

УДК 551.510.4

## Региональные источники и сезонный цикл метана в Центральной Сибири и Арктике: наблюдения и численные эксперименты

К.Б. Моисеенко<sup>✉1</sup>, Ю.А. Штабкин<sup>1</sup>, А.В. Васильева<sup>1</sup>,  
А.И. Скороход<sup>1,2</sup>, Е.И. Фёдорова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

<sup>2</sup>Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna  
1090, Vienna, Josef-Holaubek-Platz 2, Austria

Поступила в редакцию 26.05.2023 г.;

после доработки 24.07.2023 г.;

принята к печати 21.08.2023 г.

На основе глобальной транспортно-химической модели GEOS-chem проведены оценки вкладов антропогенных и природных эмиссий метана ( $\text{CH}_4$ ) в Северной Евразии ( $>40^\circ$  с.ш.) и на территории России в его приземное содержание на региональных измерительных станциях ZOTTO, Териберка и Тикси в 2007–2018 гг. Результаты модельных расчетов хорошо согласуются с предложенным полуаналитическим решением, основанным на разделении полного вклада (атмосферного отклика) на синоптическую и глобальную компоненты. На временах адвекции, соответствующих синоптическому временному интервалу, среднегодовой вклад антропогенных эмиссий на территории России в содержание метана в ZOTTO (38,6 млрд<sup>-1</sup>) более чем в 2 раза превышает вклад эмиссий из источников Западной Европы (17,7 млрд<sup>-1</sup>), тогда как для арктических станций влияние российских и европейских источников сопоставимо (19,5 и 12,4 млрд<sup>-1</sup> соответственно). Сравнительно низкий, по сравнению с ZOTTO, вклад континентальных эмиссий в приземное содержание метана и его годовую изменчивость на арктических станциях обусловлен большими временами адвекции из регионов-источников. Близость модельных величин откликов для Териберки и Тикси объясняется сравнительно однородным (циркумполярным) распределением антропогенного и биогенного сигналов в полярных широтах.

*Ключевые слова:* метан, тропосфера, Центральная Сибирь, Арктика, региональные эмиссии, WetCHARTs, EDGAR, GEOS-Chem, атмосферный перенос; methane, troposphere, Central Siberia, Arctic, regional  $\text{CH}_4$  sources, WetCHARTs, EDGAR, TXM GEOS-Chem, atmospheric transport.

### Введение

Интерес к наблюдениям содержания метана ( $\text{CH}_4$ ) в приземном слое воздуха обусловлен влиянием данного соединения на перенос радиации и фотохимические процессы в атмосфере [1], а также важной ролью метанового цикла в динамике земной системы в целом [2]. Для Северной Евразии исследование регионального баланса тропосферного метана актуально в связи с высокой потенциальной значимостью региона как источника эмиссий парниковых газов и происходящими в нем климатическими изменениями. Важная роль эмиссий из влажных и пресноводных экосистем региона в глобальном

цикле метана подчеркивалась в большом количестве модельных и экспериментальных работ (см., например, [3–8] и ссылки на них).

При оценках региональных потоков метана необходимой частью исходной информации о Земной системе являются данные прямых измерений содержания метана в приземном слое воздуха на фоновых станциях атмосферного мониторинга. Использование этих данных в алгоритмах восстановления полей эмиссий по методу top-down, основанных на решении обратной задачи атмосферного переноса [8], позволяет ограничить ошибки воспроизведения модельных полей атмосферной концентрации метана при введении поправок к априорным полям эмиссий. Имеющиеся количественные оценки прямого вклада региональных источников метана в его содержание над континентом немногочисленны и характеризуются значительным разбросом ввиду неопределенностей величин эмиссий на фоне их большой сезонной и межгодовой изменчивости [8–11].

\* Константин Борисович Моисеенко (konst.dvina@gmail.com); Юрий Александрович Штабкин (yuryshabkin@gmail.com); Анастасия Васильевна Васильева (vivechar@gmail.com); Андрей Иванович Скороход (skorokhod@ifaran.ru); Евгения Ивановна Фёдорова (fedorova@ifaran.ru).

Цель настоящей работы — оценить влияние природных и антропогенных эмиссий метана в Северной Евразии на его внутригодовую изменчивость. Актуальность подобных оценок продиктована сильной ограниченностью данных мониторинга метана в Северной Евразии и необходимостью анализа имеющихся наблюдений в рамках наиболее общей постановки задачи атмосферного переноса с учетом региональных и удаленных источников эмиссий.

## 1. Данные и методы

В статье анализируются результаты измерений на высотной мачте ст. ZOTTO в Центральной Сибири [4] и региональных арктических станциях Териберка и Тикси (рис. 1).

Данные многолетних наблюдений на арктических станциях сопоставлены с расчетами по транспортно-химической модели (TXM) GEOS-chem при задании всех основных планетарных источников и стоков метана. Количественные оценки вкладов антропогенного и биогенного сигналов в содержание метана на каждой из станций выполнены методом редукции эмиссий в заданных модельных регионах. Начало анализируемого периода примерно соответствует времени наступления нового этапа глобального роста содержания метана в атмосфере после его замедления в 1990-х и начале 2000-х гг. [12, 13].

### 1.1. Стационарные наблюдения

В работе использовались непрерывные ряды концентрации метана (отношения смеси, млрд<sup>-1</sup>), полу-

ченные на ст. Тикси (январь 2012 г. — июль 2018 г.) с помощью газоанализаторов Picarro и в Териберке (январь 2007 — декабрь 2017 гг.).

Приземные измерения концентрации метана в Тикси осуществлялись в рамках международной сети Global Air Sampling Network Global Monitoring Laboratory (GML) NOAA. Исходные минутные данные предоставляются для некоммерческого использования на веб-сайте GML (<https://gml.noaa.gov/ccgg/ggrn.php>). Для измерения концентрации метана в Териберке пробы воздуха отбираются на регулярной основе в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Данные доступны на сайте Глобальной службы атмосферы ВМО (<https://gawsis.meteoswiss.ch/GAWSIS>).

Количественные оценки годовых вариаций и внутрисезонной изменчивости содержания метана в ZOTTO получены из результатов измерений газоанализатора Picarro [4] за 2009–2012 гг.

### 1.2. Модель GEOS-Chem

Глобальная TXM GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System chemical model, <https://geos-chem.seas.harvard.edu>) [14] основана на численном интегрировании системы конечно-разностных эйлеровых уравнений, описывающих адвекцию в регулярном поле ветра, подсеточный перенос и химическую трансформацию малых газовых и аэрозольных примесей, существенных для тропосферной фотохимической системы, с использованием метеорологических полей реанализа MERRA2. Расчеты проводились на базовой сетке с горизонтальным разрешением 4° × 5°.

