



КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В АТМОСФЕРЕ АРКТИКИ ПО ДАННЫМ СУДОВЫХ И САМОЛЕТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Панкратова Н.В.¹, Скороход А.И.^{1,2}, Беликов И.Б.¹, Белоусов В.А.¹, Кравчишина М.Д.³, Новигатский А.Н.³, Белан Б.Д.⁴, Аршинов М.Ю.⁴, Баранов Б.В.³, Васильева А.В.¹, Давыдов Д.К.⁴, Пестунов Д.А.⁴

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Университет Вены, Вена, Австрия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

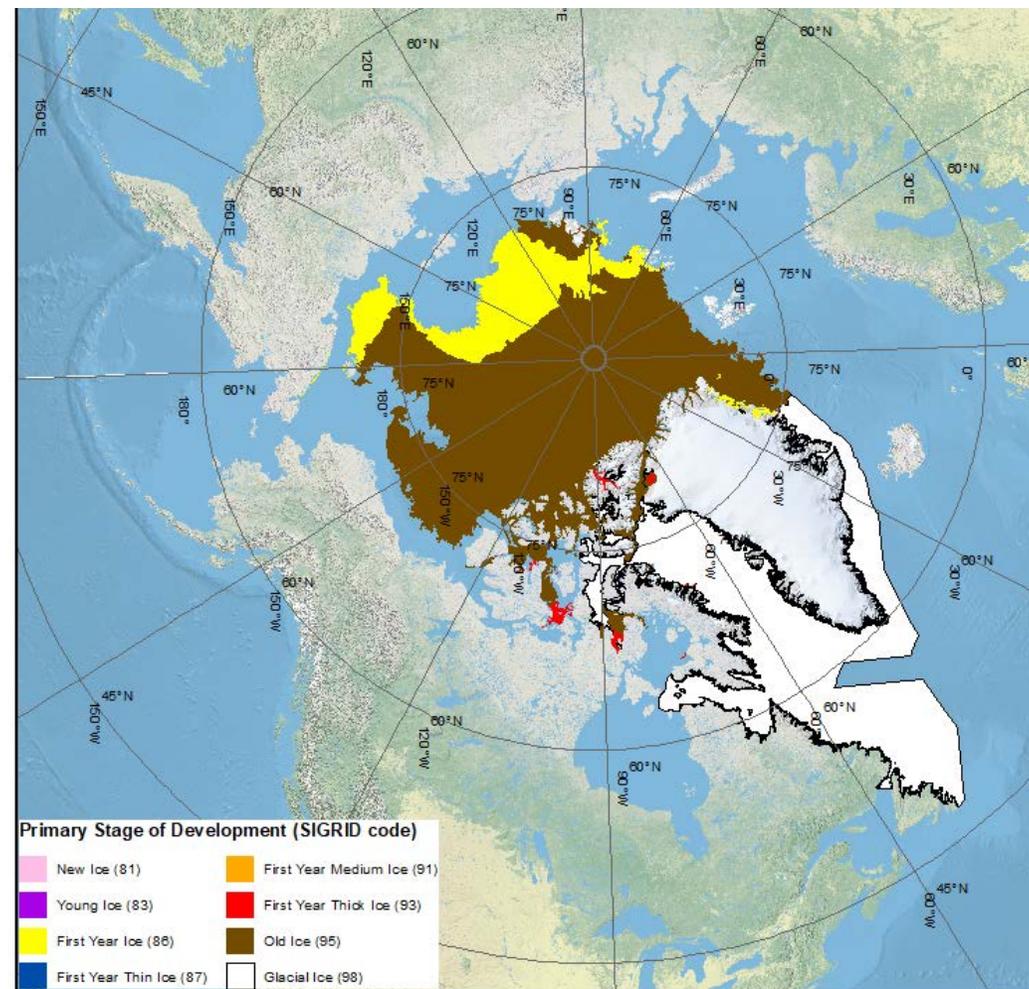
АКТУАЛЬНОСТЬ

Выполнен уникальный климатический эксперимент, включающий комплекс измерений *in situ* в водной толще и приземном слое атмосферы непрерывно по всему маршруту судна и синхронные измерения с самолета в координатах работы судна.

МЕТОДЫ

- **Район исследования**
- Анализ обратных траекторий
- Судовые и самолетные измерения
- Оценка потоков метана

Представлены результаты прямых измерений концентрации метана (CH_4), $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ и углекислого газа (CO_2) в атмосферном воздухе с 5 по 18 сентября 2022 г. с борта научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» (рейс 89(1)) в южной части Карского и Баренцева морей.



