

## Временная изменчивость концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ и их изотопных сигнатур $\delta^{13}\text{C}$ в атмосфере зоны южной тайги Западной Сибири по данным наблюдений в обсерватории «Фоновая» в 2022–2024 гг.

М.Ю. Аршинов<sup>✉</sup>, В.Г. Аршинова, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов, А.В. Козлов\*

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

Поступила в редакцию 27.08.2025;  
после доработки 29.09.2025;  
принята к печати 30.09.2025

Для лучшего понимания текущих тенденций роста концентрации парниковых газов в региональном масштабе необходим анализ их изотопного состава с целью идентификации источников и стоков, определяющих как сезонные, так и многолетние изменения их содержания в атмосфере. Непрерывные наблюдения за  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и изотопным составом углерода их молекул, проведенные в 2022–2024 гг. в обсерватории «Фоновая», позволили определить диапазон фоновых значений и сезонную изменчивость изотопных соотношений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  в атмосфере зоны южной тайги Западной Сибири. Среднедневные (13:00–17:00 по местному времени) значения  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  варьировали в диапазонах  $-9,2\div-5,7$  и  $-51,7\div-46,5\%$  соответственно. Анализ фоновых показателей выявил в годовом ходе резкий летний минимум концентрации  $\text{CO}_2$  и максимум  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ , что указывает на интенсивное поглощение  $^{12}\text{CO}_2$  наземными экосистемами региона. Зимние значения концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  согласуются с данными других станций мониторинга парниковых газов Северного полушария. Картина сезонных вариаций содержания  $\text{CH}_4$  и значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  в атмосфере региона свидетельствует о том, что зимний максимум  $\text{CH}_4$  обусловлен антропогенным фактором, а летний — биогенной эмиссией метана с заболоченных территорий Западной Сибири. Методом построения графиков Килинга для каждого месяца были определены сигнатуры источников/стоков, влияющих на концентрацию  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в районе наблюдений. Полученные результаты могут быть использованы для анализа и интерпретации данных многолетних наблюдений за парниковыми газами в Сибирском регионе.

*Ключевые слова:* состав атмосферы, парниковые газы, концентрация, углерод, стабильные изотопы, изотопные сигнатуры, южная тайга, Западная Сибирь; atmospheric composition, greenhouse gas, concentration, carbon, stable isotope, isotopic signature, southern taiga, Western Siberia.

### Введение

Для идентификации и оценки вклада отдельных источников или стоков углекислого газа и метана принято использовать соотношения стабильных изотопов углерода ( $^{13}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}$ ) в их молекулах, поскольку каждый процесс эмиссии или разложения имеет свои собственные характерные изотопные сигнатуры ( $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ ), часто именуемые изотопными «отпечатками пальцев» [1–4]. Их значения обычно определяются с помощью отклонений молярного отношения исследуемой пробы ( $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$  или  $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ ) относительно заданного стандартного соотношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  по следующим формулам:

$$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2 = \left( \frac{\left( \frac{^{13}\text{CO}_2}{^{12}\text{CO}_2} \right)_{\text{проба}}}{\left( \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{стандарт}}} - 1 \right) \cdot 1000\text{‰},$$
$$\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = \left( \frac{\left( \frac{^{13}\text{CH}_4}{^{12}\text{CH}_4} \right)_{\text{проба}}}{\left( \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{стандарт}}} - 1 \right) \cdot 1000\text{‰},$$

где  $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{стандарт}} = 1,12372 \cdot 10^{-2}$  — международный стандарт [5], определенный по образцам белемнитидов (вымерших головоногих моллюсков), найденных в Южной Каролине (США) в районе р. Пи Ди (Pee Dee Belemnite scale, PDB-стандарт).

Относительная доля  $^{13}\text{CO}_2$  в атмосфере неуклонно снижается. До промышленной революции

\* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (argvi@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru).

$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2 \approx -6,5\%$ , а сейчас его значение уже ниже  $-8\%$ . Растительность содержит меньше  $^{13}\text{C}$ , чем атмосфера, поэтому ее  $\delta^{13}\text{C}$  ниже: от  $-29\%$  у растений преобладающего на Земле типа  $\text{C}_3$  до  $-12\%$  у растений типа  $\text{C}_4$  [6]. В ископаемом топливе изотопный отпечаток  $\delta^{13}\text{C}$  меняется в широких пределах:  $-44\%$  в природном газе,  $-24\%$  в угле и  $-35 \div -19\%$  в нефти в зависимости от ее класса [6, 7].

Таким образом, тенденция уменьшения атмосферных значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  может быть объяснена добавлением в атмосферу углекислого газа, поступающего из земной биосферы и/или от сжигания ископаемого топлива [8]. Измерения соотношения радиоактивного изотопа углерода  $\Delta^{14}\text{C}$ , инвентаризации и другие данные подтверждают, что это снижение связано с выбросами ископаемого топлива и является примером эффекта Зюсса [9].

Несколько сложнее дело обстоит с тенденциями изменений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ . Многолетние наблюдения показывают, что глобальное содержание метана в атмосфере растет с 2007 г. после периода относительной стагнации 1999–2006 гг. [10]. Примерно в это же время, когда началось увеличение концентрации метана, значение  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  начало снижаться [10] после двух столетий роста [11]. Пока не ясно, связано ли это частично с увеличением выбросов природных водно-болотных угодий в результате климатической обратной связи [10]. Согласно анализу [12] повышение содержания  $\text{CH}_4$  в атмосфере и связанное с ним снижение уровней  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  могут быть результатом комбинированного воздействия эмиссии, включая выбросы от источников ископаемого топлива, водно-болотных угодий, плантаций риса, отходов/свалок, жвачных животных, сжигания биомассы/биотоплива, и поглощения почвенными бактериями (метанотрофами), а также химических реакций с гидроксильными и хлоррадикалами.