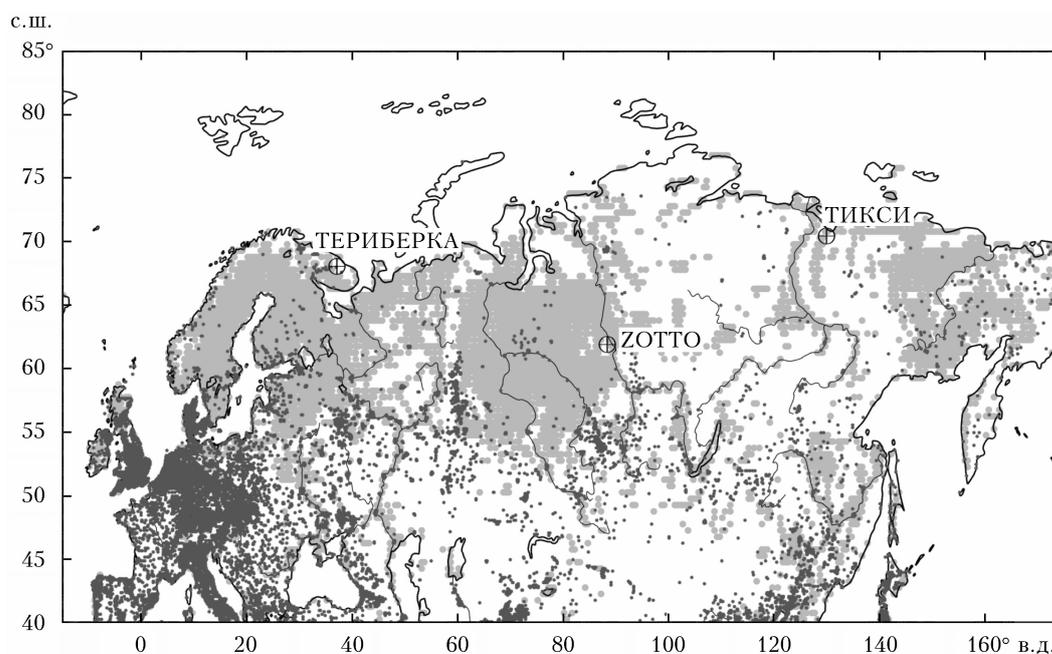


Рис. 1. Модельный регион «Северная Евразия» (10° з.д. — 180° в.д., 40–85° с.ш.). Серой заливкой показаны территории со среднегодовыми болотными эмиссиями метана  $\geq 1,13$  нмоль/м<sup>2</sup>·с. Темными кружками отмечены области ненулевых антропогенных эмиссий метана согласно инвентаризации EDGAR4.3.2

Антропогенные источники метана задавались в соответствии с глобальной инвентаризацией EDGAR4.3.2 с исходным разрешением  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  [15] (см. рис. 1). Эмиссии метана от горения биомассы рассчитывались по данным GFED4 [16], однако систематический анализ влияния природных пожаров на атмосферное содержание метана не проводился ввиду ограниченного пространственного разрешения модели и межгодовой и внутрисезонной изменчивости эмиссий.

Для задания потоков метана с переувлажненных территорий использовалась модель WetCHARTs v1.0 [17], основанная на спутниковых данных о свойствах подстилающей поверхности, температуре и осадках. Средняя величина потока ( $\text{кг CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) рассчитывается по эмпирической формуле

$$F_{\text{CH}_4}(t_m, \mathbf{r}) = s A(t_m, \mathbf{r}) R(t_m, \mathbf{r}) Q_{10}^{T(t_m, \mathbf{r})/10}, \quad (1)$$

где  $t_m$  – данный месяц;  $\mathbf{r}$  – ячейка широтно-долготной сетки;  $s$  – средне-глобальный масштабирующий множитель;  $A(t, \mathbf{r}) = w(\mathbf{r}) h(t, \mathbf{r})$  – доля занимаемой болотами площади,  $w$  и  $h$  – статическая и переменная во времени компоненты;  $R$  – интенсивность гетеротрофного дыхания, численно равная суммарному потоку углерода (C) с единицы площади подстилающей поверхности в атмосферу при разложении органического вещества;  $Q_{10}^{T(t_m, \mathbf{r})/10}$  определяет температурную зависимость эмиссионного отношения  $\text{CH}_4:\text{C}$ , где  $Q_{10}$  – отношение массы метана к массе углерода при  $T = 10^\circ\text{C}$ ,  $T$  – радиационная температура скин-слоя. Формула (1) дает приближение первого порядка при расчете глобального поля эмиссий метана, рассматриваемого как функционал от общего потока углерода, температуры и водного баланса [17].

Итоговая величина  $F_{\text{CH}_4}$ , заданная на сетке с разрешением  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  по пространству и 1 мес по времени, представляет собой сумму потоков метана с заболоченных территорий (wetlands), затопленных почв (water-logged) и пресноводных водоемов (inland water bodies) в соответствии с классификацией земной поверхности GLOBCOVER [18]. Последние два класса, по оценкам [17], могут давать вклад до 20% от общей площади переувлажненных территорий, рассчитываемой по модели. Тем не менее применительно к WetCHARTs далее для краткости будем использовать термин «болотные эмиссии» с учетом их определяющего вклада в суммарный поток метана от его природных источников.

Полное описание источников и стоков метана в модели приводится в [19].

Для России средние за 2007–2018 гг. годовые выбросы метана, согласно данным EDGAR4.3.2 и WetCHARTs1.0, составили 24,2 и 10,3 Тг соответственно. Разделив последнюю величину на площадь территории России (17,07 млн  $\text{км}^2$ ), получим средний за те же годы поток метана из влажных и пресноводных экосистем на уровне  $F_{\text{CH}_4, \text{wet}} = 1,81 \cdot 10^{-11}$   $\text{кг CH}_4/\text{м}^2 \cdot \text{с}$  (1,13 нмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ). Тер-

ритории Северной Евразии со среднегодовыми потоками метана  $\geq F_{\text{CH}_4, \text{wet}}$  показаны на рис. 1.

### 1.3. Атмосферный отклик на региональные эмиссии

Расчеты по модели GEOS\_chem проводились с 1 января 2007 г. по 31 декабря 2018 г. с дискретностью вывода 1 ч. Анализировались поля концентрации  $[\text{CH}_4]$  ( $\text{млрд}^{-1}$ ) на первом расчетном уровне, соответствующие среднему содержанию метана в приземном слое толщиной около 123 м.

Оценивалась чувствительность приземного поля метана к антропогенным и болотным эмиссиям в модельных областях ( $\Omega$ ) «Северная Евразия» (часть континента к северу от  $40^\circ$  с.ш.) и «Россия» (маска территории на сетке  $4^\circ \times 5^\circ$  по данным naturalearthdata.com). При задании потоков метана на нижней границе рассматривался сценарий со всеми планетарными эмиссиями согласно базовой модельной конфигурации (сценарий A0), а также сценарии при выключенных антропогенных либо болотных эмиссиях в Северной Евразии (сценарии A1 и W1 соответственно) и России (сценарии A2 и W2). Величины годовых эмиссий метана ( $E_{\text{CH}_4}$ ) в модельных регионах по данным EDGAR и WetCHARTs приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Средние за 2007–2018 гг. эмиссии метана ( $E_{\text{CH}_4}$ , Тг  $\text{CH}_4/\text{год}$ ) в различных регионах

Регион	Модель		Все эмиссии*
	EDGAR4.3.2	WetCHARTs1.0	
Земной шар	355,0	172,6	544,4
Северная Евразия**	57,4	14,4	74,4
Россия	24,2	10,3	39,0

\* С учетом всех источников метана в GEOS-chem, включая природные пожары, геологические источники и термитники.

\*\* Часть континента севернее  $40^\circ$  с.ш.

Модельные поля атмосферного отклика в содержании метана ( $\chi_{\text{mod}}$ ,  $\text{млрд}^{-1}$ ) за каждый месяц 2007–2018 гг. рассчитывались методом редукации эмиссий. Для источников в модельной области величина  $\chi_{\text{mod}}$  в ячейке  $\mathbf{r}$  за месяц  $t_m$  определялась как разность между концентрацией метана, полученной из базового модельного расчета со всеми планетарными эмиссиями  $[\text{CH}_4]_0$  (сценарий A0), и концентрацией  $[\text{CH}_4]^{(-)}$ , рассчитанной по одному из сценариев A или W:

$$\chi_{\text{mod}}(\mathbf{r}, t_m; \Omega) = \langle [\text{CH}_4]_0(\mathbf{r}, t) - [\text{CH}_4]^{(-)}(\mathbf{r}, t; \Omega) \rangle_m, \quad (16)$$

где  $\langle \rangle_m$  означает среднее за данный месяц текущего года. Учитывая сравнительную малость вклада региональных источников в глобальную эмиссию

метана (см. табл. 1), можно пренебречь нелинейными эффектами, обусловленными влиянием атмосферного содержания метана на глобальное поле гидроксила. Значение  $\chi_{\text{mod}}$  в этом случае будет равно вкладу региона модельной области в глобальное поле метана, рассчитанное согласно сценарию A0 при текущих планетарных источниках эмиссий и состоянии атмосферной фотохимической системы.