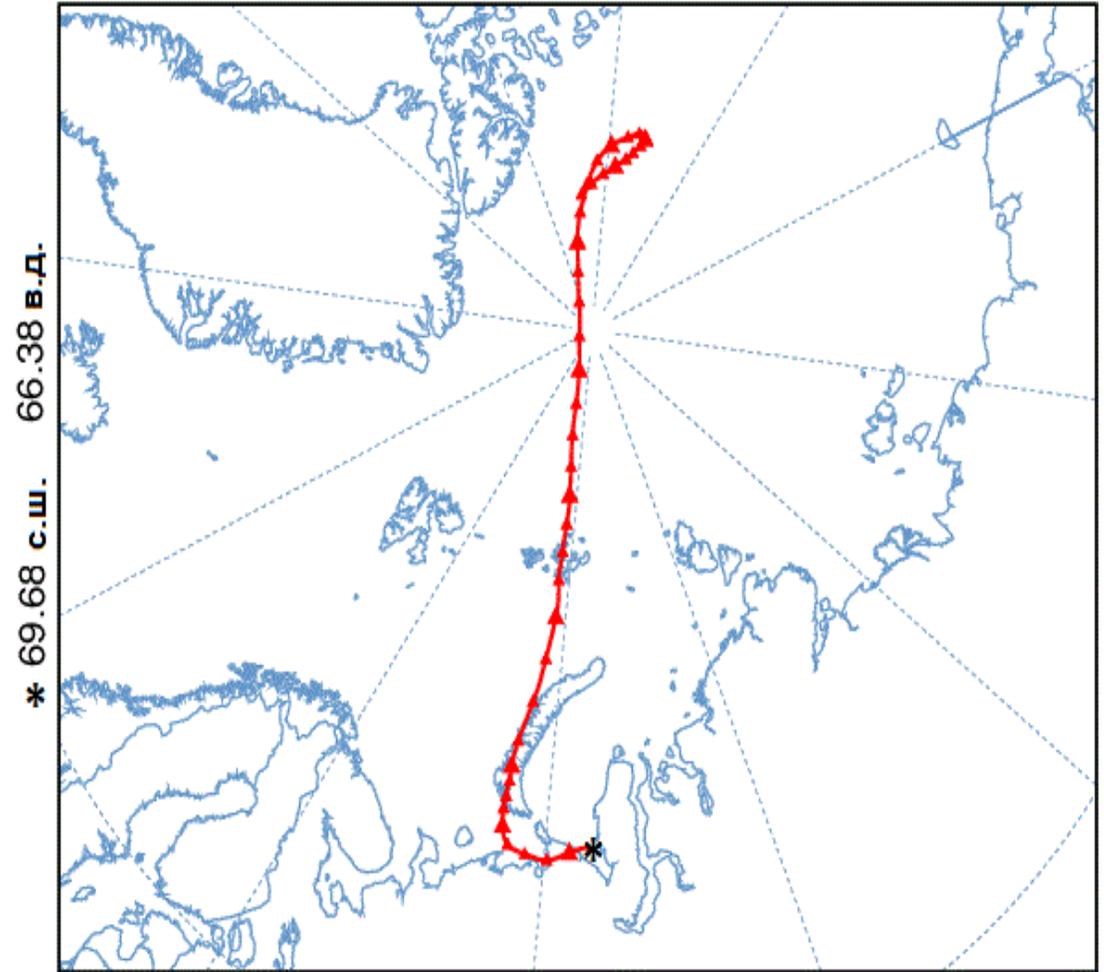
МЕТОДЫ

- Район исследования
- **Анализ обратных траекторий**
- Судовые и самолетные измерения
- Оценка потоков метана

Проанализированы обратные пятисуточные (120 часов) траектории воздушных частиц.

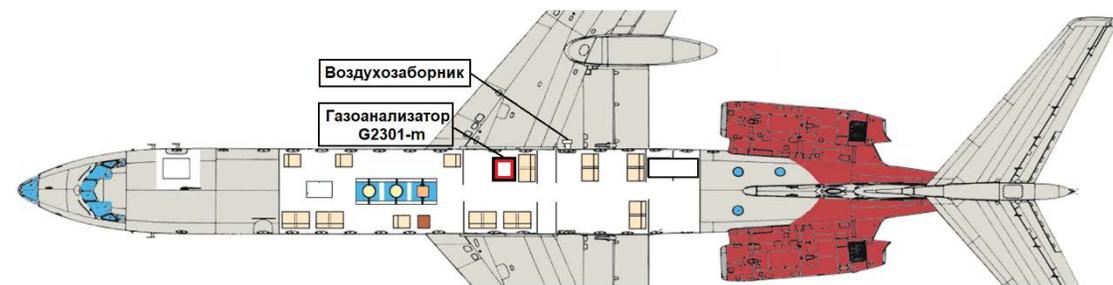
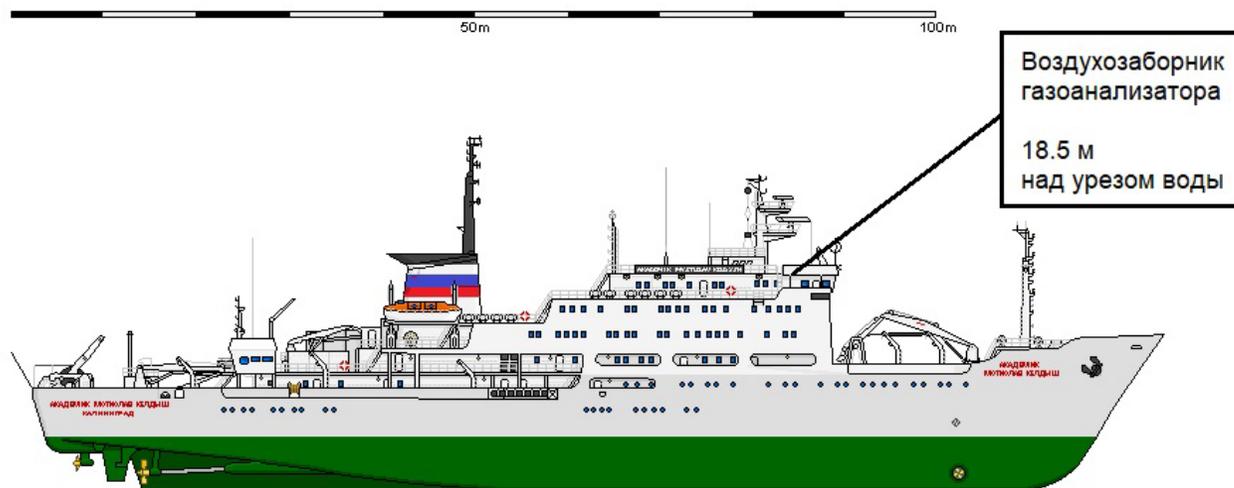
Шаг - 6 часов для сроков 00, 06, 12 и 18 UTC с конечной точкой 500 м н.у.м.

Для периодов синхронных судовых и самолетных измерений построены обратные траектории на 10 суток.



МЕТОДЫ

- Район исследования
- Анализ обратных траекторий
- **Судовые и самолетные измерения**
- Оценка потоков метана



МЕТОДЫ

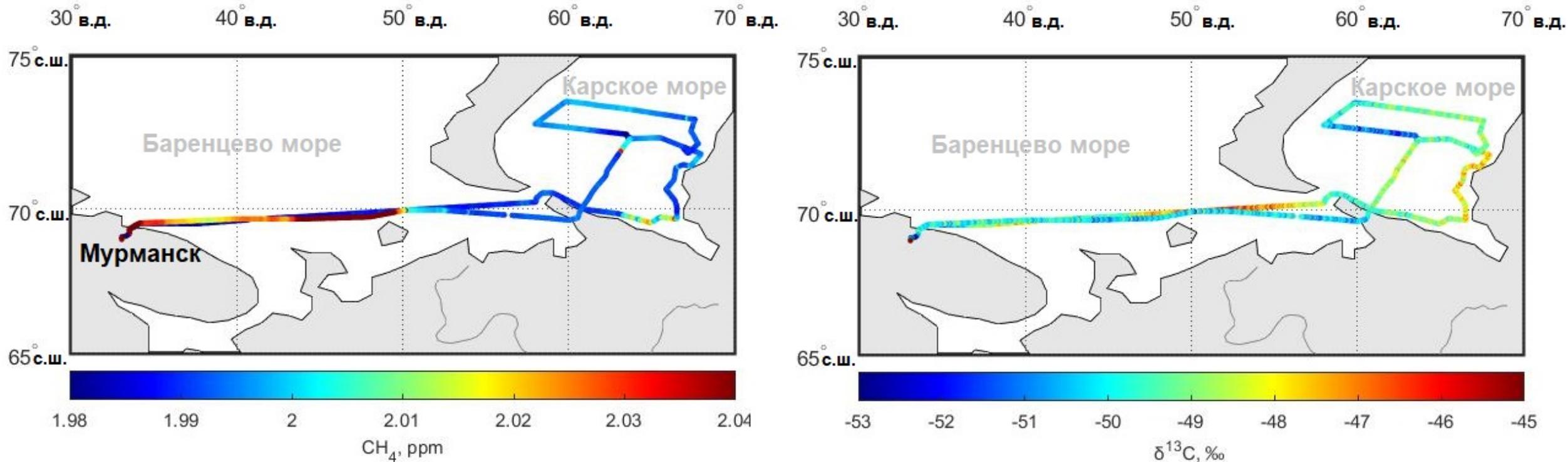
- Район исследования
- Анализ обратных траекторий
- Судовые и самолетные измерения
- **Оценка потоков метана**