Анализ пузырьков воздуха кернов льда показал, что несмотря на относительно стабильную концентрацию  $\text{CH}_4$  в доиндустриальную эпоху, с 0 по 1700 г.  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  претерпело существенное изменение. До 1000 г. оно незначительно колебалось около  $-47\%$ , после чего начало снижаться и к началу индустриального развития достигло  $\sim -49\%$  [11]. Историческая реконструкция источников метана, проведенная авторами [11], предполагает, что таким изменениям способствовали как естественные, так и антропогенные источники. Например, с 1000 по 1500 г. естественные климатические изменения (установление более прохладных и влажных условий) могли стать наиболее вероятной причиной уменьшения числа лесных пожаров и увеличения площади заболачивания, а с 1500 по 1700 г. региональные колебания численности населения, вероятно, стали основной причиной сокращения пирогенных выбросов [11]. Антропогенное расширение площади рисовых плантаций и развитие животноводства [13, 14] также могли способствовать росту биогенных выбросов в период с 0 по 1700 г. [11]. Так же как и для углекислого газа, источники метана имеют свои сиг-

натуры  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  [4, 15]:  $-49,5\%$  – угольные разрезы и шахты;  $-44,0\%$  – месторождения природного газа;  $-35,1\%$  – биотопливо в частном секторе;  $-26,2\%$  – лесные пожары;  $-70,0\%$  – заболоченные территории бореального пояса;  $-55,0\%$  – тропические заболоченные территории;  $-62,2\%$  – рисовые плантации;  $-65,4\%$  – жвачные животные;  $-56,0\%$  – отходы жизнедеятельности (свалки);  $-63,4\%$  – термиты; от  $-35,1$  до  $-19,9\%$  – сельскохозяйственные палы [15].

Непрерывные измерения изотопного состава углерода молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосфере на территории России проводятся крайне мало. Цель настоящей работы – определение источников и стоков углекислого газа и метана, влияющих на формирование поля концентрации этих парниковых газов в атмосфере зоны южной тайги Западной Сибири.

## Материалы и методы

Непрерывные наблюдения за изотопным составом углерода в молекулах  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  были начаты на территории обсерватории «Фоновая» ( $56^\circ 25' 07''$  с.ш.,  $84^\circ 04' 27''$  в.д.) в 2022 г. Для этого в блок газоанализа  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  измерительного комплекса обсерватории [16] был интегрирован анализатор изотопов углерода G2201-i (Picarro Inc., США), что позволило одновременно с газоанализатором G2301-m (Picarro Inc., США) измерять с высокой точностью как сами концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , так и их изотопные сигнатуры  $\delta^{13}\text{C}$  (рис. 1).

Принцип работы обоих приборов основан на методе лазерной спектроскопии внутрирезонаторного затухания (CRDS – cavity ring down spectrometer), позволяющем определять содержание малых газовых составляющих атмосферы с высокой точностью. Технические характеристики анализаторов приведены в табл. 1.

Для обеспечения точности измерений и репрезентативности получаемых данных комплекс оснащен автоматической системой калибровки с комплектом поверочных газовых смесей (ПГС) (см. рис. 1). Пробы наружного воздуха и ПГС подаются в анализаторы поочередно в течение 30 мин: во время первых 20 мин происходит продувка воздушных трактов, а в оставшиеся 10 мин – измерение с записью в базу данных среднего значения и среднеквадратического отклонения.

График подачи поверочных газовых смесей:

– ПГС № 1 (качественная) используется для ежедневного контроля качества и оценки неопределенности; подается с 00:00 до 00:30 по местному времени;

– ПГС № 2 (архивная) также служит для контроля качества на протяжении всего срока службы станции и для связи между различными калибровочными комплектами; подается дважды в месяц (в середине и в конце) с 01:00 до 01:30;

– калибровочные ПГС (для расчета поправочных коэффициентов) подаются один раз в месяц в рамках трех последовательных циклов: цикл 1 –

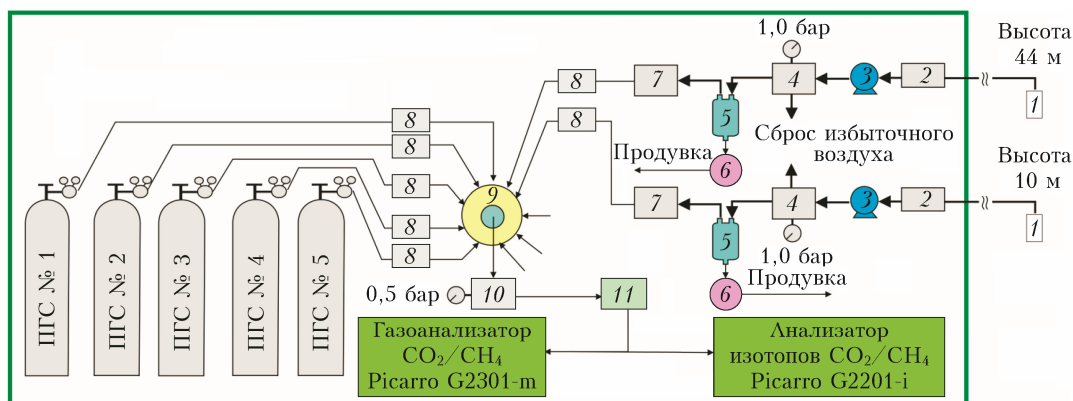


Рис. 1. Схематическая диаграмма блока газоанализа CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> измерительного комплекса обсерватории «Фоновая»: 1 – пробоотборники наружного воздуха, закрепленные на мачте на высотах 10 и 44 м; 2 – аэрозольные фильтры 15 мкм; 3 – диафрагменные насосы; 4 – регуляторы обратного давления; 5 – ловушки конденсата; 6 – электромагнитные клапаны (нормально закрытые) для периодического сброса конденсата; 7 – обратные клапаны; 8 – аэрозольные фильтры 2 мкм; 9 – десятипозиционный клапан; 10 – регулятор давления; 11 – регулятор/стабилизатор массового расхода воздуха (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.39-2026/iss.05>)

Таблица 1

**Технические характеристики анализаторов**

Газоанализатор	Измеряемый параметр	Диапазон	Неопределенность
Picarro G2301-m	CO <sub>2</sub> , млн <sup>-1</sup>	0–1000	<±0,04 млн <sup>-1</sup> *
	CH <sub>4</sub> , млн <sup>-1</sup>	0–20	<±0,0006 млн <sup>-1</sup> *
	H <sub>2</sub> O, млн <sup>-1</sup>	0–70000	<±150 млн <sup>-1</sup>
Picarro G2201-i	δ <sup>13</sup> C–CO <sub>2</sub> , ‰	–	<±0,1‰*
	δ <sup>13</sup> C–CH <sub>4</sub> , ‰	–	<±1,10‰*

\* Рассчитаны при подаче ПГС.

