

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.41

Потоки парниковых газов на границе «почва – атмосфера» в фоновом районе Томской области

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан[✉], Д.К. Давыдов,
А.В. Козлов, А.В. Фофонов*

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

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.;
после доработки 7.11.2022 г.;
принята к печати 8.11.2022 г.

Исследуется динамика потоков парниковых газов, которые измерялись с 2017 по 2021 г. в обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН (п. Киреевск, Томская обл.). Показано, что среднегодовые потоки CO_2 в обсерватории изменялись от -283 (сток) до $+31 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (эмиссия). Суточная минимальная эмиссия $1351 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ фиксировалась в 2019 г., максимальная $-1789 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ – в 2021 г. Наименьший за все время наблюдения сток был в 2017 г. и составлял $2099 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Наибольший, равный $2304 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, зарегистрирован в 2018 г. Среднегодовые потоки метана находились в диапазоне от $-0,032$ в 2018 г. до $-0,047 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в 2020 г. Суточная максимальная эмиссия метана фиксировалась в 2018 г. ($0,915 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), а минимальная в 2021 г. ($0,095 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). При этом максимальный сток варьировал от года к году в диапазоне: от $-0,241$ до $-0,361 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Почва района измерений оказалась слабым источником N_2O и сильным CO_2 и CH_4 . Среднегодовые потоки N_2O находились в пределах $0,007$ – $0,011 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Мало менялись и межгодовые максимальные эмиссии (от $0,237$ до $0,301 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) и стоки (от $-0,206$ до $-0,245 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$).

Ключевые слова: атмосфера, воздух, диоксид азота, диоксид серы, диоксид углерода, метан, озон, оксид азота, оксид углерода, поток; atmosphere, air, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon dioxide, methane, ozone, nitrogen oxide, carbon monoxide, flux.

Введение

Глобальное изменение климата, несмотря на предпринимаемые международным сообществом меры по сокращению вызывающих его факторов, продолжается [1, 2]. Основной причиной этого процесса по-прежнему является рост концентрации парниковых газов вследствие антропогенной деятельности [3]. Следовательно, для более надежного прогнозирования климата необходимы максимально точные данные о распределении концентрации таких газов и тенденциях их изменения как в целом по земному шару, так и в отдельных регионах. Для мониторинга содержания парниковых газов Всемирной метеорологической организацией была создана Глобальная служба атмосферы [4], в ряде государств запущены свои национальные системы контроля [5–7], а также развиваются региональные сети, объединяющие несколько государств [8–11].

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

Созданные за рубежом сети станций мониторинга парниковых газов насчитывают сотни автоматических постов и несколько десятков станций, осуществляющих комплексные измерения. Они дают обширную информацию, позволяющую следить за распределением концентрации парниковых газов и тенденцией их изменения по всему земному шару. Территория России в этом плане оказывается «белым пятном» при численном моделировании изменений климата, поскольку измерения если и ведутся, то в отдельных местах силами немногочисленных энтузиастов, что явно не достаточно для такой обширной территории. Довольно полный перечень работ, выполненных по данной тематике, приведен в [12]. Это позволяет не останавливаться на этом вопросе подробно. Можно также отметить пока и единственную по этой теме монографию [13]. Можно ожидать, что вышедшее в 2022 г. распоряжение Правительства «О создании единой системы мониторинга парниковых газов на территории России» кардинально изменит сложившуюся ситуацию.

Важной особенностью мониторинга парниковых газов является разделение природных (естественных) и антропогенных источников, что позволяет определить вклад каждого из них в общее содержание

климатически важных компонентов атмосферы [14]. Для оценки мощности эмиссии или стока в естественных условиях измерения проводятся в удаленных (фоновых) районах, где отсутствует любая человеческая деятельность [15]. Чаще всего измерения проводятся методами вихревой ковариации (eddy covariance), градиентным или камерным методами [16, 17]. Метод вихревой ковариации считается самым точным и рассматривается в качестве эталонного при сравнении измерений [18, 19], хотя его нельзя отнести к абсолютным. В работе [20] показано, что он на 25% завышает чистую первичную продуктивность лесной экосистемы и на 10% занижает ее дыхание. Далее будут использоваться данные о потоках парниковых газов, полученные методом статических камер. Сопоставление этих данных с результатами метода вихревой ковариации, проведенное в [21], выявило, что на хлопковом поле соотношение потоков было 0,94, а на пшеничном — 1,00. Подобное исследование, выполненное в [22], в котором исследовалось осаждение озона, углекислого газа и оксидов азота, показало, что различия в величине потоков составляли 4–10%.

Настоящая работа посвящена исследованию потоков парниковых газов CO_2 , CH_4 и N_2O в одном из фоновых районов Томской обл.

1. Район и методы измерений

Потоки парниковых газов измерялись на участке с луговой экосистемой на территории обсерватории «Фоновая», расположенной на восточном берегу р. Оби, в 60 км к западу от г. Томска (56°25'07" с.ш., 84°04'27" в.д.; 80 м н.у.м.). Обсерватория окружена лесом, характерными для лесов южной тайги Западной Сибири. Крупные промышленные объекты вблизи обсерватории отсутствуют. Весь измерительный комплекс обсерватории описан в [23].

Для измерения потоков парниковых газов между почвой и атмосферой в течение вегетационного сезона использовался комплекс, состоящий из газоанализатора $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Picarro G2508 и автоматической системы статических камер, разработанных в ИАО СО РАН [24]. Анализатор G2508 работает в режиме рециркуляции с применением вакуумного насоса Picarro A0702. Непрозрачная камера измеряет дыхание экосистемы, а прозрачная — нетто экосистемного обмена, что позволяет определять валовую первичную продуктивность. Камеры объемом 0,324 м³ открываются и закрываются с помощью автоматической пневматической системы управления в соответствии со следующим графиком: 1) одна камера закрыта (5 мин), другая открыта (5 мин); 2) затем наоборот (5 мин); 3) обе камеры открыты (10 мин) на проветривание с целью нормализации условий естественного состояния экосистемы и т.д. (всего три цикла в час).

Мониторинг парниковых газов был начат в 2016 г. и продолжается в настоящее время. Измерения начинаются после схода снега (апрель) и за-

канчиваются в октябре, когда наступают заморозки. Постоянно контролируются потоки CO_2 , CH_4 и N_2O . В настоящей работе приводятся результаты за 2017–2021 гг., для которых имеются данные о полном вегетационном цикле.

