

УДК 51.510.411; 551.510.411.35

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ МОСКВЫ НА РАЗНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ

© 2022 г. А. А. Виноградова^а, *, А. С. Гинзбург^а, Д. П. Губанова^а

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: anvinograd@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.11.2021 г.

После доработки 30.11.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

По данным многолетних регулярных измерений ГПБУ “Мосэкомониторинг” (за 2005–2020 гг.) проанализирована изменчивость концентрации метана (CH_4) в приземном слое атмосферы Москвы на разных временных масштабах. Рассмотрены возможные механизмы формирования поля концентрации метана в атмосфере города. Средняя концентрация метана в приземном воздухе в городе в холодное полугодие тем ниже, чем выше средняя температура воздуха предшествующего теплого полугодия. Минимум концентрации метана в Москве в 2010 и 2011 гг. связан с жарким летом 2010 г., сопровождавшимся сильными пожарами и частичным высыханием болот в центре европейской территории России. Внутригодовой ход концентрации CH_4 характеризуется минимальными значениями летом и максимальными в зимнее время. Промежуточный максимум концентрации CH_4 в августе-сентябре проявляется только в ночной концентрации метана. В суточном цикле наблюдается более высокое содержание метана в воздухе ночью, чем днем. Результаты исследования демонстрируют комплексность разнонаправленных природных процессов в атмосфере и на подстилающей поверхности, формирующих динамично изменяющееся поле концентрации метана в приземном воздухе мегаполиса.

Ключевые слова: атмосферный воздух, Москва, метан, временная изменчивость, источники и стоки, метеорологические параметры

DOI: 10.31857/S0002351522020110

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферный метан (CH_4) является третьим по значимости парниковым газом после паров воды и двуокиси углерода. По данным наблюдений [1], с конца 2019 г. глобальная средняя концентрация метана в атмосфере превышает доиндустриальный уровень более чем в два с половиной раза. Основными источниками метана в атмосфере Земли являются эмиссии от болот и пресноводных водоемов, животноводства, свалок, транспорта, утечек при добыче, транспортировке и сжигании природных нефти и газа и др. [2–4], которые формируют крупномасштабные поля атмосферного метана. Метан неравномерно распределен между Северным и Южным полушариями, а также по территории суши. Несмотря на относительно большое время жизни метана в атмосфере (по разным оценкам от 8 до 12 лет [3–5]), его концентрация имеет регулярный сезонный ход с максимумом в холодное время года, а также регулярный суточный ход с максимумом ночью.

Сток метана в приземной атмосфере обеспечивается в основном химическими реакциями с

гидроксидом в самой атмосфере, а также, в небольших количествах, микроорганизмами на растениях и в почве [2, 3]. В отличие от времени жизни метана в атмосфере в целом, реакции, обеспечивающие его сток из приземной атмосферы, происходят значительно быстрее, и эффективность стока метана, например, в средних широтах меняется не только от месяца к месяцу, но даже в течение суток, как и сама концентрация CH_4 , поскольку, например, изменяются инсоляция и температура воздуха (см., например, данные реанализа спутниковой и мониторинговой информации [6]).

Временная и пространственная изменчивость содержания метана в атмосфере существенно влияет на радиационные потоки в атмосфере и должна учитываться в глобальных и локальных моделях климата.

Мировая сеть мониторинга уровня содержания метана в атмосфере [1] в последние годы успешно дополняется данными дистанционных наблюдений со спутников [7] или данными реанализа [6], что дает достаточно надежные представления о пространственно-временной изменчивости поля атмосферного метана, позволяет

оценивать различные тренды и вариации, необходимые для климатических оценок [4]. В большинстве случаев измеряется и оценивается общее содержание метана в столбе атмосферы. Однако, измерениям концентрации метана в приземном воздухе города, где этот газ участвует в многочисленных химических реакциях с газами антропогенного происхождения, уделено совсем немного исследований (можно отметить измерения в Санкт-Петербурге [8–10]). В этом смысле данные непрерывного мониторинга, накопленные в Москве системой наблюдений за составом городской атмосферы ГПБУ “Мосэкомониторинг” [11] (далее – МЭМ), являются уникальными и требуют всестороннего обобщения и осмысления.

Идея о повышении концентрации CH_4 в приземном воздухе города в условиях “теплой зимы”, высказанная в [12] и проанализированная на примере Москвы по данным зимы 2006–2007 гг. [13], предполагала, что основным механизмом этого эффекта в городе может быть повышение эмиссии метана от рано обнажившихся из-под снега и частично оттаявших свалок и участков влажной почвы. В данной работе авторы проверяют эту гипотезу на материале последующих годов, когда в России и других частях Евразии и Северной Америки, в условиях глобального потепления, участились “окна тепла” в холодный период года. Однако многофакторность процесса формирования поля приземного метана в Москве расширила круг обсуждаемых вопросов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Концентрация метана в приземном воздухе Москвы измеряется автоматическими станциями контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) Государственного природоохранного бюджетного учреждения “Мосэкомониторинг” в непрерывном режиме с интервалом 20 мин [11] с середины 2000-х г. В статье анализируются эти данные за 16 лет (2005–2020 гг.), когда наблюдения проводились на 45 АСКЗА на различных типах территории Москвы. Отметим, что одновременно в разные годы работало от 12 до 33 станций. Данные этих измерений, усредненные для единовременно работавших АСКЗА, использованы нами для анализа концентрации метана в приземном воздухе Москвы.

Основной канал стока метана из атмосферы обеспечивается химическими реакциями с гидроксильным радикалом OH^- , образующимся в воздухе круглые сутки в результате реакций терпенов (класс углеводородов, выделяемых растениями) с озоном, а также (только в дневное время) – терпенов с водой под действием солнечного света, с образованием более простых побочных

продуктов, один из которых – гидроксильный радикал [2–4, 14].

Химическая активность гидроксильного радикала OH^- в приземном воздухе города не ограничивается взаимодействием только с метаном, он также в течение секунд вступает в реакции с многочисленными антропогенными составляющими, например, с оксидами азота, углерода и т.д. Однако в данной работе эффективность стока метана косвенно (и достаточно грубо) учитывалась нами по средней концентрации озона (как предшественника гидроксильного радикала) в приземном воздухе Москвы – также по данным измерений АСКЗА (с разрешением 20 мин).

Для интерпретации и более подробного анализа данных привлекалась стандартная метеорологическая информация с сайтов (<https://www.meteo.ru>, www.rp5.ru и <https://www.pogodaiklimat.ru>) для метеостанции “Балчуг”, расположенной в центре города.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Цель работы – проанализировать имеющийся экспериментальный материал и впервые попытаться выделить основные механизмы формирования поля метана в приземной атмосфере Москвы, рассматривая, в первую очередь, данные о концентрации CH_4 на разных временных горизонтах (межгодовые, сезонные и внутрисуточные вариации).