Метеопараметры приповерхностного слоя и навигационная информация определялись по данным судовой метеостанции.

Концентрацию растворенного в воде метана определяли с помощью *фазово-равновесной дегазации* с последующим измерением на газовом хроматографе



РЕЗУЛЬТАТЫ



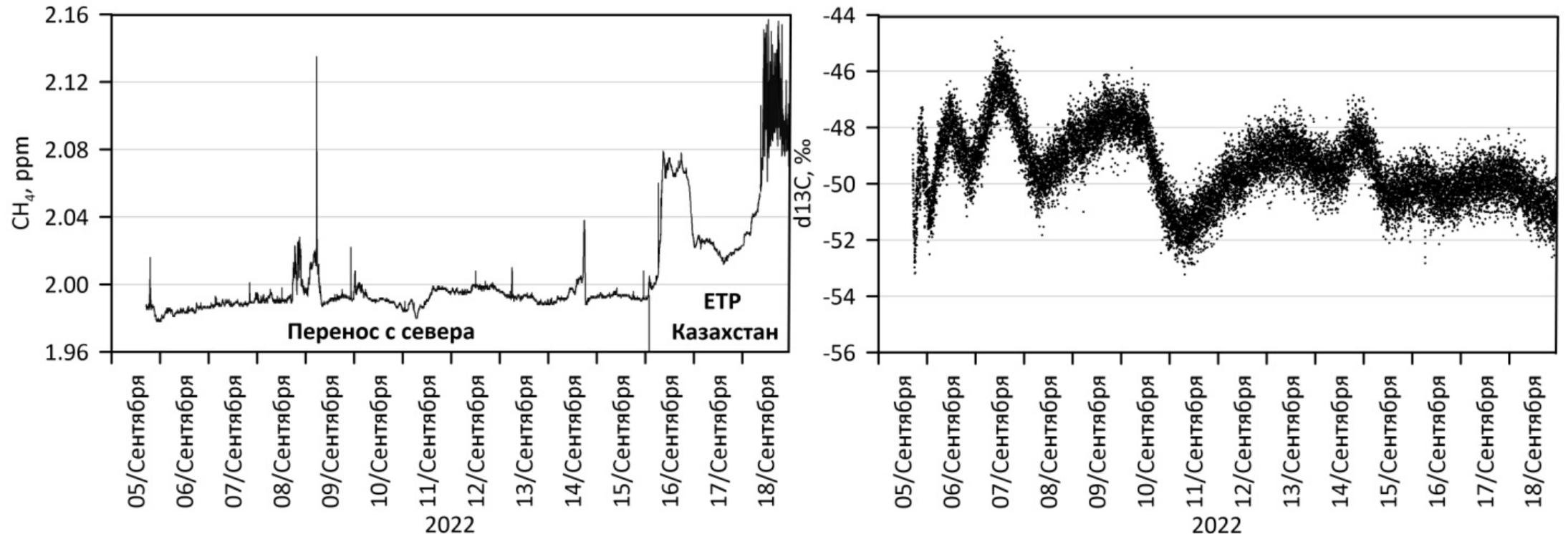
Концентрация CH_4 и значения $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ по маршруту судна на основе осредненных данных минутных измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические характеристики минутных рядов концентрации метана и величин $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ для различных участков маршрута судна

