

УДК 551.510.4

## КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕТАНА И ЗНАЧЕНИЯ $\delta^{13}\text{C}$ В МЕТАНЕ НАД АРКТИЧЕСКИМИ МОРЯМИ ЛЕТОМ И ОСЕНЬЮ 2020 г.

© 2022 г. Н. В. Панкратова<sup>1, \*</sup>, И. Б. Беликов<sup>1</sup>, А. И. Скороход<sup>1</sup>, В. А. Белоусов<sup>1</sup>,  
В. О. Муравья<sup>2, 3</sup>, М. В. Флинт<sup>2</sup>, Е. В. Березина<sup>1</sup>, А. Н. Новигатский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Московская область, Россия

\*e-mail: pankratova@ifaran.ru

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

После доработки 13.04.2022 г.

Принята к публикации 28.04.2022 г.

Работа посвящена оценке содержания метана в приводном слое атмосферы арктических морей и выявлению источников его эмиссий. Непрерывные измерения концентрации метана в приводной атмосфере и его изотопной сигнатуры  $\delta^{13}\text{C}$  проведены во время двух экспедиций на НИС “Академик Мстислав Келдыш” летом и осенью 2020 г. Минимальные значения концентрации метана, в среднем  $1.937 \pm 0.010$  ppb, отмечены в Северном и Норвежском морях, максимальные – над акваторией Карского (в среднем  $1.998 \pm 0.030$  ppb, до  $2.000$ – $2.040$  ppb в максимумах) и Белого (в среднем  $2.006 \pm 0.030$  ppb) морей. Средние значения величины  $\delta^{13}\text{C}$  в исследованном районе были близки к характерным для Северного полушария –  $-47.5\%$ . Региональные изменения  $\delta^{13}\text{C}$  позволили оценить источники  $\text{CH}_4$  и показать, что влияние на содержание метана в приводной атмосфере оказывает, главным образом, направление переноса воздушных масс.

**Ключевые слова:** Арктика, метан, судовые измерения, воздушные массы, траекторный анализ

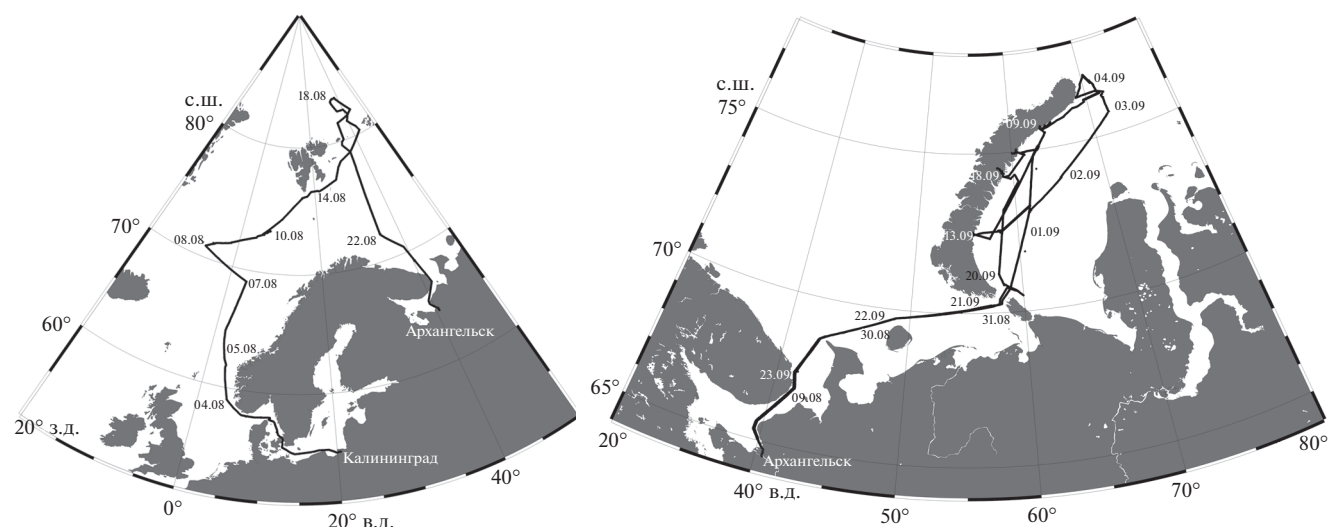
DOI: 10.31857/S0030157422060107

### ВВЕДЕНИЕ

В Арктическом регионе сосредоточены значительные запасы метана, однако их количественная оценка и скорости эмиссий плохо изучены и имеют значительные неопределенности. Так, например, выбросы метана с морской поверхности в высоких широтах по различным оценкам могут отличаться на порядок: от 4 до 25 Tg $\text{CH}_4$ /год [10, 17–20, 25]. Источниками метана в водной толще могут быть газовые сочтения на дне (термогенный или ископаемый метан), его генерация в донных осадках и водной толще, латеральный перенос с речным стоком. Информацию для определения источников метана может дать анализ данных прямых измерений изотопного состава углерода метана [3, 6, 11]. Изотопно-облегченный  $\text{CH}_4$  является в основном продуктом биологической генерации, при этом величина  $\delta^{13}\text{C}$  заметно варьирует в зависимости от степени окисления, в частности, в ходе переноса в почве или воде. Изотопно-утяжеленный  $\text{CH}_4$  поступает, как правило, из пирогенных и термогенных источников, таких