При заданном поле эмиссий в модельной области средняя за продолжительный период концентрация метана в  $\mathbf{r}$  полностью определяется распределением вероятности перехода частицы воздуха (несущей определенную массу примеси) из этой области в  $\mathbf{r}$  в зависимости от времени адвекции  $t_{\text{adv}}$  (спектром возраста). Согласно расчетам по модели FLEXTRA [20] для европейских источников и произвольной точки на континенте севернее 30–40° с.ш. преобладающий вклад в концентрацию трассера вносит воздух с возрастом < 10–20 дней, что соответствует верхней границе синоптического временного интервала  $T_{\text{syn}}$  (= 20 сут). Основная часть примеси на временах  $\leq T_{\text{syn}}$  остается захваченной на высотах менее 2–3 км (см. рис. 5 и 11 в [20]) ввиду сравнительно слабого вертикального обмена между атмосферным пограничным слоем и свободной тропосферой при адвекции над континентом. Севернее 65–70° с.ш. наблюдается сдвиг максимума спектральной функции в сторону больших времен адвекции, при этом основной вклад в суммарный сигнал приходится на время переноса от 10 до 30 сут. В соответствии с выводами [20] верхняя граница приведенного диапазона близка к характерному времени  $T_{\text{mix}}$  (~ 1 мес) зонального и меридионального выравнивания поля трассера во внутритропической тропосфере Северного полушария. Величина  $T_{\text{mix}}$  оказывается при этом значительно меньше времени обмена воздухом между умеренными широтами и приэкваториальными областями (~ 0,4 года) и экспоненциального времени межполушарного обмена  $T_{\text{int}}$  (1,2–1,5 года) [21].

Отмеченная выше тенденция к захвату примесей от европейских источников на временах  $\leq T_{\text{syn}}$  в нижней тропосфере отличает адвекцию над континентом от крупномасштабного переноса примесей от основных климатически значимых регионов антропогенного загрязнения, сосредоточенных вблизи восточных побережий Северной Америки и Азии. Приуроченность последних к высотным фронтальным зонам определяет высокие скорости вертикальной адвекции с последующим трансокеаническим переносом на высотах средней и верхней тропосферы [20].

В дальнейшем анализе будем пренебрегать возможными многолетними трендами полей ветра и турбулентности в модельной области, так что для выбранного месяца перенос долгоживущей примеси в синоптическом временном интервале можно рассматривать как статистически стационарный процесс. Неравенство  $T_{\text{syn}} \sim T_{\text{mix}} \ll T_{\text{int}}$ , выражающее разделение на быстрые и медленные процессы перемешивания в атмосфере, позволяет в этом случае представить среднее по ансамблю реализаций поле

атмосферного отклика  $\chi(\mathbf{r}, t_m; \Omega)$  от источников в модельной области в виде суперпозиции синоптической ( $\chi_{\text{syn}}$ ) и глобальной ( $\chi'$ ) компонент:

$$\chi_j(\mathbf{r}, t_m; \Omega) = \chi_{\text{syn}(m)}(\mathbf{r}; \Omega) + \chi'_j(t_m; \Omega) \quad (2)$$

$$(t_m \gg T_{\text{mix}}),$$

где  $\chi_{\text{syn}}$  характеризует прямой вклад от источников на временах переноса  $\leq T_{\text{syn}}$ ;  $\chi'_j$  — долговременный эффект накопления метана в атмосфере (на временах  $t_m \geq T_{\text{int}}$ ),  $j \equiv S$  и  $N$  для Южного и Северного полушарий соответственно.

Следуя [22], положим  $\chi_{\text{syn}(m)}(\mathbf{r}; \Omega) = \langle \chi(\mathbf{r}, t; \Omega) \rangle_{m,y}$ , где оператор  $\langle \rangle_{m,y}$  представляет среднее арифметическое от соответствующих величин за все дни месяца «m» для всех лет из рассматриваемого диапазона

Согласно [21, 23] для нахождения явного вида функций  $\chi'_S$  и  $\chi'_N$  воспользуемся двухбоксовой моделью атмосферы с заданной интенсивностью  $r$  ( $= 1/T_{\text{int}}$ ) межполушарного обмена воздухом

$$\frac{d\chi'_S}{dt} = r(\chi'_N - \chi'_S) - \lambda\chi'_S; \quad (3)$$

$$\frac{d\chi'_N}{dt} = -r(\chi'_N - \chi'_S) - \lambda\chi'_N + S_N \quad (4)$$

с начальными условиями  $\chi'_S(0) = 0$ ,  $\chi'_N(0) = \chi'_N^0$ , где  $\lambda = 1/\tau_{\text{CH}_4}$ ;

$$S_N = E_{\text{CH}_4} / M_{\text{NH}} \cdot \mu_a / \mu_{\text{CH}_4} \quad (5)$$

— суммарная интенсивность источников метана в пересчете на отношение смеси, млрд<sup>-1</sup>/год;  $M_{\text{NH}}$  — масса воздуха в тропосфере каждого из полушарий (слой толщиной 1000–200 мбар),  $\mu_a = 29$  г/моль и  $\mu_{\text{CH}_4} = 16,05$  г/моль — молярные массы воздуха и метана соответственно.

Решение (3), (4) имеет вид

$$\chi'_S = \frac{1}{2} \left( \chi_N^0 - \frac{S_N}{\lambda} \right) \exp(-\lambda t) - \frac{1}{2} \left( \chi_N^0 - \frac{S_N}{2r + \lambda} \right) \times$$

$$\times \exp(-[2r + \lambda]t) + \frac{S_N r}{\lambda(2r + \lambda)}, \quad (6a)$$

$$\chi'_N = \frac{1}{2} \left( \chi_N^0 - \frac{S_N}{\lambda} \right) \exp(-\lambda t) + \frac{1}{2} \left( \chi_N^0 - \frac{S_N}{2r + \lambda} \right) \times$$

$$\times \exp(-[2r + \lambda]t) + \frac{S_N(r + \lambda)}{\lambda(2r + \lambda)}. \quad (6b)$$

В пределе  $\lambda \rightarrow 0$  выражения (6a) и (6b) переходят в формулы (2) из [23], в соответствии с которыми на больших временах имеет место линейный рост концентрации трассера

$$\chi_j(\mathbf{r}, t; \Omega) = \chi_{\text{syn}(m)}(\mathbf{r}; \Omega) \sim \frac{1}{2} \left( \chi_N^0 \mp \frac{S_N}{2r} \right) + \frac{1}{2} S_N t$$

$$(\lambda = 0, rt \gg 1), \quad (7)$$

где знаки «-» и «+» берутся для  $j = S$  и  $j = N$ . В использованных нами расчетных сценариях  $\chi_N^0 \equiv 0$ , откуда с учетом (2) и (6b) получим

$$\chi_N(\mathbf{r}, t; \Omega) = \chi_{\text{syn}(m)}(\mathbf{r}; \Omega) - \frac{S_N}{2} \left( \frac{\exp(-\lambda t)}{\lambda} + \frac{\exp(-[2r + \lambda]t)}{2r + \lambda} \right) + \frac{S_N(r + \lambda)}{\lambda(2r + \lambda)}. \quad (8)$$