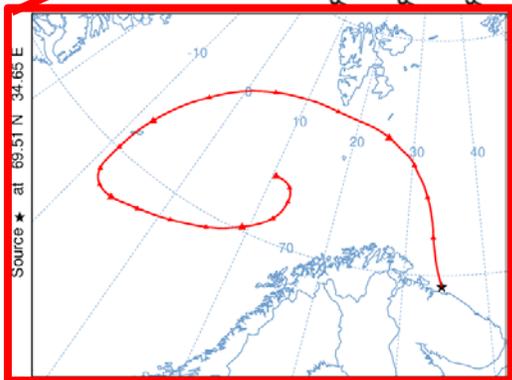
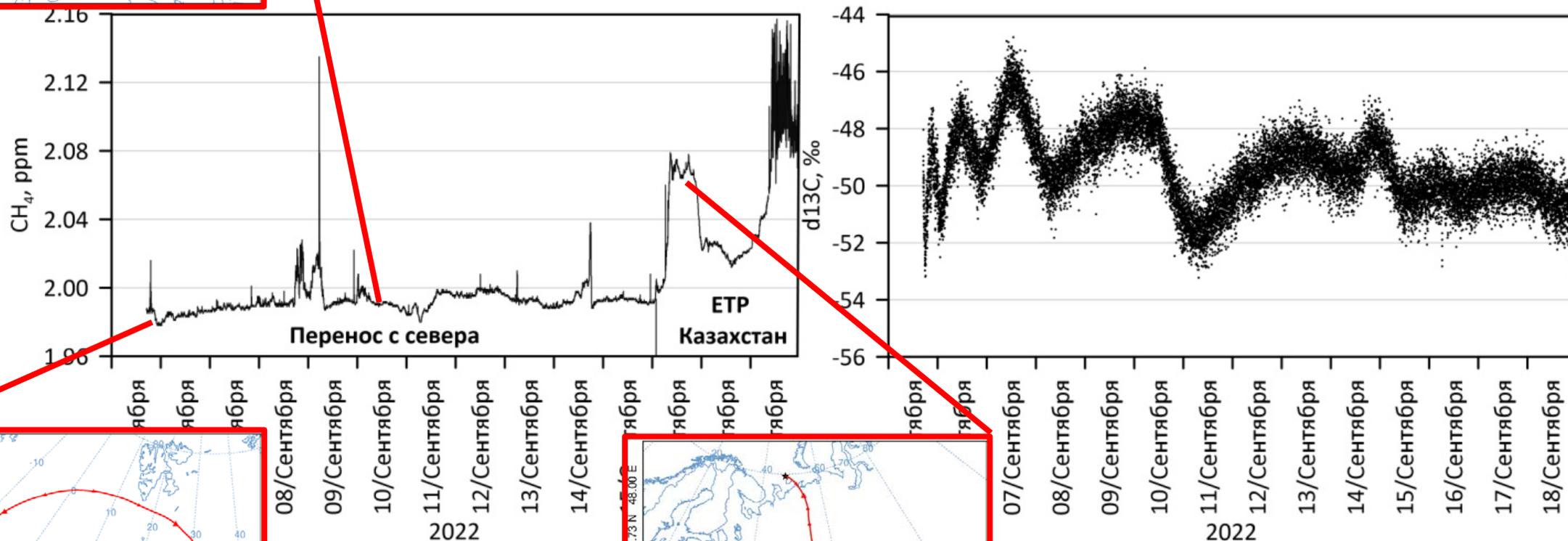
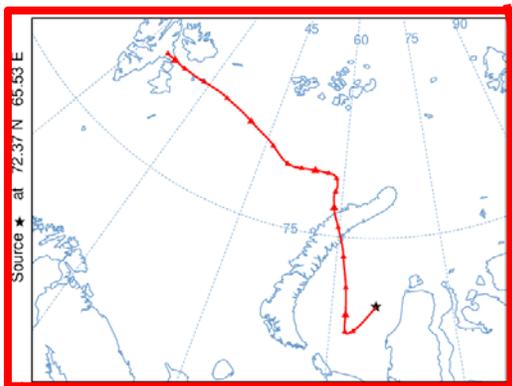
Регион	min max		min max		Среднее \pm ст. отклонение	
	$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, ‰		CH_4 , ppm		$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, ‰	CH_4 , ppm
Порт Мурманск	-52.6	-49.0	2.061	2.251	-50.7 \pm 0.6	2.103 \pm 0.017
Баренцево море восток	-53.2	-44.8	1.978	2.016	-48.5 \pm 1.4	1.987 \pm 0.004
Карское море	-53.2	-45.9	1.980	2.135	-49.3 \pm 1.2	1.994 \pm 0.013
Баренцево море запад	-52.8	-48.0	1.990	2.106	-50.1 \pm 0.6	2.026 \pm 0.018

РЕЗУЛЬТАТЫ



Дифференциальное распределение концентраций метана и значений $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, полученное в сентябре 2022 г. (данные с минутным осреднением). Подписи на левом графике соответствуют направлению адвекции воздушных масс.

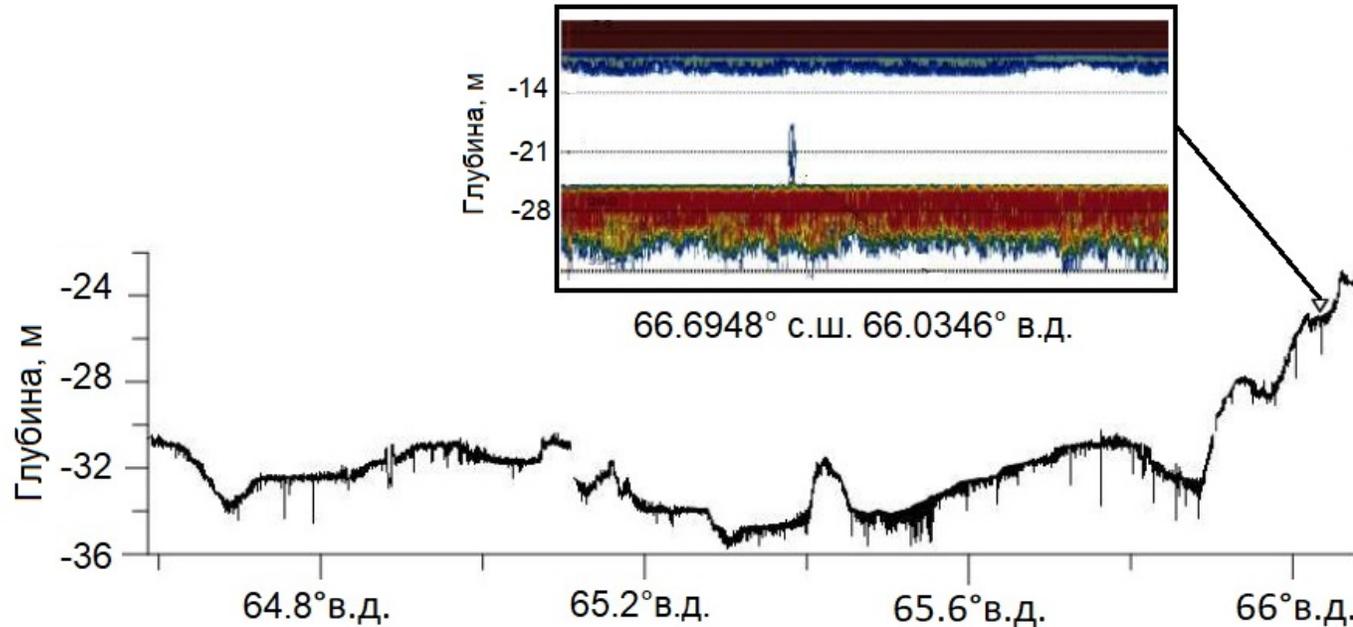
РЕЗУЛЬТАТЫ



ре распределение концент
с минутным осреднением
ых масс.

чений $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, полученное в сентябре
м графике соответствуют направлению

РЕЗУЛЬТАТЫ



Положение метанового сипа на батиметрическом профиле, пересекающем Байдарацкую губу в восточном направлении. На врезке дана эхограмма акустической аномалии в водной толще и ее координаты.

