

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Сравнение потоков парниковых газов, измеренных с помощью комплексов научного оборудования самолета- лаборатории Як-40 и обсерватории «ZOTTO»

П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹, В.Е. Арясов², Б.Д. Белан^{✉ 1},
С.Б. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹, А.В. Панов²,
А.С. Прокушкин², И.Р. Путилин², Т.М. Рассказчикова¹, Д.Е. Савкин¹,
Д.В. Симоненков¹, Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов^{1*}

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

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, г. Красноярск, Академгородок № 50, стр. 28

Поступила в редакцию 20.05.2024;
после доработки 19.09.2024;
принята к печати 23.09.2024

Продолжающееся глобальное потепление климата приводит к необходимости проведения непрерывного мониторинга концентрации парниковых газов и величины их потоков. Газообмен между наземными экосистемами и атмосферой измеряется в основном с помощью метода вихревой ковариации, градиентным и камерным методами. Приводится описание приборных комплексов самолета-лаборатории Як-40 и обсерватории «ZOTTO». Измеренные двумя разными методами потоки CO₂ и CH₄ на одинаковых высотных уровнях совпадают по знаку, близки по величине для углекислого газа и различаются до двух раз у метана. Полученные результаты представляют интерес для специалистов в области измерения потоков парниковых газов методом вихревой ковариации.

Ключевые слова: атмосфера, вертикальное распределение, вихревая ковариация, диоксид углерода, метан, потоки; atmosphere, vertical distribution, eddy covariance, carbon dioxide, methane, flux.

Введение

Продолжающееся глобальное потепление климата приводит к необходимости проведения непрерывного мониторинга роста концентраций парниковых газов как основной причины изменения радиационного притока тепла в атмосферу Земли. Наблюдающееся увеличение содержания таких соединений в воздухе является следствием дисбаланса

между их эмиссией и стоком из атмосферы. С целью оценки этого дисбаланса нужно контролировать величину потоков парниковых газов. Для определения эмиссии или поглощения (стока) углерода растительным покровом в естественных условиях измерения проводятся в удаленных (фоновых) районах, где антропогенное влияние минимально. Для этого, как правило, используются методы вихревой ковариации (eddy covariance), градиентные или камерные [1].

Принято считать, что метод вихревой ковариации наиболее точен и рассматривается в качестве эталонного при сравнении данных измерений [2]. Исследования с использованием данного метода могут объяснить временные и суточные вариации локальных потоков, что расширяет наше понимание механизма поглощения углерода в окружающей среде [3]. Однако охват территории данными одного такого измерительного комплекса является небольшим. Необходима реалистичная оценка углеродного баланса атмосферы, которая связывала бы локальные (экосистемные) потоки и их величины, интегрированные над земной поверхностью в региональном (континентальном) масштабе.

* Павел Николаевич Антохин (apn@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Владимир Евгеньевич Арясов (vova_aryasov@mail.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Алексей Витальевич Панов (alexey.v.panov@gmail.com); Анатолий Станиславович Прокушкин (prokushkin@ksc.krasn.ru); Илья Романович Путилин (rputilin@mail.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Идея использования самолетов для измерения газообмена между поверхностью Земли и атмосферой была предложена более 40 лет назад [4, 5]. Наблюдения с помощью современных приборов, установленных на борту воздушных судов, могут дать результаты не менее точные, чем высотные мачты (башни), а основное отличие заключается в интерпретации данных [6]. Самолеты обеспечивают почти «мгновенную» картину поля турбулентности над территорией, и их данные не подвержены влиянию временных тенденций и нестационарных эффектов, подобно измерениям на башнях. Основным преимуществом бортовых измерений турбулентных потоков методом вихревой ковариации являются большая репрезентативность по пространству, чем данных стационарных наземных измерений, и более высокие временное разрешение и точность, чем расчетов с использованием моделей [4].

В настоящее время бортовой вихревой метод измерения турбулентных потоков парниковых газов реализован в мониторинговом режиме только в США. Здесь создана сеть из 33 пунктов самолетного зондирования, оснащенных небольшими машинами разных типов [7]. Периодические измерения выполняются в Великобритании, Франции и ФРГ [5, 6, 8]. На территории России, насколько можно судить по публикациям, подобных исследований не проводилось. Для восполнения этого пробела нами был скомпонован комплекс оборудования на борту самолета Як-40, позволяющий измерять потоки пар-

никовых газов методом вихревой ковариации [9].

При использовании нового метода и вводе в эксплуатацию комплекса оборудования для его реализации всегда возникает вопрос о надежности и точности измерений. Эта проблема при зондировании решается с помощью интеркалибровок с другими самолетами-лабораториями или сопоставления данных, полученных на высотных сооружениях [10–12].

Поскольку в РФ нет машин, на которых проводятся измерения вихревым методом, то был выбран вариант сопоставления данных, полученных с помощью оборудования, размещенного в обсерватории «ЗОТТО» в районе п. Зотино Туруханского района Красноярского края.

Цель работы — сопоставление потоков парниковых газов, измеренных методом вихревой ковариации с самолета Як-40 и с помощью системы газоанализа и метеорологических датчиков, размещенных в обсерватории «ЗОТТО».

Материалы и методы

Научное оборудование самолета-лаборатории и обсерватории «ЗОТТО»

Для измерения потоков парниковых газов методом вихревой ковариации был скомпонован и установлен на борт самолета Як-40 комплекс необходимого оборудования (рис. 1).