2. Результаты измерений

2.1. Суточный ход

Одним из основных природных циклов является суточный, который определяется приходом солнечной радиации. В течение суток изменяется характер взаимодействия «подстилающая поверхность — атмосфера» и, как следствие, может поменяться и направление потоков газов. Важно также и расположение их источника. Например, источником водяного пара является испарение с подстилающей поверхности, а озон образуется в вышерасположенных слоях тропосферы или переносится из стратосферы.

На рис. 1 (цв. вкладка) приведен среднегодовой суточный ход потоков CO_2 , CH_4 и N_2O , а также их осредненный ход за пять лет (2017–2021 гг.). Поскольку основным стоком углекислого газа из атмосферы на континенте является поглощение его растительностью в результате фотосинтеза [25, 26], здесь также показан суточный ход притока солнечной радиации (рис. 1, з).

Из рис. 1, а видно, что потоки CO_2 изменяются в районе проведения измерений в течение суток. В дневное время с 07:00 до 19:00 происходит сток углекислого газа из атмосферы в результате фотосинтеза. Ночью сток прекращается и начинается возврат диоксида углерода в атмосферу за счет дыхания луговой растительности. На рис. 1, а обращает на себя внимание также межгодовое различие в дневных и ночных потоках. Значения ночных потоков находятся в пределах 450–550 мг · м⁻² · ч⁻¹ и мало меняются год от года. Полуденные потоки CO_2 могут варьировать от –600 мг · м⁻² · ч⁻¹ (2021 г.) до –1200 мг · м⁻² · ч⁻¹ (2019 г). Переход от положительного знака к отрицательному в среднем происходит около 07:00 по местному времени, а от отрицательного к положительному — 19:00. Из рис. 1, д следует, что эмиссия CO_2 начинает превышать сток и наоборот при переходе интенсивности суммарной солнечной радиации через порог около 100 Вт · м⁻². Следует также обратить внимание и на относительное изменение потоков CO_2 в полдень (до двух раз), и на динамику притока солнечной энергии, изменяющуюся от года к году не более чем на 20%. Это, по-видимому, подтверждает вывод об особенностях фотосинтеза в конкретном месте проведения измерений даже при других равных условиях [27].

Потоки метана в течение всех суток направлены из атмосферы в почву (рис. 1, б). Изменение их интенсивности мало зависит от времени дня или ночи. Можно, правда, отметить небольшие уменьшения интенсивности в переходные периоды: утром и вечером. В 2018, 2019 и 2021 гг. величина стока метана из атмосферы была сильнее днем, а в 2017 и 2020 гг.

потоки были больше ночью. Величина потоков в течение суток изменялась от $-0,028$ до $-0,048$ $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Потоки N_2O , в отличие от CO_2 и CH_4 , в обсерватории «Фоновая» в течение почти всех суток были положительными, хотя и не очень значительными (рис. 1, *в*). Это говорит о том, что луговая экосистема на данной территории скорее является источником N_2O . Величина потоков изменялась от $-0,005$ (ночью) до $+0,024$ $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Они имеют достаточно хорошо выраженный, хотя и флуктуирующий, суточный ход. Максимум потока наблюдается в послеполуденное время, минимум – в середине ночи. После полудня происходит даже слабый сток N_2O из атмосферы в почву. Следует также отметить и небольшую межгодовую изменчивость потоков закиси азота.

2.2. Сезонный ход

Кроме вышерассмотренного суточного цикла, в природных процессах хорошо видны сезонные и годовые ритмы. Проявляются они и в потоках газовых примесей между атмосферой и подстилающей поверхностью (рис. 2, *цв. вкладка*).

Из рис. 2, *а* видно, что потоки CO_2 в 2017–2021 гг. вели себя очень неоднозначно. В мае начался процесс поглощения углекислого газа, который усиливался в июне-июле. Затем на фоне накопления биомассы вегетационная активность ослабевала, а дыхание усиливалось. Сток диоксида углерода продолжался, но значительно слабее. Такая картина наблюдалась в 2017–2019 гг. Всплеск поглощения в июле 2017 г. был связан с покосом травы в камере измерительного комплекса, что подтвердилось вышесказанное. В 2020 и 2021 гг. сезонный ход потоков CO_2 кардинально изменился. В первой фазе вегетационного цикла фиксировался сток углекислого газа, а начиная с июля среднесуточные потоки стали положительными и оставались такими до конца сезона. Если обратиться к данным о притоке солнечной радиации и температуре воздуха (рис. 2, *г, е*), то можно увидеть, что кардинальных изменений в их значениях, по сравнению с предыдущими годами, с июля по октябрь не наблюдалось. На возможных причинах такого поведения потоков CO_2 остановимся ниже.

Потоки метана в течение всего теплого сезона имеют отрицательное значение, что указывает на сток этого газа из атмосферы на обсерватории «Фоновая». Минимальный сток наблюдается в мае, максимальный – в июле-августе. Возможно, такой сезонный ход связан с деятельностью микроорганизмов в почве, которые реагируют на температуру верхнего ее слоя. Обращает на себя внимание также и подобие характера кривых сезонных потоков метана и давления воздуха (рис. 2, *б, д*).

Потоки N_2O почти весь вегетационный период остаются положительными (рис. 2, *в*). Исключение бывает только в отдельные годы в сентябре-октябре. Скорость изменения потоков закиси азота была пропорциональна температуре воздуха (рис. 2, *е*). Как показано в [28], N_2O образуются в почве

в значительных количествах в результате цикла преобразований азотсодержащих органических соединений.

На скорость эмиссии оказывают влияние климатические факторы, такие как температура и влажность воздуха, а также почвы [29–31], поэтому схожесть кривых потоков N_2O и температуры воздуха не случайна.

В течение теплого сезона заметно изменяется и суточный ход потоков парниковых газов (рис. 3, *цв. вкладка*). Для CO_2 это отражается в амплитуде колебаний (рис. 3, *а*). Она максимальна в июне и минимальна в октябре. В потоках CH_4 сезонность проявляется в изменении их величины при почти нейтральном суточном ходе (рис. 3, *б*). Минимальный сток фиксируется в мае, а максимальный – в июле-августе. Для N_2O от месяца к месяцу наблюдаются вариации поведения самих потоков. В июле-августе отмечается максимальная амплитуда, а в сентябре-октябре – почти нейтральный ход.

