

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.42

## Вертикальное распределение *n*-алканов в атмосферном аэрозоле российского сектора Арктики в сентябре 2020 г.

В.Г. Аршинова<sup>1</sup>, М.Ю. Аршинов<sup>1</sup>, Б.Д. Белан<sup>1</sup>, Д.К. Давыдов<sup>1</sup>,  
Г.А. Ивлев<sup>1</sup>, А.В. Козлов<sup>1</sup>, А.С. Козлов<sup>2</sup>, Т.М. Рассказчикова<sup>1</sup>,  
Д.В. Симоненков<sup>1</sup>, Г.Н. Толмачев<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 20.07.2021 г.

В сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» был выполнен комплексный эксперимент по исследованию состава воздуха над всеми морями российского сектора Арктики. Эксперимент включал также отбор проб атмосферного аэрозоля в слое от 200 до 9000 м над уровнем моря и определение в его частицах концентрации предельных углеводородов (*n*-алканов). В воздухе российского сектора Арктики были обнаружены соединения предельных углеводородов C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>–C<sub>27</sub>H<sub>56</sub>. Основная же масса этого класса органических соединений заключена в более узком диапазоне C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>–C<sub>20</sub>H<sub>42</sub>. Средняя во всем слое тропосферы концентрация *n*-алканов в аэрозоле над всеми морями была небольшой, в пределах 9,3–12,6 нг/м<sup>3</sup>. Исключение составляет Чукотское море, над которым их концентрация достигала 37,7 нг/м<sup>3</sup>.

*Ключевые слова:* Арктика, атмосфера, аэрозоль, предельные углеводороды (*n*-алканы), вертикальное распределение; Arctic, atmosphere, aerosol, saturated hydrocarbons (*n*-alkanes), vertical distribution.

### Введение

Более быстрое возрастание температуры воздуха в Арктике по сравнению с другими регионами планеты в настоящее время вызывает повышенное внимание научного сообщества [1–3]. Это может привести к весьма негативным последствиям для природы Земли. Изменение климата в регионе уже проявляется на самых разных природных объектах. Так, в [4] показано, что в зоне сплошной многолетней мерзлоты наблюдалось среднегодовое повышение температуры грунта от 0,03 до 0,06 °С/год на глубине 10–12 м. Основание мерзлоты на прерывистых участках опустилось до глубины 8 м. Авторами [5] выявлено, что рост температуры воздуха привел к изменениям в гидрологическом цикле: количестве осадков, речном сбросе, потере материкового льда и т.п. И подобных фактов уже достаточно много.

Потепление климата Арктики отражается и в изменении состава воздуха, в частности в содержании атмосферного аэрозоля [6–8]. Его исследованию посвящено много работ. Однако, как следует из обобщающего обзора [9], в большинстве из них изучается неорганическая фракция аэрозоля (ионный, минеральный или элементный составы) или сажа – так называемый черный углерод.

Сведения, касающиеся органического компонента атмосферного аэрозоля в Арктике, немногочисленные и разрозненные. Они получены в основном в Западном полушарии [10–20]. Теоретический анализ источников легколетучих органических соединений и их присутствия в составе частиц выполнен с использованием модели переноса химических веществ с высоким разрешением (GEOS-Chem STM) в [10]. Он показал завывшенную оценку мощности биогенных источников гидроксиацетона, метилэтилкетона и глиоксаля, меньшие чем ожидалось мощность источников биогенной муравьиной кислоты и производство пероксиуксусной кислоты из биогенных и антропогенных прекурсоров. Атмосферные летучие органические соединения были измерены времяпролетным масс-спектрометром на ст. Виллум и Норд в северо-восточной Гренландии с апреля по октябрь 2018 г. [11]. Результаты измерений показали, что содержание ацетонитрила и бензола достигало пиковых значений в августе и сентябре и отражало поступление воздуха с континента,

\* Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru).

на котором происходило сжигание биомассы. Рост вклада морской поверхности — поступления карбоновых кислот (муравьиной, уксусной и диметилсульфида (DMS)) — наблюдался в периоды таяния снега и морского льда на побережье юго-восточной и северо-восточной Гренландии.

В сентябре 2018 г. в ходе кампании МОСНА (Microbiology-Ocean-Cloud-Coupling in High Arctic) в рамках экспедиции в Северном Ледовитом океане на шведском ледоколе Oden измерялось содержание органических соединений в аэрозоле с использованием йодидного времяпролетного масс-спектрометра. Выявлен существенный вклад морской поверхности в формирование приводного аэрозоля. В частности, подтвержден факт того, что серосодержащие соединения являются продуктами окисления диметилсульфида — газа, выделяемого фитопланктоном и ледяными водорослями. Сравнение временных рядов продуктов окисления DMS в виде частиц и газовой фазы не выявило значительной корреляции, свидетельствующей о разном времени жизни предшественника и продуктов окисления в разных фазах.

Авторами [13, 14] анализировалось общее количество органического вещества и его вклад в общую массу аэрозоля атмосферы заполярной Аляски. На всех высотах общее содержание органического углерода в аэрозоле колебалось от 8 до 950 нг/м<sup>3</sup> с максимумом в конце лета, начале осени и конце зимы. На водорастворимую часть в среднем приходилось 57 ± 11% от общей массы на протяжении всей кампании. В [15] обнаружено, что в химическом составе аэрозоля в пограничном слое атмосферы Северной Атлантики преобладали сульфаты и сильно переработанная органика. Массовые доли сульфатов, органических веществ, аммония и нитратов составляли 69, 23, 7 и 1% соответственно и оставались в значительной степени одинаковыми в разные сезоны.