как сжигание биомассы и угольные шахты. Однако даже при тщательном измерении метана из конкретного источника имеются значительные неопределенности, которые связаны, например, с температурой, влажностью почвы, географическим положением места, сезоном. Для болот Финляндии в зависимости от сезона значение  $\delta^{13}\text{C}$  может варьировать от  $-60$  до  $-78\%$ , при наибольшей повторяемости значений от  $-68$  до  $-74\%$  [5]. Метану, поступающему в атмосферу за счет разложения газовых гидратов, соответствует в среднем  $\delta^{13}\text{C}$   $-55\%$  [7], от пожаров –  $-26\%$  [4], от утечек газа из месторождений и газопроводов –  $-42\%$  [8, 16, 21]. При этом выделить вклад определенных источников в генерацию метана вдали от них только по изотопной метке не всегда представляется возможным ввиду сложности измерений и значительному перемешиванию воздуха по мере удаления от источников [1, 2, 13], в результате чего значения изотопной сигнатуры меняется в сторону средних значений  $47.5\%$ .

Для более точного анализа изотопного состава углерода в  $\text{CH}_4$  необходимо привлечение метода



**Рис. 1.** Маршруты экспедиций АМК-80 (слева) и АМК-81 (справа); даты прохождения точек маршрутов указаны в формате день.месяц.

Килинга (Keeling plot) [9, 14]. Использование метода Килинга дает максимальный эффект в случае больших вариаций концентрации метана. Сложность определения источников при судовых измерениях в приводном слое атмосферы состоит в том, что воздушный поток неоднороден и, проходя над различными районами, накапливает метан от нескольких источников.

Дополнительную информацию о происхождении воздушных масс в районах измерений и о региональных вариациях концентрации метана в атмосфере может дать анализ обратных траекторий. С их помощью можно выделить пространственную неоднородность распределения концентрации метана в нижних слоях атмосферы, выделить районы с максимальным и минимальным вкладом разных источников в наблюдаемые значения концентрации  $\text{CH}_4$ .

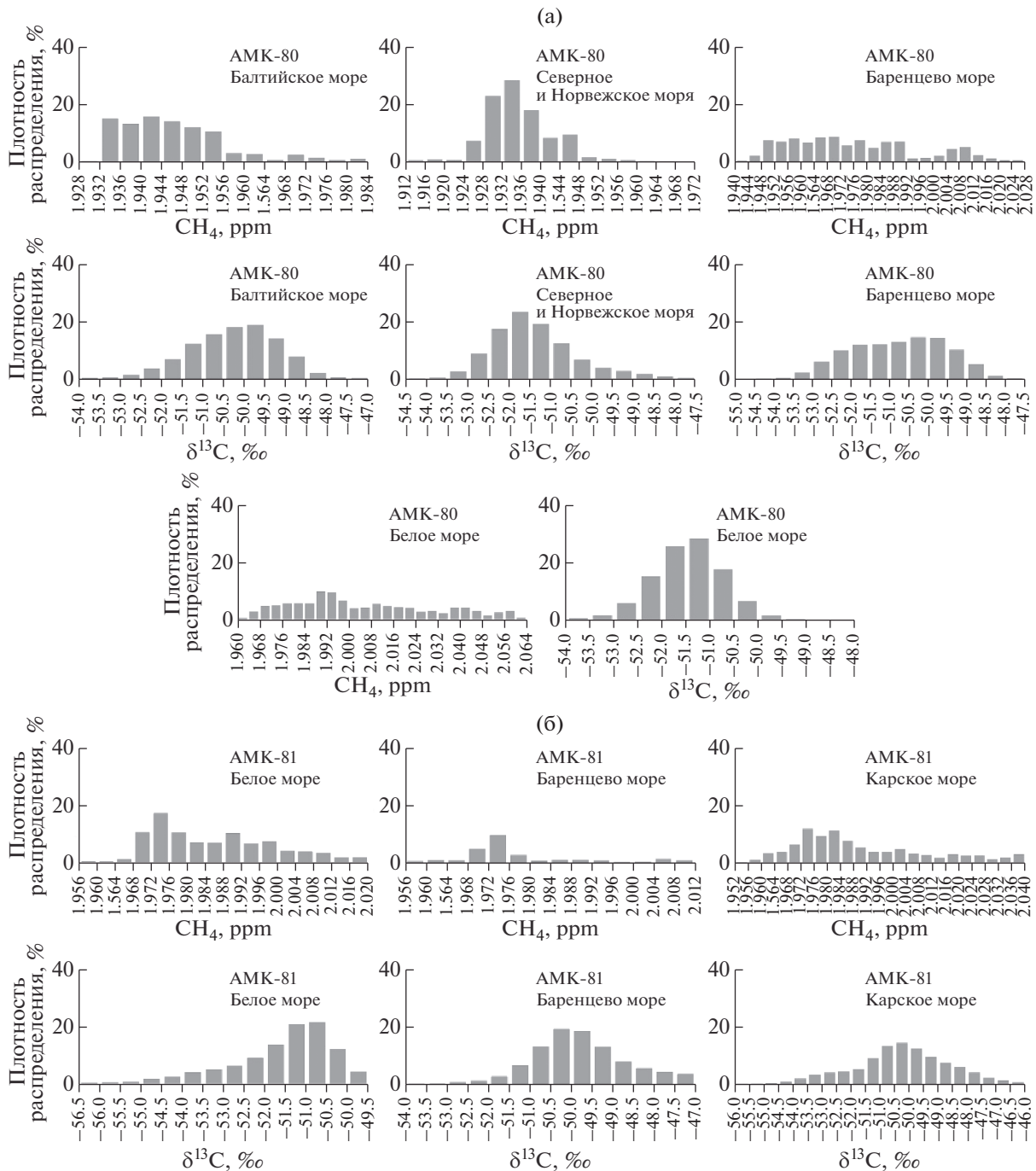
В данной работе представлены результаты судовых измерений концентрации метана и его изотопной сигнатуры, выполненных в морской Арктике в 2020 г. Все экспедиции были проведены в период, когда моря были свободны ото льда, и согласно [12, 25], эмиссии в системе океан–атмосфера были незначительными. Это позволяет считать основным фактором изменчивости концентрации метана над морской поверхностью в период наблюдений адвекцию воздушных масс. Результаты работы представляют интерес не только, собственно, для оценки региональных значений концентрации  $\text{CH}_4$  в атмосфере Арктики, но и для анализа регионального переноса воздушных масс и его влияния на динамику концентрации метана в арктическом воздухе.