Концентрация метана в приземном воздухе Москвы на протяжении последних полутора десятилетий менялась нелинейно – с минимумом среднегодовой концентрации 1.303 мг/м^3 в 2011 г. и максимумами около 1.40 мг/м^3 в 2005 и 2020 гг. (средняя концентрация за эти годы 1.369 мг/м^3). При этом надо иметь в виду, что пространственная изменчивость концентрации CH_4 в городе велика: статистический разброс среднегодовых значений, измеренных на разных станциях, превышает амплитуду внутрigoдовых вариаций среднемесячных величин. Это можно объяснить различиями городской обстановки (жилые районы, транспортные магистрали, парковые зоны и т.д.) вблизи разных станций наблюдения МЭМ.

В частности, рассмотрим свалки как антропогенный источник метана в городе на примере станции АСКЗА “Саларьево”. Анализ концентрации метана, измеренной на станции “Саларьево”, показывает, как в условиях мегаполиса при активной человеческой деятельности могут возникать мощные источники метана. При расширении территории Москвы и системы линий Московского метрополитена были вскрыты старые свалки, которые в годы их активного функционирования официально находились за чертой города. По состоянию на октябрь 2013 г. полигон

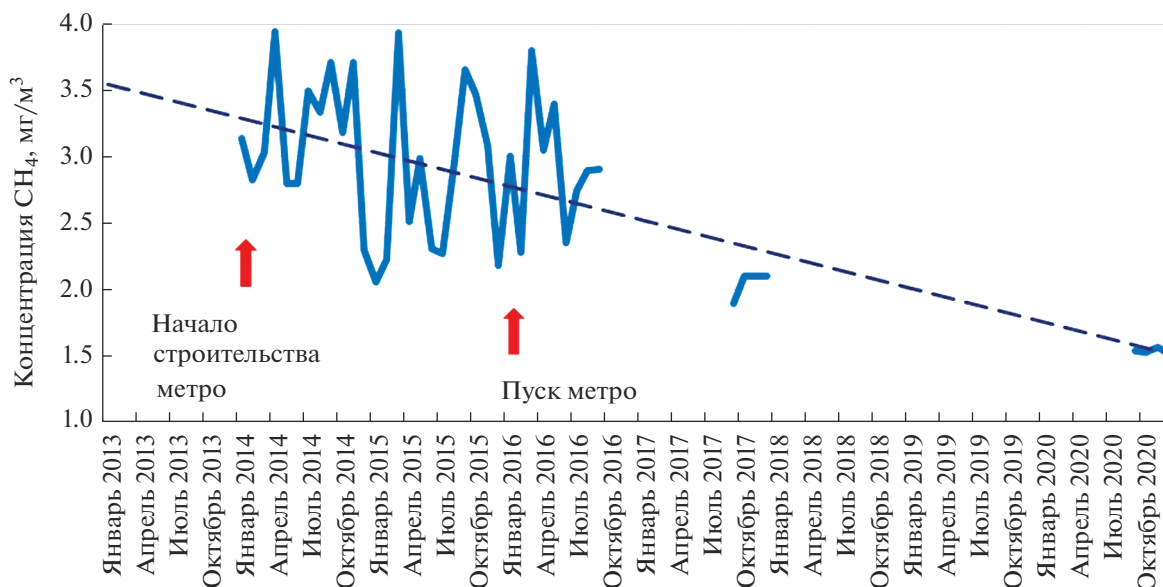


Рис. 1. Концентрация метана на АСКЗА “Саларьево”. Пунктир – линейный тренд, его достоверность $R^2 = 0.47$.

ТБО “Саларьево”, по данным Википедии, являлся самым большим полигоном ТБО в Европе.

На рис. 1 приведены все данные по концентрации метана, полученные на АСКЗА “Саларьево”, а в табл. 1 – представительность этих данных по годам. Станция работала недолго, но дала очень показательные результаты. В конце 2013 г. были начаты измерения концентрации метана на АСКЗА “Саларьево”, а в начале 2014 г. вблизи было начато строительство метро (станция Саларьево), которая была запущена через 2 года – в начале 2016 г. Интервал между этими датами заметен на рис. 1 высокими значениями концентрации метана в приземной атмосфере, в 2–2.5 раз превосходящими средний (по остальным АСКЗА МЭМ) уровень этого показателя в городе (см. рис. 2) за рассматриваемые годы.

После запуска метро в этом районе были проведены специальные работы по предотвращению дополнительных выбросов метана от вскрытых источников и рекультивация местности. Хотя измерения на АСКЗА “Саларьево” в последующие годы проводились лишь эпизодически (табл. 1), они показывают, что уровень концентрации CH₄ в воздухе в районе станции метро Саларьево стал близок к среднему по городу (рис. 2). Однако непрерывные полноценные измерения метана на этой станции МЭМ не возобновились. Далее значения концентрации метана, полученные на АСКЗА “Саларьево”, не включались нами в анализируемый массив данных, поскольку они могли значимо изменить средние величины для всей территории Москвы. Заметим, что по окраинам Москвы (вблизи МКАД) расположено ещё несколько полигонов ТБО, меньших масштабов. На

станциях МЭМ, ближайших к этим точкам, не наблюдается значительное повышение уровня содержания метана в приземном воздухе. Скорее всего, эффект, отмеченный на АСКЗА “Саларьево”, обусловлен именно работами по строительству станции метро.

Долговременные межгодовые вариации концентрации CH₄ в Москве. Одним из основных источников метана в атмосфере являются эмиссии водных объектов, в частности, болот [15, 16], которых достаточно много на Европейской территории России (ЕТР) [17], в Московской области до 6%, а в окружающих ее областях – еще больше [18]. Этот инерционный медленно меняющийся источник должен определять общий уровень метана в атмосфере над ЕТР и над Москвой, благодаря длительному времени жизни метана в атмосфере и перераспределению воздушных масс. Болота выбрасывают анаэробный метан, образующийся под водной толщей без участия кислорода.

Таблица 1. Концентрация метана (средняя за месяцы наблюдений для каждого года) на АСКЗА “Саларьево” и представительность измерений по годам

Год	CH ₄ , мг/м ³	Месяцы наблюдений
2013	1.71	Ноябрь–декабрь
2014	3.19	Все месяцы
2015	2.76	
2016	2.93	Январь–сентябрь
2017	2.06	Сентябрь–декабрь
2020	1.53	