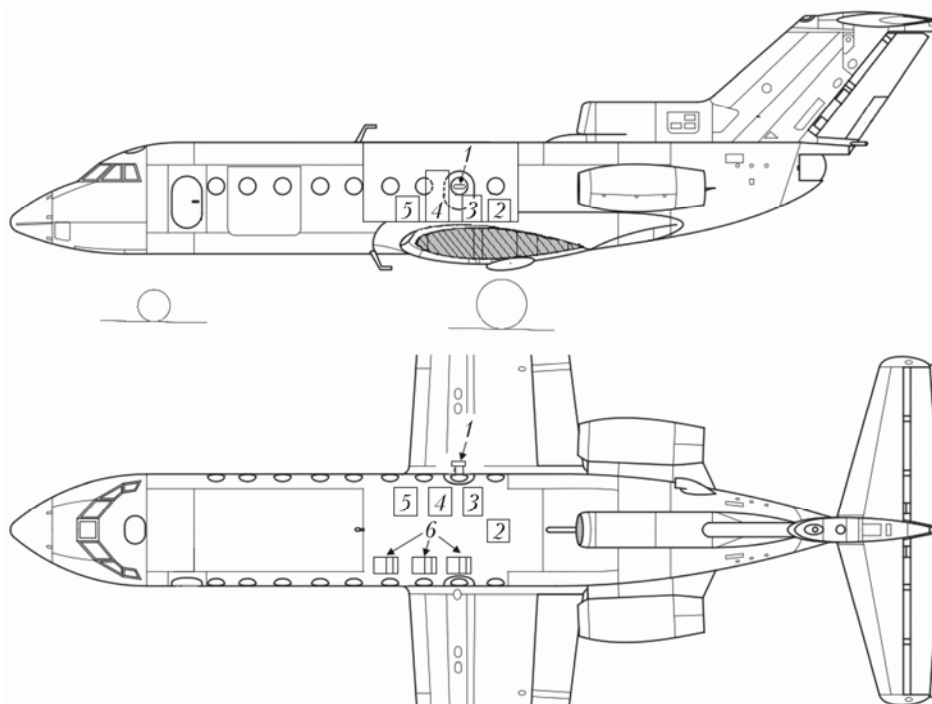


Рис. 1. Размещение научного оборудования на борту самолета-лаборатории Як-40 «Оптик»: 1 — воздухозаборник, датчик температуры и влажности, приемники ГЛОНАСС/GPS; 2 — стойка интегрированной инерциальной системы «КомпаНав-5.2 ИОА», датчика скорости ДАС, приемника полного давления ППД-1, датчика барометрической высоты ДВ6П-13; 3 — стойка блока питания бортовой аппаратуры; 4 — приборная стойка газоанализатора CO₂/CH₄/H₂O (Picarro G2301-m) и источника бесперебойного питания (Delta RT-2K); 5 — стойка центрального бортового компьютера; 6 — кресла борт-операторов

Измерения концентраций CO_2 и CH_4 осуществлялись с помощью газоанализатора G2301-m, работающего на основе технологии спектроскопии внутрирезонаторного затухания сигнала во времени (CRDS, Picarro Inc., США). Данная модель прибора была специально разработана производителем для самолетных исследований. Газоанализатор позволяет измерять концентрации CO_2 в диапазоне $0 \dots 1000 \text{ млн}^{-1}$ с неопределенностью $< \pm 0,04 \text{ млн}^{-1}$ и CH_4 в диапазоне $0 \dots 20 \text{ млн}^{-1}$ с неопределенностью $< \pm 0,0006 \text{ млн}^{-1}$ (неопределенности получены в ходе калибровки поверочными газовыми смесями стандарта ВМО).

Для измерения вертикальной скорости ветра использовалась бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) «КомпаНав-5.2 ИОА», предназначенная для определения координат местоположения, параметров движения и углов ориентации летательного аппарата. Система построена на основе волоконно-оптических гироскопов российского производства и акселерометров на базе микроэлектромеханических систем. В качестве дополнительного источника навигационной информации в состав «КомпаНав-5.2 ИОА» входит приемник спутниковой навигационной системы GPS/ГЛОНАСС Ublox NEO-8M, который позволяет определять вертикальную составляющую скорости самолета относительно воздуха в диапазоне от -50 до $+50 \text{ м/с}$ с неопределенностью $\pm 0,15 \text{ м/с}$. Технические характеристики интегрированной БИНС с приемником GPS/ГЛОНАСС (модель КомпаНав-5.2 ИОА) представлены в табл. 1.

Давление и температура воздуха определялись с помощью изготовленной ранее метеосистемы [13]. В качестве датчика температуры использовался Honeywell HIH-3602-C, измеряющий в диапазоне

Таблица 1

Технические характеристики БИНС	
Параметр	Значение
<i>Основные характеристики</i>	
Угловая скорость, град/с	300
Линейное ускорение	$\pm 10g$
Скорость, м/с	до 300
Тангаж, град	± 90
Крен, град	± 180
Курс, град	$0 \dots 360$
Высота, м	20000
<i>Точностные характеристики</i>	
Горизонтальные координаты, м	6
Пределы допускаемой инструментальной погрешности	не более $\pm 2,5 \text{ м}$
Путевая скорость, м/с	0,1
Вертикальная скорость, м/с	0,15
Углы ориентации (крен, тангаж), град	0,07
Курс, град	0,2
Высота, м	4
Воздушная скорость, м/с	1,5

от -40 до $+85^\circ\text{C}$ с неопределенностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$, датчика давления — Young Model 61302, имеющий диапазон $150 \text{--} 1150 \text{ гПа}$ и неопределенность $< \pm 1,5\%$.

Полное описание измерительного комплекса обсерватории «ЗОТТО» представлено в [14]. Она оснащена высотной мачтой (301 м), на разных уровнях которой закреплены пробоотборные устройства и трубопроводы, подводящие анализируемый воздух к газоанализаторам. В эксперименте были задействованы все имеющиеся уровни отбора: 4, 52, 93, 159, 227 и 301 м. Концентрация парниковых газов измерялась с помощью газоанализатора, характеристики которого приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики оборудования обсерватории «ЗОТТО»

Тип	Модель	Измеряемый параметр	Диапазон	Неопределенность, % [10]
Газоанализатор $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$	EnviroSense 3000i (CRDS); Picarro Inc., США	CO_2 , млн^{-1}	0–1000	$< \pm 0,04$
		CH_4 , млн^{-1}	0–10	$< \pm 0,0003$
		H_2O , млн^{-1}	0–7000	$< \pm 10$
Ультразвуковой анемометр-термометр	Solent-R3; GILL Instruments, Великобритания	Скорость ветра, м/с	0–45 (разрешение 0,01)	± 1
		Направление ветра, град	0–359 (разрешение 1)	± 1
Датчики температуры и влажности	KPK 1/6-ME-H38, Германия	Температура, $^\circ\text{C}$	$-40 \dots +80$	$\pm 0,2$
	MELA Sensorteknik, Германия	Относительная влажность, %	0...100	± 2

Схема проведения эксперимента

Измерения потоков парниковых газов в районе обсерватории «ЗОТТО» осуществлялись 01.11.2023 г. в период с 10:00 до 12:00 по местному времени. Схема полета приведена на рис. 2 (цв. вкладка).