## ИЗМЕРЕНИЯ

В периоды с 31 июля по 25 августа и с 27 августа по 23 сентября 2020 г. на борту НИС “Академик Мстислав Келдыш” (соответственно, рейсы АМК-80 и АМК-81) были проведены непрерывные измерения концентраций метана и значения  $\delta^{13}\text{C}$  в метане в приводном воздухе. Маршрут рейса АМК-80 пролегал от порта Калининград через Балтийское море и Датские проливы в Северное и Норвежское моря, затем в Баренцево море до  $83^\circ$  с.ш., и далее через Белое море в порт Архангельск. Маршрут рейса АМК-81 прошел от порта Архангельск через Белое и Баренцево моря в Карское море, где наблюдения выполнены в районах желоба Святой Анны и архипелага Новая Земля. Схемы маршрутов рейсов показаны на рис. 1.

Для проведения измерений был использован специализированный измерительный комплекс на основе анализатора изотопного состава метана (далее – комплекс) типа G2132-i производства компании Picarro Inc. (США). Комплекс и проведение его периодических калибровок непосредственно до и после морских экспедиций подробно описаны в [1, 2, 13]. В рейсе АМК-80 комплекс был размещен в помещении метеорологической лаборатории судна, а в рейсе АМК-81 – в помещении лоцманской. Забор воздуха проводился по борту судна на высоте 18.5 м над уровнем моря. Воздух подавался в прибор трубопроводом длиной 10 м при расходе воздуха 1.5 л/мин.

В результате наблюдений были сформированы практически непрерывные ряды данных о концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}$  с временным разрешением



**Рис. 2.** Распределение концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}$  для различных морей по данным экспедиций АМК-80 (а) и АМК-81 (б) (использованы данные с минутным осреднением).

в 1 минуту продолжительностью 26 сут в 80-АМК и 28 сут в 81-АМК.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа данных наблюдений были выделены участки по отдельным морям: Балтийскому, Северному и Норвежскому, Белому, Баренцеву и

Карскому. Для этих участков вычислены статистические характеристики по концентрации метана и  $\delta^{13}\text{C}$  (табл. 1), построены функции распределения содержания  $\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}$  (рис. 2а, 2б).

Полученный набор данных позволяет выделить некоторые закономерности пространственной и временной изменчивости концентрации

**Таблица 1.** Статистические характеристики минутных рядов измерений  $\delta^{13}\text{C}$  и концентрации  $\text{CH}_4$  в приводной атмосфере для экспедиций АМК-80 и АМК-81