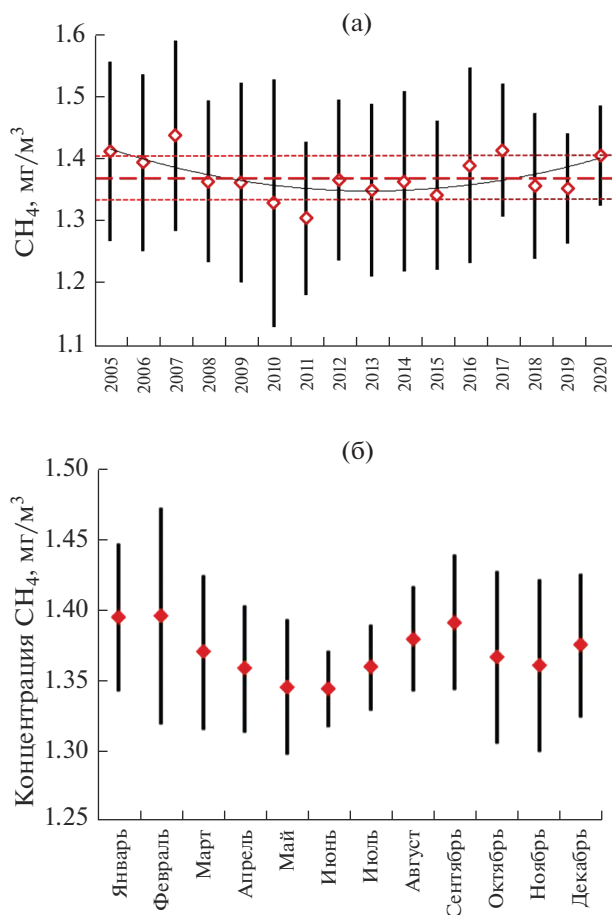


Рис. 2. Вариации концентрации метана в приземном воздухе Москвы: а – межгодовые, б – внутригодовые. Красные горизонталы – среднее среднегодовое значение и коридор его среднеквадратичных отклонений, тонкая черная линия – параболический тренд. Вертикальные диапазоны – статистический разброс соответствующих средних значений (СКО)

Основными регуляторами эмиссии метана от болот, как в межгодовых, так и в сезонных изменениях, являются метеорологические условия – температура воздуха и количество осадков. Повышение в определенных пределах температуры и количества осадков должно усиливать эмиссию метана от болот, хотя для разных типов болот эти пределы различны. Чрезмерное повышение температуры при недостатке осадков может частично или полностью высушить болото, уменьшив поступление метана, а чрезмерное количество выпавших осадков при не слишком высокой температуре воздуха может привести к увеличению загнивающего водного слоя и также уменьшить эмиссию метана в атмосферу.

Считается, как подчеркнуто в [2], что связанные с климатом колебания эмиссии CH_4 из естественных заболоченных территорий являются основным фактором, обуславливающим наблюдаемую глобальную межгодовую изменчивость выбросов CH_4 в атмосферу. В этом отношении также играет определенную роль горение биомассы в те годы, в кото-

рые наблюдаются обширные пожары [16]. Имея в виду эти комментарии, заметные минимумы среднегодовой концентрации CH_4 в Москве в 2010 и 2011 гг. (рис. 2а), когда ее значения были ниже средней величины на 1 СКО и 2 СКО, (СКО – среднеквадратическое отклонение), т.е. 1.327 и 1.303 mg/m^3 , соответственно, могут указывать на возможную причину этого явления – известную ситуацию аномальной жары с пожарами летом 2010 года в центре ЕТР [19–21].

Аномально жаркое и сухое лето (особенно июль и август) 2010 г. с лесными и торфяными пожарами в условиях обширного и длительного блокирующего антициклона, охватившего почти всю Восточно-Европейскую равнину за исключением самых северных районов [19, 20], заметно повлияло на болотные экосистемы ЕТР, частично высушив их [21]. Это привело к уменьшению эмиссии анаэробного метана от них: коэффициент корреляции среднегодовой концентрации метана и годовой суммы осадков в Москве $R = 0.56$. Количество выпавших в эти годы осадков (570 и 550 мм в 2010

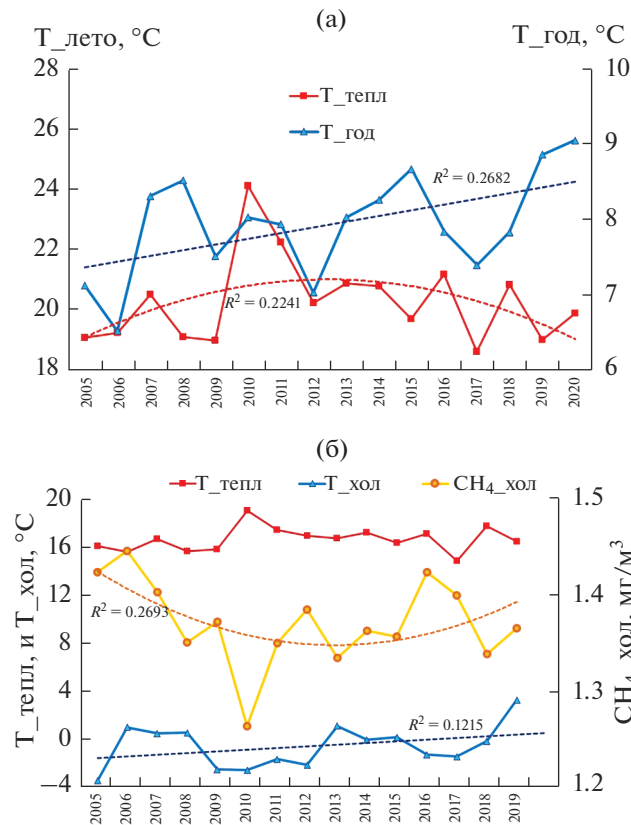


Рис. 3. Средние значения температуры воздуха в Москве: а – за лето (июнь–август) и за год; б – за теплое и следующее за ним холодное полугодия, а также средние значения концентрации CH_4 в те же холодные полугодия. Пунктирные линии – линейный и квадратичный тренды

и 2011 г., соответственно) заметно ниже средней величины, которая за рассматриваемые годы составила 660 ± 145 мм/год. Таким образом, и в 2011 г. естественное увлажнение болот после жары и пожаров 2010 года не было в достаточной степени обеспечено. Однако, при отсутствии аномальных пожаров, на территориях областей, окружающих Московскую область, эмиссии метана в атмосферу в 2011 г., по данным [22], превысили более чем в 2 раза эмиссии 2010 г. [23]. По-видимому, не выгоревшая в 2010 году часть болот довольно быстро начала восстанавливаться [21], но, как видно из рис. 2а, это сказалось на среднегодовой концентрации метана в городе не в 2011, а в последующие годы.

Температура воздуха в Москве в целом в течение рассматриваемых годов повышалась (рис. 3), причем в холодную половину года (октябрь–март) нагрев происходил почти вдвое быстрее ($0.138^\circ\text{C}/\text{год}$), чем в целом за год ($0.076^\circ\text{C}/\text{год}$). Особенно быстро в Москве теплеет в феврале – со скоростью около $0.59^\circ\text{C}/\text{год}$ (коэффициент достоверности $R^2 = 0.33$), и, начиная с 2013 г. (кроме 2018-го), февраль уже не самый холодный месяц года в Москве, как это было ранее. Значения

средней летней и среднегодовой температуры воздуха в Москве не коррелировали друг с другом в межгодовых вариациях (рис. 3а) в течение рассматриваемых лет.