Полеты выполнялись по квадрату на высотах 100, 200, 300, 400, 500, 1000 и 1500 м над уровнем земной поверхности. В центре квадрата находилась высотная мачта. Расположение квадрата было выбрано на основании фактических данных авиаметеостанции «Енисейск», полученных перед вылетом, так, чтобы две стороны совпадали с направлением ветра или были противоположны его направлению, а две другие оказались ему перпендикулярными. На каждом уровне полет продолжался 10 мин и охватывал две стороны квадрата — в дальнейшем они обозначены как участки 1, 2, 3 и 4. Следует отметить, что в реальном эксперименте такая идеальная картина наблюдается не всегда. Это подтверждают и данные, приводимые ниже.

Синоптические условия в период эксперимента

На рис. 3 (цв. вкладка) приведена приземная карта погоды за срок 13 ч местного времени 01.11.2023 г., которая характеризует синоптические условия в период выполнения зондирования атмосферы.

Видно, что район измерений находился на юго-западной периферии обширного антициклона, центр которого располагался вблизи п. Хатанга. Такая погода обеспечила ясные условия, без которых невозможно проведение полетов ниже 600 м.

Согласно [15] антициклоническая погода сопровождается нисходящими вертикальными потоками, в результате чего образуются инверсии температуры, препятствующие обмену воздухом между слоями. Небольшие барические градиенты указывают на незначительные скорости ветра и возможные вариации его направления.

Результаты и обсуждение

Вертикальное распределение температуры воздуха и концентрации парниковых газов

Поскольку методы измерения на мачте и самолете-лаборатории отличаются по темпам регистрации, высотному разрешению и т.д., то дальнейшее рассмотрение будем проводить комбинированием данных. Самолетные профили построены с разрешением 20 м по высоте, а мачтовые — по вышеуказанным уровням.

Из рис. 4 (цв. вкладка) видно, что в период измерений с 10:00 до 12:00 по местному времени в районе эксперимента наблюдалась многослойная инверсия вблизи 250, 500, 900 и 1500 м над поверхностью земли. На рис. 4, а можно также выделить еще и дополнительную приземную инверсию.

Это соответствует уже упомянутым антициклоническим условиям и не совсем способствует исследованию вертикального распределения потоков парниковых газов. Однако весьма проблематично подобрать ситуацию, когда наблюдаются идеальные условия в аэропортах вылета, промежуточной заправки и зоне зондирования, учитывая расстояния между ними более 1000 км. Кроме того, такая стратификация атмосферы должна приводить к особому характеру вертикальных профилей концентрации анализируемых газов.

В связи с тем что эксперимент проходил в условиях, когда физиологическая активность растительного покрова минимальна и отмечается превалирование эмиссионного потока над процессами фотосинтетической ассимиляции углерода наземными экосистемами в районе исследований, вертикальное распределение углекислого газа отражает наличие источника вблизи подстилающей поверхности (рис. 4, б). Причем в приземном слое динамика концентрации CO_2 незначительна. Рис. 4, б показывает, что имеющиеся на кривой концентрации CO_2 небольшие максимумы в основном совпадают с инверсиями, имеющимися на профиле температуры (рис. 4, а).

Концентрация метана изменяется по вертикали совершенно иначе (рис. 4, в). От приземного слоя и до высоты 700 м наблюдается почти нейтральный ход с небольшими вариациями, отражающими наличие инверсий температуры. На высоте 850–900 м фиксируется основной максимум. Такое распределение CH_4 возможно при сочетании воздействия двух источников: адвекции воздуха из районов с его высокой концентрацией и наличии местного источника.

Здесь следует отметить, что измерения высотной мачты «ЗОТТО» охватывают существенный территориальный домен, который ввиду западного переноса смещен на районы Западной Сибири [14], что обуславливает значительное влияние окружающих ее заболоченных территорий, в том числе комплексов Большого Васюганского болота, на фиксируемые на мачте значения концентрации метана. Это также подтверждают данные рис. 4, в, которые показывают резкое увеличение концентрации метана после 11:00 по местному времени, когда исчезает внутренний слой перемешивания [16, 17].

Потоки парниковых газов

Согласно [18, 19] поток газа, измеренный методом вихревой ковариации с самолета, рассчитывается по формуле

$$F = \frac{1}{N} \sum (C' - C)(w' - w),$$

где C' и C — флуктуации и средние значения массовых концентраций исследуемого газа на участке; w' и w — флуктуации и средние значения вертикальной скорости воздуха на участке; N — число отсчетов, вошедших в обработку.

Величина N определяется исходя из следующих соображений. Поток F должен адекватно отражать

неоднородность подстилающей поверхности, которая является источником или стоком искомого газа. Проведенное в [20] исследование показало, что для этого достаточно дистанции 3 км. Второе обстоятельство заключается в частоте отсчетов, по которым регистрируются C' и w' . Для приземных измерений она должна быть не менее 10 Гц [2, 3]. Анализ методических вопросов, выполненный в [21, 22], показал, что в авиационных измерениях концентрацию газов и вертикальную скорость ветра достаточно измерять с частотой 1 Гц. Следовательно, при скорости самолета 100 м/с период осреднения будет равен 300 с или 5 мин. Исходя из этого определялась длина наших участков при зондировании в районе обсерватории «ЗОТТО». Полученные значения потоков парниковых газов представлены на рис. 5 (цв. вкладка).

Из рис. 5 видно, что в период эксперимента потоки CO_2 находились в диапазоне от $-0,3$ до $+0,3 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, CH_4 — от $-0,2$ до $+0,55 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Полученные нами значения близки к результатам, которые регистрировались и в других районах [23–25]. Они ожидаемо и значительно меньше, чем над промышленными районами, например Лондоном [26, 27]. Также обращают на себя внимание различия потоков CO_2 и CH_4 на одной и той же высоте, но на разных участках. Авторы [21, 22] рекомендуют осуществлять измерения потоков при ветровых условиях, стабильных как по направлению, так и по скорости.