ПГС № 3 (с 02:00 до 02:30); ПГС № 4 (с 02:30 до 03:00), ПГС № 5 (с 03:00 до 03:30), цикл 2 – ПГС № 3 (с 03:30 до 04:00); ПГС № 4 (с 04:00 до 04:30); ПГС № 5 (с 04:30 до 05:00); цикл 3 – ПГС № 3 (с 05:00 до 05:30); ПГС № 4 (с 05:30 до 06:00); ПГС № 5 (с 06:00 до 06:30). В остальное время в анализаторы поочередно поступают пробы наружного воздуха с высот 44 и 10 м в течение 30 мин каждая.

Используемые ПГС изготовлены компанией Deuste Steiningер GmbH (ФРГ) и аттестованы по первичным стандартам Всемирной метеорологической организации (ВМО) в Лаборатории наук о климате и окружающей среде (LSCE, Франция). Концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, содержащиеся в этих смесях, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в ПГС**

ПГС	CO <sub>2</sub> , млн <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> , млрд <sup>-1</sup>
№ 1	370,91 ± 0,005	1814,35 ± 0,150
№ 2	390,33 ± 0,009	1960,99 ± 0,094
№ 3	430,87 ± 0,006	2205,01 ± 0,106
№ 4	390,52 ± 0,004	1962,69 ± 0,077
№ 5	420,89 ± 0,007	2209,63 ± 0,107

В настоящий момент поставка ПГС, сертифицированных по международным стандартам ВМО, затруднена, поэтому три резервных канала десяти-

позиционного клапана 9 (рис. 1) используются для эпизодического подключения отечественных ПГС к системе для их калибровки по ПГС № 1–3.

**Результаты и обсуждение**

Временные вариации концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, а также отклонений изотопных сигнатур их молекул от стандартных образцов (δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub> и δ<sup>13</sup>C–CH<sub>4</sub>), измеренных за период с сентября 2022 г. по сентябрь 2024 г. включительно, представлены на рис. 2. Видно, что флуктуации концентраций как CO<sub>2</sub>, так и CH<sub>4</sub> связаны с δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub> и δ<sup>13</sup>C–CH<sub>4</sub> соответственно. Наибольшие амплитуды δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub> от минимума –13,6‰ до максимума –5,2‰ наблюдались в теплый период года вследствие ночного дыхания растений и фотосинтеза соответственно. Понижение уровня δ<sup>13</sup>C–CH<sub>4</sub> относительно зимних значений происходило с июня по сентябрь включительно и было обусловлено влиянием биогенных источников метана на обширных заболоченных территориях региона, что подтверждается анализом данных, который будет приведен ниже.

Для определения фонового уровня значений, характерных для Северного полушария в период 2022–2024 гг., были использованы данные входящих в Глобальную службу атмосферы ВМО (ГСА ВМО) станций, доступные на сайте Национального управления океанических и атмосферных исследований США (НУОА, <https://gml.noaa.gov/dv/iadv/>). Поскольку δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub> и δ<sup>13</sup>C–CH<sub>4</sub> имеют естественный сезонный ход, на рис. 2 серой полосой обозначен коридор фоновых значений, определенных по данным следующих станций Северного полушария: Alert и Lac La Biche (Канада), Barrow и Poker Flat (США), Summit (Гренландия), Ny-Ålesund (Норвегия).

Для анализа многолетних тенденций и определения амплитуды сезонного хода концентраций парниковых газов и их изотопного состава принято использовать их среднедневные значения, т.е. за тот