При  $\lambda > 0$  и  $\lambda t \gg 1$  величины  $\chi'_j$  определяются последними слагаемыми в правых частях (6а) и (6б). Соответствующая асимптотика поля  $\chi$  для Северного полушария имеет вид

$$\chi_{\text{lim}}(\mathbf{r}; \Omega) \sim \chi_{\text{syn}(m)}(\mathbf{r}; \Omega) + \frac{S_N(r + \lambda)}{\lambda(2r + \lambda)} \quad (\lambda t \gg 1). \quad (9)$$

Для выбранного месяца сравнение модельного отклика  $\chi_{\text{mod}}$  (1) с  $\chi'_N$  (6б) при известной интенсивности источника  $S_N$  позволяет оценить величину региональной добавки  $\chi_{\text{syn}}$  как среднюю многолетнюю разность между полным модельным откликом и его глобальной компонентой согласно выбранному модельному сценарию:

$$\chi_{\text{syn}(m)}(\mathbf{r}; \Omega) = \langle \chi_{\text{mod}}(\mathbf{r}, t_m; \Omega) - \chi'_N(t_m; \Omega) \rangle. \quad (10)$$

В качестве итоговых величин для ZOTTO и арктических станций далее приведены результаты расчетов временных зависимостей  $\chi_{\text{mod}}(t)$  (1) и  $\chi_N(t)$  (8). Средние многолетние величины регионального вклада  $\chi_{\text{syn}(m)}$  (10) и соответствующие асимптотические оценки для суммарного атмосферного отклика  $\chi_{\text{lim}}$  (9) приводятся за январь и июль 2007–2018 гг. (центральные месяцы зимы и лета).

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Сравнение модельных данных со стационарными

Сравнение модельных и измеренных концентраций метана представлено на рис. 2. Годовой ход содержания метана в Териберке и ZOTTO характеризуется отчетливо выраженным максимумом в зимние месяцы и минимумом в конце весны – начале лета, средняя многолетняя разность между которыми (амплитуда вариаций) составляет 49,2 и 64,2 млрд<sup>-1</sup> соответственно. Наличие зимнего максимума отражает общую тенденцию к накоплению долгоживущих примесей в нижней внетропической тропосфере Северного полушария в холодный период года и связано с сезонным уменьшением окислительной способности атмосферы, высоты слоя перемешивания и интенсивности вертикального обмена воздухом между пограничным слоем и свободной тропосферой [24]. Аналогичный – одномодальный – годовой ход метана установлен и на других региональных станциях, расположенных в умеренных и высоких широтах Северного полушария [4, 24, 25]. Годовой ход метана, зарегистрированный на ст. Тикси, в целом близок к описанной выше одномодальной изменчивости с амплитудой 55,6 млрд<sup>-1</sup>. В отдельные годы в конце лета – начале осени наблюдается вторичный максимум, амплитуда которого в октябре 2015 г. (а также в августе 2019 г. и ноябре 2020 г.

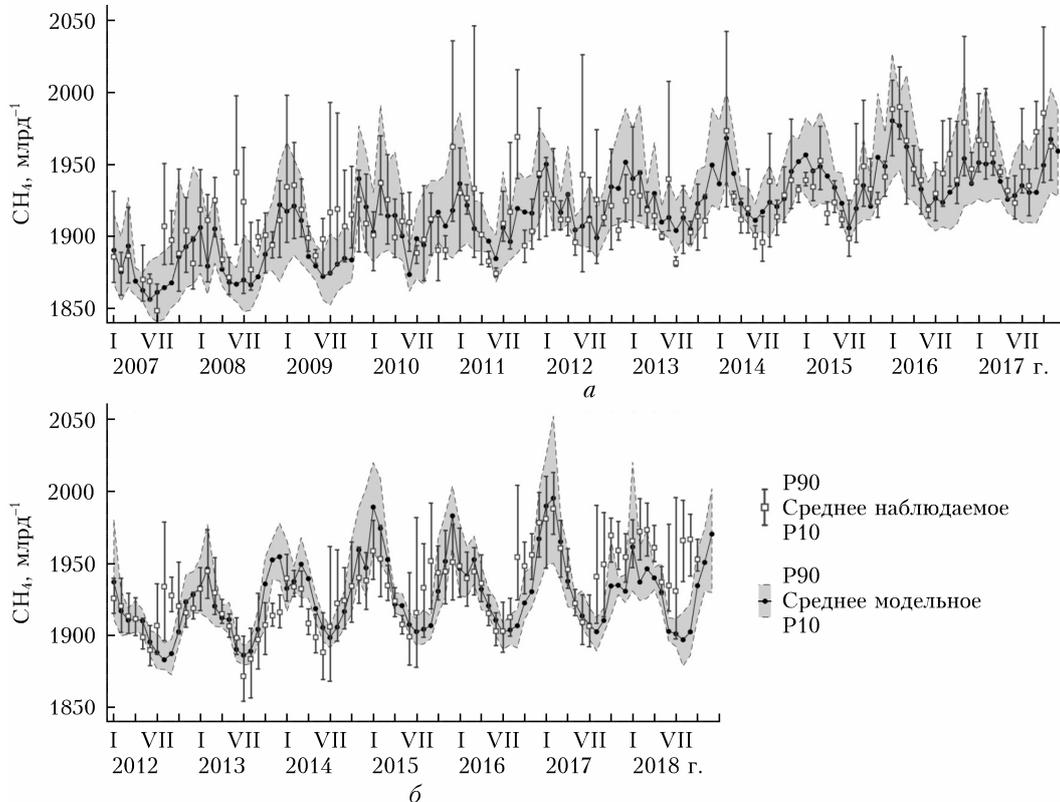


Рис. 2. Среднемесячные приземные концентрации  $\text{CH}_4$  в Териберке (а) и Тикси (б):  $\square$  – наблюдения,  $\bullet$  – модель; P10, P90 – 10-й и 90-й перцентили среднесуточных величин за данный месяц в Тикси; вертикальными отрезками показан разброс между минимальным и максимальным значениями для проб воздуха

согласно данным, публикуемым на сайте ГГО им. А.И. Воейкова) превышает амплитуду зимнего максимума. Как было отмечено ранее [6, 26], этот максимум на ст. Тикси совпадает по фазе с сезонным максимумом глубины протаивания приповерхностного слоя почвы на материке и минимумом площади морского льда на океаническом шельфе, что может указывать на заметный вклад региональных природных источников метана в наблюдаемый сезонный рост его приземной концентрации в аномально теплые годы.

Согласно рис. 2 и рис. 19 из [4], разброс измеренных концентраций в пределах одного месяца на всех станциях сопоставим с амплитудой годового хода. Наиболее сильно данная особенность проявляется на ст. Терiberка и ZOTTO ввиду их близости к основным регионам — источникам метана в западной части континента. Заметный вклад «синоптического шума» в общую изменчивость содержания долгоживущих примесей является характерной особенностью наблюдений в приземном слое и обусловлен как метеорологическими факторами, так и пространственной неоднородностью распределения соответствующих источников эмиссий.

В качестве критериев согласованности между наблюдениями и расчетами на арктических станциях использовались стандартные статистики: смещение  $\delta = \langle O - C \rangle$ , среднеквадратичное отклонение  $\delta = \left[ \langle (O - C)^2 \rangle \right]^{1/2}$  и коэффициент корреляции Пирсона  $R$ , где  $O$  и  $C$  — среднемесячные концентрации, полученные по наблюдениям и модельным расчетам соответственно. Согласно табл. 2 в декабре — феврале величина  $|\delta|$  намного меньше  $2\sigma$  («модельного шума») и амплитуды годовой изменчивости метана на обеих станциях, что наряду с высокими  $R$  указывает на успешность модельного прогноза в арктическом регионе зимой. В июне — августе имеет место заметное положительное смещение модельных концентраций, составляющее около 25% от амплитуды годового хода, при более низких, по сравнению с зимними месяцами, коэффициентах корреляции.