Обратимся к рис. 6 (цв. вкладка), на котором представлено распределение скорости и направления ветра на высоте 100 м на участках 1 и 2. На участке 1 скорость и направление ветра изменялись значительно сильнее. Диапазон изменений направления ветра на участке 1 был более 100° , а скорости 8 м/с, тогда как на участке 2 — 40° при тех же 8 м/с. Понятно, что свою роль сыграли синоптическая обстановка и прибрежная орография р. Енисей, находящейся в 30 км от мачты. Однако предсказать подобную метеорологическую ситуацию для локального района проведения эксперимента пока невозможно.

В период эксперимента в обсерватории «ЗОТТО» измерения методом вихревой ковариации не проводились. Однако регистрировались концентрации CO_2 и CH_4 , метеовеличины на вышеперечисленных высотах. По этим данным были сделаны оценки потоков парниковых газов по градиентной методике. Она основана на теории подобия Монина–Обухова и подробно описана в [28].

Значения потоков рассчитывались для каждого слоя между двумя уровнями, на которых проводились измерения. Полученные величины приводились к уровню середины такого слоя. Выполненные ранее сопоставления градиентного и вихревого методов [29–33] показали, что они дают близкие результаты и совпадают в пределах 18–25%.

Рис. 7, а (цв. вкладка) показывает, что измеренные разными методами потоки CO_2 на пересекающихся уровнях (100 и 200 м) совпадают по зна-

ку и близки по величине. Оценки, проведенные для метана, демонстрируют совпадение по знаку и различия по величине почти в два раза (рис. 7, б). Отмеченные расхождения объяснимы, если принять во внимание стратификацию атмосферы в день проведения эксперимента, особенности вертикального распределения CO_2 и CH_4 , а также неустойчивость ветрового режима.

Следует отметить, что расхождения между самолетными измерениями и мониторинговыми оценками на базе высотной мачты можно считать закономерными и они ранее отмечены, например, в [34, 35]. Это обусловлено не только принципиальным различием методов, но и тем, что самолет собирает информацию с более обширной территории; у каждого способа свои пространственно-временные масштабы осреднения.

Заключение

Проведен эксперимент по зондированию атмосферы в районе высотной мачты обсерватории «ЗОТТО». Выполнено сопоставление потоков, измеренных с самолета и рассчитанных по данным мониторинга на базе обсерватории. Результаты сравнения продемонстрировали совпадение по знаку потоков парниковых газов на одинаковых уровнях и достаточную степень близости их величин у диоксида углерода. При одинаковых знаках различия в значениях метана достигают двух раз. Очевидно, что для окончательного заключения требуется проведение такого сравнения в других погодных условиях. Поэтому планируется повторение аналогичного эксперимента в летнее время.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6). Мониторинг газового состава атмосферы на базе обсерватории «ЗОТТО» реализуется в рамках проектов госзадания № FWES-2024-0040 и FWES-2024-0023.

Список литературы

1. Глаголев М.В. К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1, № 1. С. 17–36.
2. Riederer M., Serafimovich A., Foken T. Net ecosystem CO_2 exchange measurements by the closed chamber method and the eddy covariance technique and their dependence on atmospheric conditions // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 4. P. 1057–1064. DOI: 10.5194/amtd-6-8783-2013.
3. Falge E., Baldocchi D., Tenhunen J., Aubinet M., Bakwin P., Berbigier P., Bernhofer C., Burba G., Clement R., Davis K.J., Elbers J.A., Goldstein A.H., Grelle A., Granier A., Guomundsson J., Hollinger D., Kowalski A.S., Katul G., Law B.E., Malhi Y., Meyers T.,