Сопоставление величин концентрации метана и температуры в приземном воздухе иллюстрирует рис. 3б. Концентрация CH_4 холодных полугодий хорошо коррелирует с температурой воздуха предшествующих теплых полугодий, коэффициент корреляции $R = -0.66$ (при 16 парах сравниваемых параметров значения $R > 0.5$ можно считать значимыми на уровне 95% [24]). Таким образом, зимой метана меньше/больше после жаркого/холодного предыдущего лета, а не в зависимости от температуры самого холодного полугодия, как предполагалось и обсуждалось нами ранее в [12, 13].

Кроме того, по-видимому, это связано не с источниками метана в городе, как мы предполагали, а с более масштабными и медленными процессами образования метана от болотных экосистем и перераспределения его в атмосфере. Конечно, вокруг Москвы существуют и другие источники метана, например, продукты жизнедеятельности крупного рогатого скота, но эти источники относительно малы и не рассматриваются в данной работе.

Таблица 2. Эмиссии, стоки и тенденции внутригодовых изменений содержания метана в атмосферном воздухе большого города в умеренных широтах Северного полушария (на примере Москвы)

Месяцы	Метеорологические условия, эмиссии и стоки метана
Декабрь–февраль	Самое холодное время года, химические стоки в атмосфере слабые. Поверхность покрыта снегом, эмиссии от природных источников минимальны. Антропогенные эмиссии от энергетики максимальны. Эмиссии транспорта примерно постоянны в течение года.
Март–апрель	Среднее значение температуры воздуха переходит через 0°C. Оттаивают свалки с их эмиссиями метана, повышается эффективность химического стока в атмосфере.
Май–июнь	Температура приземного воздуха и его инсоляция растут, эффективность химического стока в атмосфере повышается и достигает максимума. Добавляются химические стоки на поверхности. Уменьшается антропогенная эмиссия, связанная с отоплением, добавляются природные эмиссии от водоемов.
Июль–август	Самое теплое время года. Эффективность химических стоков в атмосфере и на поверхности меняется мало. Антропогенные эмиссии, связанные с обогревом, минимальны. Добавляются и усиливаются эмиссии от болот и пожаров.
Сентябрь	Температура воздуха начинает понижаться, увеличивается количество осадков. Усиливаются антропогенные эмиссии, связанные с отоплением. Увлажнение поверхности усиливает эмиссии природных источников – болот и водоемов. Ослабление эмиссии от пожаров. Ослабление химических стоков в атмосфере и на поверхности.
Октябрь–ноябрь	Падает температура воздуха до отрицательных значений. Рост антропогенных эмиссий и ослабление химических стоков. Постепенная изоляция снегом поверхности с ее эмиссиями (болота и водоемы) и стоками.

Зимой в средних широтах поверхность (в том числе, и болота) покрыта снегом, блокирующим поступление в атмосферу метана от болот, однако большое время жизни этого газа способствует длительному перемешиванию и транспортировке его в атмосфере, в результате чего формируется общий уровень его атмосферной концентрации и в зимнее время года.

В табл. 2 приведены некоторые качественные сведения о внутригодовых изменениях источников и стоков метана в атмосфере Москвы. Характерные времена различных процессов, обуславливающих поступление метана в атмосферу и его удаление из нее, сильно разнятся. Эмиссии болотных экосистем меняются от месяца к месяцу и от года к году, синоптические перестройки направлений переноса воздуха и примеси в атмосфере имеют характерное время порядка 5–7 дней, антропогенные эмиссии в городе могут меняться за часы, как и условия вертикального перемешивания в приземном воздухе. Есть ещё внутригодовые сезонные эффекты, связанные со снежным покровом, его становлением и таянием. В современных условиях климатических сдвигов метеорологические характеристики демонстрируют ряд заметных аномалий как в температуре воздуха и количестве осадков, так и в сроках становления и длительности залегания снежного покрова.

Изменения концентрации метана в Москве в течение календарного года характеризуются двумя максимумами (зимой и в сентябре) и летним минимумом (рис. 2б и 4), что характерно в целом для сезонных изменений содержания CH_4 в атмосфере над севером Евразии [2–4, 13] и определяется сочетанием интенсивностей эмиссий и стоков метана из атмосферы в разные месяцы.

Сток метана из приземной атмосферы в результате химических реакций с гидроксидом можно косвенно в первом приближении оценивать по концентрации озона (O_3) в воздухе, считая его предшественником или показателем наличия гидроксидов OH^- в воздухе. Как уже отмечалось, это грубый (качественный) показатель, но коэффициенты корреляции между концентрациями CH_4 и O_3 в атмосфере Москвы говорят о наличии некоторой взаимосвязи процессов, формирующих поля метана и озона в городской атмосфере. Данные МЭМ показывают высокую изменчивость содержания озона в приземном воздухе Москвы от года к году с максимумом в теплые месяцы, причем с 2007 года не только средняя концентрация в теплое время года, но и среднегодовая концентрация озона в Москве близка или выше значения средне-суточной ПДК, которое составляет 0.03 мг/м^3 [25]. Эту особенность отмечали и обсуждали и другие

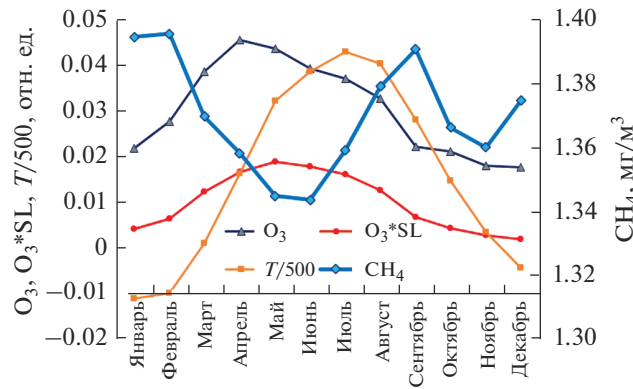


Рис. 4. Внутригодовые изменения концентрации CH₄ в приземном воздухе Москвы в 2005–2020 годах, а также параметров, косвенно связанных с его стоком из атмосферы – температуры воздуха T (значения уменьшены в 500 раз для масштабирования), величины концентрации озона (O_3) и ее произведения на частоту регистрации ясного неба (параметр SL – sunlight).

исследователи состава атмосферного воздуха в Москве (из последних работ – см., например, [26]). Процессы образования озона в атмосфере связаны с интенсивностью солнечной радиации, а не напрямую с температурой воздуха, поэтому коэффициент корреляции среднегодовых значений концентрации озона и температуры воздуха не слишком высок $R = 0.65$. По средним значениям для холодной половины года корреляция концентраций метана и озона в Москве несколько выше $R = -0.75$, что указывает на правомерность использования концентрации O_3 как показателя эффективности стока CH₄ (знак корреляции отрицателен). Поскольку образование OH⁻ происходит в присутствии солнечного излучения, т.е. днем больше, чем ночью, летом больше, чем зимой, и т.д., мы рассматривали второй показатель эффективности стока – частоту регистрации ясного неба (солнечного света, sunlight – SL), которую определяли по данным стандартных метеорологических наблюдений (<https://www.meteo.ru>) как частоту регистрации балла облачности меньше 5. Произведение среднемесячных значений концентрации озона и этой частоты, возможно, является более корректным показателем эффективности стока метана в приземной атмосфере в рассматриваемом месяце. Рост концентрации озона от зимы к лету опережает возрастание температуры воздуха и имеет максимум в апреле-мае, а не летом (рис. 4). Однако более ясное небо в летние месяцы синхронизирует максимум эффективности стоков метана (по показателю в виде произведения величин концентрации O_3 и частоты SL) и минимальные значения концентрации CH₄ во внутригодовом ходе – рис. 4.