Работы [16, 17] посвящены изучению вертикального распределения органического аэрозоля. В нижней тропосфере в субмикронном аэрозоле преобладали сульфаты (в среднем 74%) [16]. Вклад органического углерода составлял 20%, аммония — 4% и черного углерода (сажа) — 1%. На больших высотах соотношение менялось: относительное содержание органического углерода, аммония и сажи составляло 42, 8 и 2% соответственно. В [17] натурные измерения сравниваются с несколькими широко используемыми моделями. Сделан вывод о том, что тестируемые модели пока недостаточно точно описывают динамику органического компонента в атмосфере. Диапазон различий между модельными и измеренными данными — 30–60%.

В ряде исследований изучались соединения, входящие в состав аэрозольных частиц, их происхождение, образование и трансформация в арктической атмосфере [18–20]. В частности, в [19] представлены средние молекулярные распределения гомологического ряда *n*-алканов, жирных кислот и *n*-спиртов для теплых и холодных периодов в центральной части Аляски с июня 2008 г. по июнь 2009 г. Средние концентрации всех липидных компонентов, в том

числе *n*-алканов, в теплый период были значительно выше, чем в холодный. Индексы CPI (индекс происхождения углерода — молекулярное соотношение, отражающее его биологическое и антропогенное образование) *n*-алканов варьировались от 2,2 до 21 и в теплый период были в пять раз выше, чем в холодный, что свидетельствует об увеличении биогенного поступления от наземных высших растений в этот период.

Из этого обзора следует, что проведенные в зарубежном секторе Арктики исследования органического аэрозоля не дают однозначного представления ни о его составе, ни о пространственно-временной изменчивости. В российском секторе Арктики изучение вертикального распределения органического углерода или его составляющих вообще не проводилось. Настоящая работа частично восполняет этот пробел, представляя результаты измерения концентрации *n*-алканов в пограничном слое и свободной тропосфере Арктики.

## Методы исследования

Эксперимент выполнялся в сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» [21]. Полеты проводились с 4 по 17 сентября 2020 г. над всеми морями российского сектора Арктики: Баренцевым, Карским, Лаптевых, Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым, а также над прибрежными территориями.

Для определения органических соединений в составе аэрозоля осуществляется забор проб воздуха из-за борта воздушного судна при помощи модифицированного штатного приемника давления ППД-2М, установленного вместо иллюминатора правого борта воздушного судна и направленного навстречу набегающему потоку параллельно оси фюзеляжа. Герметичный фильтродержатель, рассчитанный на мембраны диаметром 50 мм (использовались Sartorius PTFE 11803, размер пор 1,2 мкм), изготовлен из нержавеющей стали и оснащен быстроразъемными вакуумными соединениями на входе и выходе. В конструкции использован пластинчато-роторный насос (Elmo Rietschle Gardner Denver V-VTN 26) со счетчиком газа (Shinagawa 2C-M), обеспечивающий прокачку и учет в нормированных литрах до 25 м<sup>3</sup> воздуха в час. Пневматические коммуникации, расположенные до держателя фильтров по потоку, выполнены из тефлоновой трубки внутренним диаметром 8 мм, после фильтров — из вакуумного шланга аналогичного сечения. Электропитание насоса обеспечивается инвертором с максимальной мощностью 4,5 кВт, подключенным к отдельной шине бортового питания 27 В с максимально возможным потреблением тока 100 А. При длительности работы от 20 мин установка для отбора органического компонента позволяет прокачать через фильтрующий элемент от 1 до 8 м<sup>3</sup> воздуха. С учетом чувствительности (50 пг) ГХМС-метод позволяет регистрировать в составе атмосферного аэрозоля *n*-алканы концентрацией от 0,1 нг/м<sup>3</sup>.

Место и высота отбора проб, объем прокачанного воздуха

№	Маршрут	Эшелон, м	Объем воздуха, м <sup>3</sup>
1	Толмачево—Архангельск	> 3000	18,8
2	Баренцево море	3000—9000	6,7
3	Баренцево море	200—2000	4,2
4	Архангельск—Нарьян-Мар	> 3000	5,6
5	Карское море	3000—9000	8,5
6	Карское море	200—2000	4,1
7	Нарьян-Мар—Сабетта	> 3000	4,1
8	Сабетта—Тикси	> 3000	9,5
9	Лаптевых море	3000—9000	8,4
10	Лаптевых море	200—2000	6,4
11	Тикси—Анадырь	> 3000	10,7
12	Чукотское море	3000—9000	7,2
13	Чукотское море	200—2000	4,6
14	Восточно-Сибирское море	3000—9000	7,6
15	Восточно-Сибирское море	200—2000	4,5
16	Берингово море	3000—9000	2,5
17	Берингово море	200—2000	4,8
18	Анадырь—Якутск	10600	11,3
19	Якутск—Томск	9800	13,4

Ввиду низкой концентрации органического аэрозоля в Арктическом регионе приходилось прокачивать большие объемы воздуха. Профиль же полета менялся через относительно небольшие промежутки времени. Поэтому, чтобы получить представительные пробы аэрозоля для анализа, отбор производился по следующей схеме. Над морями в слое от 200 до 2000 м, в свободной тропосфере — от 3000 до 9000 м. Над прибрежными районами отбор производился в слое 3000—9000 м при перелетах от одного аэропорта к другому. Такая процедура выполнялась над всеми морями и во время остальных перелетов.

Для примера на рис. 1 (цв. вкладка) приведена схема полета над акваторией моря Лаптевых 9 сентября. После взлета в Тикси был осуществлен набор высоты до 9200 м и выполнена 10-минутная площадка в верхней тропосфере. Затем проведены последовательные снижения до 5200 и 200 м в северо-северном направлении к району Новосибирских островов с выполнением 10-минутных площадок на каждой высоте. На высоте 200 м полет проходил над поверхностью пролива Санникова юго-восточнее о-ва Котельный. Далее последовал набор высоты до 9000 м и разворот на западный галс над о-м Беннетта с выполнением 10-минутной площадки в верхней тропосфере. Затем вновь проведены последовательные снижения до 5200 и 200 м с выполнением 10-минутных площадок на каждой высоте. В нижней части полет проходил над поверхностью моря Лаптевых северо-западнее о-ва Бельковский. Далее вновь последовал набор высоты до 9000 м с выполнением 10-минутной площадки в верхней тропосфере. Перед посадкой в Тикси последовательно занимались высоты 5000, 500 и 1000 м с 10-минутными площадками.