2.3. Межгодовая изменчивость

Изменение потоков парниковых газов в течение пяти лет рассмотрим по средним за вегетационный сезон данным, которые представлены на рис. 4. Видно, что ни один из трех анализируемых газов не имеет однозначной тенденции изменения потоков на границе «почва – атмосфера». Так, поглощение CO_2 вначале усиливалось до -283 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в 2019 г., а затем начало уменьшаться и в 2021 г. результирующий поток стал уже положительным (рис. 4, *а*), т.е. интегрально сток сменился на эмиссию. Поток метана направлен в почву (рис. 4, *б*). Наименьший поток наблюдался в 2018 г., а наибольший – в 2020 г. Характер изменения потоков метана прямо противоположен тенденции изменения температуры воздуха (рис. 4, *г*). Совершенно по-иному ведут себя потоки N_2O . Из рис. 4, *в* видно, что эмиссия этого газа была минимальной в 2021 г., а максимальной – в 2019 г. И это совершенно не коррелирует с другими параметрами окружающей среды. Поскольку обмен газами между подстилающей поверхностью и атмосферой – процесс многопараметрический, то на коротком отрезке времени трудно ожидать однозначных результатов.

Основные параметры потоков парниковых газов за 2017–2021 гг. на обсерватории «Фоновая» обобщены в таблице.

Из данных таблицы следует, что средние за вегетационный период потоки CO_2 в обсерватории изменялись от -283 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (сток) в 2019 г. до $+31$ $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (эмиссия) в 2021 г. Минимальная эмиссия 1351 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ фиксировалась также в 2019 г., как и максимальная – 1789 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в 2021 г. Наименьший сток наблюдался в 2017 г. и составлял 2099 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$; наибольший (2304 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) – в 2018 г. Таким образом, среднесезонные потоки за 5 лет изменились почти на порядок, в то время как максимальные (эмиссия) – на 30% и сток – на 10%.

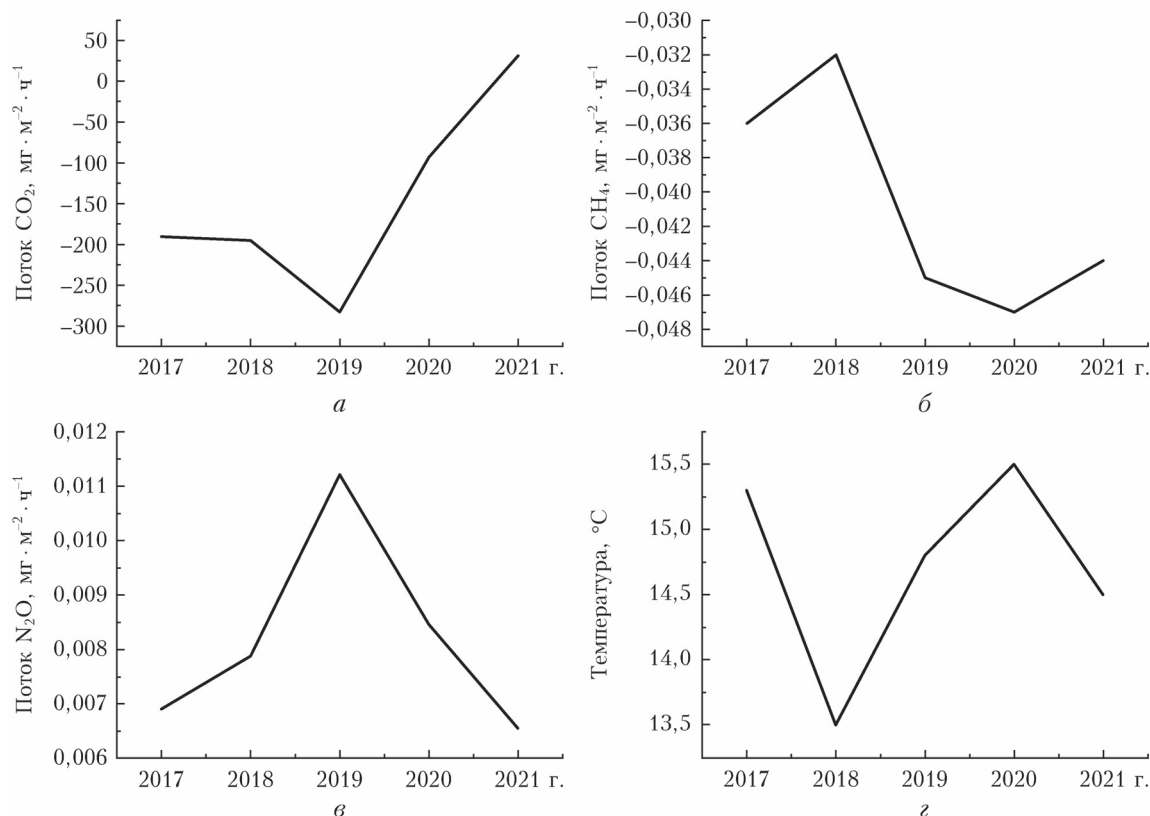


Рис. 4. Среднесезонные потоки парниковых газов (а–в) и температура воздуха (z) на участке с луговой растительностью на территории обсерватории «Фоновая»

Средние, максимальные (эмиссия) и минимальные (сток) потоки ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) парниковых газов на участке с луговой экосистемой на территории обсерватории «Фоновая» в 2017–2021 гг.

Парниковый газ	Потоки	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
CO ₂	средний	-191 ± 238	-195 ± 227	-283 ± 194	-93 ± 191	31 ± 265
	максим.	1965	1964	1351	1445	1789
	миним.	-2099	-2304	-2294	-2124	-2192
CH ₄	средний	-0,036 ± 0,01	-0,032 ± 0,008	-0,045 ± 0,008	-0,047 ± 0,008	-0,044 ± 0,011
	максим.	0,158	0,915	0,307	0,218	0,095
	миним.	-0,327	-0,284	-0,361	-0,241	-0,246
N ₂ O	средний	0,008 ± 0,058	0,008 ± 0,060	0,011 ± 0,063	0,009 ± 0,062	0,007 ± 0,063
	максим.	0,261	0,261	0,270	0,301	0,237
	миним.	-0,206	-0,214	-0,238	-0,245	-0,245

Среднесезонные потоки метана оказались менее изменчивыми. Они находились в диапазоне от -0,032 в 2018 г. до -0,047 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в 2020 г. Зато почти на порядок величины изменялась эмиссия в отдельные годы: максимальная фиксировалась в 2018 г. (0,915 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), минимальная в 2021 г. (0,095 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). При этом максимальный сток в межгодовом цикле варьировал в более узком диапазоне: от -0,241 до -0,361 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. По-видимому, эмиссия метана была связана с определенными внутригодовыми природными процессами. Этому будет посвящено отдельное исследование.