Коэффициенты парной корреляции среднемесячных значений трех параметров – концентраций CH₄ и O_3 и температуры – в приземном воздухе Москвы в разные месяцы (рис. 5) свиде-

тельствуют о качественно правильном описании, представленном в табл. 2, внутригодовых изменений концентрации метана в приземной атмосфере города. В разные месяцы сочетание коэффициентов корреляции различно, как по абсолютной величине, так и по знаку, и отражает сложность и многофакторность процессов формирования поля приземного метана в атмосфере города.

В холодные месяцы и в июле коэффициент корреляции величин концентраций метана и озона отрицателен, что говорит об эффективности химического стока метана в эти месяцы. Значение концентрации озона коррелирует с величиной температуры воздуха зимой и летом с положительными коэффициентами. В переходные сезоны (весной и осенью) процессы формирования поля метана в приземной атмосфере не могут быть описаны рассматриваемыми тремя переменными (рис. 5), поскольку они не учитывают усиление/ослабление действий источников метана (табл. 2), а также различия в механизмах образования озона и гидроксила в приземном слое атмосферы при усилении и ослаблении ее инсоляции.

Положительные коэффициенты корреляции между значениями концентрации метана и температуры воздуха, которые, будучи обнаружены в зимний сезон 2006–2007 гг., послужили импульсом для данной работы, на более длинном ряде данных обнаружены только в августе и в сентябре и невелики по абсолютной величине. Скорее всего, это обусловлено ростом эмиссий метана от естественных источников в самые теплые месяцы года при достаточной влажности, но не при слишком жарком и сухом лете, как отмечалось выше.

Характерной особенностью холодной половины года в средних широтах можно считать выпадение снега и тем самым изоляцию на некоторое время подстилающей поверхности от воздушной

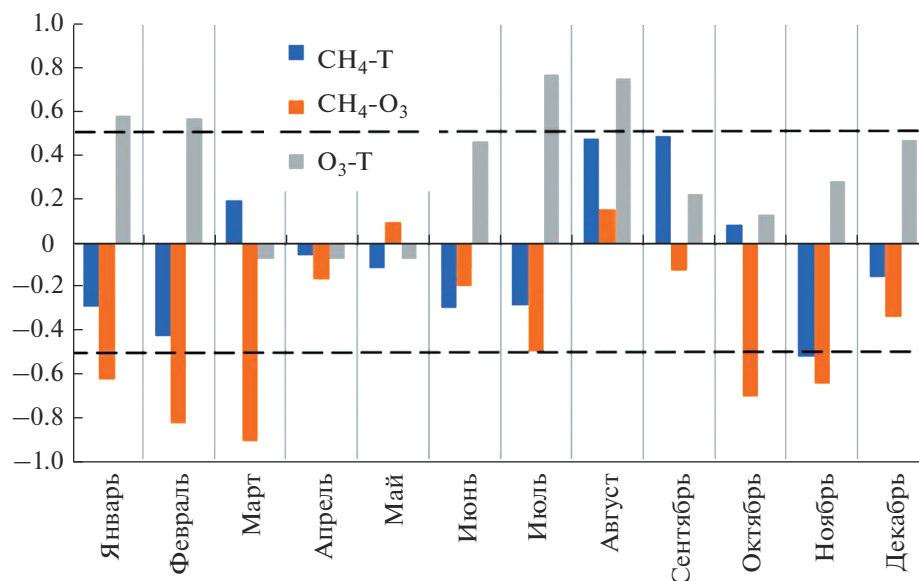


Рис. 5. Парные коэффициенты корреляции среднемесячных значений концентраций CH_4 и O_3 , а также температуры T в приземном воздухе Москвы – по межгодовым вариациям. Горизонтальные пунктирные линии – пороговый уровень достоверности коэффициента корреляции по критерию значимости Пирсона (с вероятностью 95%) для 16 пар значений [24].

среды. Как уже говорилось, почва и растения могут участвовать в формировании поля метана, как в канале эмиссии, так и в канале стока этого газа. Межгодовая изменчивость сроков становления и схода снежного покрова, а также длительности залегания снега в Москве в рассматриваемые годы представлена на рис. 6, коэффициенты попарной корреляции между этими параметрами, средней температурой воздуха и показателем ясного неба SL за холодное полугодие – в табл. 3.

По рис. 6 видна сильная изменчивость снежных условий в Москве в рассматриваемые годы. Важно, что зимой солнечные дни в Москве соответствуют, по большей части, антициклональным морозным условиям, когда температура воздуха понижена (коэффициент корреляции между T и SL в табл. 3 отрицательный, а между SL и длительностью снегозалегания – положительный). Отметим также, что чем раньше установится снежный покров, тем дольше он лежит. Все это сильно влияет на изменчивость процессов эмиссии и стока метана в переходные сезоны.

Рассмотрим самые короткопериодные вариации величины концентрации метана в приземной атмосфере – это колебания концентрации CH_4 внутри суток. Поскольку стоки метана в сильной степени зависят от солнечного излучения, в любое время года должна наблюдаться разница в его концентрации днем и ночью. Причем ночью, при минимальных стоках, концентрация метана должна быть больше, чем днем. Заметим, что различия концентрации примеси в приземной атмосфере между днем и ночью формируются также наличием/отсутствием и мощностью приземных инверсий температуры воздуха, параметры которых очень изменчивы не только в разные месяцы и годы, но и день ото дня [27–29]. Приземная инверсия температуры воздуха, формирующаяся чаще всего в вечерние и разрушающаяся в утренние часы, препятствует вертикальному перемешиванию воздуха в нижнем слое атмосферы, вызывая увеличение концентрации примеси в этом слое ночью, если источники примеси расположены на поверхности, а эффективность ее стока на по-

Таблица 3. Матрица парных коэффициентов корреляции временных характеристик снежного покрова, а также температуры воздуха и частоты ясного неба (SL) за холодную половину года.