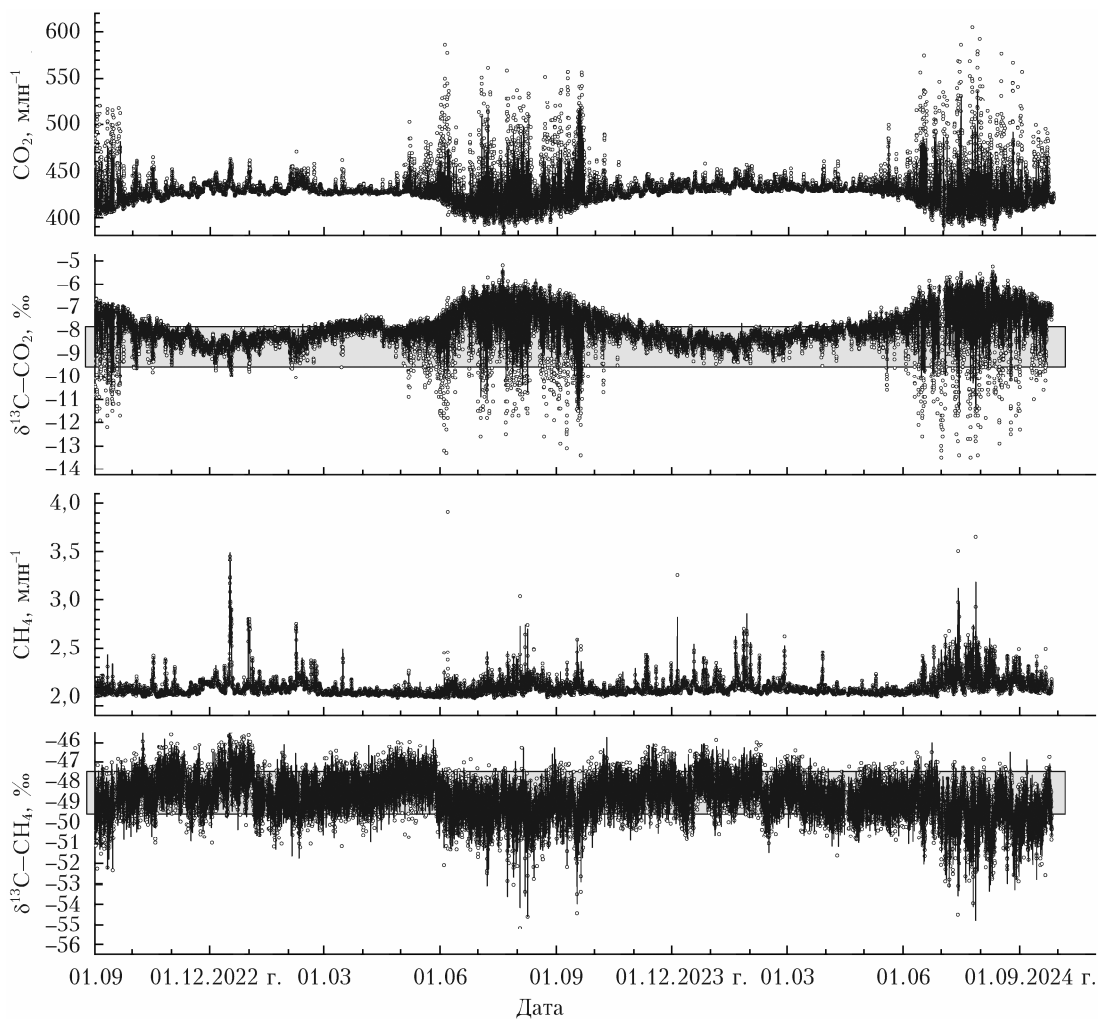


Рис. 2. Концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и значения  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ , измеренные на территории обсерватории «Фоновая» за период с сентября 2022 г. по сентябрь 2024 г. на высотах 10 (точки) и 44 м (сплошная кривая) над уровнем земли

период суток, когда атмосфера хорошо перемешана. Например, для США и Канады [17, 18] берут данные с 15:00 до 17:00 по местному времени включительно, Японии — с 13:00 до 16:00 [19], а для Западной Сибири — с 13:00 до 17:00 [20].

Согласно данным, полученным в обсерватории «Фоновая», диапазоны фоновых значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ , определенные по минимальным и максимальным среднесуточным показателям (рис. 3), значительно шире, чем приведенные выше по данным станций ГСА. Так, для нашего региона они составили  $-9,2 \div -5,7\text{‰}$  и  $-51,7 \div -46,5\text{‰}$ . Это связано с тем, что мощность биосферных источников и стоков, которые определяют региональный фон, значительно выше в южно-таежной зоне Западной Сибири, чем в прибрежных и арктических регионах, где расположены станции НУОА и ГСА ВМО, на которых измеряются  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ .

Сигнатуры источников и стоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  обычно определяют с помощью анализа связи между значениями  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ ,  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  и их концентрациями. Этот метод известен как построение графиков Килинга [21–23]. На рис. 4 приведены

графики таких связей для  $\text{CO}_2$  по данным обсерватории «Фоновая».

Из рис. 3 и 4 видно, что с декабря по апрель фоновые концентрации  $\text{CO}_2$  находились в диапазоне 425–435  $\text{млн}^{-1}$ , чему соответствовали значения  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  от  $-7,8$  до  $-9,0\text{‰}$ . Незначительное влияние местных антропогенных источников  $\text{CO}_2$  в этот период проявилось в превышении регионального фона ( $> 435 \text{млн}^{-1}$ ) и снижении  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  до  $\approx -10,0\text{‰}$ . В целом, зимние значения как концентрации  $\text{CO}_2$ , так и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  согласуются с данными других станций мониторинга парниковых газов Северного полушария. С возобновлением фотосинтеза в мае дневные концентрации  $\text{CO}_2$  начинали снижаться с  $\approx 430$  до  $\approx 400 \text{млн}^{-1}$  в июле–августе, а  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ , наоборот, поднимались с  $-9,3$  до  $-5,7\text{‰}$ .

Значения  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  отражают региональную специфику суточного чистого экосистемного обмена (Net Ecosystem Exchange, NEE), т.е. баланса между поглощением  $\text{CO}_2$  растениями и их дыханием. Отметим, что при усвоении  $\text{CO}_2$  растения предпочитают изотоп  $^{12}\text{C}$  изотопу  $^{13}\text{C}$  [24].