В отличие от CO₂ и CH₄ почва района измерений оказалась слабым источником N₂O. Среднегодо-

вые потоки которого находились в пределах 0,007–0,011 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Мало менялись и межгодовые максимальные эмиссии (от 0,237 до 0,301 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) и стоки (-0,206 – -0,245 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$). В этом плане обсерватория «Фоновая» оправдывает свое название.

3. Обсуждение результатов

Мониторинг потоков углекислого газа широко распространен во всем мире [5–8, 12–16]. На территории же Сибирского региона и смежных с ним областях эксперименты проводились в основном на болотных участках [32–34]. Ближе всего к нашим оценкам оказались результаты, полученные

в финском бореальном лесу в [35]. Причем совпадение очень хорошее как по величине самих потоков, так и по сезонному ходу.

Подобная же картина наблюдается и по метану. Опубликовано достаточно много результатов исследований болот или озер [36–38], но почти нет работ по лесным районам Сибири. Ранее мы выполнили сопоставление потоков CO_2 и CH_4 , измеренных в обсерватории «Фоновая» [39] и на одном из пунктов Васюганского болота [36–38]. Проведенный анализ показал, что в обоих пунктах наблюдался сток CO_2 , причем в «Фоновой» он был на порядок интенсивнее: $-4377,2$ и $-429,0 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ соответственно. Болото являлось источником метана в течение всего сезона, в то время как в обсерватории «Фоновая» в среднем наблюдался его сток.

Исследование потоков закиси азота показало, что измерения, выполненные в районах, где используются удобрения, дают очень высокие значения потоков [40–42]. В фоновых районах наоборот наблюдаются слабые эмиссии этого газа или сток [43, 44]. Величины потоков, приведенные в последних цитируемых работах, очень близки к значениям, полученным нами. Кроме того, совпадает суточный и сезонный ходы. Малые потоки N_2O в фоновых районах привели авторов работы [45] к выводу о необходимости увеличения числа камер для измерения потоков парниковых газов с целью обеспечения репрезентативности региональных оценок.

Остановимся еще на одном факте, который был отмечен при анализе рис. 2, а, о большом межгодовом различии в сезонном ходе концентрации углекислого газа. Поскольку итоговый поток CO_2 является разницей стока вследствие фотосинтеза и эмиссии за счет дыхания растительности, то изменения CO_2 могли произойти как в результате одного, так и другого процесса. Для этого сравним только ночные потоки (чистое дыхание экосистем) и дневные, когда фотосинтез доминирует (рис. 5, цв. вкладка).

Рис. 5 показывает, что сток CO_2 уменьшился вследствие действия обоих указанных факторов. Видно, что с июня по август заметно увеличилась интенсивность дыхания в ночное время и превышение, по сравнению с предыдущим годом, сохранялось до октября. В этот же период фотосинтетический сток углекислого газа стал менее интенсивным (рис. 5, б). Такие различия сохранялись до конца вегетационного периода. Поскольку заметных межгодовых различий температуры воздуха и притока солнечной радиации (см. рис. 2, д и е) зафиксировано не было, то объяснить этот факт пока затруднительно. Он в значительной степени напоминает обнаруженный нами ранее по данным самолетного зондирования рост концентрации CO_2 в пограничном слое атмосферы в летнее время [46]. Чему, кстати, тоже объяснения пока не найдено. Возможно, накопление углекислого газа в атмосфере привело к тому, что сибирские луговые экосистемы уже не справляются с поглощением такого его количества. Но это можно проверить только по результатам мониторинга в последующие годы.

Заключение

Проведенный анализ газообмена CO_2 , CH_4 и N_2O на границе раздела «почва – атмосфера» в фоновом районе Томской обл. показал, что все они имеют особенности в суточном и сезонном ходе и отличаются своей межгодовой изменчивостью. В среднем за вегетационный сезон для CO_2 и CH_4 характерен сток из атмосферы, а для N_2O – слабая эмиссия.

Для потоков характерно изменение знака от положительного в ночное время до отрицательного в дневное. В большинстве случаев абсолютная величина дневного стока больше ночной эмиссии. Потоки метана в течение всех суток направлены из атмосферы в почву. В отличие от CO_2 и CH_4 в обсерватории «Фоновая» в течение почти всех суток N_2O переносится из почвы в атмосферу.

В сезонном ходе в мае начинается процесс поглощения углекислого газа, который достигает максимума в июне-июле. Затем вегетационная активность ослабевает, начинается преобладание дыхания в темное время суток. Сток диоксида углерода продолжается, но значительно слабее. Такая картина наблюдалась в 2017–2019 гг. В 2020 и 2021 гг. сезонный ход потоков CO_2 кардинально изменился. В первой фазе вегетационного цикла фиксировался сток углекислого газа, а начиная с июля потоки стали положительными и такими оставались до конца сезона. Это могло быть обусловлено тем, что в период с июня по август заметно увеличилась интенсивность дыхания в ночное время и его преобладание, по сравнению с предыдущим годом, сохранялось до октября. В этот же период очень сильно уменьшился сток углекислого газа за счет фотосинтеза. Такие различия сохранялись до конца вегетационного периода 2020 и 2021 гг. Потоки CH_4 в течение всего теплого сезона имеют отрицательное значение, а потоки N_2O почти весь вегетационный период остаются положительными. Минимальный сток метана наблюдался в мае, максимальный – в июле-августе.

В течение теплого сезона заметно изменяется и суточный ход потоков парниковых газов. Для CO_2 это отражается в амплитуде колебаний, для CH_4 сезонность проявляется в изменении их величины при почти нейтральном суточном ходе, а для N_2O от месяца к месяцу характерны вариации самих потоков.