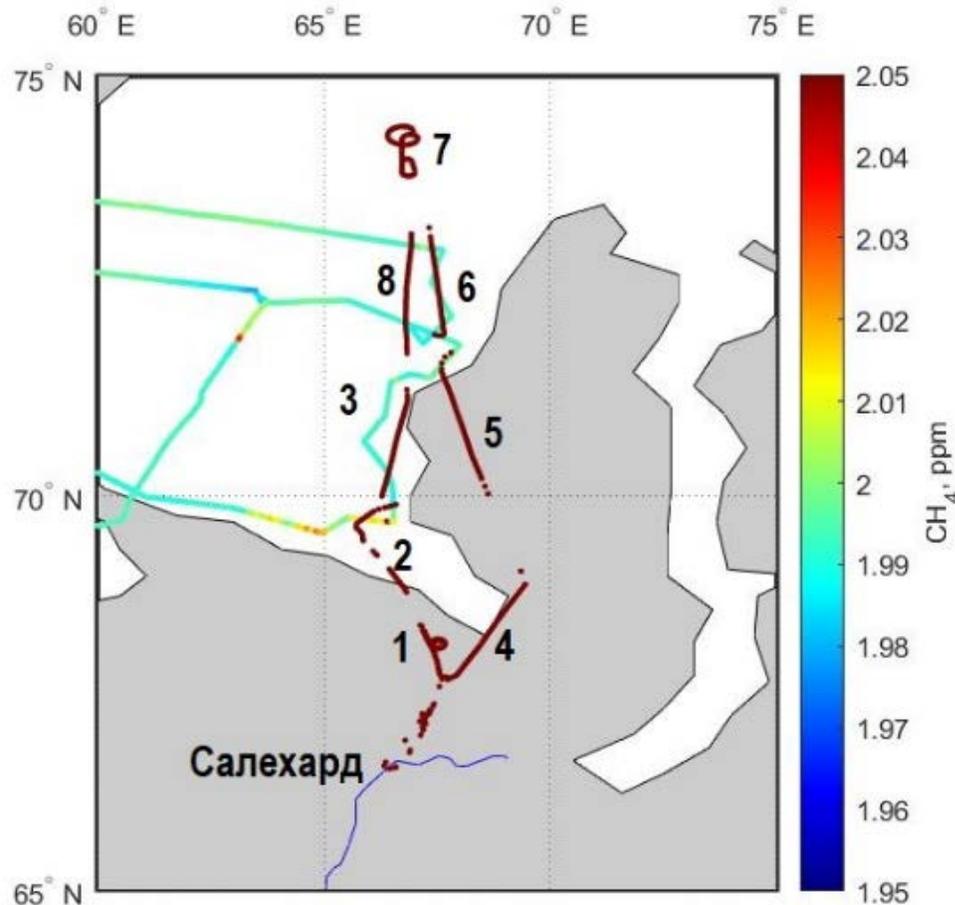
ПОТОКИ МЕТАНА

Наибольший поток метана с Приямальского шельфа (до $114 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) отмечен в открытой части Байдарацкой губы ($69^\circ 40'$ с.ш., $66^\circ 33'$ в.д.) при глубине моря 15 м.

При этом уже на высоте ~ 20 м над уровнем воды концентрации метана не превышали ≤ 2 ppm, то есть соответствовали фоновым значениям.

(Швед В. А., Егоров А. В., Кравчишина М. Д. и др. Концентрация метана в южной части Карского моря // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Владивосток, 13–17 мая 2024 г. Владивосток: Приморский океанариум – филиал Национального научного центра морской биологии ДВО РАН, 2024. С. 503-504)