- Monson R.K., Munger J.W., Oechel W., Paw K.T., Pilegaard K., Rannik U., Rebmann C., Suyker A., Valentini R., Wilson K., Wofsy S. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements // *Agric. For. Meteorol.* 2002. V. 113, N 1–4. P. 53–74.
4. Desjardins R.L., Brach E.J., Alno P., Schuepp P.H. Aircraft monitoring of surface carbon dioxide exchange // *Science*. 1982. V. 216, N 4547. P. 733–735.
 5. Lenschow D.H., Pearson Jr., R., Stankov B.B. Estimating the ozone budget in the boundary layer by use of aircraft measurements of ozone eddy flux and mean concentration // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 7291–7297.
 6. Sun Y., Ma J., Sude B., Lin X., Shang H., Geng B., Diao Z., Du J., Quan Z. A UAV-based eddy covariance system for measurement of mass and energy exchange of the ecosystem: Preliminary results // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 403. DOI: 10.3390/s21020403.
 7. Global monitoring laboratory. USA. <https://gml.noaa.gov/ccgg/aircraft/index.html> (last access: 20.04.2024).
 8. Erland B.M., Adams C., Darlington A., Smith M.L., Thorpe A.K., Wentworth G.R., Conley S., Liggio J., Li S.-M., Miller C.E., Gamon J.A. Comparing airborne algorithms for greenhouse gas flux measurements over the Alberta oil sands // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15, N 19. P. 5841–5859. DOI: 10.5194/amt-2022-120.
 9. Белан Б.Д., Антохин П.Н., Аришинов М.Ю., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Самолет лаборатория ЯК-40 для измерения потоков парниковых газов. Патент на полезную модель № 228158 от 16.08.2024.
 10. Wendisch M., Brenguier J.-L. (ed.) *Airborne Measurements for Environmental Research*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 655 p.
 11. Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1998. V. 15. P. 416–429. DOI: 10.1175/1520-0426(1998)015<0416:FSEFAA>2.0.CO;2.
 12. Prueger J.H., Hatfield J.L., Kustas W.P., Hipps L.E., Macpherson J.I., Neale C.M.U., Eichinger W.E., Cooper D.I., Parkin T.B. Tower and aircraft eddy covariance measurements of water vapor, energy, and carbon dioxide fluxes during SMACEX // *J. Hydrometeorol.* 2005. V. 6, N 12. P. 954–960. DOI: 10.1175/JHM457.1.
 13. Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Iulev G.A., Kotelnikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhailchishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15, N 13. P. 3941–3967. DOI: 10.5194/amt-15-3941-2022.
 14. Winderlich J., Chen H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., Lavrič J.V., Kaiser C., Höfer A., Heimann M. Continuous low-maintenance CO₂/CH₄/H₂O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // *Atmos. Meas. Tech.* 2010. V. 3, N 4. P. 1113–1128. DOI: 10.5194/amt-3-1113-2010.
 15. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 616 с.
 16. Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // *Оптика атмосф. и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.
 17. Балин Ю.С., Еришов А.Д. Вертикальная структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным лазерного зондирования // *Оптика атмосф. и океана*. 1999. Т. 12, № 7. С. 616–623.
 18. Tremblay A., Roehm C., Varfalvy L., Garneau M. *Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes*. Berlin: Springer, 2005. 732 p.
 19. Burba G. *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. USA, 2013. 331 p.
 20. Sayres D.S., Dobosy R., Healy C., Dumas E., Kochendorfer J., Munster J., Wilkerson J., Baker B., Anderson J.G. Arctic regional methane fluxes by ecotope as derived using eddy covariance from a low-flying aircraft // *Atmos. Chem. Phys.* 2017. V. 17, N 13. P. 8619–8633. DOI: 10.5194/acp-17-8619-2017.
 21. Yuan B., Kaser L., Karl T., Graus M., Peischl J., Campos T.L., Shertz S., Apel E.C., Hornbrook R.S., Hills A., Gilman J.B., Lerner B.M., Warneke C., Flocke F.M., Ryerson T.B., Guenther A.B., de Gouw J.A. Airborne flux measurements of methane and volatile organic compounds over the Haynesville and Marcellus shale gas production regions // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120, N 12. P. 6271–6289. DOI: 10.1002/2015JD023242.
 22. Shaw J.T., Allen G., Barker P., Pitt J.R., Pasternak D., Bauguette S.J.-B., Lee J., Bower K.N., Daly M.C., Lunt M.F., Ganesan A.L., Vaughan A.R., Chibesakunda F., Lambakasa M., Fisher R.E., France J.L., Lowry D., Palmer P.I., Metzger S., Parker R.J., Gedney N., Bateson P., Cain M., Lorente A., Borsdorff T., Nisbet E.G. Large methane emission fluxes observed from tropical wetlands in Zambia // *Global Biogeochem. Cycl.* 2022. V. 36, N 6. P. e2021GB007261. DOI: 10.1029/2021GB007261.
 23. Zulueta R.C., Oechel W.C., Verfaillie J.G., Hastings S.J., Gioli B., Lawrence W.T. Aircraft regional-scale flux measurements over complex landscapes of mangroves, desert, and marine ecosystems of Magdalena Bay, Mexico // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2013. V. 30, N 7. P. 1266–1294. DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00022.1.
 24. Loechli M., Stephens B.B., Commene R., Chevallier F., McKain K., Keeling R.F., Morgan E.J., Patra P.K., Sargent M.R., Sweeney C., Keppel-Aleks G. Evaluating northern hemisphere growing season net carbon flux in climate models using aircraft observations // *Global Biogeochem. Cycl.* 2023. V. 37, N 2. P. E2022GB007520. DOI: 10.1029/2022GB007520.
 25. Desjardins R.L., Worth D.E., MacPherson J.I., Bastian M., Srinivasan R. Flux measurements by the NRC Twin Otter atmospheric research aircraft: 1987–2011 // *J. Adv. Sci. Res.* 2016. V. 13. P. 43–49. DOI: 10.5194/asr-13-43-2016.
 26. Font A., Grimmond C.S.B., Kotthaus S., Morgui J.-A., Stockdale C., O'Connor E., Priestman M., Barratt B. Daytime CO₂ urban surface fluxes from airborne measurements, eddy-covariance observations and emissions inventory in Greater London // *Environ. Pollut.* 2015. V. 196. P. 98–106. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.10.001.
 27. O'Shea S.J., Allen G., Fleming Z.L., Bauguette S.J.-B., Percival C.J., Gallagher M.W., Lee J., Helfter C., Nemitz E. Area fluxes of carbon dioxide, methane, and carbon monoxide derived from airborne measurements around Greater London: A case study during summer

- 2012 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. V. 119, N 8. P. 4940–4952. DOI: 10.1002/2013JD021269.
28. *Foken T.* Micrometeorology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 320 p.
 29. *Viterbo P., Beljaars A., Mahfouf J.-F., Teixeira J.* The representation of soil moisture freezing and its impact on the stable boundary layer // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1999. V. 125, N 559. P. 2401–2426.
 30. *Wang X., Wang C., Bond-Lamberty B.* Quantifying and reducing the differences in forest CO₂-fluxes estimated by eddy covariance, biometric and chamber methods: A global synthesis // Agric. Forest Meteorol. 2017. V. 247. P. 93–103. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.07.023.
 31. *Wang K., Liu C., Zheng X., Pihlatie M., Li B., Haapanala S., Vesala T., Liu H., Wang Y., Liu G., Hu F.* Comparison between eddy covariance and automatic chamber techniques for measuring net ecosystem exchange of carbon dioxide in cotton and wheat fields // Biogeosci. 2013. V. 10, N 11. P. 6865–6877. DOI: 10.5194/bgd-10-8467-2013.
 32. *Almand-Hunter B.B., Walker J.T., Masson N.P., Hafford L., Hammigan M.P.* Development and validation of inexpensive, automated, dynamic flux chambers // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8, N 1. P. 267–280. DOI: 10.5194/amt-8-267-2015.
 33. *You Y., Staebler R.M., Moussa S.G., Beck J., Mittermeier R.L.* Methane emissions from an oil sands tailings pond: a quantitative comparison of fluxes derived by different methods // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14, N 3. P. 1879–1892. DOI: 10.5194/amt-14-1879-2021.
 34. *Gioli B., Miglietta F., De Martino B., Hutjes R.W.A., Dolman H.A.J., Lindroth A., Schumacher M., Sanz M.J., Manca G., Peressotti A., Dumas E.J.* Comparison between tower and aircraft-based eddy covariance fluxes in five European regions // Agric. Forest Meteorol. 2004. V. 127, N 1. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.08.004.
 35. *Hannun R.A., Wolfe G.M., Kawa S.R., Hanisco T.F., Newman P.A., Alfieri J.G., Barrick J., Clark K.L., DiGangi J.P., Diskin G.S., King J., Kustas W.P., Mitra B., Noormets A., Nowak J.B., Thornhill K.L., Vargas R.* Spatial heterogeneity in CO₂, CH₄, and energy fluxes: Insights from airborne eddy covariance measurements over the Mid-Atlantic region // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15, N 3. P. 035008. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7391.