	Температура воздуха	Дата схода снега	Дата становления снега	Длительность залегания снега	SL
Температура воздуха	1	-0.72	0.50	-0.73	-0.51
Дата схода снега		1	-0.42	0.85	0.53
Дата становления снега			1	-0.84	-0.21
Длительность залегания снега				1	0.44

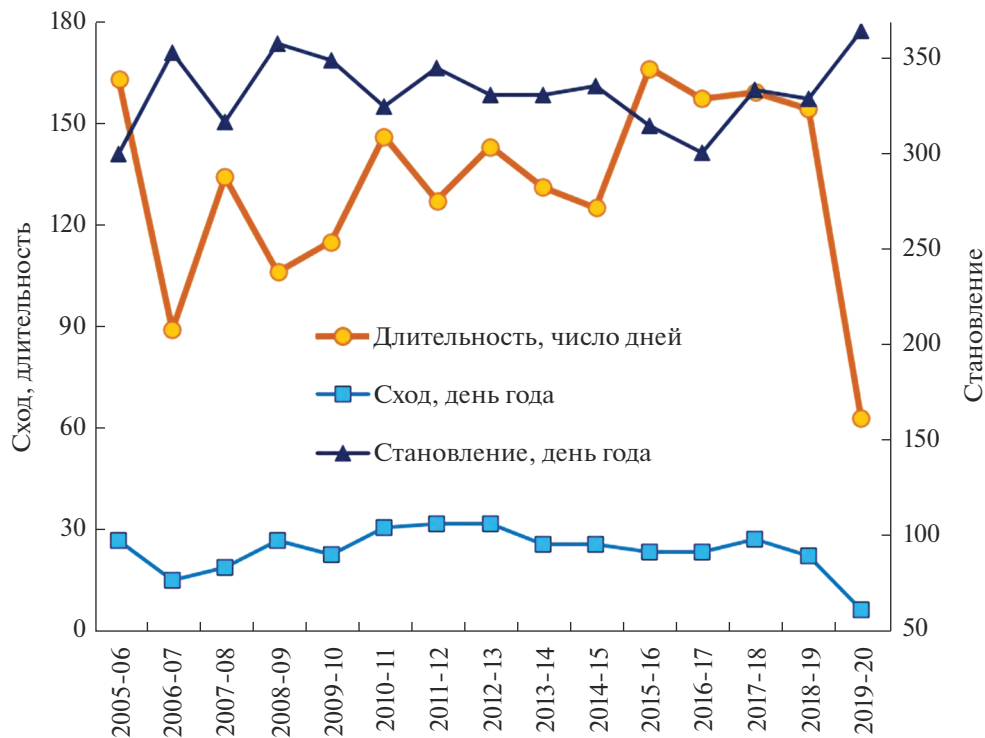


Рис. 6. Сроки становления и схода снежного покрова в Москве, а также длительности его залегания в холодные сезоны рассматриваемых годов.

верхность низка. Заметим, что на величину концентрации метана образование ночной инверсии температуры должно воздействовать в том же направлении, что и ослабление химического стока в атмосфере: в обоих случаях ночью концентрация CH_4 должна быть выше, чем днем.

Для анализа таких внутрисуточных колебаний концентрации CH_4 из ряда исходных данных выбирались ночной (условно – с инверсией) и дневной (условно – без инверсии) массивы – средние концентрации метана с 00 до 05 ч и с 12 до 17 ч, соответственно. На рис. 7 показана межгодовая и внутригодовая изменчивость ночной и дневной концентрации метана, а также их разности в Москве за рассматриваемые годы.

По рис. 7а и 7в можно проследить, как весной после зимы, с ростом эффективности стоков в дневное время, от месяца к месяцу падает величина концентрации метана днем, а ночью остается неизменной, при этом разница между ночью и днем растет. В середине лета начинает уменьшаться эффективность химических стоков в атмосфере, которая характеризуется концентрацией озона и ее производением на значение параметра SL (см. рис. 4), и концентрация метана, как ночью, так и днем, растет, а разница между ними почти не изменяется. К сентябрю эмиссии болот, видимо, достигают максимума, а стоки метана продолжают ослабляться, и далее вся ситуация посте-

пенно возвращается к зимней – с малыми стоками и местными, преимущественно антропогенными, эмиссиями на фоне общего содержания метана в атмосфере, сформированного за весь предыдущий год. В начале осени также усиливаются и становятся более частыми приземные инверсии температуры воздуха [27–29]. В результате “осенний” максимум концентрации метана (рис. 2б) проявляется в августе и сентябре только ночью, а не днем (рис. 7а). Максимальная разница в концентрации CH_4 между ночью и днем наблюдается все теплое полугодие и почти не меняется от мая до сентября (рис. 7в).

Рисунки 7б и 7г показывают, как все обсуждавшиеся выше процессы действовали на ночную и дневную концентрации метана в разные годы. Видно, что межгодовые различия качественно соответствуют межгодовым изменениям средней концентрации метана за рассматриваемые годы (рис. 2а). Здесь очень интересно уменьшение разности между величинами ночной и дневной концентрации (рис. 7г), начиная с 2007 г., за счет более сильного роста дневных значений по сравнению с ночными (0.0055 и 0.0022 мг/м³/год, соответственно), что может быть связано с постепенным восстановлением болот в центре ЕТР после жары лета 2010 г. [20].

В заключение приведем количественные показатели изменчивости концентрации CH_4 в Москве – для возможности использования при