В ходе зондирования над каждым из морей аэрозоль отбирался на два фильтра, в слоях 200—2000 м (пограничный слой атмосферы) и 3000—9000 м (свободная тропосфера). Поскольку профиль полета переменный по высоте, фильтры переключались в зависимости от высоты полета. Таким образом на фильтры собирались пробы со всего слоя атмосферы над каждым морем, дающие представление о средних концентрациях *n*-алканов в пограничном слое и в свободной тропосфере. Это касается и перелетов. Так, например, проба, отобранная на маршруте Тикси—Анадырь, будет представлять среднее значение для всего участка. Только такая методика «валового» отбора проб позволяла произвести сбор аэрозоля, достаточного для получения хорошо идентифицируемой количественно картины всего определяемого спектра *n*-алканов.

Всего за время экспедиции отобрано 19 проб, из них шесть в нижнем эшелоне (табл. 1).

Процедура пробоподготовки и анализа *n*-алканов состояла в однократной экстракции пробы хроматографическим ацетоном (1,5 мл) в ультразвуковой бане, концентрировании экстракта на ротормном испарителе до 15 мкл с последующим анализом на хромато-масс-спектрометре (50—250 °С со скоростью 5 °С/мин, изотерма при конечной температуре — 45 мин, без разбавления, колонка DB-1MS).

В анализе использованы хроматограф Agilent 6890N и масс-спектрометр Agilent 5973N. Углеводороды идентифицировались с использованием библиотечных баз данных масс-спектров NIST 14, а также путем сравнения времен удерживания эталонных соединений в калибровочных смесях — аналитические стандарты Fluka: Alkane standard solution C<sub>8</sub>—C<sub>20</sub>, Alkane standard solution C<sub>21</sub>—C<sub>40</sub>. Более подробное описание методологии отбора проб, пробоподготовки и проведения анализа представлено в [22].

## Результаты измерений и их обсуждение

Сначала остановимся на общем содержании органических *n*-алканов в составе аэрозоля над морскими акваториями. Полученные концентрации в пробах, отобранных над соответствующими морями в слое 200—2000 м, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Суммарная концентрация *n*-алканов над морями российского сектора Арктики

Море	Концентрация, нг/м <sup>3</sup>
Баренцево	11,0
Карское	9,3
Лаптевых	9,7
Восточно-Сибирское	12,6
Чукотское	37,7
Берингово	10,6

Из данных табл. 2 следует, что концентрации *n*-алканов над всеми морями попадают в диапазон 9,3—12,6 нг/м<sup>3</sup>. Исключение составляет Чукотское море, над которым она достигает 37,7 нг/м<sup>3</sup>.

Повышенные концентрации примесей над Арктикой, как правило, связывают с переносом в регион примесей с континента [23–26]. Об этом судят по обратным траекториям. В нашем случае метод траекторий непригоден, так как площадь зондирования охватывает сотни квадратных километров. Результаты же синоптического анализа общего направления переноса воздушной массы в целом указывают, что на территорию Баренцева, Карского и моря Лаптевых воздух поступал с Европейского материка, на территорию Восточно-Сибирского моря — с восточного сектора Ледовитого океана, на территорию Берингова моря — с территории Тихого океана. И только когда зондирование осуществлялось над Чукотским морем, результаты анализа указывали на перенос воздуха из района Аляски. Это хорошо видно из рис. 2 (цв. вкладка), где приведена синоптическая карта для периода зондирования.

Данных измерений в районе Аляски у авторов нет, но опубликованные ранее результаты указывают, что этот регион вполне мог быть источником повышенных концентраций *n*-алканов. Как показано в [27], суммарное количество всех органических компонентов в аэрозоле, образующемся на Американском континенте, может составлять до 2 мкг/м<sup>3</sup>. Содержание же фракции алканов в аэрозоле на Аляске, как уже отмечалось [19], в теплый период может достигать 50 нг/м<sup>3</sup>. Известно, что океан обладает демпфирующим свойством, заключающимся в запаздывании максимума и минимума годового хода температуры воздуха относительно годового хода инсоляции [28]. Исходя из этого можно полагать, что наши измерения были выполнены в теплый период и полученная величина концентрации *n*-алканов близка к фиксируемой на Аляске. Хотя, конечно, это не является прямым подтверждением того факта, что большая концентрация *n*-алканов достигается переносом с Аляски.

Наши многолетние измерения предельных углеводородов над континентом показали, что их суммарная концентрация обычно убывает с высотой по экспоненте [29]. Хотя бывают и отклонения от такой закономерности [30]. Вертикальное распределение *n*-алканов в аэрозоле над арктическими морями приведено на рис. 3 (цв. вкладка). Видно, что в пограничном слое атмосферы концентрация *n*-алканов изменяется в пределах 3–8 нг/м<sup>3</sup>, а в свободной тропосфере — 2–6 нг/м<sup>3</sup>. Исключение вновь составляет Чукотское море, где содержание *n*-алканов в пограничном слое было в три, а в свободной тропосфере — в два раза выше, чем над другими морями. Эти данные сопоставимы с результатами, полученными для этих предельных углеводородов в [19].

Рассматривая характер вертикального распределения *n*-алканов над разными морями Арктики, отмечаем, что над четырьмя морями их концентрация в атмосферном аэрозоле уменьшается с высотой, а над двумя — морем Лаптевых и Беринговым — увеличивается. Такое вертикальное распределение — не единичный случай. Возможность поступления

примесей в Арктику из верхних слоев тропосферы фиксировалось в [16, 17] и теоретически постулируется в [31].