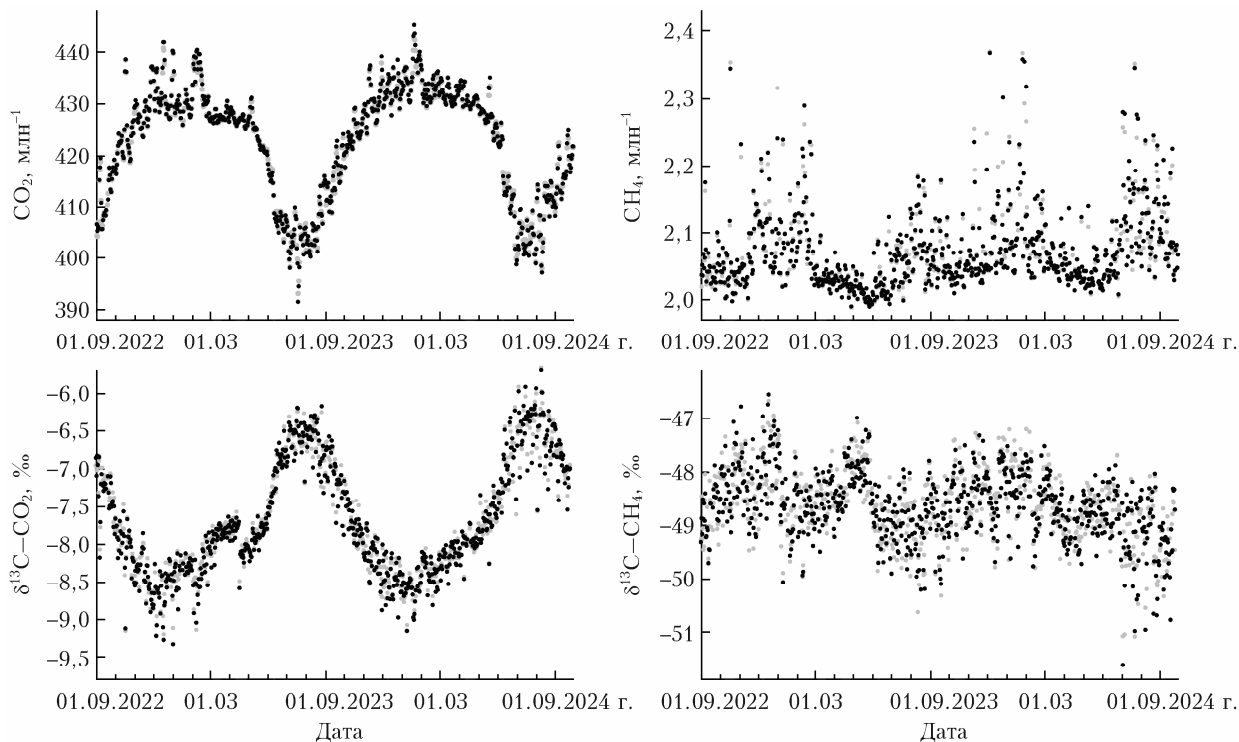


Рис. 3. Временной ход средневенных (с 13:00 до 17:00) концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ , наблюдавшихся на территории обсерватории «Фоновая» в период с сентября 2022 г. по сентябрь 2024 г. включительно, на высотах 10 (точки) и 44 м (сплошные кривые) над уровнем земли

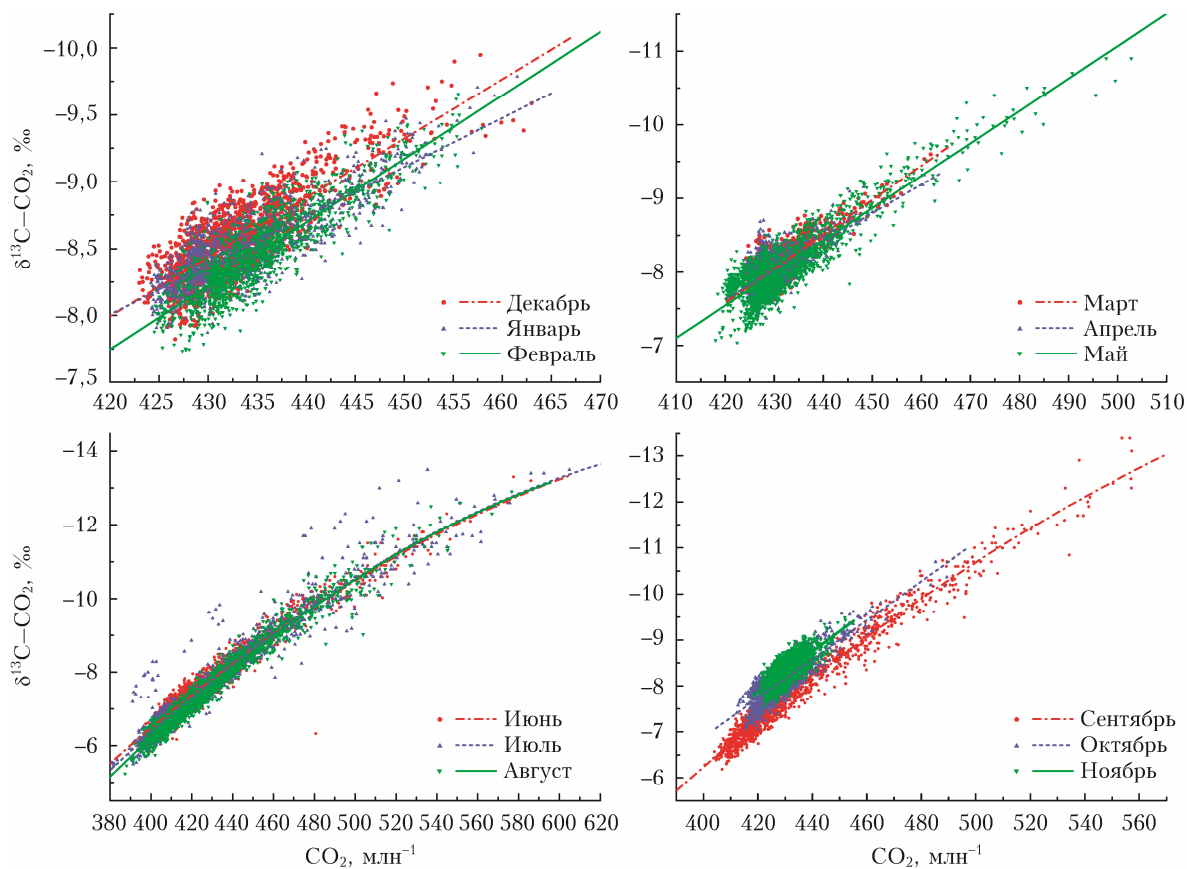


Рис. 4. Связь между значениями  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и концентрацией  $\text{CO}_2$  (график Килинга) по данным обсерватории «Фоновая» в период с сентября 2022 г. по сентябрь 2024 г. включительно

Ночное дыхание к июлю понижало  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  до  $\approx 13,5\%$ . Следует отметить, что связи между концентрацией  $\text{CO}_2$  и значениями  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  с октября по май имели линейный характер, а с июня по сентябрь были нелинейными.