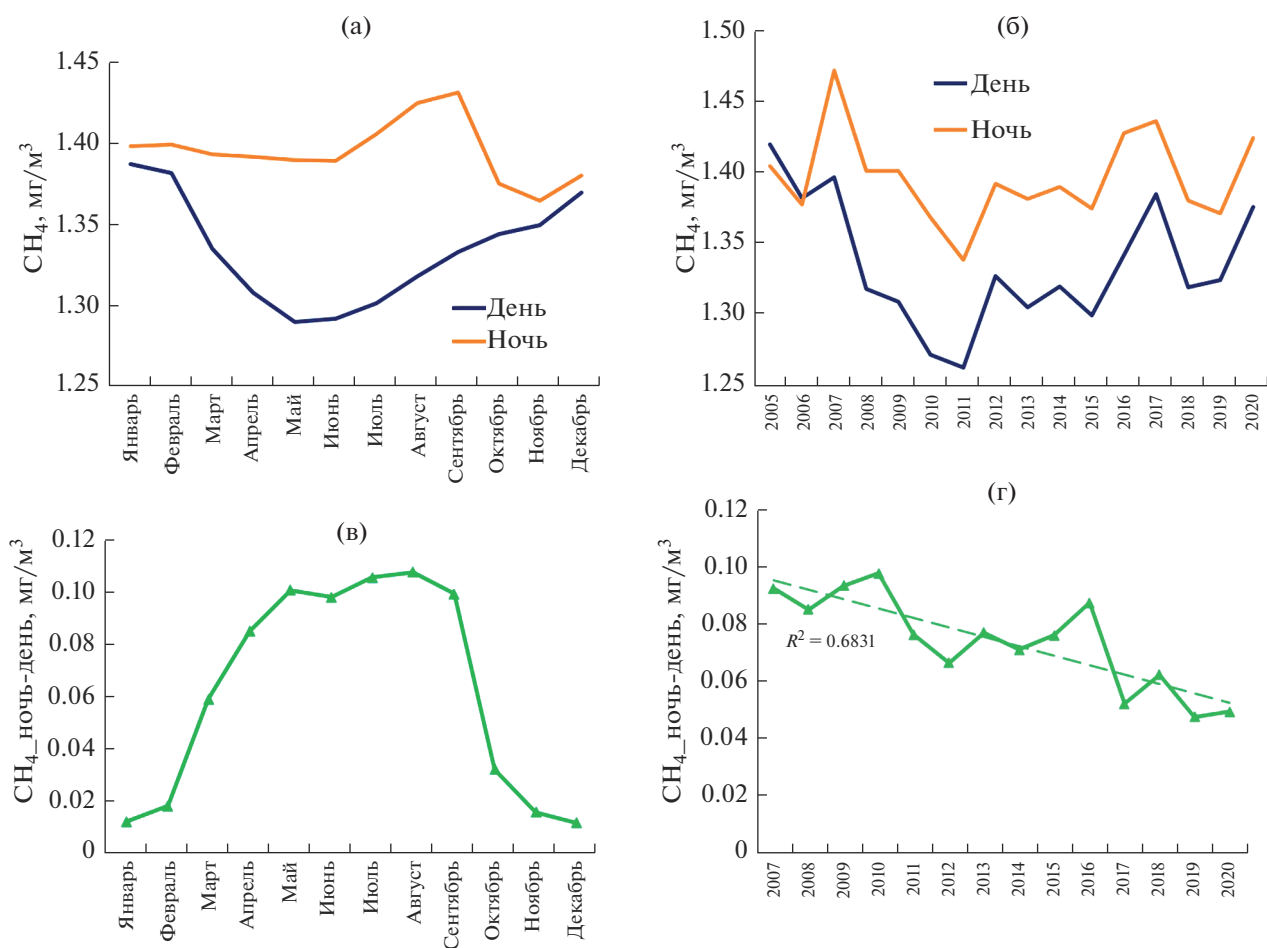


Рис. 7. Внутрисуточные различия (между днем и ночью) концентрации метана в приземном воздухе Москвы в разные месяцы и годы: а) и б) – ночные и дневные значения; в) и г) – разность ночных и дневных значений (ночь–день).

численных оценках. Средняя концентрация метана в приземном воздухе Москвы в 2005–2020 гг. составила $1.369 \pm 0.035 \text{ mg}/\text{m}^3$. Максимальный разброс среднемесячных концентраций был в 2010, а минимальный – в 2020 г. (0.19 и $0.08 \text{ mg}/\text{m}^3$, соответственно). Во внутригодовых вариациях максимальное среднемесячное значение ($1.395 \pm 0.077 \text{ mg}/\text{m}^3$) было достигнуто в феврале, а минимальное ($1.343 \pm 0.028 \text{ mg}/\text{m}^3$) в июне. Средние величины ночной и дневной концентрации метана за рассматриваемые годы составили 1.396 и $1.334 \text{ mg}/\text{m}^3$, соответственно, при максимальной разнице между ночью и днем $0.118 \text{ mg}/\text{m}^3$ в мае-сентябре и минимальной – $0.016 \text{ mg}/\text{m}^3$ в ноябре-феврале.

С точки зрения радиационных процессов в атмосфере метан как климатообразующий компонент в приземной атмосфере оказывается максимально значимым в августе и сентябре в ночные часы, поскольку молекулы метана имеют полосы поглощения в тепловой области спектра. Однако,

как показано в [30], вопрос о влиянии атмосферного метана на радиационный баланс атмосферы в целом и в ее нижнем слое должен рассматриваться с учетом содержания атмосферного водяного пара.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Исследована многолетняя (2005–2020 гг.) изменчивость концентрации метана в приземном слое атмосферы Москвы – по данным ГПБУ “Мосэкомониторинг”. Рассмотрены разные временные масштабы с учетом возможных механизмов формирования поля приземного метана в атмосфере города.

Средняя годовая концентрация метана за рассматриваемый период составила $1.369 \pm 0.035 \text{ mg}/\text{m}^3$. Разброс значений по данным разных АСКЗА ГПБУ “Мосэкомониторинг” выше, чем разброс средне-годовых величин, что, по-видимому, связано со значительными различиями районов города по инфраструктуре, по типу и интенсивности локальных антропогенных источников.

Выявлен минимум концентрации метана в Москве в 2010 и 2011 гг., что ассоциируется с жарким летом 2010 г., сопровождавшимся сильными пожарами на ЕТР и частичным высыханием болот — основного регулятора межгодовых вариаций содержания метана в атмосфере над северной Евразией. Показано, что в целом средняя концентрация метана в холодное полугодие тем ниже, чем выше средняя температура воздуха предшествующего теплого полугодия.

Внутригодовые изменения концентрации CH_4 характеризуются минимальными значениями летом и максимальными в зимнее время, с промежуточным максимумом в августе—сентябре. Эти закономерности, главным образом, определяются эффективностью стоков метана из атмосферы, основным из которых является химическое взаимодействие в воздухе с радикалом гидроксила OH^\cdot . Рассматривая концентрацию озона в качестве показателя эффективности этого канала стока, показано, что в июле, а также в холодные месяцы года (с ноября по февраль) в приземной атмосфере Москвы величины концентраций метана и озона коррелируют друг с другом с отрицательными коэффициентами. В остальные месяцы связи не столь однозначны вследствие разнонаправленных изменений эффективности различных источников и стоков метана в переходные сезоны года.

Положительная корреляция между величинами концентрации метана и температурой воздуха обнаружена только в июле и августе, что, по-видимому, обусловлено ростом эмиссий метана от сравнительно близких естественных источников в самые теплые месяцы года, но не при слишком жарком и сухом лете.

Короткопериодная (внутрисуточная) изменчивость концентрации метана, обусловленная вариациями в течение суток эффективности химических стоков CH_4 и приземной стратификации атмосферы, характеризуется более высоким содержанием метана в воздухе ночью, чем днем. Разница концентрации CH_4 между ночью и днем почти на порядок больше летом, чем зимой (0.12 и 0.016 мг/м^3 , соответственно). В теплое полугодие (от мая до сентября) эта разница мало меняется от месяца к месяцу. Промежуточный максимум концентрации метана в приземном воздухе в августе—сентябре проявляется только в ночной концентрации метана, а дневная концентрация монотонно возрастает от летних месяцев к зимним.

Комплексность и разнонаправленность природных процессов в атмосфере и на поверхности создают сложную и изменчивую картину формирования поля метана в приземной атмосфере среднеширотного города.

Некоторые предварительные результаты данного исследования были доложены на Междуна-

родном симпозиуме “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД–2021) и опубликованы в трудах этого симпозиума [31].