Таблица 2

Сравнение модельных и измеренных концентраций  $\text{CH}_4$  по отдельным станциям

Станция	$\delta$ , млрд <sup>-1</sup>	$\sigma$ , млрд <sup>-1</sup>	$R$
<i>Декабрь — февраль</i>			
Териберка	0,46	15,7	0,83
Тикси	-1,98	16,7	0,71
<i>Июнь — август</i>			
Териберка	12,8	23,0	0,54
Тикси	14,9	22,2	0,21

Дополнительный анализ показал, что вероятной причиной ухудшения общей согласованности между расчетными и экспериментальными данными в летний период являются ошибки в расчетах вертикального переноса на подсеточных масштабах ввиду завышенной интенсивности вертикального

турбулентного обмена. Другими причинами наблюдаемого несоответствия могут быть ошибки воспроизведения высокочастотных (синоптических) флуктуаций поля метана ввиду ограниченного пространственного разрешения модели (на что указывают сравнительно высокие  $\sigma$ ), а также эмиссий метана от локальных источников. В целом модель реалистично воспроизводит как внутригодовую, так и долгосрочную изменчивость измеренного содержания метана, что позволяет использовать результаты расчетов для выделения вкладов антропогенного и биогенного сигналов с учетом сезонных вариаций региональных источников эмиссий.

## 2.2. Атмосферный отклик в поле метана

Расчитанные по формуле (8) значения  $\chi_N$  хорошо согласуются с модельными откликами  $\chi_{\text{mod}}$  (1) для каждой из станций в диапазонах неопределенностей  $\tau_{\text{CH}_4}$  и  $T_{\text{mix}}$ , приводимых разными авторами. Зависимости  $\chi_{\text{mod}}(t)$  и  $\chi_N(t)$  при  $\tau_{\text{CH}_4} = 10,6$  лет [19],  $T_{\text{mix}} = 1,4$  года и величинах  $E_{\text{CH}_4}$  из табл. 1 для модельных сценариев A1 и W1 приведены на рис. 3 и рис. 4. (Результаты для сценариев A2 и W2 выглядят аналогично с пропорционально меньшими

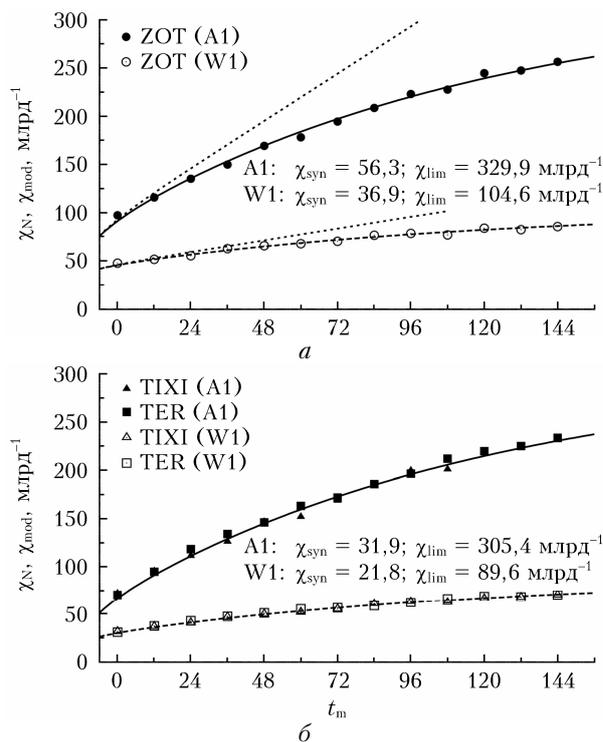


Рис. 3. Зависимости  $\chi_{\text{mod}}(t_m)$  (1) (точки) и  $\chi_N(t_m)$  (8) (сплошные кривые) для ст. ZOTTO (а) и арктических станций Тикси (TIXI) и Териберка (TER) (б) в 2007–2018 гг., а также значения  $\chi_{\text{syn}}$  (10) и  $\chi_{\text{lim}}$  (9) в ZOTTO и средние по арктическим станциям; пунктирные прямые — линейные аппроксимации по формуле (7) для ZOTTO. Сценарии A1 и W1 (модельный регион Северная Евразия). По оси абсцисс отложено порядковый номер месяца начиная с января 2007 г.

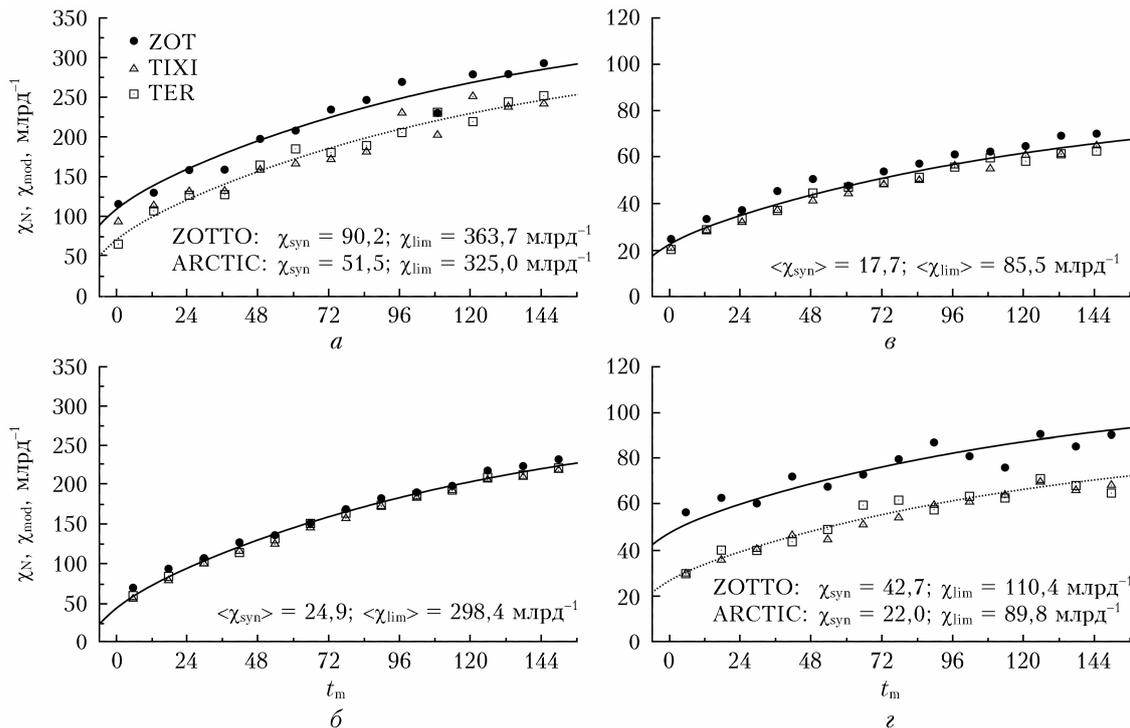


Рис. 4. Зависимости  $\chi_{mod}(t_m)$  (1) и  $\chi_N(t_m)$  (8) для ст. ZOTTO и арктических станций в сценариях A1 (а, б) и W1 (в, г) для января (а, в) и июля (б, г) 2007–2018 гг.;  $\chi_{syn}$  (10) и  $\chi_{lim}$  (9) для ZOTTO и средние для арктических станций (ARCTIC,  $\langle \rangle$ )

абсолютными величинами сигналов.) На уровне среднегодовых величин (рис. 3) расхождение между  $\chi_{mod}$  и  $\chi_N$  во второй и последующий годы не превышает 1%. Сравнивая результаты расчетов  $\chi_N(t)$  по формулам (7) и (8) для ZOTTO (рис. 3, а), можно сделать вывод, что учет конечного времени жизни метана в атмосфере необходим для количественных оценок региональных атмосферных откликов на временах более 1–2 лет ввиду большого времени реакции атмосферы на источники метана.