Состав органических соединений, входивших в аэрозольные частицы, приведен на рис. 4 (цв. вкладка). В составе аэрозольных частиц фиксируются *n*-алканы от C<sub>9</sub> до C<sub>27</sub>. Этот диапазон значительно меньше, чем в приземном слое атмосферы Арктики [18, 19] и над континентальными районами [32]. С учетом логарифмической шкалы можно сказать, что основа *n*-алканов, вошедших в состав частиц аэрозоля, состоит из соединений C<sub>10</sub>–C<sub>22</sub>. Более тяжелые соединения фиксируются менее чем в половине случаев измерений над отдельными морями. Концентрация рассматриваемых соединений незначительно меньше в пограничном слое и свободной атмосфере, чем в приземном и приземном слое в западной Арктике [18, 19]. Номенклатура легких соединений C<sub>*n*</sub>H<sub>2*n*+2</sub>, присутствующих в пограничном слое (рис. 4, а) и в свободной тропосфере (рис. 4, б), практически совпадает, хотя по более тяжелым гомологам с *n* > 20 наблюдаются различия, что, вероятно, связано с большей селективностью их источников и разным происхождением воздушных масс в зондируемых слоях.

Несколько иное распределение органических соединений наблюдалось над прибрежными районами (рис. 5, цв. вкладка). В силу особенностей отбора проб рис. 5 следует сравнивать с рис. 4, б только для свободной тропосферы. Измерений в пограничном слое над сушей не было, так как слой 0–2000 м самолет проходит быстро и не удастся накопить достаточное количество вещества для уверенного анализа. Из рис. 5 видно, что над прибрежными районами, особенно западными, в состав частиц заметный вклад вносят тяжелые гомологи C<sub>23</sub>H<sub>48</sub>–C<sub>29</sub>H<sub>60</sub>. Возможно, сказываются различия в характере растительности в этих районах.

Согласно исследованиям [10, 33] наличие соединений C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>–C<sub>14</sub>H<sub>30</sub> в составе частиц можно отнести к естественным биологическим продуктам: газы, спирты, кислоты, выделяемые растительностью. По данным [34, 35], C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>–C<sub>22</sub>H<sub>46</sub> относятся к аэрозолям антропогенного происхождения. Сюда входят: C<sub>19</sub>H<sub>40</sub> — смазочное масло и дизельное топливо, C<sub>21</sub>H<sub>44</sub> и C<sub>22</sub>H<sub>46</sub> — автомобильные выхлопы. У C<sub>23</sub>H<sub>48</sub>–C<sub>29</sub>H<sub>60</sub> в основном естественное биологическое происхождение [36, 37]. Такое деление относительно условно, так как все эти соединения могут присутствовать, например, в составе нефтепродуктов [38, 39]. Деление опирается на преобладающие в каждой моде соединения.

Исходя из такой классификации, на основании данных рис. 4 и 5 можно сделать вывод, что в основном *n*-алканы в аэрозоле над арктическими морями и прибрежными районами имеют биологическое происхождение. Этот вывод можно было бы проверить с помощью коэффициента CPI (carbon preference index), предложенного еще в 1961 г. [36], который рассчитывается по соответствующей формуле, куда входят соединения с C<sub>24</sub>H<sub>50</sub> до C<sub>34</sub>H<sub>70</sub> [40]. Однако, как видно из рис. 4 и 5, таких соединений

в отобранных пробах очень мало или они отсутствуют полностью. Поэтому этот коэффициент для оценки в данном случае применить сложно.

Построенные обратные траектории поступления воздуха в районы измерений в большинстве случаев начинались на континенте, за исключением Восточно-Сибирского моря. Это же показали и синоптические карты для разных высотных уровней. В таком случае содержание *n*-алканов в аэрозоле над побережьем должно быть выше или сравнимо с концентрациями, зафиксированными над морями. Для сравнения построен рис. 6 (цв. вкладка), на котором приведены средние концентрации над побережьем и над морями. Исключено Чукотское море как особый случай. Видно, что почти все прибрежные концентрации больше либо равны морским. Это, на наш взгляд, свидетельствует о том, что органические соединения действительно переносятся в акваторию Арктики с континента.

### Заключение

Проведенное исследование распределения *n*-алканов над морями российского сектора Арктики показало, что их концентрации составляют 9–12 нг/м<sup>3</sup> и сопоставимы с концентрациями *n*-алканов над сопредельными зарубежными секторами.

В составе частиц устойчиво обнаруживаются соединения C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>–C<sub>19</sub>H<sub>40</sub>. Этот диапазон значительно меньше, чем над континентальными районами и сопредельными территориями.

В вертикальном распределении над большинством морей наблюдается нисходящий с высотой тренд содержания *n*-алканов, хотя над двумя морями – Лаптевых и Беринговым – зафиксирован инверсный ход, возможно, обусловленный дальним переносом аэрозоля в вышележащих слоях.

Поступление *n*-алканов в составе аэрозоля в атмосферу Арктики с Евразийского континента подтверждается сопоставлением их концентраций над прибрежными и морскими районами, а также данными синоптического анализа.

Работа выполнена по данным, полученным на УНУ самолет-лаборатории Ту-134 «Оптик», входящего в ЦКП «Атмосфера», и при финансовой поддержки Минобрнауки России (грант № 075-15-2021-934).

1. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2021. Т. 57, № 1. С. 21–35.
2. Richter-Menge J., Druckenmiller M.L. The Arctic // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2020. V. 101, N 8. P. S245–S285. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0086.1.
3. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic climate system and its global influences – overview of GRENE Arctic climate change research project (2011–2016) // Polar Sci. 2020. V. 25. P. 100548.
4. Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15, N 4. P. 045001.

5. Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Overland J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters J., Mermild S., Merd J., Pawlak J., Olsen M.S. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14, N 4. P. 045010.
6. Виноградова А.А., Васильева А.В., Иванова Ю.А. Загрязнение воздуха черным углеродом в районе о-ва Врангеля: сравнение источников и вкладов территорий Евразии и Северной Америки // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 12. С. 907–912; Vinogradova A.A., Vasileva A.V., Ivanova Yu.A. Air pollution by black carbon in the region of Wrangel Island: Comparison of Eurasian and American sources and their contributions // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 2. P. 97–103.
7. Witze A. Why Arctic fires are bad news for climate change // Nature. 2020. V. 585, N 7825. P. 336–337.
8. Sharma S., Barrie L.A., Magnusson E., Brattström G., Leaitch W.R., Steffen A., Landsberger S. A factor and trends analysis of multidecadal lower tropospheric observations of arctic aerosol composition, black carbon, ozone, and mercury at Alert, Canada // J. Geophys. Res.: Atmos. 2019. V. 124, N 24. P. 14133–14161.
9. Willis M.D., Leaitch W.R., Abbatt J.P. Processes controlling the composition and abundance of Arctic aerosol // Rev. Geophys. 2018. V. 56, N 4. P. 621–671.
10. Chen X., Millet D.B., Singh H.B., Wisthaler A., Apel E.C., Atlas E.L., Blake D.R., Bourgeois I., Brown S.S., Crouse J.D., de Gouw J.A., Flocke F.M., Fried A., Heikes B.G., Hornbrook R.S., Mikoviny T., Min K.-E., Müller M., Neuman J.A., O’Sullivan D.W., Peischl J., Pfister G.G., Richter D., Roberts J.M., Ryerson T.B., Shertz S.R., Thompson C.R., Treadaway V., Veres P.R., Walega J., Warneke C., Washenfelder R.A., Weibring P., Yuan B. On the sources and sinks of atmospheric VOCs: An integrated analysis of recent aircraft campaigns over North America // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 14. P. 9097–9123.
11. Pernov J.B., Bossi R., Lebourgeois T., Nøjgaard J.K., Holzinger R., Hjorth J.L., Skov H. Atmospheric VOC measurements at a High Arctic site: Characteristics and source apportionment // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21, N 4. P. 2895–2916.
12. Siegel K., Karlsson L., Zieger P., Baccarini A., Schmale J., Lawler M., Salter M., Leck C., Ekman A.M.L., Riiipinen I., Mohr C. Insights into the molecular composition of semivolatile aerosols in the summertime central Arctic Ocean using FIGAERO-CIMS // Environ. Sci.: Atmos. 2021. DOI: 10.1039/D0EA00023J.
13. Barret T.E., Sheesley R.J. Year-round optical properties and source characterization of Arctic organic carbon aerosols on the North Slope Alaska // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122, N 17. P. 9319–9331.
14. Haque M.M., Kawamura K., Deshmukh D.K., Kunwar B., Kim Y. Biomass burning is an important source of organic aerosols in Interior Alaska // J. Geophys. Res.: Atmos. 2021. V. 126, N 12. P. e2021JD034586.
15. Zawadowicz M.A., Suski K., Liu J., Pekour M., Fast J., Mei F., Sedlacek A.J., Springston S., Wang Y., Zaveri R.A., Wood R., Wang J., Shilling J.E. Aircraft measurements of aerosol and trace gas chemistry in the eastern North Atlantic // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21, N 10. P. 7983–8002.
16. Willis M.D., Bozem H., Kunkel D., Lee A.K.Y., Schulz H., Burkart J., Aliabadi A.A., Herber A.B., Leaitch W.R., Abbatt J.P.D. Aircraft-based measurements of High Arctic springtime aerosol show evidence for vertically varying sources, transport and composition // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 1. P. 57–76.