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН. Анализ данных наблюдений выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-05-00254). Авторы благодарят анонимного рецензента за полезные замечания и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dlugokencky E.J.*, NOAA/GML (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/).
2. *Бажин Н.М.* Метан в окружающей среде: аналитический обзор // Изд. ГПНТБ СО РАН, 2010. Сер. Экология. Вып. 93. 56 с.
3. *Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е.* Роль метана в современном изменении климата. М., 2018. 106 с.
4. *Киселев А.А., Кароль И.Л.* С метаном по жизни // СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. 2019. 73 с.
5. *Дзюба А.В., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Оценка изменений скорости стока метана из атмосферы при потеплении климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 3. С. 372–382.
6. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
7. *Bader W., Bovy B., Conway S., Strong K., Smale D., Turner A.J., Blumenstock T., Boone C., Coen M.C., Coulon A., Garcia O., Griffith D.W.T., Hase F., Hausmann P., Jones N., Krummel P., Murata I., Morino I., Nakajima H., O'Doherty S., Paton-Walsh C., Robinson J., Sandrin R., Schneider M., Servais C., Sussmann R., Mahieu E.* The recent increase of atmospheric methane from 10 years of ground based NDACC FTIR observations since 2005 // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. № 3. P. 2255–2277. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2255-2017>
8. *Арабаджян Д.К., Парамонова Н.Н., Макарова М.В., Поберовский А.В.* Анализ временной изменчивости концентрации метана в атмосфере по данным наземных наблюдений // Вестник СПбГУ. 2015. Сер. 4. Т. 2(60). Вып. 3. С. 204–215.
9. *Макарова М.В., Курнер О., Тимофеев Ю.М. и др.* Анализ изменчивости атмосферного метана в Петергофе (59.88 с.ш. 29.83 в.д.) по данным наземных измерений и модели. 1. Общая характеристика рядов // Изв. РАН. ФАО. 2015. Т. 51. № 2. С. 201–209.
10. *Макарова М.В., Курнер О., Тимофеев Ю.М. и др.* Анализ изменчивости атмосферного метана в Петергофе (59.88° с.ш.; 29.83° в.д.) по данным наземных измерений и моделирования. 2. Годовой ход и долговременный тренд // Изв. РАН. ФАО. 2015. Т. 51. № 2. С. 201–209.
11. *Мосэкомониторинг.* <https://mosecom.mos.ru/>.
12. *Виноградова А.А., Федорова Е.И., Беликов И.Б., Гинзбург А.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И.* Временные изменения концентраций углекислого газа и метана в городских условиях // Изв. РАН. ФАО. 2007. Т. 43. № 5. С. 651–663.

13. Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Федорова Е.И. Некоторые особенности сезонного хода концентрации метана в приземной атмосфере в начале XXI века // Изв. РАН. ФАО. 2011. Т. 47. № 1. С. 50–63.
14. Исидоров В.А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль. СПб.: Алга, 1994. 188 с.
15. Cao M., Gregson K., Marshall S. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change // Atmos. Environ. 1998. V. 32. № 19. P. 3293–3299.
16. Nisbet E.G., Dlugokencky E.J., Manning M.R., Lowry D., Fisher R.E., France J.L., Michel S.E., Miller J.B., White J.W.C., Vaughn B., Bousquet P., Pyle J.A., Warwick N.J., Cain M., Brownlow R., Zazzeri G., Lanoiselle M., Manning A.C., Gloor E., Worthy D.E.J., Brunke E.-G., Labuschagne C., Wolff E.W., Ganesan A.L. Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift // Global Biogeochemical Cycles. 2016. V. 30. Is. 9. P. 1356–1370. <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>
17. Волперский С.Э., Сурин А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
18. Sirin A.A., Maslov A.A., Valyaeva N.A., Tsyganova O.P., Glukhova T.V. Mapping of Peatlands in the Moscow Oblast Based on High Resolution Remote Sensing Data // Contemporary Problems of Ecology. 2014. V. 7. № 7. P. 809815. <https://doi.org/10.1134/S1995425514070117>
19. Ситнов С.А. Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 г // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 7. С. 572–581.
20. Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А. Космический мониторинг Сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 г. и тенденции 20-летних изменений // ДАН. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106.
21. Гришуткин О.Г. Влияние пожаров 2010 года на болотные экосистемы Мордовского государственного природного заповедника // Труды Мордовского государственного природного заповедника имени П.Г. Смидовича. 2012. Вып. X. С. 261–265.
22. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2011 год / Под ред. А.Ю. Недре. СПб: ОАО “НИИ Атмосфера”, 2013. 196 с.
23. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2010 год / Под ред. А.Ю. Недре. СПб: ОАО “НИИ Атмосфера”, 2011. 560 с.
24. Пановский Г.А., Брайер Г.В. Статистические методы в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 209 с.
25. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 22 декабря 2017 года N 165 Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492–17 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений” (с изменениями на 31 мая 2018 года). <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201801090023>.
26. Chubarova N.Ye., Androsova Ye.Ye., Lezina Ye.A. The dynamics of the atmospheric pollutants during the Covid-19 pandemic 2020 and their relationship with meteorological conditions in Moscow // Geography, Environment, Sustainability. 2021. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-012>
27. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1980. 184 с.
28. Локощенко М.А. Температурная стратификация нижней атмосферы в Москве // Метеорология и гидрология. 2007. Т. 32. № 1. С. 53–64.
29. Локощенко М.А., Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Лезина Е.А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Изв. РАН. ФАО. 2021. Т. 57. № 6. С.
30. Feldman D.R., Collins W.D., Biraud S.C., Risser M.D., Turner, Gero P.J., Tadić J., Helmig D., Xie S., Mlawer E.J., Shippert T.R., Torn M.S. Observationally derived rise in methane surface forcing mediated by water vapour trends // Nature Geosci. 2018. V. 11. P. 238–243. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0085-9>
31. Виноградова А.А. Гинзбург А.С., Губанова Д.П. Изменчивость концентрации метана в приземном воздухе Москвы в холодные полугодия 2005–2020 гг. // В сборнике: Международный симпозиум “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД–2021). Сборник трудов Международного симпозиума. Санкт-Петербург, 2021. С. 84–86.

Variability of Methane Concentration in the Surface Air of Moscow at Different Time Scales

A. A. Vinogradova^{1,*}, A. S. Ginzburg¹, and D. P. Gubanova¹

¹A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia
*e-mail: anvinograd@yandex.ru

The variability of methane (CH₄) concentration in the surface layer of the atmosphere in Moscow at different time scales was analyzed according to the data of long-term regular measurements by the State Budgetary Environmental Institution “Mosecomonitoring” (2005–2020). Possible mechanisms of formation of the meth-

ane concentration field in the city atmosphere are considered. The average concentration of methane in the surface air in the city during the cold half-year is lower, the higher the average air temperature of the previous warm half-year. The lowest concentrations of methane in Moscow in 2010 and 2011 are associated with the hot summer of 2010, accompanied by severe fires and partial drying of wetlands in the center of the European territory of Russia. The intra-annual variations of CH_4 concentration are characterized by minimum values in summer and maximum values in winter. The additional maximal concentration of CH_4 in August-September is typical only for the night methane concentration. In the daily cycle, there is a higher methane content in the air at night than during the daytime. The results of the study demonstrate the complexity of multidirectional nature processes in the atmosphere and on the underlying surface, forming a dynamically changing field of methane concentration in the surface air of a megalopolis.

Keywords: atmospheric air, urban surface layer, Moscow, methane, sources and sinks, temporal variability, meteorological parameters