Вывод о правомерности разделения атмосферного отклика в поле метана на основе быстрых и медленных процессов переноса наглядно иллюстрируется представленными на рис. 5 вертикальными разрезами поля  $\chi_{mod}$  (1) вдоль  $50^\circ$  с.ш. (а, б) и  $50^\circ$  в.д. (в, г) за январь и июль 2015 г., взятого в качестве примера. Можно видеть, что поле метана от источников в Северной Евразии эффективно разделяется на область высоких абсолютных значений и пространственных градиентов к северу от  $30^\circ$  с.ш. в диапазоне долгот  $0-150^\circ$  в.д. и остальную часть атмосферы, в которой концентрация метана остается примерно постоянной (на уровне  $125 \text{ млрд}^{-1}$ ). Основное отличие между зимним и летним полями  $\chi_{mod}$  обусловлено сравнительно большей высотой слоя перемешивания в июле (около 3–4 км в сравнении с 2 км в январе) и пропорционально меньшим содержанием метана вблизи нижней границы расчетной области. В целом имеет место циркумполярное выравнивание поля  $\chi_{mod}$  севернее  $65-70^\circ$  с.ш. (рисунок не приводится) в соответствии с результатами [20] (см. обсуждение в п. 1.3). Данное свойст-

во численного решения проявляется в близком соответствии среднегодовых (рис. 3) и среднемесячных (см. рис. 4) значений  $\chi_{mod}$  для Тикси и Терiberки. С целью упрощения количественного анализа соответствующие оценки для арктического региона даются ниже как средние арифметические по обеим станциям.

Экстраполяция приведенных на рис. 3 и 4 зависимостей  $\chi_{mod}(t_m)$  и  $\chi_N(t_m)$  в начальный момент  $t_m = -6$  мес (момент включения модельных источников) позволяет получить оценки  $\chi_{syn}$  и  $\chi_{lim}$  по формулам (9) и (10) (табл. 3 и 4). Как следует из табл. 3, региональная компонента  $\chi_{syn}$  полного атмосферного отклика по сценариям А и W оказывается в 3–7 раз меньше соответствующей асимптотической величины ( $\chi_{lim}$ ) для антропогенного и биогенного сигналов. При выбранном времени жизни метана в атмосфере  $\tau_{\text{CH}_4} = 10,6$  лет функция  $\chi'_N(t_m)$  (66), определяющая асимптотику  $\chi_N(t_m)$ , достигает 90% от своего максимума за время  $t^* = 10,6 \ln 0,2^{-1} \approx 17$  лет, что примерно в 1,5 раза превышает анализируемый временной интервал.

На уровне среднегодовых величин (табл. 3) антропогенный сигнал в ZOTTO по сценариям A1 и A2 ( $56,3$  и  $38,6 \text{ млрд}^{-1}$  соответственно) примерно в два раза превышает данную величину для арктических станций ( $31,9$  и  $19,5 \text{ млрд}^{-1}$ ). Рассматривая разность между значениями  $\chi_{syn}$  в сценариях A1 и A2 (W1 и W2) в качестве оценки антропогенного (биогенного) сигнала от источников в Западной Европе, можно сделать вывод о преобладающем вкладе антропогенных эмиссий метана на территории

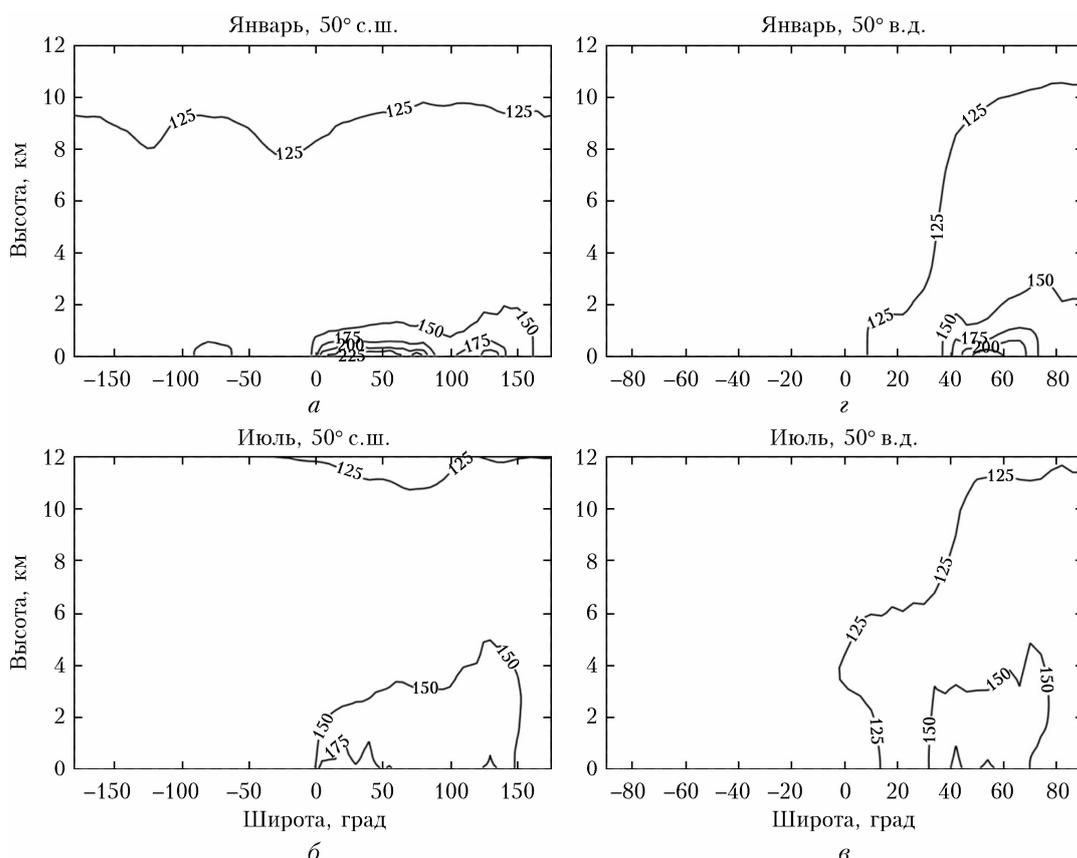


Рис. 5. Вертикальный разрез поля  $\chi_{\text{mod}}$  (1) вдоль 50° с.ш. (а, б) и 50° в.д. (в, г) за январь и июль 2015 г.; шаг изолиний 25 млрд<sup>-1</sup>. Расчеты EOS-chem по сценарию A1

Таблица 3  
Среднегодовые величины  $\chi_{\text{syn}}$  и  $\chi_{\text{lim}}$  для ZOTTO и арктических станций, млрд<sup>-1</sup>

Сценарий эмиссий	ZOTTO		Арктика	
	$\chi_{\text{syn}}$	$\chi_{\text{lim}}$	$\chi_{\text{syn}}$	$\chi_{\text{lim}}$
EDGAR (A1)	56,3	329,9	31,9	305,4
EDGAR (A2)	38,6	154,2	19,5	135,0
A1 – A2	17,7	175,7	12,4	170,4
WetCHARTs (W1)	36,9	104,6	21,8	89,6
WetCHARTs (W2)	34,2	83,4	19,7	68,9
W1 – W2	2,7	21,2	2,1	20,7

Таблица 4  
Среднемесячные величины  $\chi_{\text{syn}}$  для ZOTTO и арктических станций в январе и июле, млрд<sup>-1</sup>

Сценарий эмиссий	$\chi_{\text{syn}}$ (ZOTTO)		$\chi_{\text{syn}}$ (Арктика)	
	январь	июль	январь	июль
EDGAR (A1)	90,2	29,8	51,5	22,5
EDGAR (A2)	58,3	20,5	21,7	11,6
A1 – A2	31,9	9,3	29,8	10,9
WetCHARTs (W1)	21,2	42,7	15,9	22,0
WetCHARTs (W2)	19,0	40,8	12,6	17,1
W1 – W2	2,2	1,9	3,3	4,9

России (38,6 млрд<sup>-1</sup>) в ZOTTO по сравнению с европейскими источниками (17,7 млрд<sup>-1</sup>), тогда как для арктических станций вклад российских и евро-

пейских источников оказывается сопоставимым (19,5 и 12,4 млрд<sup>-1</sup> соответственно). Атмосферные отклики в сценарии W1 как на ст. ZOTTO, так и на арктических станциях лишь ненамного превышают соответствующие величины в сценарии W2. Таким образом, вклад болотных эмиссий на территории России абсолютно преобладает в суммарном биогенном сигнале над вкладом таких же эмиссий от источников Северной Евразии: 34,2 и 19,7 млрд<sup>-1</sup> для ZOTTO и арктических станций (Россия); 2,7 и 2,1 млрд<sup>-1</sup> (Западная Европа).