17. Hodzic A., Campuzano-Jost P., Bian H., Chin M., Colarco P.R., Day D.A., Froyd K.D., Heinold B., Jo D.S., Katich J.M., Kodros J.K., Nault B.A., Pierce J.R., Ray E., Schacht J., Schill G.P., Schroder J.C., Schwarz J.P., Sueper D.T., Tegen I., Tilmes S., Tsigaridis K., Yu P., Jimenez J.L. Characterization of organic aerosol across the global remote troposphere: A comparison of ATom measurements and global chemistry models // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20, N 8. P. 4607–4635.
18. Fu P.Q., Kawamura K., Chen J., Charriere B., Semper R. Organic molecular composition of marine aerosols over the Arctic Ocean in summer: Contributions of primary emission and secondary aerosol formation // *Biogeosciences*. 2013. V. 10, N 2. P. 653–667.
19. Boreddy S.K.R., Md. Haquea M.M., Kawamura K., Fua P., Kim Y. Homologous series of *n*-alkanes (C<sub>19</sub>–C<sub>35</sub>), fatty acids (C<sub>12</sub>–C<sub>32</sub>) and *n*-alcohols (C<sub>8</sub>–C<sub>30</sub>) in atmospheric aerosols from central Alaska: Molecular distributions, seasonality and source indices // *Atmos. Environ.* 2018. V. 184. P. 87–97.
20. Verma S.K., Kawamura K., Deshmukh D.K., Haque M.M., Pavuluri C.M. Seasonal characteristics of biogenic secondary organic aerosols over Chichijima Island in the western North Pacific: Impact of biomass burning activity in East Asia // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126, N 12. P. e2020JD032987.
21. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсуков В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Синецкин Д.С., Толмачев Г.Н., Филитов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
22. Воронцовская Н.Г., Певнева Г.С., Головки А.К., Козлов А.С., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. Углеводородный состав тропосферного аэрозоля юга Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 6. С. 496–505; Vorontsovskaya N.G., Pevneva G.S., Golovko A.K., Kozlov A.S., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N. Hydrocarbon composition of tropospheric aerosol in the south of Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 4. P. 547–557.
23. Arnold S.R., Law K.S., Brock C.A., Thomas J.L., Starkweather S.M., Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M.T., Flanner M.G., Petaja T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J.E., Melamed M., Johnson N., Fieder M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S.A., Broome J., Bozem H. Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade // *Elementa: Sci. Atmos.* 2016. N 4. 16 p.
24. Law K.S., Stohl A. Arctic air pollution: Origins and impacts // *Science*. 2007. V. 315, N 5818. P. 1537–1540.
25. Law K.S., Stohl A., Quinn P.K., Brock C.A., Burkhardt J.F., Paris J.D., Ancellet G., Singh B., Roiger A., Schlager H. Arctic air pollution // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2014. V. 95, N 12. P. 1873–1895.
26. Roiger A., Thomas J.-L., Schlager H., Law K.S., Kim J., Schafner A., Weinzierl B., Dahlkötter F., Krisch I., Marelle L., Minikin A., Raut J.-C., Reiter A., Rose M., Scheibe M., Stock P., Baumann R., Clerbaux C., George M., Onishi T., Flemming J. Quantifying emerging local anthropogenic emissions in the Arctic region // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96, N 3. P. 441–460.
27. Schroder J.C., Campuzano-Jost P., Day D.A., Shah V., Larson K., Sommers J.M., Sullivan A.P., Campos T., Reeves J.M., Hills A., Hornbrook R.S., Blake N.J., Scheuer E., Guo H., Fibiger D.L., McDuffie E.E., Hayes P.L., Weber R.J., Dibb J.E., Apel E.C., Jaeglé L., Brown S.S., Thornton J.A., Jimenez J.L. Sources and secondary production of organic aerosols in the northeastern United States during winter // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123, N 14. P. 7771–7796.
28. Шерстюков Б.Г. Инерционность изменений температуры в приповерхностном слое // *Метеорол. и гидрол.* 201. № 4. С. 5–16.
29. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 2. Вертикальное распределение // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 9. С. 733–739.
30. Аршинов М.Ю., Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Куйбида Л.В., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Аномальное вертикальное распределение органического аэрозоля над югом Западной Сибири в сентябре 2018 г. Аномальное вертикальное распределение органического аэрозоля над югом Западной Сибири в сентябре 2018 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2020. Т. 33, № 10. С. 791–797; Arshinov M.Yu., Arshinova V.G., Belan B.D., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.S., Kuibida L.V., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Anomalous vertical distribution of organic aerosol over the South of Western Siberia in september 2018 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 5. P. 495–502.
31. Zheng C., Wu Y., Ting M., Orbe C., Wang X., Tilmes S. Summertime transport pathways from different northern hemisphere regions into the Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126, N 4. P. e2020JD033811.
32. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 1. Географические особенности и временная динамика // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 8. С. 716–722.
33. Alwe H.D., Millet D.B., Chen X., Raff J.D., Payne Z.C., Fledderman K. Oxidation of volatile organic compounds as the major source of formic acid in a mixed forest canopy // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46, N 5. P. 2940–2948.
34. Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T. Sources of fine organic aerosol. 5. Natural gas home appliances // *Environ. Sci. Technol.* 1993. V. 27, N 13. P. 2736–2744.
35. Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T. Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks // *Environ. Sci. Technol.* 1993. V. 27, N 4. P. 636–651.
36. Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T. Interpretation of high-resolution gas chromatography and high-resolution gas chromatography/mass spectrometry data acquired from atmospheric organic aerosol samples // *Aerosol Sci. Technol.* 1989. V. 10. P. 408–420.
37. Rogge W.F., Hildemann L.M., Mazurek M.A., Cass G.R., Simoneit B.R.T. Sources of fine organic aerosol. 4. Particulate abrasion products from leaf surfaces of urban plants // *Environ. Sci. Technol.* 1993. V. 27, N 13. P. 2700–2711.

38. *Исидоров В.А.* Органическая химия атмосферы. СПб.: Химия, 2001. 352 с.
39. *Bray E.E., Evans E.D.* Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1961. V. 22. P. 2–15.
40. *Herrera-Herrera A.V., Leierer L., Jambrina-Enriquez M., Connolly R., Mallol C.* Evaluating different methods for calculating the Carbon Preference Index (CPI): Implications for palaeoecological and archaeological research // *Org. Geochem.* 2020. V. 146. P. 104056.

*V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, A.S. Kozlov, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev.* **Vertical distribution of *n*-alkanes in atmospheric aerosol in the Russian Arctic in September 2020.**

A combined experiment aimed at the study of the air composition over all the seas of the Russian Arctic was carried out in September 2020 with the Optik Tu-134 flying laboratory. The experiment included sampling the atmospheric aerosol in a layer of 200 to 9000 m above the sea level and determining the concentration of saturated hydrocarbons (*n*-alkanes) in aerosol particles. Saturated hydrocarbon compounds C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>–C<sub>27</sub>H<sub>56</sub> were detected. The main mass of this class of organic compounds is concentrated in the narrower range C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>–C<sub>20</sub>H<sub>42</sub>. The concentrations of *n*-alkanes in aerosol over all the seas were low (9.3–12.6 ng/m<sup>3</sup>). The only exception was the Chukchi Sea, over which the concentrations reached 37.7 ng/m<sup>3</sup>.