P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, V.E. Artyasov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, G.A. Iulev, A.V. Kozlov, A.V. Panov, A.S. Prokushkin, I.R. Putilin, T.M. Rasskazhikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Comparison of greenhouse gas fluxes derived from measurements carried out by means of equipment suites of the Yakovlev-40 aircraft laboratory and ZOTTO Observatory.**

The ongoing global warming leads to the need for continuous monitoring of greenhouse gas concentrations and the magnitude of their fluxes. Gas exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere is mainly measured using eddy covariance, gradient, and chamber methods. This work compares greenhouse gas fluxes measured using the airborne eddy covariance technique and by means of the gas analysis system and meteorological sensors at the ZOTTO observatory. A description of instrument suites of the aircraft laboratory and observatory is presented. The comparison results showed that CO₂ and CH₄ fluxes measured by two different methods at the same altitudes coincide in sign, are close to each other in value for carbon dioxide, and differ by up to 2 times for methane. The results are of interest to specialists who study greenhouse gas fluxes using the eddy covariance method.

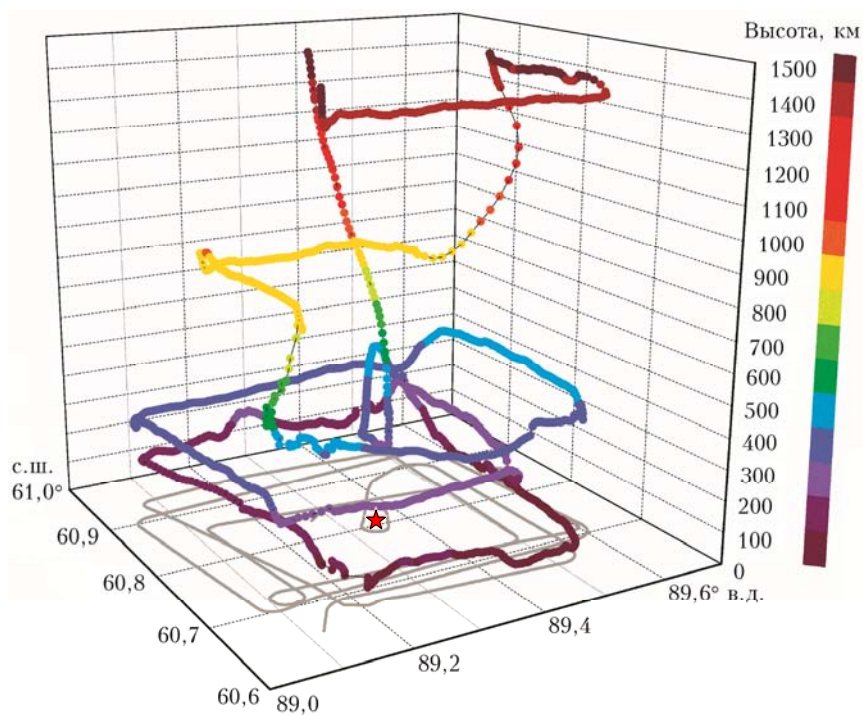


Рис. 2. Схема зондирования атмосферы в районе обсерватории «ZOTTO»; маяк обозначена звездочкой

