0,42$ ($n = 7$). В сентябре 2007 г. распределение УВ и взвеси совпадало: $r(\text{взвесь}-\text{УВ}) = 0,74$ ($n = 11$) [9]. Приливные явления вносят дополнительный вклад в поведение УВ на этом геохимическом барьере, поэтому не всегда происходит плавное уменьшение концентраций УВ при увеличении солёности.

На распределение УВ также оказывает влияние водосбор рек. В частности, различия между содержанием УВ и взвеси в устьевых областях Оби и Енисея связаны с характером пород, слагающих бассейны этих двух рек. В отличие от Оби сток Енисея зарегулирован. В результате произошло снижение поступления наносов более чем в 2 раза: с 13 до 4,9 млн т/год [13]. Для устья Оби, так же как Северной Двины, в интервале солёности 0,05–0,6 psu доминировали УВ_р [9]. С увеличением солёности концентрации УВ_р уменьшались, а УВ_в увеличивались, и при $S = 6$ psu минимум растворённых форм соответствовал максимуму взвешенных (УВ_р/УВ_в = 0,18). При этом содержание УВ_в в пересчёте на мг взвеси увеличивалось в 8,5 раз (с 2 до 16,9 мкг/мг). Напротив, в устье Енисея отношение УВ_р/УВ_в с увеличением солёности возрастало от 0,77 до 5. Примечательно, что концентрации растворённых ОС в речных водах оказались даже ниже, чем в биологической части маргинального фильтра. Это отличает устьевую область Енисея от Северной Двины и Оби — арктических рек, протекающих по почвам, богатым гумусом. Кроме того, необходимо учитывать, что главную роль в поставке ОБ в Карское море имеет не молодое

биогенное вещество, а терригенный, древний материал, принесённый реками [14].

Повышенные концентрации УВ_в установленные в устье Хатанги, вызваны высокими концентрациями взвеси. Несмотря на то, что материковый сток Хатанги (более 100 км³/год) почти в 5 раз ниже, чем у Лены, а твёрдый сток самый низкий из всех исследованных сибирских рек — 1,7×10⁶ т/год (почти на порядок ниже, чем у Оби, Лены, Индигирки и Колымы), содержание взвеси здесь достигает 22 мг/л. Поэтому даже при максимальном содержании в пересчёте на взвесь концентрация УВ составила всего 2,6 мкг/мг, а в составе алканов доминировали природные нечётные гомологи (рис. 3). Для сравнения в устье Оби при максимальной концентрации УВ их содержание достигло 86 мкг/мг взвеси, а состав алканов был нефтяным. По всей вероятности, взаимодействие течений самой р. Хатанга с приливами в зоне узкого русла приводит к столь высоким концентрациям взвеси и УВ, т.е. обусловлены природными процессами. Уменьшение продуктивности вод с западных арктических морей к восточным [15] сказывается и на концентрациях УВ. Поэтому минимальное их содержание установлено в поверхностных водах Восточно-Сибирского моря (2–3 мкг/л, рис. 1). Изменение в последние годы ледовой обстановки в прибрежных водах привело к уменьшению фоновых концентраций УВ, которые в сентябре 2000 г. колебались в интервале 14–20 мкг/л [9], а в 2017 г. в интервале 3–10 мкг/л.

Источники финансирования. Результаты исследований получены в рамках государственного задания тема № 0149-2019-0007, обработка проб за счёт средств РФФИ (проект № 17-05-00356), отбор проб

в экспедициях за счёт средств РФФ (проект 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лисицын А.П.* Мировой океан. М.: Науч. мир, 2014. Т. 2. С. 331–571.
2. *Fernandes M.B., Sicre M.A.* // *Org. Geoch.* 2000. V. 31. P. 363–374.
3. *Немировская И.А., Реджепова З.Ю.* // *Геохимия.* 2018. № 8. С. 791–804.
4. *Лисицын А.П.* // *Океанология.* 1994. В. 34. № 5. С. 735–747
5. *Dahle S., Savinov V., Matishov G.G., et al.* // *Sci. Environ.* 2003. V. 36. P. 57–71.
6. *Bouloubassi I., Fillaux J., Saliot A.* // *Mar. Pollut. Bull.* 42. № 12. P. 1335–1346.
7. *Yunker M.B., Macdonald R. W., L. R. Snowdon L.R. et al.* // *Organic Geochem.* 2011. V. 42. P. 1109–1114.
8. *Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В. и др.* // *Геохимия* 2010. № 2. P. 151–163.
9. *Немировская И.А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Науч. мир, 2013. 432 с.
10. *Demidov A.B., Mosharov S.A., Makkaveev P.N.* // *J. Mar. Syst.* 2014. V. 132. P. 130–149.
11. *Галимов Э. М., Кодина Л.А., Степанец О.В.* Фундаментальные исследования океанов и морей. М.: Наука, 2006. Т. 2. С. 440–465.
12. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme) Ch. 4. Oslo: AMAP, 2007. 87 p.
13. *Лисицын А.П., Купцов В.М.* // *Океанология.* 2003. № 4. С. 593–604.
14. *Fahl K., Stein R.* // *Geo-Mar. Lett.* 2007. V. 27. P. 12–35.
15. *Кособокова К.Н.* Зоопланктон арктического бассейна. М.: Геос. 2012. 272 с.

HYDROCARBONS OF THE SURFACE WATERS IN THE TRANSARCTIC SECTION

I. A. Nemirovskaya, Z. Yu. Redzhepova, Academician of the RAS A. P. Lisitzin

P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received October 25, 2018

The results of determining the content and composition of aliphatic hydrocarbons (HCs) in suspended matter on the geochemical barrier of the river (Ob, Yenisei, Lena, Khatanga, Indigirka, Kolyma) — the sea (Kara, Laptev, and East Siberian), obtained in 2015–2017, were presented. It was shown that the distribution of HC concentrations in general with the content of the suspended matter. Losses in HC concentrations in the zone of mixing of river and sea waters in some cases exceeded 90% of their removal by the river. In the pelagial of the seas, the HCs were closed to the background (2–7 µg/l). The behavior and composition of HCs depends on the characteristics of the catchment area of the rivers, the sampling season and the time of day (tide, outflow). The influence of anthropogenic inflows was established only in the Ob Bay, where the composition of alkanes is close to oil and the HCs was 86 µg/mg of the suspension. The remaining samples are dominated by natural hydrocarbons.

Keywords: Arctic, geochemical barrier zone, river, sea, suspended matter, hydrocarbons, alkanes.