В многолетнем разрезе средний за вегетационный сезон сток CO_2 с 2017 г. усилился до $-283 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в 2019 г., а затем начал снижаться и в 2021 г. стал уже положительным. В течение всего периода преобладает поглощение метана луговой экосистемой обсерватории «Фоновая» над его эмиссией. Эмиссия N_2O была минимальной в 2021 г., и максимальной в 2019 г.

Поскольку значения потоков парниковых газов совершенно не коррелируют с другими параметрами окружающей среды, а обмен между подстилающей поверхностью и атмосферой является процессом

многopараметрическим, то требуется дополнительное исследование отдельных его факторов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. O'Grady C. Warming of 1.5 °C carries risk of crossing climate tipping points // *Science*. 2022. V. 377, N 6611. P. 1135.
2. McKay D.I.A., Staal A., Abrams J.F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S., Fetzer I., Cornell S.E., Rockström J., Lenton T.M. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points // *Science*. 2022. V. 377, N 6611. P. 1171.
3. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
4. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch Implementation Plan: 2016–2023. Report No 228. WMO, 2017. 75 p.
5. Andrews A.E., Kofler J.D., Trudeau M.E., Williams J.C., Neff D.H., Masarie K.A., Chao D.Y., Kitzis D.R., Novelli P.C., Zhao C.L., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M.J., Fischer M.L., Parker M.J., Lee J.T., Baumann D.D., Desai A.R., Stanier C.O., De Wekker S.F.J., Wolfe D.E., Munger J.W., Tans P.P. CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: Instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 2. P. 647–687.
6. Higuchi K., Worthy D., Chan D., Shashkov A. Regional source/sink impact on the diurnal, seasonal and inter-annual variations in atmospheric CO₂ at a boreal forest site in Canada // *Tellus B*. 2003. V. 55, N 2. P. 115–125.
7. Sun Y., Yin H., Wang W., Shan C., Notholt J., Palm M., Liu K., Chen Z., Liu C. Monitoring greenhouse gases (GHGs) in China: Status and perspective // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15, N 16. P. 4819–4834.
8. Kadygrov N., Broquet G., Chevallier F., Rivier L., Gerbig C., Ciais P. On the potential of the ICOS atmospheric CO₂ measurement network for estimating the biogenic CO₂ budget of Europe // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 22. P. 12765–12787.
9. Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kurten T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Hari P., Sorvari S., Bäck J., Bondur V., Kasimov N., Kotlyakov V., Matvienko G., Baklanov A., Guo H.D., Ding A., Hansson H.-C., Zilitinkevich S. Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative // *Atmos. Chem. Phys.* V. 15, N 22. P. 13085–13096.
10. Starkweather S., Larsen J.R., Kruemmel E., Eicken H., Arthurs D., Bradley A.C., Carlo N., Christensen T., Daniel R., Danielsen F., Kalhok S., Karcher M., Johansson M., Jóhannsson J., Kodama Y., Lund S., Murray M.S., Petäjä T., Pulsifer P.L., Sandven S., Sankar R.D., Strahlendorff M., Wilkinson J. Sustaining Arctic Observing Networks' (SAON) Roadmap for Arctic Observing and Data Systems (ROADS) // *Arctic*. 2021. V. 74, suppl. 1. P. 56–68.
11. Pallandt M.M.T.A., Kumar J., Mauritz M., Schur E.A.G., Virkkala A.-M., Celis G., Hoffman F.M., Göckede M. Representativeness assessment of the pan-Arctic eddy covariance site network and optimized future enhancements // *Biogeosci.* 2022. V. 19, N 3. P. 559–583.
12. Глаголев М.В. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH₄ и CO₂ из болот России // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. Т. 1, № 2. С. 5–57.
13. Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабаню Р.Т., Карелин Д.В., Каложный И.Л., Кашии Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотыицев В.А., Лавров С.А., Марунич А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В., Юзбеков А.К. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амрит, 2017. 279 с.
14. Grant R.F., Roulet N.T. Methane efflux from boreal wetlands: Theory and testing of the ecosystem model Ecosys with chamber and tower flux measurements // *Global Biogeochem. Cycles*. 2002. V. 16, N 4. P. 1054. DOI: 10.1029/2001GB001702.
15. Смагин А.В., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Шнырев Н.А. Методы исследования потоков газов и состава почвенного воздуха в полевых условиях с использованием портативного газоанализатора ПГА-7 // *Вестн. МГУ. Сер. Почвоведение*. 2003. № 3. С. 29–36.
16. 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.
17. Pavelka P., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Brümmer C., Crill P., Darenova E., Fuß R., Gielen B., Graf A., Klemetsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jiménez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Mari Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvennoinen H., Skiba U., Vestin P., Westli P., Janous D., Kutsch W. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O, and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems // *Int. Agrophys.* 2018. V. 32, N 12. P. 569–587.
18. Riederer M., Serafimovich A., Foken T. Net ecosystem CO₂ 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.
19. 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.
20. 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. For. Meteorol.* 2017. V. 247. P. 93–103.
21. 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.
22. Almand-Hunter B.B., Walker J.T., Masson N.P., Hafford L., Hannigan M.P. Development and validation of inexpensive, automated, dynamic flux chambers // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8, N 1. P. 267–280.

23. Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.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., Pestunov 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 Fofonova Observatory, West Siberia: Current status and future needs // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 108337Z. DOI: 10.1117/12.2504388.
24. Автоматическая камера для измерения потоков парниковых газов на поверхности раздела «почва – атмосфера». Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Ивлев Г.А. Патент на полезную модель № 169373 от 15 марта 2017 г.
25. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quééré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris I., Havard V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetjzer E., Kaplan J.O., Kato E., Goldewijk K.K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauwet S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombardozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Neill C., Omar A.M., Ono T., Peregon A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Séférian R., Schwinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S. Global Carbon Budget 2019 // Earth Syst. Sci. Data. 2019. V. 11, N 4. P. 1783–1838.
26. Keenan T.F., Luo X., De Kauwe M.G., Medlyn B.E., Prentice I.C., Stocker B.D., Smith N.G., Terrer C., Wang H., Zhang Y., Zhou S. A constraint on historic growth in global photosynthesis due to increasing CO₂ // Nature. 2021. V. 600, N 7888. P. 253–257.
27. Wehr R., Munger J.W., McManus J.B., Nelson D.D., Zahniser M.S., Davidson E.A., Wofsy S.C., Saleska S.R. Seasonality of temperate forest photosynthesis and daytime respiration // Nature. 2016. V. 534, N 7609. P. 680–683.
28. Мишустин Е.Н. Круговорот азота и его соединений в природе. Роль микроорганизмов в круговороте газов в природе. М.: Наука, 1979. С. 68–91.
29. Schindlbacher A., Zechmeister-Boltenstern S., Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from European forest soil // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. P. D17302. DOI: 10.1029/2004JD004590.
30. Pilegaard K., Skiba U., Ambus P., Beier C., Brüggemann N., Butterbach-Bahl K., Dick J., Dorsey J., Duyzer J., Gallagher M., Gasche R., Horvath L., Kitzler B., Leip A., Pihlatie M.K., Rozenkranz P., Seufert G., Vesala T., Westrate H., Zechmeister-Boltenstern N. Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and NO₂) // Biogeosci. 2006. V. 3, N 4. P. 651–661.
31. Machefer S.E., Dise N.B., Goulding K.W.T., Whitehead P.G. Nitrous oxide emissions from two riparian ecosystems: Key controlling variables // Water, Air, Soil Pollut: Focus. 2004. V. 4, N 2–3. P. 427–436.
32. Краснов О.А., Максютов Ш., Давыдов Д.К., Фофанов А.В., Глаголев М.В., Иноуэ Г. Мониторинг эмиссии метана и двуокси углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.) // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 630–637.
33. Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максютов Ш.Ш. Эмиссия метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 4. С. 301–309.
34. Serikova S., Pokrovsky O.S., Ala-Aho P., Kazantsev V., Kirpotin S.N., Kopysov S.G., Krickov I.V., Laudon H., Manasyrov R.M., Shirokova L.S., Soulsby C., Tetzlaff D., Karlsson J. High riverine CO₂ emissions at the permafrost boundary of Western Siberia // Nature Geosci. 2018. V. 11, N 11. P. 825–829.
35. Mustamo P., Maljanen M., Hyvärinen M., Ronkanen A.-K., Kløve B. Respiration and emissions of methane and nitrous oxide from a boreal peatland complex comprising different land-use types // Boreal Environ. Res. 2016. V. 21, N 5–6. P. 405–426.
36. Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6, N 4. P. 045214.
37. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling // Environ. Res. Lett. 2014. V. 9, N 4. P. 045008.
38. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Terentieva I.E., Stepanenko V.M., Kotsyurbenko O.R., Maksyutov S.S., Pokrovsky O.S. Variability in methane emissions from West Siberia's shallow boreal lakes on a regional scale and its environmental controls // Biogeosci. 2017. V. 14, N 15. P. 3715–3742.
39. Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Maksyutov Sh.Sh., Fofonov A.V. Comparison of flows of greenhouse gases at the atmosphere – soil interface for three areas of the Tomsk Region // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 115607M. DOI: 10.1117/12.2576745.
40. Saikawa E., Prinn R.G., Dlugokencky E., Ishijima K., Dutton G.S., Hall B.D., Langenfelds R., Tohjima T., Machida T., Manizza M., Rigby M., O'Doherty S., Patra P.K., Harth C.M., Weiss R.F., Krummel P.B., van der Schoot M., Fraser P.J., Steele L.P., Aoki S., Nakazawa T., Elkins J.W. Global and regional emissions estimates for N₂O // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 9. P. 4617–4641.
41. Thompson R.L., Lassaletta L., Patra P.K., Wilson C., Wells K.C., Gressent A., Koffi E.N., Chipperfield M.P., Windearther W., Davidson E.A., Tian H., Canadell J.G. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion // Nat. Clim. Change. 2019. V. 9, N 12. P. 993–998.
42. Maier R., Hörtnag L., Buchmann N. Greenhouse gas fluxes (CO₂, N₂O, and CH₄) of pea and maize during two cropping seasons: Drivers, budgets, and emission factors for nitrous oxide // Sci. Total Environ. 2022. V. 849. P. 157541.
43. Gong Y., Wu J., Vogt J., Le T.B., Yuan T. Combination of warming and vegetation composition change strengthens the environmental controls on N₂O fluxes in a boreal peatland // Atmosphere. 2018. V. 9, N 12. P. 480.
44. Tangen B.A., Bansa A. Prairie wetlands as sources or sinks of nitrous oxide: Effects of land use and hydrology // Agric. For. Meteorol. 2022. V. 320. P. 108968.
45. Wangari E.G., Mwanake R.M., Kraus D., Werner C., Gettel G.M., Kiese R., Breuer L., Butterbach-Bahl K., Houska T. Number of chamber measurement locations for accurate quantification of landscape-scale greenhouse gas fluxes: Importance of land use, seasonality, and green-

house gas type // J. Geophys. Res.: Biogeosci. 2022. V. 127, N 9. P. e2022JG006901.

46. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Краснов О.А., Macsutov Sh.Sh., Machida T., Sasakawa Mo-

toki, Фофанов А.В. Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом Западной Сибири в летний период // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 670–681.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov, A.V. Fofonov. Soil-atmosphere greenhouse gas fluxes in the meadow of a background area of the Tomsk region (Western Siberia).

The work is devoted to the study of the dynamics of greenhouse gas flows, which were measured from 2017 to 2021 at the Background Observatory of Institute of Atmospheric Optics SB RAS. It is shown that the annual average SO_2 flows at the observatory varied from $-283 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (runoff) to $+31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (emission). The minimum emission of $1351 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ was recorded in 2019 and the maximum emission of $1789 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in 2021. The lowest runoff was observed in 2017 ($2099 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). The largest, equal to $2304 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, was in 2018. The annual average methane fluxes ranged from $-0.032 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in 2018 to $-0.047 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in 2020. The maximum methane emission was recorded in 2018 and was equal to $0.915 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, and the minimum in 2021 was only $0.095 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. At the same time, the maximum runoff in the interannual variability varied in a narrower range from -0.241 to $-0.361 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Unlike SO_2 and SN_4 , the soil of the measurement area turned out to be a weak source of N_2O . The annual average fluxes of this gas were in the range 0.00 – $0.011 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Internal maximum emissions from 0.237 to $0.301 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and runoffs from -0.206 to $-0.245 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ also changed little.