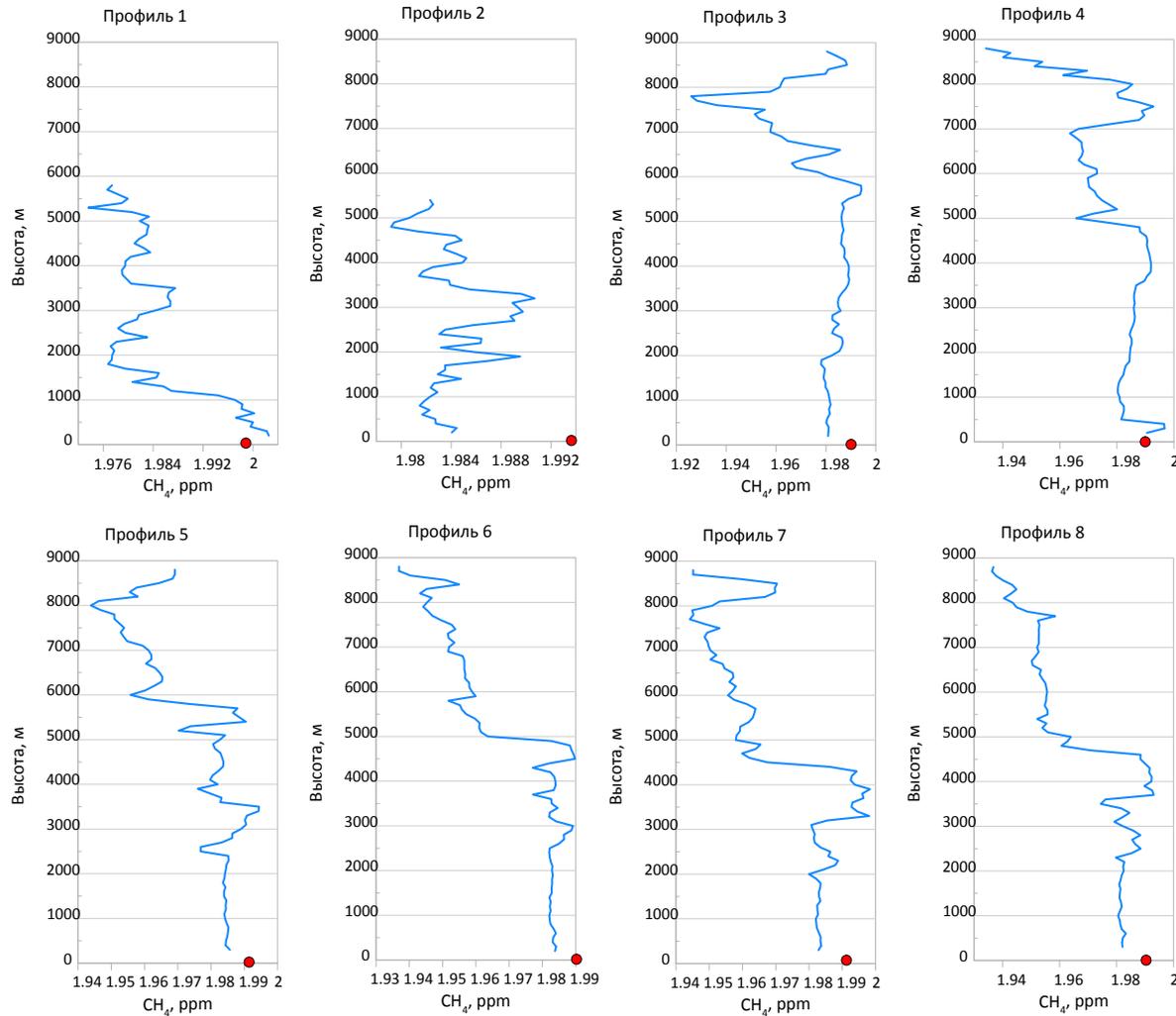
РЕЗУЛЬТАТЫ



Профиль 1	09.09.2022	07:04-07:13 UTC
Профиль 2	09.09.2022	07:18-07:36 UTC
Профиль 3	09.09.2022	07:45-08:03 UTC
Профиль 4	10.09.2022	06:44-07:06 UTC
Профиль 5	10.09.2022	07:18-07:36 UTC
Профиль 6	10.09.2022	07:53-08:12 UTC
Профиль 7	10.09.2022	08:25-08:42 UTC
Профиль 8	10.09.2022	08:57-09:12 UTC

Концентрация метана в приводном слое атмосферы и маршруты полетов самолета в тропосфере во время выполнения измерений с номером профилей: 9 сентября – обозначены цифрами 1–3 и 10 сентября – обозначены цифрами 4–8. Справа – таблица с датой и временем измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

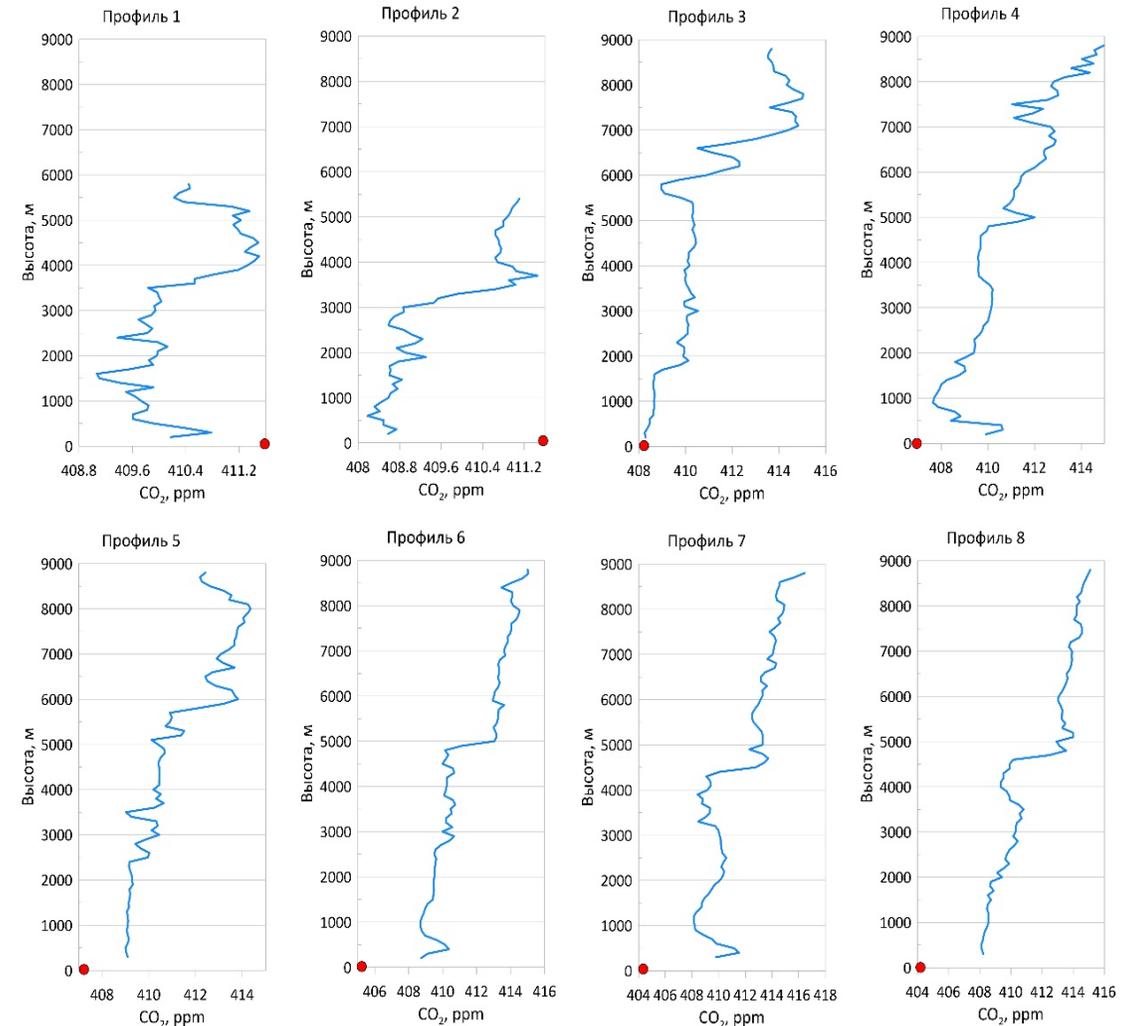


Профили (1–8) концентрации метана в слое тропосферы во время полетов самолета-лаборатории 9 и 10 сентября. Красной точке соответствует средняя концентрация метана, измеренная в приводном слое на судне (осредненное значение для периода измерения концентрации для каждого профиля).

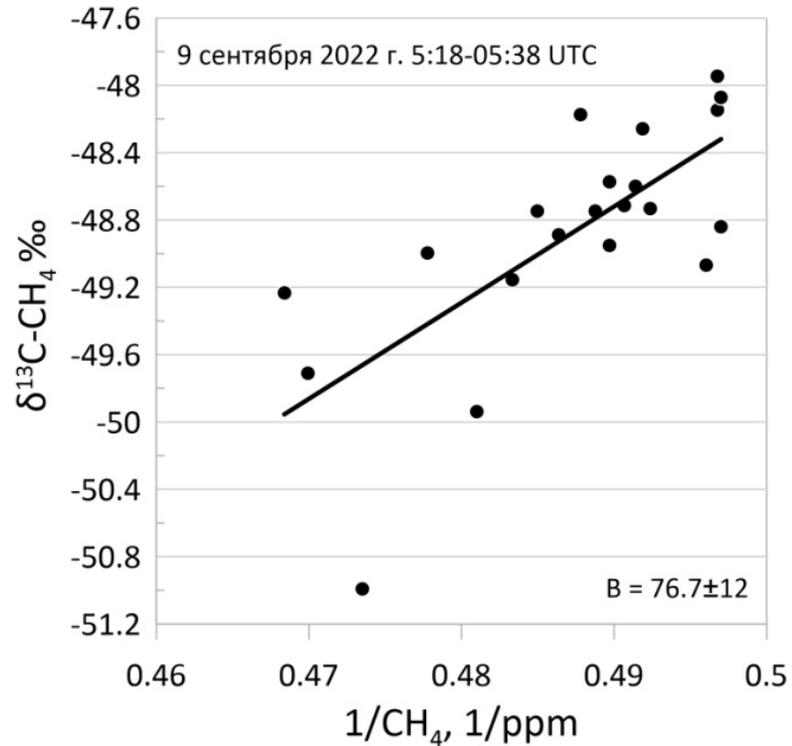
РЕЗУЛЬТАТЫ

Профили (1–8) концентрации CO_2 во время полетов 9 и 10 сентября 2022.