Для годового хода концентрации  $\text{CH}_4$  характерно наличие двух максимумов – зимнего и летнего. Первый определяется антропогенным фактором, что подтверждается ростом значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ , а второй – преобладанием биогенной эмиссии метана с сибирских болот, приводящей к уменьшению  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  (см. рис. 3). Для более точного определения источников, вызывающих значительные отклонения концентраций  $\text{CH}_4$  от фоновых значений, применяется модифицированный график Килинга, на котором отображается связь между значениями  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  и отношением  $1/\text{CH}_4$  [22, 23]. В этом случае сигнатура источника определяется как значение аппроксимирующей функции в точке  $1/\text{CH}_4 = 0$ . На рис. 5 приведены такие зависимости для каждого месяца наблюдений на территории обсерватории «Фоновая» в 2022–2024 гг.

При построении регрессионных линий учитывались только те данные измерений с обоих уровней пробоотбора (10 и 44 м), которые существенно выходили за границы области фоновых отношений  $1/\text{CH}_4$  (рис. 5, пунктирные линии). Анализ данных, представленных на рис. 5, а также результаты

исследований [4, 25, 26] позволяют выделить следующие причины отклонений концентраций  $\text{CH}_4$  от фонового уровня в 2022–2024 гг.:

- антропогенные утечки природного газа при его добыче и транспортировке в октябре и декабре–феврале;
- адвекция воздуха из угледобывающих районов Кузбасса в марте;
- локальные мусорные свалки, приводящие к выделению метана в апреле;
- сельскохозяйственные палы в мае;
- биогенная эмиссия с болот Западной Сибири с июня по сентябрь;
- местные источники сжигания биотоплива в ноябре.

Анализ данных, полученных в обсерватории «Фоновая», выявил аномально высокую концентрацию метана в августе 2024 г. (средние значения составили  $2210,2 \pm 150,8$  млрд<sup>-1</sup>). Это совпадает с тем, что лето 2024 г. в Северном полушарии, и в Сибири в частности, было рекордно теплым (<https://meteo-info.ru/novosti/20479-zavershivsheesya-letno-v-rossii-voshlo-v-trojku-samykh-zharkikh>), за исключением ее северо-восточных районов [27]. Положительные температурные аномалии вызвали усиление биогенной эмиссии метана с заболоченных территорий, что подтверждается анализом изотопных сигнатур источников, приведенным выше.

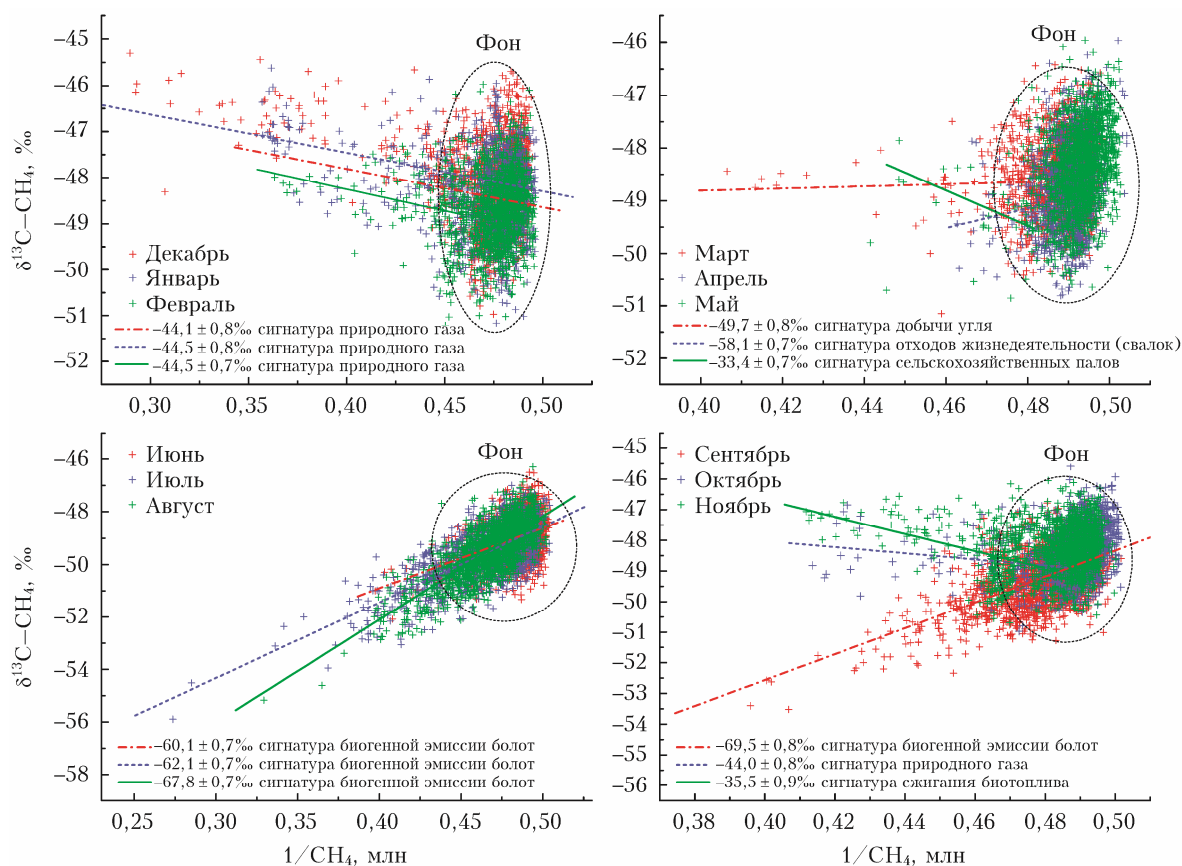


Рис. 5. Связь между значениями  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  и обратным отношением концентрации метана  $1/\text{CH}_4$  (график Килинга) по данным обсерватории «Фоновая» в период с сентября 2022 г. по сентябрь 2024 г.

## Заключение

Анализ данных непрерывных наблюдений за изотопным составом углерода в молекулах  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосфере, проведенный на территории обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН с сентября 2022 г. по сентябрь 2024 г., позволил определить региональный фон и сезонную изменчивость  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  для зоны южной тайги Западной Сибири. Для  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  характерны явно выраженный летний максимум (в июле–августе), обусловленный преобладанием поглощения растениями более легкого изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , и зимний минимум (в январе–феврале). Сезонная динамика значений  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  демонстрирует менее четкие сезонные колебания, с широким максимумом в холодный период года (с ноября по май) и резким минимумом в конце лета и начале осени.