Регион (даты)	min	max	min	max	Среднее $\pm$ ст. отклонение	
	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰		$\text{CH}_4$ , ppm		$\delta^{13}\text{C}$ , ‰	$\text{CH}_4$ , ppm
Рейс АМК-80						
Порт Калининград (28.07–31.07)	–57.5	–46.3	1.967	4.728	$-50.8 \pm 1.3$	$2.058 \pm 0.090$
Балтийское море (31.07–02.08)	–53.9	–47.4	1.932	2.018	$-50.3 \pm 1$	$1.949 \pm 0.010$
Северное, Норвежское моря (02.08–13.08)	–54.5	–47.1	1.913	2.110	$-51.4 \pm 1$	$1.937 \pm 0.010$
Баренцево море и СЛО* (13.08–23.08)	–54.5	–47.2	1.943	2.166	$-50.8 \pm 1.2$	$1.980 \pm 0.030$
Белое море (24.08–25.08)	–54.0	–49.4	1.964	2.082	$-51.5 \pm 0.7$	$2.006 \pm 0.030$
Порт Архангельск (25.08)	–52.4	–49.9	1.972	2.005	$-51.3 \pm 0.6$	$1.984 \pm 0.010$
Рейс АМК-81						
Порт Архангельск (26.08–28.08 и 23.09)	–54.0	–48.6	1.979	2.631	$-51.2 \pm 1$	$2.065 \pm 0.090$
Белое море (27.08–29.08 и 22.09–23.09)	–56.1	–48.3	1.958	2.170	$-51.5 \pm 1.1$	$1.989 \pm 0.020$
Баренцево море (29.08–31.08 и 20.09–22.09)	–53.6	–44.5	1.958	2.130	$-49.6 \pm 1.3$	$1.987 \pm 0.020$
Карское море (31.08–20.09)	–55.9	–44.1	1.955	2.216	$-50.3 \pm 1.7$	$1.998 \pm 0.030$

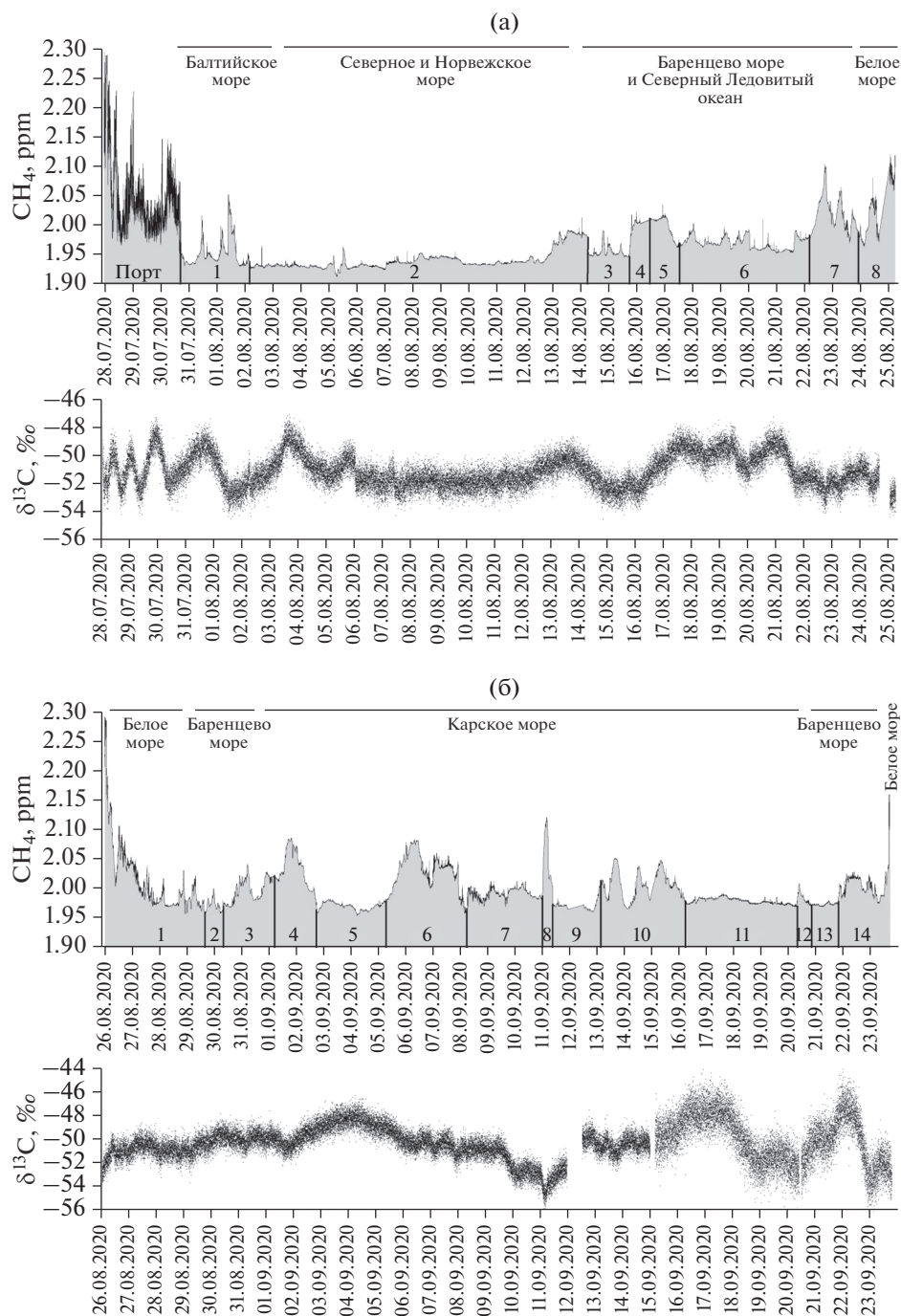
\* СЛО – Северный Ледовитый океан.