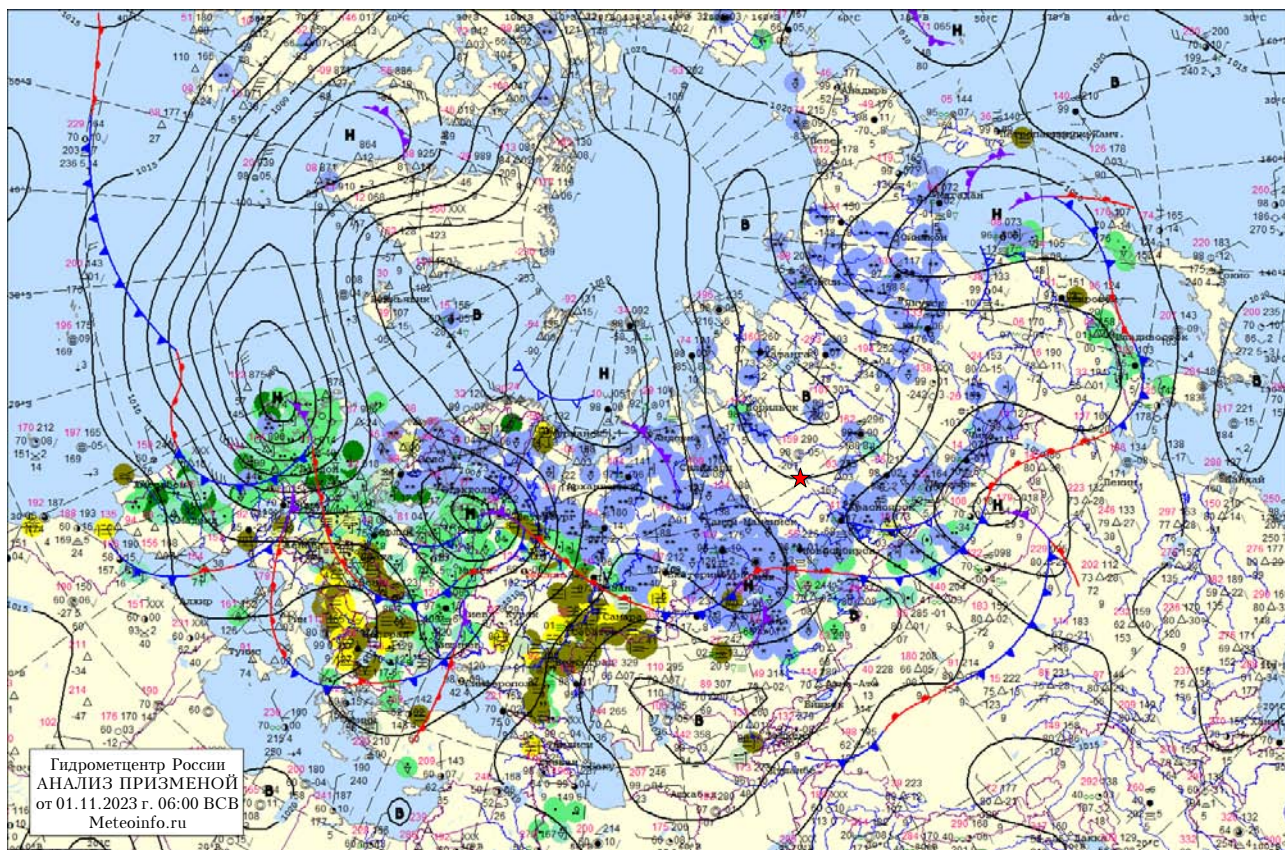


Рис. 3. Приземная карта погоды за срок 06 ВСВ (13 ч местного времени) 01.11.2023 г.; маяк обозначена звездочкой

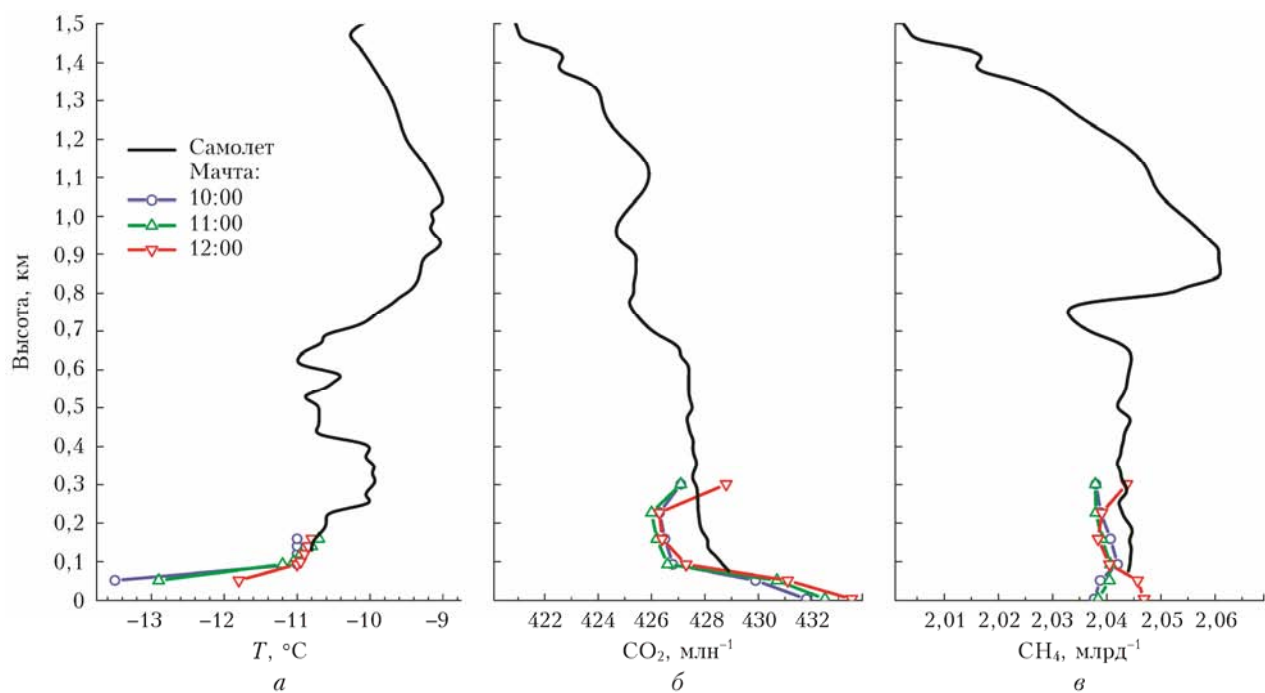


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры воздуха (а), концентраций CO_2 (б) и CH_4 (в) в районе обсерватории «ZOTTO»

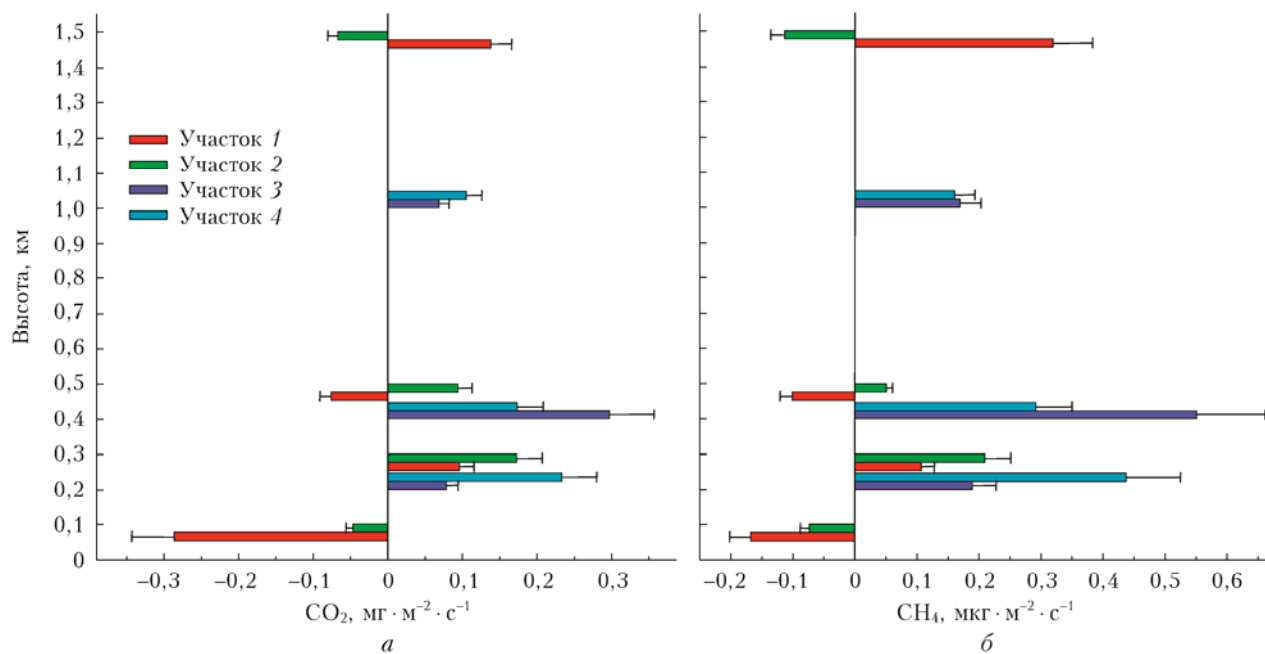


Рис. 5. Поток парниковых газов CO_2 (а) и CH_4 (б), измеренные на разных высотах в районе обсерватории «ZOTTO» с помощью бортового комплекса аппаратуры самолета-лаборатории Як-40