Фоновые значения  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  и  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ , определенные по среднедневным показателям (с 13:00 до 17:00), варьировали в диапазонах  $-9,2\div-5,7\text{‰}$  и  $-51,7\div-46,5\text{‰}$  соответственно. Методом построения графиков Килинга для каждого месяца были определены сигнатуры источников и стоков, влияющих на изменения концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в районе наблюдений.

Превышения фонового уровня концентрации  $\text{CO}_2$ , характерного для холодного периода (с декабря по апрель), были вызваны эпизодическим влиянием местных антропогенных источников, что приводило к падению  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  с  $6-9\text{‰}$  (фон) до  $-10\text{‰}$ . Летом содержание атмосферного  $\text{CO}_2$  снижалось до  $\approx 400 \text{ млн}^{-1}$  в июле–августе, а  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ , наоборот, повышалось до  $-5,7\text{‰}$ , что соответствует региональной сигнатуре дневного чистого экосистемного обмена. Это объясняется дискриминацией изотопа  $^{13}\text{C}$  растениями во время фотосинтеза. Связь между концентрацией  $\text{CO}_2$  и значением  $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$  с октября по май имела линейный характер, а с июня по сентябрь – нелинейный.

Эпизодические отклонения концентраций  $\text{CH}_4$  от фонового уровня с октября по май были вызваны влиянием таких антропогенных источников, как утечки природного газа при его добыче и транспортировке, адвекция воздуха из угледобывающих районов Кузбасса, локальные мусорные свалки и местные источники сжигания биотоплива. С июня по сентябрь доминирующее влияние на изменение концентрации атмосферного метана оказывала биогенная эмиссия с обширных заболоченных территорий Западной Сибири.

Для выявления тенденций усиления или ослабления роли природных и антропогенных источников в изменениях концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосфере исследуемого района необходимы дальнейшие многолетние ( $> 10$  лет) непрерывные наблюдения за их изотопным составом.

**Финансирование.** Измерения концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и их изотопных сигнатур  $\delta^{13}\text{C}$  выполнялись в интересах проекта «Российская система климатического мониторинга» (ВИП ГЗ). Обработка данных проводилась в рамках госзадания ИОА СО РАН.

## Список литературы

1. Ciais P., Tans P.P., Trolier M., White J.W.C., Francey R.J. A large Northern Hemisphere terrestrial  $\text{CO}_2$  sink indicated by the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of atmospheric  $\text{CO}_2$  // *Science*. 1995. V. 269, N 5227. P. 1098–1102. DOI: 10.1126/science.269.5227.1098.
2. Miller J.B., Tans P.P., White J.W.C., Conway T.J., Vaughn B.W. The atmospheric signal of terrestrial carbon isotopic discrimination and its implication for partitioning carbon fluxes // *Tellus. B: Chem. Phys. Meteorol.* 2003. V. 55, N 2. P. 197–206. DOI: 10.1034/j.1600-0889.2003.00019.x.
3. Sherwood O.A., Schwietzke S., Arling V.A., Etiope G. Global inventory of gas geochemistry data from fossil fuel, microbial and burning sources, version 2017 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2017. V. 9, N 2. P. 639–656. DOI: 10.5194/essd-9-639-2017.
4. Fujita R., Morimoto S., Maksyutov S., Kim H.-S., Arshinov M., Brailsford G., Aoki S., Nakazawa T. Global and regional  $\text{CH}_4$  emissions for 1995–2013 derived from atmospheric  $\text{CH}_4$ ,  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ , and  $\delta\text{D}-\text{CH}_4$  observations and a chemical transport model // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020. V. 125, N 14. DOI: 10.1029/2020JD032903.
5. Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1957. V. 12, N 1–2. P. 133–149. DOI: 10.1016/0016-7037(57)90024-8.
6. Graven H., Keeling R.F., Rogelj J. Changes to carbon isotopes in atmospheric  $\text{CO}_2$  over the industrial era and into the future // *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2020. V. 34, N 11. DOI: 10.1029/2019GB006170.
7. Andres R.J., Marland G., Boden T., Bischof S. Carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement manufacture, 1751–1991, and an estimate of their isotopic composition and latitudinal distribution // *The Carbon Cycle* / T.M. Wigley, D.S. Schimel (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2000. P. 53–62.
8. Keeling R.F., Graven H.D., Welp L.R., Resplandy L., Bi J., Piper S.C., Sun Y., Bollenbacher A., Meijer H.A.J. Atmospheric evidence for a global secular increase in carbon isotopic discrimination of land photosynthesis // *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. V. 114, N 39. P. 10361–10366. DOI: 10.1073/pnas.1619240114.
9. Keeling C.D. The Suess effect:  $^{13}\text{C}$ Carbon– $^{14}\text{C}$ Carbon interrelations // *Environ. Int.* 1979. V. 2, N 4–6. P. 229–300. DOI: 10.1016/0160-4120(79)90005-9.
10. Бюллетень № 19 ВМО по парниковым газам: «Содержание парниковых газов в атмосфере по данным глобальных наблюдений в 2023 году». Женева: ВМО, 2024. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/69057> (дата обращения: 27.07.2025).
11. Ferretti D.F., Miller J.B., White J.W.C., Etheridge D.M., Lassey K.R., Lowe D.C., MacFarling Meure C.M., Dreier M.F., Trudinger C.M., van Ommen T.D., Langenfelds R.L. Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years // *Science*. 2005. V. 309, N 5741. P. 1714–1717. DOI: 10.1126/science.1115193.
12. Lan X., Basu S., Schwietzke S., Bruhwiler L.M.P., Dlugokencky E.J., Michel S.E., Sherwood O.A., Tans P.P., Thoning K., Etiope G., Zhuang Q., Liu L., Oh Y., Miller J.B., Pétron G., Vaughn B.H., Crippa M. Improved constraints on global methane emissions and sinks using  $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$  // *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2021. V. 35, N 6. DOI: 10.1029/2021GB007000.
13. Subak S. Methane from the House of Tudor and the Ming Dynasty: Anthropogenic emissions in the sixteenth