метана в нижнем слое атмосферы. В рейсе АМК-80 минимальные значения концентрации метана отмечались в Северном и Норвежском морях. На некоторых участках маршрута она понижалась до 1.913 ppm, среднее значение зафиксировано на уровне  $1.937 \pm 0.010$  ppm (табл. 1); распределение концентрации метана близко к нормальному (рис. 2а). Также пониженные значения концентрации метана в приводном воздухе наблюдались над Балтийским морем ( $1.949 \pm 0.010$  ppm). Значения  $\delta^{13}\text{C}$  от Балтики до Норвежского моря варьировало в среднем от  $-51.5$  до  $-50.3$ ‰, максимальные значения находились в диапазоне от  $-47.4$  до  $-47.1$ ‰, а минимальные – от  $-54.5$  до  $-53.9$ ‰.

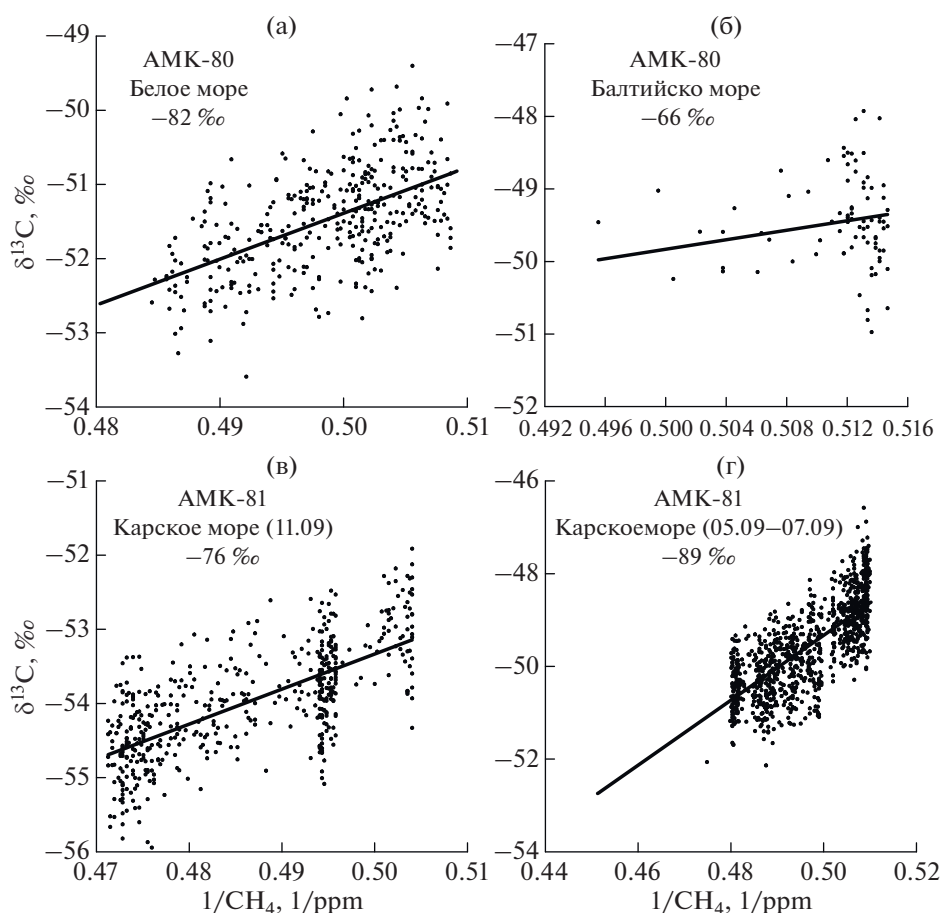
По мере продвижения научного судна в восточном направлении содержание метана в атмосфере увеличивалось, начинали доминировать природные источники  $\text{CH}_4$ , основными из которых, вероятнее всего, являются водно-болотистые угодья [18], эмиссии от которых в период наблюдений наиболее интенсивны [23]. При этом значения концентрации метана имели бимодальное распределение, что связано со сменой направления переноса воздушных масс (рис. 2а). Максимальные концентрации  $\text{CH}_4$  в атмосфере в

рейсе АМК-80, исключая территорию портов – среднее значение достигало 2.006 ppm, отмечались над Белым морем, где сочетаются эмиссии от болот и от антропогенных источников.  $\delta^{13}\text{C}$  в этом регионе также менялась в сторону более легких значений и находилась в диапазоне от  $-54.0$  до  $-49.4$ ‰.

В период проведения рейса АМК-81 наиболее низкие средние значения концентрации метана отмечались в Белом и Баренцевом морях (среднее  $1.987$ – $1.989$  ppm, минимум  $1.958$  ppm) (табл. 1, рис. 2б). При этом в Белом море и значения изотопной сигнатуры оказались более низкими, чем в восточных районах и варьировали в пределах от  $-56.1$  до  $-48.3$ ‰. Подобная изменчивость  $\delta^{13}\text{C}$  в этот период может говорить о постепенной смене с запада на восток доли в атмосфере метана от различных источников. Самые продолжительные измерения в рейсе АМК-81 проведены в Карском море, на востоке от архипелага Новая Земля, где в ходе экспедиционных работ судно часто находилось в дрейфе. Средняя концентрация метана в приводном слое атмосферы этого района была на уровне  $1.998 \pm 0.030$  ppm, при этом довольно высокой оказалась и доля повышенных значений концентрации  $\text{CH}_4$  – от 2.000 до 2.040 ppm (рис. 2б).