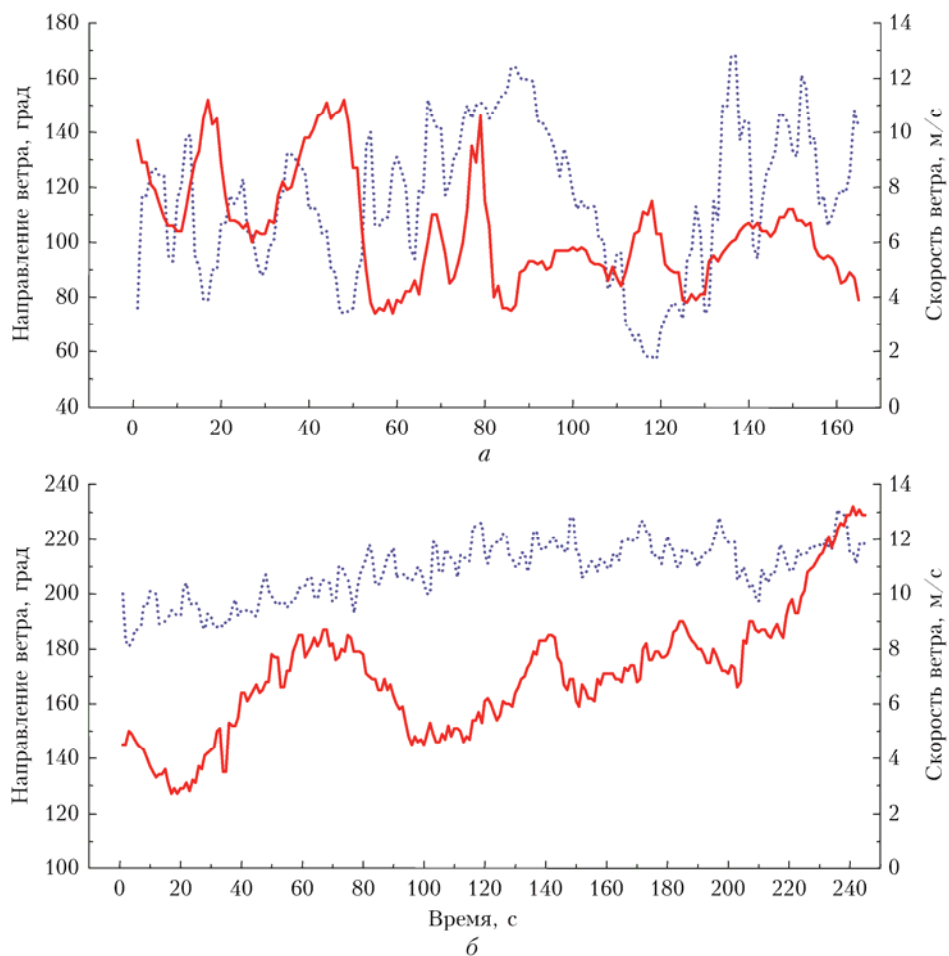


Рис. 6. Распределение скорости (сплошная кривая) и направления ветра (пунктир) на высоте 100 м: *а* — участок 1, *б* — участок 2

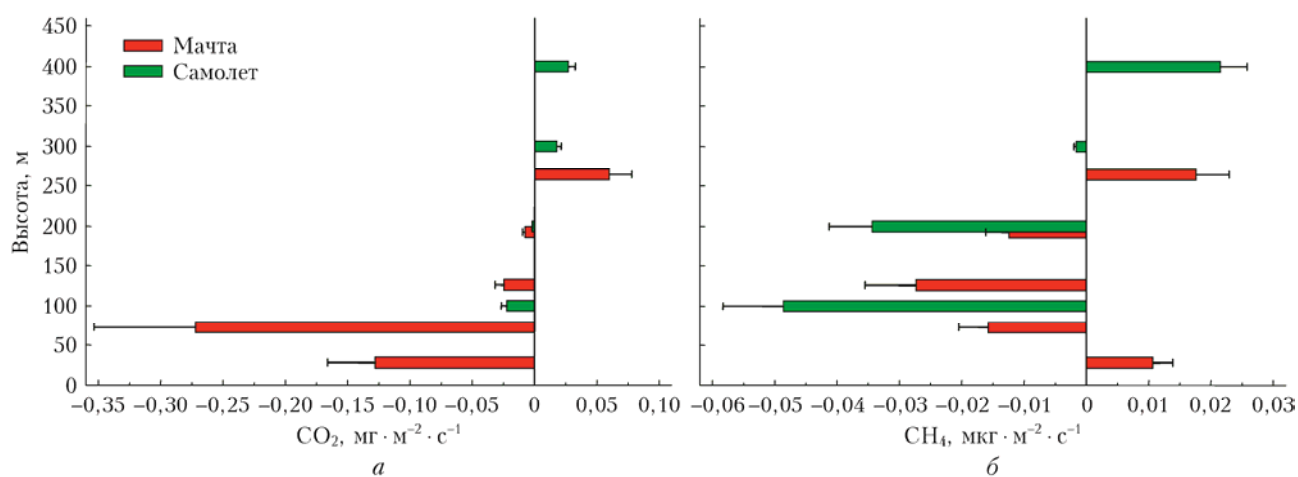


Рис. 7. Средние значения потоков CO₂ (*а*) и CH₄ (*б*) в районе обсерватории «ЗОТТО»