- century // *Chemosphere*. 1994. V. 29, N 5. P. 843–854. DOI: 10.1016/0045-6535(94)90157-0.
14. *Ruddiman W.F.* The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago // *Clim. Change*. 2003. V. 61, N 3. P. 261–293. DOI: 10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.fa.
  15. *Yamada K., Ozaki Y., Nakagawa F., Sudo S., Tsuruta H., Yoshida N.* Hydrogen and carbon isotopic measurements of methane from agricultural combustion: Implications for isotopic signatures of global biomass burning sources // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2006. V. 111, N 16. D16306. DOI: 10.1029/2005JD006750.
  16. *Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Y., Belan B.D., Balin Y.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Petunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M.* Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: Current status and future needs // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. DOI: 10.1117/12.2504388.
  17. *Bakwin P.S., Tans P.S., Zhao C., Ussler III W., Quesnell E.* Measurements of carbon dioxide on a very tall tower // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 1995. V. 47, N 5. P. 535–549. DOI: 10.3402/tellusb.v47i5.16070.
  18. *Higuchi K., Worthy D., Chan D., Shashkov A.* Regional source/sink impact on the diurnal, seasonal and inter-annual variations in atmospheric CO<sub>2</sub> at a boreal forest site in Canada // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2003. V. 55, N 2. P. 115–125. DOI: 10.3402/tellusb.v55i2.16752.
  19. *Inoue H.Y., Matsueda H.* Measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> from a meteorological tower in Tsukuba, Japan // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2001. V. 53, N 3. P. 205–219. DOI: 10.3402/tellusb.v53i3.16592.
  20. *Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O.* Aircraft and tower measurements of CO<sub>2</sub> concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118, N 16. P. 9489–9498. DOI: 10.1002/jgrd.50755.
  21. *Keeling C.D.* The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1958. V. 13, N 4. P. 322–334. DOI: 10.1016/0016-7037(58)90033-4.
  22. *Fisher R.E., France J.L., Lowry D., Lanoisellé M., Brownlow R., Pyle J.A., Cain M., Warwick N., Skiba U.M., Drewer J., Dinsmore K.J., Leeson S.R., Bauguitte S.J.-B., Wellpott A., O’Shea S.J., Allen G., Gallagher M.W., Pitt J., Percival C.J., Bower K., George C., Hayman G.D., Aalto T., Lohila A., Aurela M., Laurila T., Crill P.M., McCalley C.K., Nisbet E.G.* Measurement of the <sup>13</sup>C isotopic signature of methane emissions from northern European wetlands // *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2017. V. 31, N 3. P. 605–623. DOI: 10.1002/2016GB005504.
  23. *Sriskanharajah S., Fisher R.E., Lowry D., Aalto T., Hatakka J., Aurela M., Lurila T., Lohila A., Kuitunen E., Nisbet E.G.* Stable carbon isotope signatures of methane from a Finnish subarctic wetland // *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2012. V. 64, N 1. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.18818.
  24. *Lloyd J., Farquhar G.D.* <sup>13</sup>C discrimination during CO<sub>2</sub> assimilation by the terrestrial biosphere // *Oecologia*. 1994. V. 99. N 3, 4. P. 201–215. DOI: 10.1007/BF00627732.
  25. *Yamada K., Yoshida N., Nakagawa F., Inoue G.* Source evaluation of atmospheric methane over Western Siberia using double stable isotopic signatures // *Organic Geochem.* 2005. V. 36, N 5. P. 717–726. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2005.01.016.
  26. *Umezawa T., Machida T., Aoki S., Nakazawa T.* Contributions of natural and anthropogenic sources to atmospheric methane variations over western Siberia estimated from its carbon and hydrogen isotopes // *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2012. V. 26, N 4. P. GB4009. DOI: 10.1029/2011GB004232.
  27. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Росгидромет, 2025. 104 с. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/39990/>.

*M.Yu. Arshinov, V.G. Arshinova, B.D. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov.* **Temporal variability of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations and their δ<sup>13</sup>C isotopic signatures in the atmosphere of the southern taiga zone of Western Siberia derived from observations at the Fonovaya observatory in 2022–2024.**

To better understand the current trends in the growth of greenhouse gas concentrations on a regional scale, it is necessary to analyze their isotopic composition in order to identify their sources and sinks, which determine both seasonal and long-term changes in their atmospheric content. Continuous observations of atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> and the carbon isotope composition of their molecules carried out in 2022–2024 at the Fonovaya observatory enabled the range of background values and seasonal pattern of δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C–CH<sub>4</sub> in the atmosphere of the southern taiga zone of Western Siberia to be determined. The average daytime (01–05 pm) values of δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C–CH<sub>4</sub> varied in the ranges –9.2 to –5.7‰ and –51.7 to –46.5‰, respectively. The analysis of background values revealed a sharp summer minimum in CO<sub>2</sub> concentration and, conversely, a maximum in δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub>, indicating intensive uptake of <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> by the regional terrestrial ecosystems. Winter values of both CO<sub>2</sub> concentration and δ<sup>13</sup>C–CO<sub>2</sub> are consistent with data from other greenhouse gas monitoring stations in the Northern Hemisphere. The pattern of seasonal variations in atmospheric CH<sub>4</sub> mixing ratios and δ<sup>13</sup>C–CH<sub>4</sub> values in the region under study indicates that the winter maximum in CH<sub>4</sub> content is driven by anthropogenic factors, while the summer maximum, by the predominance of biogenic methane emissions from Western Siberian wetlands. Using the Keeling plot method, source/sink signatures influencing changes in atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations in the area under study were determined for each month of the year. The results can be used when analyzing and interpreting long-term observations of greenhouse gases in Siberia.