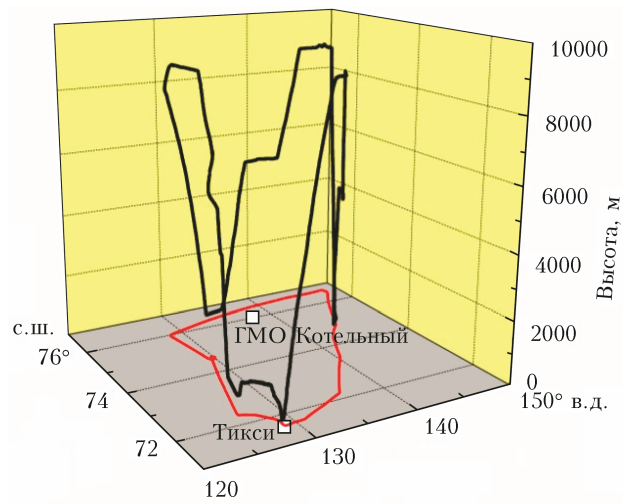


Рис. 1. Схема выполнения полета при зондировании атмосферы над морем Лаптевых

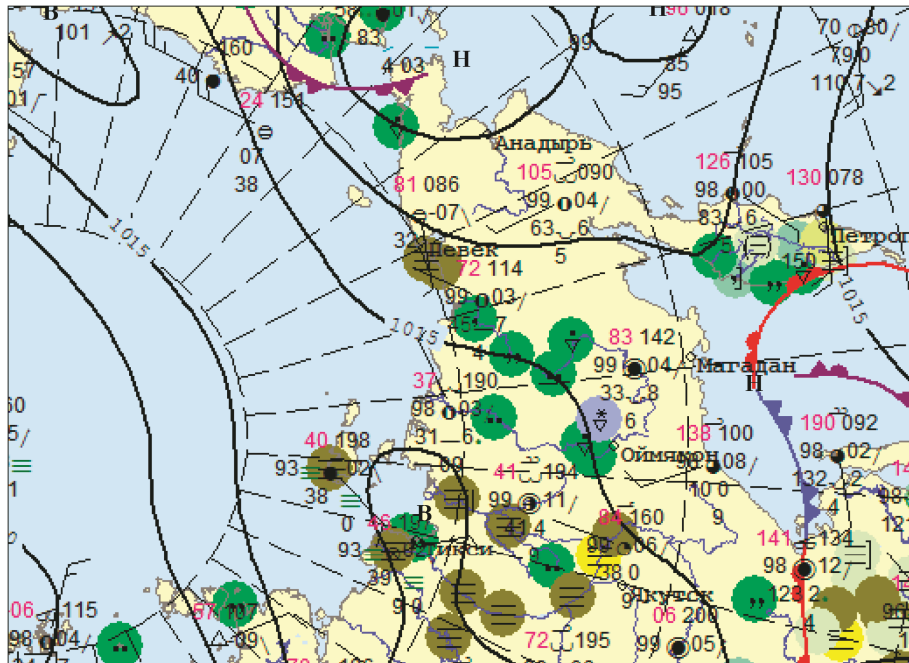


Рис. 2. Синоптическая карта погоды 16.09.2020 г., 00:00 UTC, в районе измерений



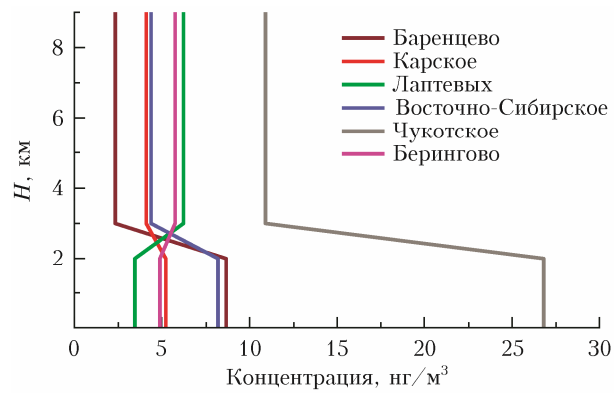


Рис. 3. Вертикальное распределение *n*-алканов в аэрозоле над арктическими морями