### 2.3. Сезонные вариации антропогенного и биогенного сигналов

Аналогичные оценки, но для января и июля, представлены в табл. 4. Наблюдаемое на всех станциях уменьшение антропогенного и увеличение биогенного вклада от зимы к лету отражают суммарный эффект сезонных вариаций мощностей эмиссий, режимов атмосферной циркуляции, а также глубины и скорости вентиляции атмосферного пограничного слоя над континентом.

Наибольший отклик в содержании метана на континентальные антропогенные эмиссии на протяжении всего года наблюдается на ст. ZOTTO: 90,2 млрд<sup>-1</sup> в январе и 29,8 млрд<sup>-1</sup> в июле в сравнении с 51,5 и 22,5 млрд<sup>-1</sup> в аналогичные месяцы

на арктических станциях. Как было отмечено выше, Центральная Сибирь находится в зоне прямого влияния антропогенных источников атмосферного загрязнения в Западной Европе, на ЕТР и юге Сибири [27] при характерном времени атмосферного переноса из регионов-источников в район станции 3–10 сут. Снижение интенсивности западного переноса и увеличение высоты слоя перемешивания в летний период сопровождаются уменьшением амплитуды антропогенного сигнала в сценариях A1 и A2 в 2,5–3 раза на ст. ZOTTO и примерно в 2 раза – на арктических станциях (см. табл. 4). Относительный вклад антропогенных эмиссий в Западной Европе при переходе от января к июлю также уменьшается: с 35 до 31% в ZOTTO и с 57 до 48% на арктических станциях.

В июле биогенный сигнал на ст. ZOTTO в 2 раза превышает антропогенный, тогда как на арктических станциях данные сигналы от эмиссий в Северной Евразии оказываются примерно равными (22,0 и 22,5 млрд<sup>-1</sup>; см. табл. 4). Рассчитанный по сценариям W1 и W2 биогенный сигнал в ZOTTO также оказывается в 1,5–2 раза выше, чем на арктических станциях. Указанное различие обусловлено непосредственным влиянием на район ZOTTO эмиссий метана с переувлажненных территорий Западной Сибири [4], характеризующихся одними из наиболее высоких потоков метана в атмосферу в Северной Евразии [9, 11].

Следует отметить, что в зимний период величина биогенного сигнала как в ZOTTO, так и на арктических станциях остается достаточно высокой – на уровне 10–20 млрд<sup>-1</sup>. Наличие значимых потоков метана в атмосферу зимой в высоких широтах было установлено ранее по результатам многочисленных экспериментальных работ для разных типов болотных ландшафтов (см. [10, 11] и ссылки в них). Согласно результатам измерений метана в болотных экосистемах северо-востока ЕТР (Большеземельская тундра) и Западной Сибири, положительные потоки метана (из почвы в атмосферу) осенью и зимой составили от 0,03 до 2 мг С/м<sup>2</sup>·ч (0,7–46 нмоль СН<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>·с) [11]. В арктической тундре на Аляске [10] зимний (январь – май) поток метана составил около 0,1 мг С/м<sup>2</sup>·ч (2,3 нмоль СН<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>·с), или ~0,1 от аналогичной величины в летние месяцы, при этом суммарные эмиссии СН<sub>4</sub> за сентябрь – май из почвы к северу от полярного круга в исследуемом регионе, согласно полученным в [10] оценкам, составляют около 40% от годовых эмиссий.

Используя те же соображения, что и при выводе (2), представим измеренное содержание метана [СН<sub>4</sub>]<sub>obs</sub> в виде суммы [СН<sub>4</sub>]<sub>obs</sub> = χ<sub>syn</sub> + χ<sup>(+)</sup> + χ'<sub>N</sub>, где χ<sup>(+)</sup> определяет вклад дальнего переноса от источников за пределами модельной области. Приняв среднюю многолетнюю разность между соответствующими значениями в январе и июле в качестве оценки амплитуды годового хода (обозначаемой ниже символом Δ), получим

$$\Delta[\text{СН}_4]_{\text{obs}} = \Delta\chi_{\text{syn}} + \Delta\chi^{(+)} \quad (11)$$

Взяв величины χ<sub>syn</sub> из табл. 4, получим оценку вклада Δχ<sub>syn</sub> источников Северной Евразии в наблюдаемую годовую вариацию содержания метана на станциях:

$$\Delta\chi_{\text{syn}} = [\chi_{\text{syn}}(\text{A1}) + \chi_{\text{syn}}(\text{W1})](\text{январь}) - [\chi_{\text{syn}}(\text{A1}) + \chi_{\text{syn}}(\text{W1})](\text{июль}), \quad (12)$$

откуда с учетом (11) следует: Δχ<sub>syn</sub> = 38,9 млрд<sup>-1</sup>, Δχ<sup>(+)</sup> = 25,3 млрд<sup>-1</sup> (ZOTTO) и Δχ<sub>syn</sub> = 22,9 млрд<sup>-1</sup>, Δχ<sup>(+)</sup> = 32,1 млрд<sup>-1</sup> (арктические станции).

Приведенные величины Δχ<sub>syn</sub> оказываются в 1,5–2 раза ниже, чем средние за рассматриваемый период амплитуды годового хода метана в ZOTTO (64,2 млрд<sup>-1</sup>) и на арктических станциях (~55 млрд<sup>-1</sup>). Аналогичные расчеты для эмиссий на территории России (сценарии A2, W2) дают Δχ<sub>syn</sub> = 16,0 млрд<sup>-1</sup>, Δχ<sup>(+)</sup> = 48,2 млрд<sup>-1</sup> и Δχ<sub>syn</sub> = 5,6 млрд<sup>-1</sup>, Δχ<sup>(+)</sup> = 49,4 млрд<sup>-1</sup> в ZOTTO и на арктических станциях соответственно. Можно сделать вывод об ограниченном влиянии эмиссий на территории России и в Северной Евразии в целом для рассматриваемых станций в сравнении с дальним переносом от его планетарных источников. Указанная тенденция проявляется наиболее сильно на арктических станциях, для которых годовая вариация суммарного сигнала от антропогенных и болотных эмиссий на территории России составляет всего около 10% от амплитуды годового хода приземного содержания метана.