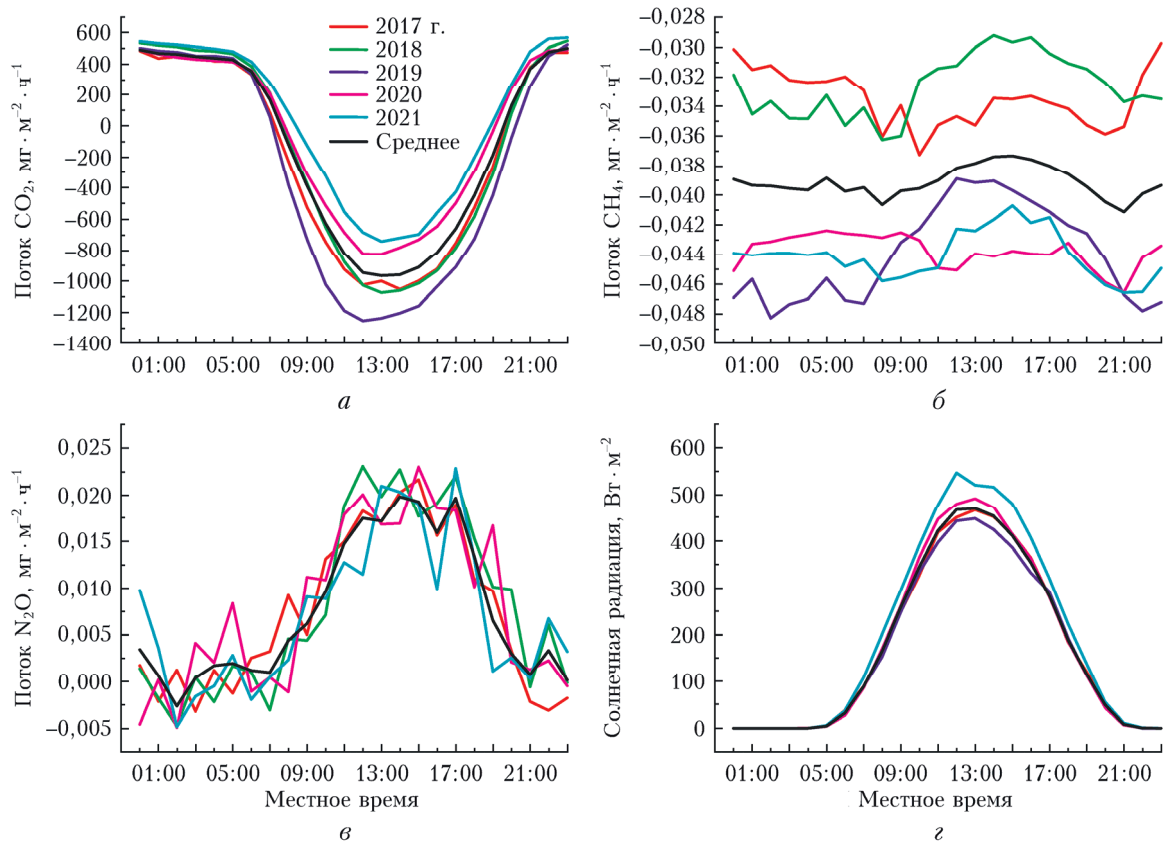


Рис. 1. Усредненный для всего вегетационного периода суточный ход потоков парниковых газов (*a–в*) и притока солнечной радиации (*г*) в обсерватории «Фоновая» в 2017–2021 гг.