**Рис. 3.** Концентрации  $\text{CH}_4$  и значения  $\delta^{13}\text{C}$  для рейсов АМК-80 (а) и АМК-81 (б) (использованы данные с минутным осреднением). Сверху указаны районы нахождения судна, цифрами обозначены направления выноса воздушных масс. АМК-80 (а): 1 – со Скандинавии, 2 – из районов Северной Атлантики (без пересечения материковых районов), 3 – с севера, северо-востока (из районов СЛО), 4 – с запада, юго-запада и с Северной Атлантики, 5 – со Скандинавии и севера Европейской территории России (ЕТР), 6 – с Баренцева моря и северной Атлантики, 7 – с северной Скандинавии, Карелии, северо-запада ЕТР, 8 – с Северной Атлантики и юга Скандинавии; АМК-81 (б): 1 – с Северной Атлантики, севера Скандинавии, Кольского полуострова, 2 – с Северной Атлантики с пересечением северо-востока ЕТР, 3 – с Северной Атлантики с пересечением северо-запада Сибири, 4 – с востока с пересечением севера Сибири и районов моря Лаптева, 5 – с Северной Атлантики, Баренцева моря, 6 – с юго-запада через Скандинавию и Северную Атлантику, 7 – с Баренцева моря, СЛО, 8 – с юга ЕТР, 9 – с севера Скандинавии и Северной Атлантики, 10 – с севера ЕТР, северо-запада Сибири, 11 – СЛО, 12 – с северо-запада Сибири (через районы добычи и транспортировки природного газа), 13 – с Карского и Баренцева морей и СЛО, 14 – с запада с пересечением Скандинавии.



**Рис. 4.** Анализ по методу Килинга (Keeling plot) для участков маршрутов АМК-80 и АМК-81. В подписях к каждому графику указаны номер рейса, район, где проведены измерения (для (в) и (г) в скобках указаны даты) и значение коэффициента В линейной интерполяции.

В портах Архангельск и Калининград, где сосредоточено множество антропогенных источников, отмечались самые высокие концентрации метана в атмосфере (табл. 1). Максимум при разовом значении до 4.728 ppm зафиксирован в п. Калининград. Однако ввиду значительного влияния сильных локальных источников метана в портах в настоящей работе эти данные детально не анализировались.

#### *Анализ обратных траекторий*

Для всех экспедиций проанализированы обратные пятисуточные траектории воздушных потоков, построенные на базе лагранжевой модели NOAA Nysplit [15, 22]. Для построения траекторий использованы метеополя GDAS  $1 \times 1$  град., траектории рассчитаны с шагом 6 часов для сроков 00, 06, 12 и 18 UTC с конечной точкой 500 м. н.у.м. На рис. 3 представлены ряды концентрации метана и  $\delta^{13}\text{C}$  с генерализованным направлением переноса и районом нахождения НИС.

Экспедиция АМК-80 была проведена в конце июля—начале августа, в период сезонного минимума содержания метана в приводном воздухе. Согласно анализу обратных траекторий, пониженному содержанию метана соответствует вынос воздушных масс с юго-запада со стороны Северной Атлантики. В этот период концентрация  $\text{CH}_4$  доходила до 1.913 ppm. Пониженным значениям содержания метана также соответствует вынос с запада и с северо-запада, в условиях, что поток не пересекал Скандинавский полуостров. Так, во время движения судна через Северное и Норвежское моря происходил заток в район воздуха с юга и запада, отмечалась адвекция с севера, при этом воздушный поток не пересекал материк. В результате в среднем значение концентрации метана составляло 1.937 ppm, а в некоторых случаях понижалось до 1.913–1.920 ppm. При пересечении воздушным потоком Скандинавии концентрация метана в среднем возрастала до  $\sim 1.970$  ppm, что может быть связано с активной эмиссией  $\text{CH}_4$

с заболоченных районов. Максимальное среднее значение концентрации метана ( $2.006 \pm 0.030$  ppm) отмечается в Белом море при адвекции воздушных масс с юга ЕТР. Для сравнения, уже через несколько дней при смене направления воздушного потока на западное (адвекция из Скандинавии и Кольского полуострова) во время экспедиции АМК-81 в Белом море среднее значение концентрации  $\text{CH}_4$  в атмосфере понизилось до 1.989 ppm. В целом же во время экспедиции АМК-81 отмечаются те же закономерности, что и в предыдущем рейсе. Минимум содержания метана был отмечен при выносе воздушных масс с запада и севера, как правило, без пересечения воздушным потоком материковых районов. В этот период в Карском море концентрация метана понижалась до 1.955 ppm – минимум для всего периода экспедиции АМК-81. В Баренцевом море при выносе воздуха с Северной Атлантики минимум метана соответствовал 1.958 ppm. Повышенные значения содержания  $\text{CH}_4$  отмечались при восточном воздушном переносе и адвекции с юга ЕТР, когда концентрация метана нередко превышала 2 ppm (11 сентября 2020 г.).