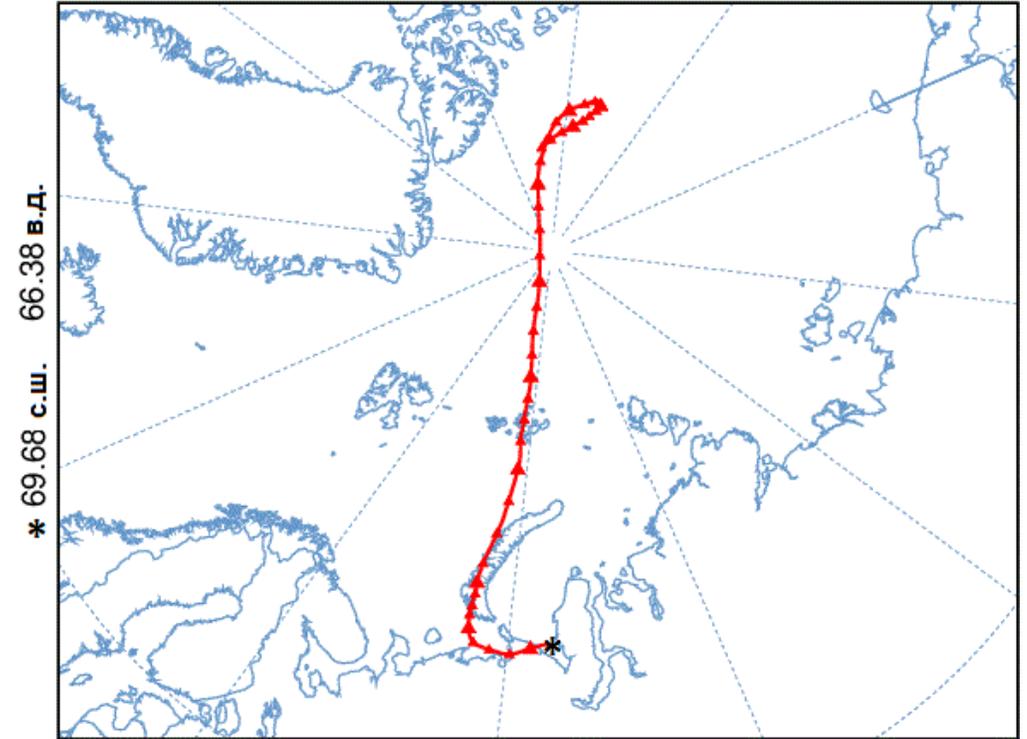
Красной точке соответствует средняя концентрация CO_2 , измеренная на судне (осредненное значение для периода измерения концентрации для каждого профиля).



РЕЗУЛЬТАТЫ



Анализ по методу Килинга (Keeling plot) для 9 сентября 2022 г. (за период с 5:18 до 5:38 UTC). Значение свободного члена линейной регрессии - 76.7, коэффициент детерминации $R^2 = 0.7$.



Обратные траектории воздушных масс, осредненные за 10 суток для 05:00 UTC 9 сентября 2022 г., построенные по данным NOAA на конечную высоту 100 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Показано неоднородное распределение парниковых газов в столбе атмосферы непосредственно от морской поверхности вплоть до 9 км над морем. В нижней тропосфере из-за близости различных источников изменчивость концентрации метана в окружающем воздухе заметно выше.
- Долгопериодные (от нескольких часов до нескольких суток) колебания концентрации метана связаны с направлением адвекции воздушных масс, короткопериодные (~несколько минут) – с влиянием локальных источников, а именно эмиссии метана на границе раздела вода–воздух.
- Пониженные значения концентрации парниковых газов отмечались при северном направлении переноса.. Смена направления переноса воздуха на южное приводила к существенному росту концентраций над шельфом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В нижнем приповерхностном слое атмосферы содержание метана превышает его содержание в свободной тропосфере примерно на 10 ppb, что может указывать на наличие источника вблизи района измерений. Обратная ситуация с двуокисью углерода, концентрация которого в свободной атмосфере превышала значения, полученные в приповерхностном слое воздуха на 3-5 ppm. Тем не менее, даже над районами возможных эмиссий метана из водной толщи в атмосферу, (как, например, 9 сентября), метод Килинга не дает полной информации об источниках избыточного метана. Показано, что при выполнении судовых измерений в воздухозаборник на высоте ~18 м над поверхностью воды поступает уже перемешанный воздух, где смешивается метан из разных источников (местных и дальнего переноса).
- Несмотря на положительные потоки метана на границе раздела фаз вода–воздух на обширной акватории Пряймальской части Южно-Карского шельфа, судовые измерения на высоте около 18 м над уровнем моря фиксируют концентрации метана близкие к фоновым значениям и успешно регистрируют лишь локальные всплески его концентраций за счет всплытия газовых пузырьков в Байдарацкой губе в результате *флюидной разгрузки* метана из донных осадков. Полученные данные свидетельствуют о сравнительно слабой эмиссии метана с акватории Южно-Карского шельфа по сравнению с эмиссией с территории Большеземельской тундры. Продемонстрировано отсутствие значимых признаков эмиссии метана (атмосферного отклика) в южной исследованной части Баренцева моря в сентябре 2022 г.