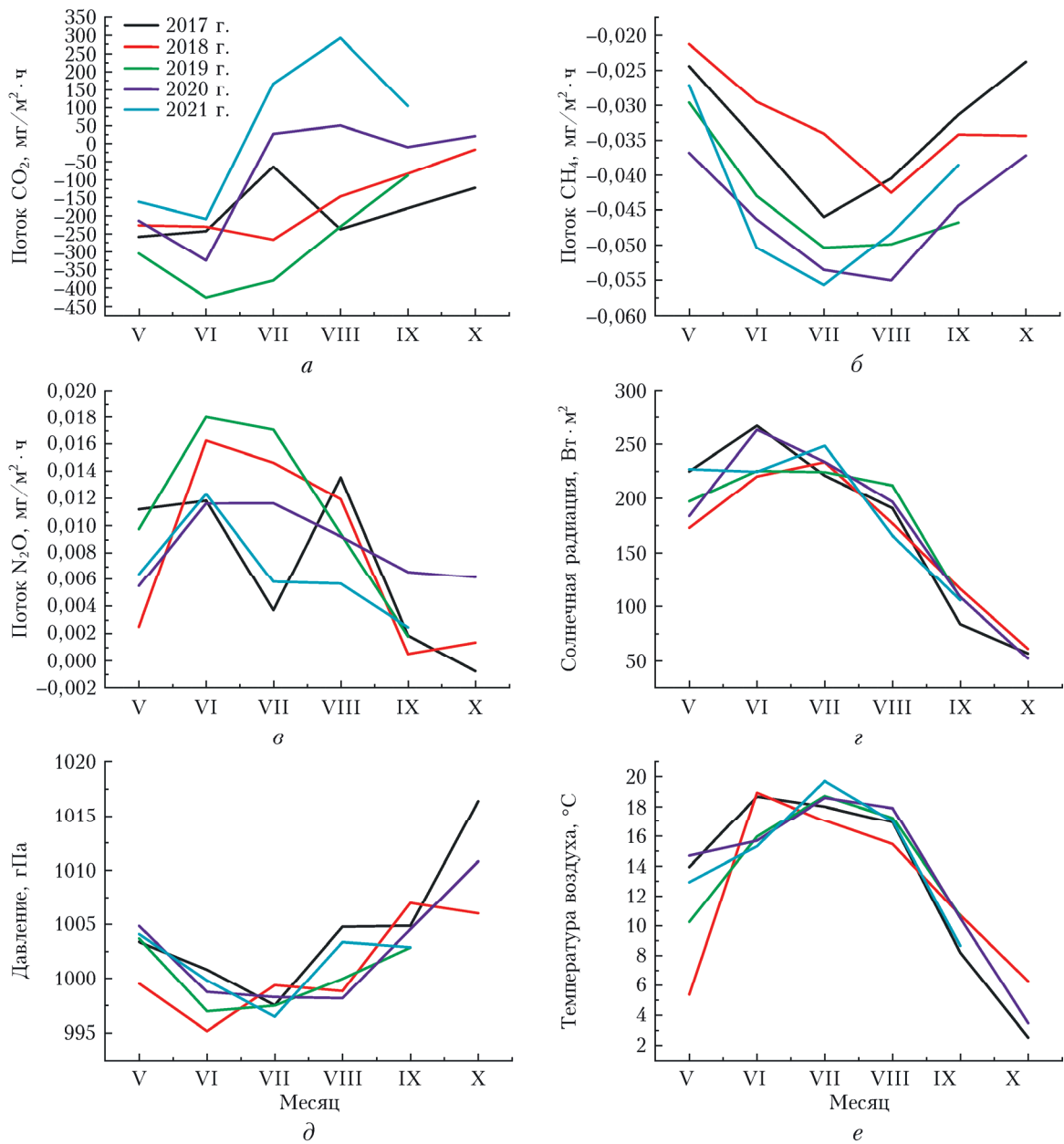


Рис. 2. Сезонный ход потоков CO₂ (а), CH₄ (б), N₂O (в), солнечной радиации (г), давления (д) и температуры воздуха (е) в обсерватории «Фоновая»

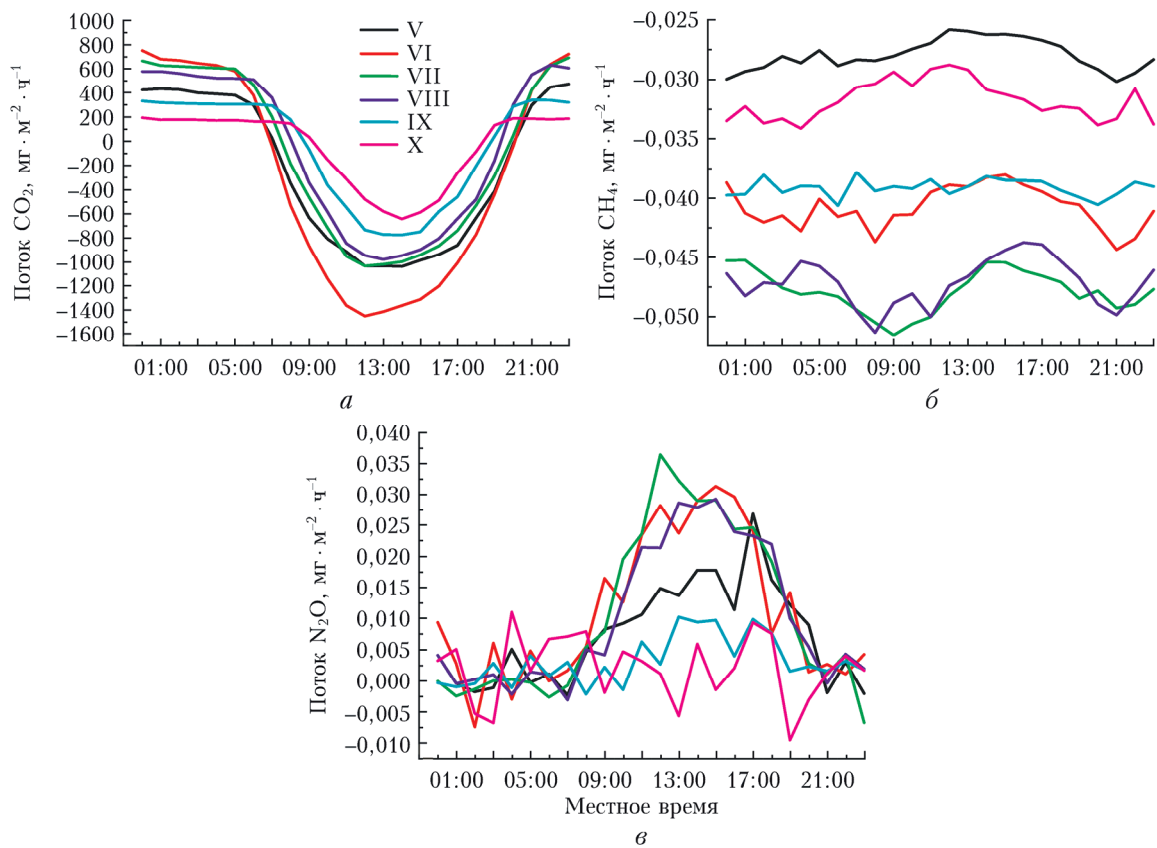


Рис. 3. Суточный ход потоков парниковых газов в разные месяцы вегетационного периода: а – CO₂; б – CH₄; в – N₂O

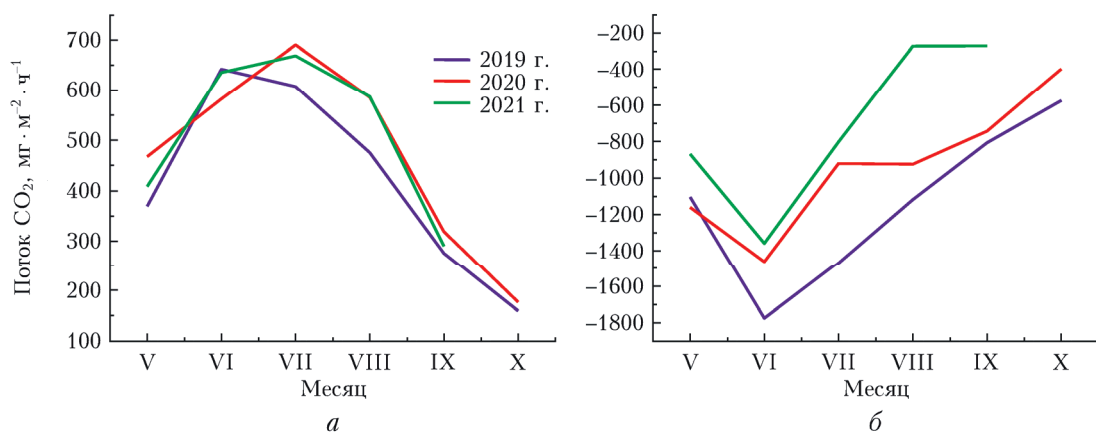


Рис. 5. Потоки CO₂ в ночное (а) и дневное (б) время