#### *Определение источников метана*

По всей вероятности, судно на маршрутах обеих экспедиций находилось вдали от источников метана, в результате определенная  $\delta^{13}\text{C}$  была близка к средним значениям для Северного полушария –  $-47.5\%$  [23]. На рис. 4 показаны примеры графиков Килинга (Keeling plot), построенные для различных участков маршрутов АМК-80 и АМК-81.

На рис. 4а, 4г значения  $\delta^{13}\text{C}$  понижены и находятся за пределами, характерными для водно-болотистых угодий. Такая картина характерна в большинстве случаев при проведении судовых измерений в арктических морях. На рис. 4б представлен график для Балтийского моря. Согласно результатам траекторного анализа, в период измерений происходил заток воздуха со Скандинавии. Значение  $\delta^{13}\text{C}$  соответствовало  $-66\%$ , что характерно для эмиссии метана из болот. На рис. 4в сигнатура  $\delta^{13}\text{C}$  соответствует  $-76\%$ , что укладывается в границы, характерные для водно-болотистых угодий, хотя и здесь, как в случае с графиками, представленными на рис. 4а, 4г, она смещена в сторону более легких значений.

Эмиссии метана с поверхности океана при анализе данных экспедиций 2020 г. не проявились, что, по всей видимости, связано с тем, что исследования проводились в период формирования жесткого пикноклина, который блокировал

вертикальные потоки  $\text{CH}_4$  в водной толще и, соответственно, его потоки на границе океан–атмосфера. Также не было зарегистрировано четких проявлений антропогенных эмиссий метана вне зоны влияния портов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных измерений концентрации метана и  $\delta^{13}\text{C}$  в атмосфере арктических морей летом и в начале осени 2020 г. показали, что влияние на содержание  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы оказывало, главным образом, направление переноса воздушных масс. Минимальное содержание метана в приземном воздухе наблюдалось в южных и западных районах – над Балтийским, Северным и Норвежским морями. Подобный результат согласуется с результатами морской экспедиции, приведенными в [24], где минимум также зафиксирован в западных морях Арктики. Максимум концентрации метана в приземном слое атмосферы наблюдается при адвекции воздушных масс с востока из районов севера Сибири и акватории моря Лаптевых.

Анализ значений  $\delta^{13}\text{C}$  в исследованных районах позволяет говорить об источнике смешанного типа. При этом над Балтикой, когда отмечалась адвекция со Скандинавии, анализ по методу Килинга четко показал наличие эмиссий из болот. Также характерные для эмиссий с водно-болотистых районов значения  $\delta^{13}\text{C}$  отмечены в экспедиции АМК-81 при движении судна по некоторым участкам Карского моря. В целом же из-за значительного перемешивания воздуха над исследованными морскими акваториями изотопная сигнатура метана в наших летне-осенних измерениях была близка к средним значениям, характерным для Северного полушария –  $-47.5\%$  [23].

**Источники финансирования.** Работа выполнена при поддержке РФФ № 20-17-00200 (анализ данных), подготовка оборудования и экспериментальные исследования проходили в рамках госзадания: темы № 0129-2022-0012 (ИФА РАН) и FMWE-2021-0007 (ИО РАН). Экспедиционные исследования проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (целевое финансирование на проведение морских экспедиций), а также гранта РФФ № 19-17-00234-П.