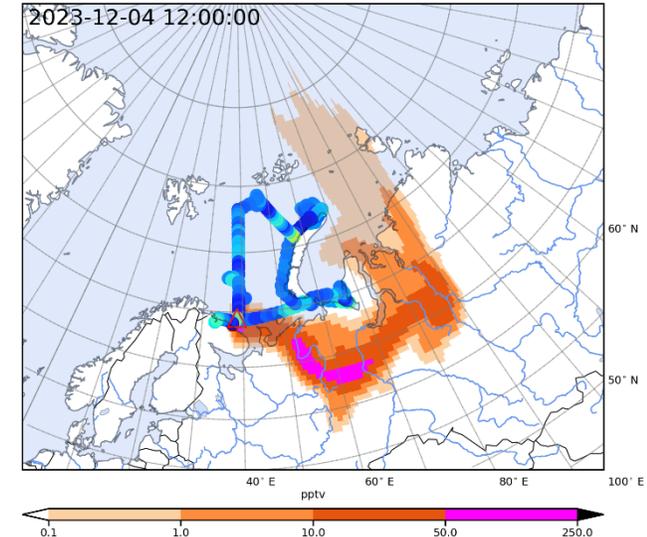
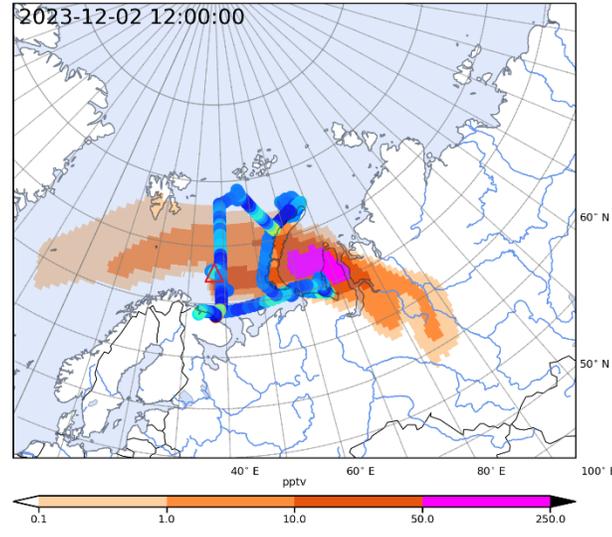
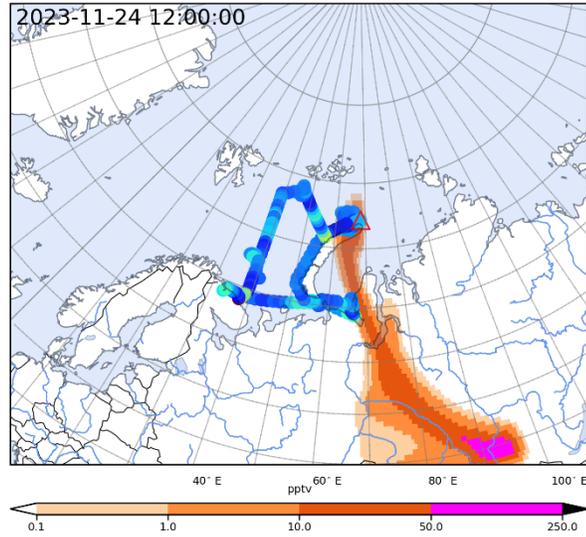
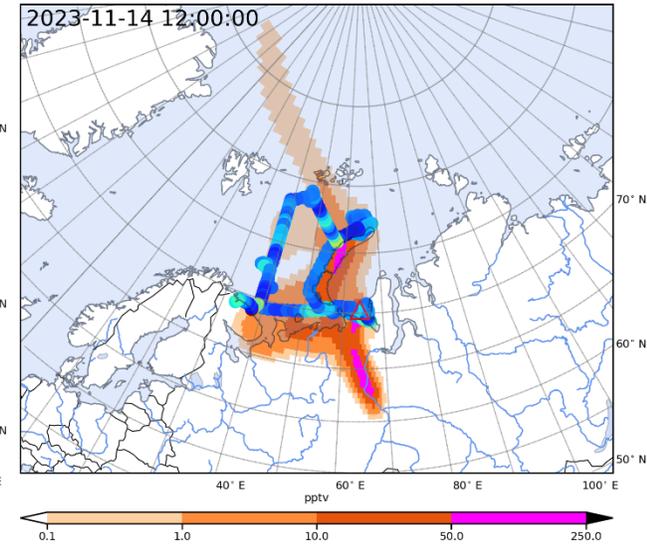
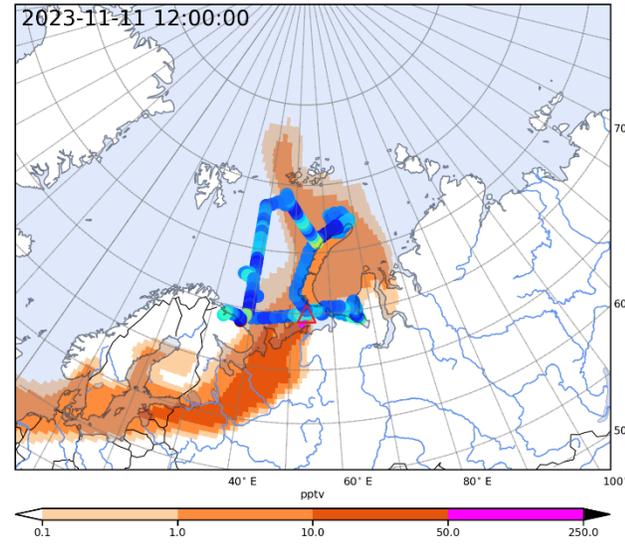


Синоптические флуктуации измеренных концентраций метана (красная линия) вдоль маршрута экспедиции АМК-93 (средние трёхчасовые значения минус их медиана в скользящем окне шириной ± 7 дней) и **модельные оценки вклада эмиссий** от антропогенных источников (сплошные линии) и суммарных эмиссий с учётом переувлажнённых территорий (болот, штрихпунктирная линия) в области влияния атмосферного переноса продолжительностью до суток (серые линии) и до пяти суток (чёрные линии).

→ Пики модельных и измеренных концентраций (пять главных пиков) в основном совпадают по времени. Можно взять интервал осреднений более 3 час, чтобы сгладить влияние погрешностей метеоданных и модели атмосферного переноса.

→ Основные источники наблюдаемых вариаций метана находятся на расстоянии более суток атмосферного переноса (чёрные линии); в основном это антропогенные источники (сплошная чёрная линия).

ПЛАНЫ



Области влияния атмосферного переноса в приземном слое (по модели ЛГПА ИФА) в течение пяти суток перед приходом в точку наблюдений для пяти главных пиков наблюдаемых концентраций метана. Размерность: время пребывания воздуха в ячейках сетки (0.5° x 0.5°), умноженное на средний поток эмиссий метана в северной Евразии.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