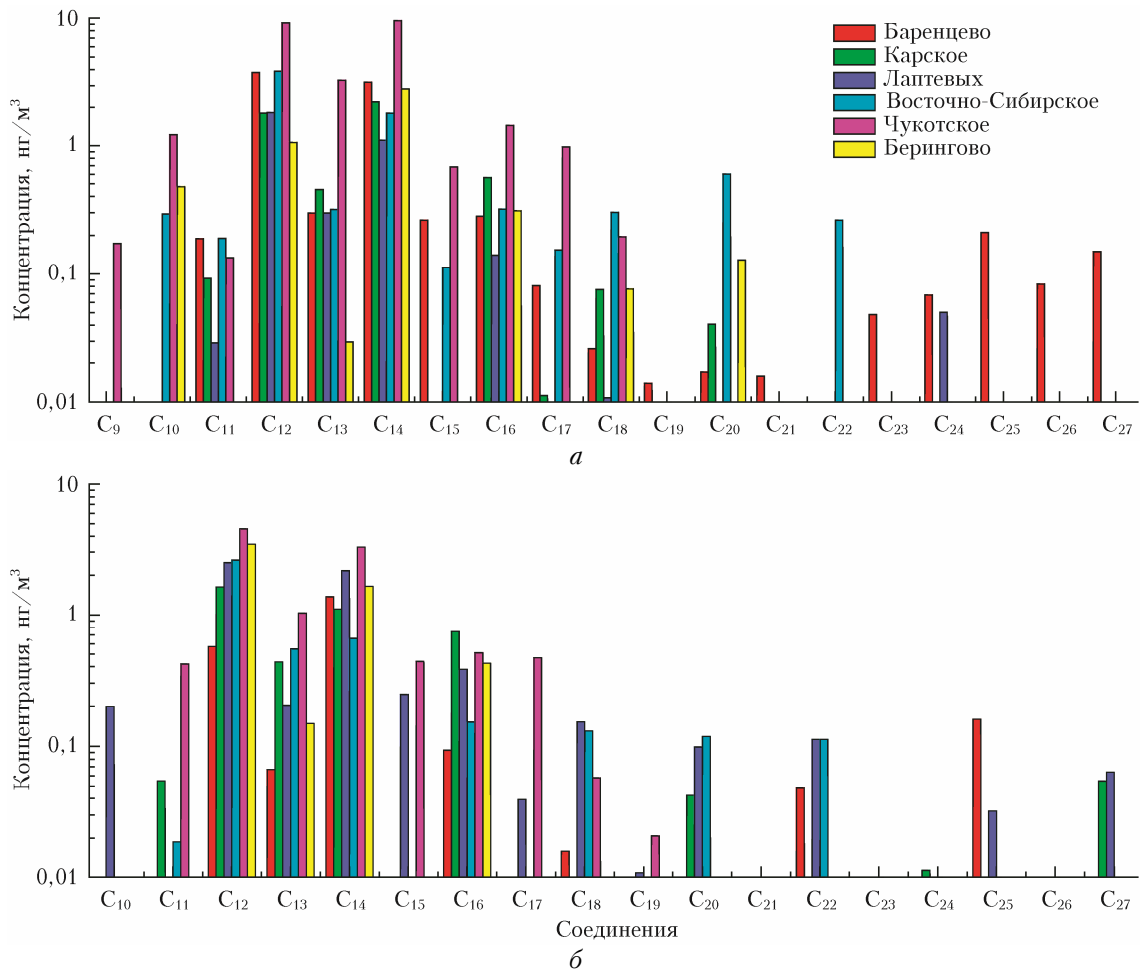


Рис. 4. Состав *n*-алканов в аэрозоле над арктическими морями в слое: *а* – 0,2–2,0; *б* – 3,0–9,0 км. Шкала логарифмическая

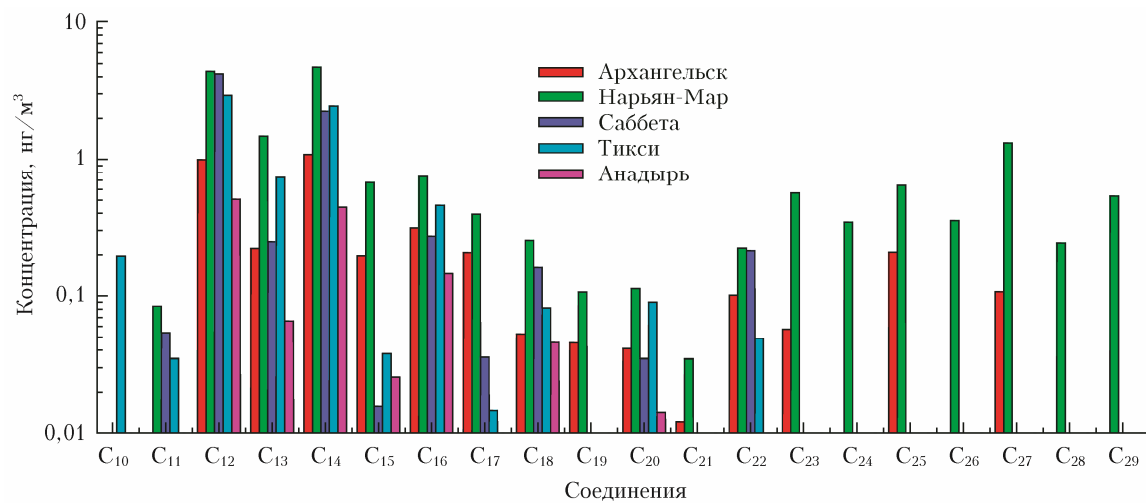


Рис. 5. Состав *n*-алканов в аэрозоле над прибрежными арктическими районами в слое 3,0–9,0 км

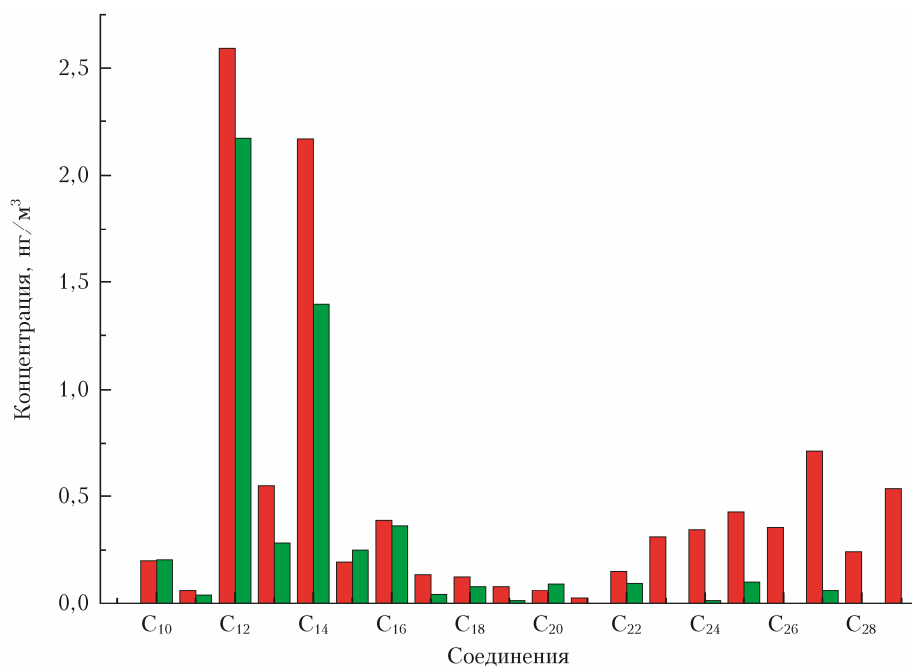


Рис. 6. Концентрация *n*-алканов в аэрозоле над побережьем (по шести пробам) (красные столбики) и арктическими морями (по пяти пробам) (зеленые столбики)