**Благодарности.** Авторы выражают искреннюю благодарность экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш” за высокопрофессиональную организацию экспедиции и всестороннюю поддержку в проведении измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А. и др. Наблюдения концентраций метана, озона, черного углерода, оксидов азота, углерода и содержания  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  над морями российской Арктики с борта научно-исследовательского судна летом и осенью 2018 года // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 5. С. 685–695.
2. Скороход А.И., Панкратова Н.В., Беликов И.Б. и др. Атмосферный метан и его изотопный состав над морями российской Арктики по результатам судовых измерений летом и осенью 2015 года // *Докл. РАН*. 2016. Т. 470. № 5. С. 1–5. <https://doi.org/10.7868/S0869565216290247>
3. Bousquet P., Ciais P., Miller J. et al. Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability // *Nature*. 2006. V. 443(7110). P. 439–443. <https://doi.org/10.1038/Nature05132>
4. Dlugokencky E.J., Nisbet E.G., Fisher R. et al. Global atmospheric methane: budget, changes and dangers // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2011. V. 369. P. 2058–2072. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0341>
5. Fisher R.E., France J.L., Lowry D. et al. Measurement of the  $^{13}\text{C}$  isotopic signature of methane emissions from northern European wetlands // *Global Biogeochem. Cycles*. 2017. V. 31. P. 605–623. <https://doi.org/10.1002/2016GB005504>
6. Fisher R.E., Sriskantharajah S., Lowry D. et al. Arctic methane sources: Isotopic evidence for atmospheric inputs // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L21803. <https://doi.org/10.1029/2011GL049319>
7. Gupta M., Tyler S., Cicerone R. Modeling atmospheric  $^{13}\text{CH}_4$  and the causes of recent changes in atmospheric  $\text{CH}_4$  amounts // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 22923–22932. <https://doi.org/10.1029/96JD02386>
8. Jackson R., Saunio M., Bousquet P. et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources // *Environ. Res. Lett.* 2020. V. 15(7). JRC121045.
9. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1958. V. 13. P. 322–334.
10. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P. et al. Three decades of global methane sources and sinks // *Nature Geosci.* 2013. V. 6. № 10. P. 813–823.
11. Levin I., Veidt C., Vaughn B. H. et al. No inter-hemispheric delta ( $\text{CH}_4$ )-C-13 trend observed // *Nature*. 2012. V. 486(7404). E3–E4. <https://doi.org/10.1038/Nature11175>
12. Myhre C.L., Ferré B., Platt S.M. et al. Extensive release of methane from Arctic seabed west of Svalbard during summer 2014 does not influence the atmosphere // *Geophysical Research Letters*. 2016. V. 43 № 9. P. 4624–4631.
13. Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I. et al. E. Evidence of atmospheric response to methane emissions from the East Siberian Arctic shelf // *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. V. 11. P. 85–92. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-85-92>
14. Pataki D.E., Ehleringer J.R., Flanagan L.B. et al. The application and interpretation of Keeling plots in terrestrial carbon cycle research // *Global Biogeochem. Cycles*. 2003. V. 17. 1022. <https://doi.org/10.1029/2001GB001850>
15. Rolph G., Stein A., Stunder B. Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY // *Environmental Modelling & Software*. 2017. V. 95. P. 210–228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
16. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I. et al. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis // *Biogeosciences*. 2017. V. 14. P. 2283–2292. <https://doi.org/10.5194/bg-14-2283-2017>
17. Saunio M., Bousquet P., Poulter B. et al. The global methane budget 2000–2012 // *Earth. System Sci. Data*. 2016. V. 8. № 2. P. 697–751. <https://doi.org/doi.10.5194/essd-8-697-2016>.
18. Saunio M., Stavert A.R., Poulter B. et al. The global methane budget 2000–2017 // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 3. P. 1561–1623. <https://doi.org/doi.10.5194/essd-12-1561-2020>.
19. Shakhova N.N., Semiletov I.I., Salyuk A.A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 327. № 5970. P. 1246–1250.
20. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geoscience*. 2014. V. 7. P. 64–70. <https://doi.org/doi10.1038/ngeo2007>.
21. Sherwood O.A., Schwietzke S., Arling V.A. et al. Global Inventory of Gas Geochemistry Data from Fossil Fuel, Microbial and Burning Sources, version 2017 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. V. 9. P. 639–656. <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>
22. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. NOAA’s HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
23. Warwick N.J., Cain M.L., Fisher R. et al. Using  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  and  $\delta\text{D}-\text{CH}_4$  to constrain Arctic methane emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 14891–14908. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14891-2016>
24. Yu J., Xie Z., Sun L. et al.  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  reveals  $\text{CH}_4$  variations over oceans from mid-latitudes to the Arctic // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. 13760. <https://doi.org/10.1038/srep13760>
25. Yurganov L., Carroll D., Zhang H. Ocean stratification and sea-ice cover in Barents and Kara seas modulate sea-air methane flux: satellite evidence // *Earth and Space Science*. 2020. 18 p. <https://doi.org/10.1002/essoar.10504047.1>



## Methane Concentration and $\delta^{13}\text{C}$ Isotopic Signature in Methane over the Arctic Seas in Summer and Autumn 2020

N. V. Pankratova<sup>a, #</sup>, I. B. Belikov<sup>a</sup>, A. I. Skorokhod<sup>a</sup>, V. A. Belousov<sup>a</sup>, V. O. Muravya<sup>b, c</sup>,  
M. V. Flint<sup>b</sup>, E. V. Berezina<sup>a</sup>, A. N. Novigatsky<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>c</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: pankratova@ifaran.ru*

We studied the assessment of methane content in the near atmospheric layer of the Arctic seas and the sources of its emissions. Continuous atmospheric measurements of methane concentration and  $\delta^{13}\text{C}$  isotope signature in methane were carried out during two expeditions aboard the R/V Akademik Mstislav Keldysh in the summer and autumn of 2020. Minimum  $\text{CH}_4$  concentration (mean  $1.937 \pm 0.010$  ppm) were obtained over the Northern and Norwegian Seas. Maximum  $\text{CH}_4$  concentration took place above the Kara ( $1.998 \pm 0.030$  ppm in average, maximum values are up to 2.000–2.040 ppm) and White ( $2.006 \pm 0.030$  ppm in average) seas. The average values of  $\delta^{13}\text{C}$  in the studied region were close to those typical for the Northern Hemisphere —  $-47.5\%$ . Regional changes in  $\delta^{13}\text{C}$  allowed to determine  $\text{CH}_4$  sources and show that methane concentration in the surface atmospheric level is mainly affected by the direction of air mass advection.

**Keywords:** Arctic, methane, ship-borne measurements, stable isotope, air masses, trajectory analysis