Учитывая хорошее согласие между полуаналитическим и численным решениями, воспользуемся боксовой моделью для оценки атмосферного отклика в содержании метана на наблюдаемый тренд антропогенных эмиссий на территории России, средняя величина которого за 2007–2017 гг. (<dS<sub>N</sub>/dt>), по данным EDGAR6.0, составила около 0,34 Тг СН<sub>4</sub>/год. Решение (3), (4) при χ<sub>S</sub>(0) = 0, χ'<sub>N</sub>(0) = 0, S<sub>N</sub>(t) = <dS<sub>N</sub>/dt> · t при rt ≥ 1 с точностью лучше 2% дается асимптотическим выражением

$$\chi_N^*(t) \sim \frac{\langle dS_N/dt \rangle}{\lambda^2} \left( \lambda t - \frac{r + \lambda}{2r + \lambda} + \frac{\exp(-\lambda t)}{2} \right). \quad (13)$$

В соответствии с (13) и начальными условиями угол наклона кривой χ<sub>N</sub><sup>\*</sup>(t) к оси абсцисс монотонно возрастает от 0 при t = 0 до <dS<sub>N</sub>/dt>/λ при λt → +∞. Средний (±1 стандартное отклонение) по арктическим станциям линейный тренд концентрации метана в январе 2007–2018 гг. составил 6,6 ± 1,0 млрд<sup>-1</sup>/год (R<sup>2</sup> = 0,78) в сравнении с асимптотической величиной <dS<sub>N</sub>/dt>/λ = 3,05 млрд<sup>-1</sup>/год (рис. 6).

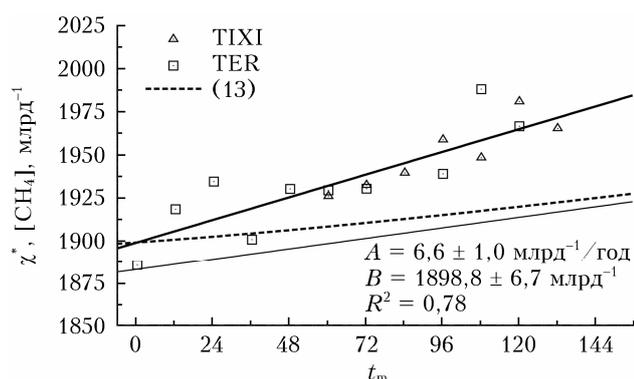


Рис. 6. Средние концентрации  $\text{CH}_4$  на ст. Тикси и Териберка в январе 2007–2018 гг., линейный тренд  $y = Ax + B$  (полуэллиптическая кривая) и  $\chi_N^*(t)$  (13) (штриховая кривая); сплошной линией показан угол наклона  $\chi_N^*$  к оси абсцисс в пределе  $\lambda t \rightarrow +\infty$ . Для наглядности график  $\chi_N^*(t)$  сдвинут вверх по оси ординат на  $1900 \text{ млрд}^{-1}$

За рассматриваемый период средний прирост метана по стационарным данным составил в январе около  $73 \text{ млрд}^{-1}$ , в то время как прирост метана, обусловленный рассматриваемым трендом эмиссий, — лишь  $21,8 \text{ млрд}^{-1}$ , что равно примерно 30% от суммарного вклада региональных и планетарных процессов.

## Закключение

Во многих исследованиях отмечается, что сильная пространственная и временная неоднородность полей атмосферных эмиссий и приземных концентраций метана приводит к значительным неопределенностям при расчетах региональных потоков метана по методу top-down (см. недавнюю работу [8] и ссылки в ней на более ранние исследования) и пропорционально большому влиянию априорной информации на итоговые оценки. Однако результаты проведенных нами расчетов демонстрируют другой потенциально значимый источник неопределенностей при оценках региональных потоков. Сравнительно небольшой вклад эмиссий от источников на территории России (~10–25%) в наблюдаемую на станциях амплитуду годовых колебаний метана является одним из факторов, определяющих в целом низкое отношение полезного сигнала к шуму в алгоритмах восстановления. Отмеченное свойство данных может быть скомпенсировано в смысле уменьшения итоговой погрешности оценок лишь увеличением общего числа измерительных пунктов в высоких широтах и/или дополнительной априорной информацией об источниках эмиссий. В настоящее время количество данных о приземном содержании метана, получаемых на сравнительно редкой сети фоновых станций атмосферного мониторинга в Северной Евразии, является недостаточным для получения надежных оценок потоков метана из высокоширотных экосистем,

в том числе при исследованиях долговременной изменчивости и сезонных вариаций величин эмиссий в соответствии с выводами недавней работы [8].

Существенной особенностью атмосферного отклика на региональные эмиссии метана является длительное время установления равновесного поля концентрации, составляющее (для случая «мгновенного» включения источника) около 20 лет. Сезонная изменчивость синоптической составляющей полного отклика, обусловленной прямым влиянием наветренных источников при адвекции в слое перемешивания, совпадает по фазе с годовым ходом приземного содержания метана во внетропических широтах с максимумом в зимние и минимумом в летние месяцы. Результаты проведенных в настоящей работе численных экспериментов показывают, что амплитуда годового хода метана, полученная непосредственно по стационарным измерениям, не может отождествляться с абсолютным вкладом региональных антропогенных эмиссий, как это ошибочно делалось авторами ряда предыдущих работ.

На уровне среднегодовых величин синоптическая компонента антропогенного сигнала в ZOTTO от источников на территории России ( $38,6 \text{ млрд}^{-1}$ ) более чем в 2 раза превышает вклад источников в Западной Европе ( $17,7 \text{ млрд}^{-1}$ ), тогда как для арктических станций вклад российских и европейских источников оказывается сопоставимым ( $19,5$  и  $12,4 \text{ млрд}^{-1}$  соответственно). Для природных источников метана в Северной Евразии вклад болотных эмиссий на территории России абсолютно преобладает на всех рассматриваемых станциях:  $34,2$  и  $19,7 \text{ млрд}^{-1}$  для ZOTTO и арктических станций, соответственно, в сравнении с  $2,7$  и  $2,1 \text{ млрд}^{-1}$  от болотных эмиссий в Западной Европе.

Полученные нами модельные оценки согласно сценариям W1 и W2 подтверждают сделанный в [10] вывод о необходимости учета вклада болотных эмиссий в измеренное содержание метана на высокоширотных станциях не только в теплое время года, но и в зимний период. В последнем случае эффект от региональных эмиссий будет усиливаться на фоне сезонного сокращения глубины слоя перемешивания и снижения интенсивности обмена воздухом между атмосферным пограничным слоем и свободной тропосферой.

**Финансирование.** Работы проводились с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»» ИОА СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-934) в части численного моделирования вклада естественных и антропогенных источников метана в его приземную концентрацию и РНФ (проект № 20-17-00200) в части обработки данных прямых измерений концентрации атмосферного метана в Северной Евразии.

## Список литературы

1. *Van Dingenen R., Crippa M., Janssens-Maenhout G., Guizzardi D., Dentener F.* Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018. DOI: 10.2760/73788, JRC113210.
2. *Елисеев А.В.* Глобальный цикл метана: обзор // Фунд. и прикл. климатол. 2018. № 1. С. 52–70.
3. *Anisimov O.* Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // *Environ. Res. Lett.* 2007. N 2. DOI: 10.1088/17489326/2/4/045016.
4. *Winderlich J.* Setup of a CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurement system in Central Siberia and modeling of its results. Technical Report 26. Max Planck Institut für Biogeochemie. 2012. P. 120.
5. *Rößger N., Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L.* Seasonal increase of methane emissions linked to warming in Siberian tundra // *Nat. Clim. Change.* 2022. V. 12. P. 1031–1036.
6. *Peng S., Lin X., Thompson R.L., Xi Y., Liu G., Hauglustaine D., Lan X., Poulter B., Ramonet M., Saunois M., Yin Y., Zhang Z., Zheng B., Ciais P.* Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020 // *Nature.* 2022. V. 612. P. 477–482.
7. *Anisimov O., Zimov S.* Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // *Ambio.* 2021. V. 50. P. 2050–2059.
8. *Wittig S., Berchet A., Pison I., Saunois M., Thanwerdas J., Martinez A., Paris J.-D., Machida T., Sasaki M., Worthy D.E.J., Lan X., Thompson R.L., Sollum E., Arshinov M.* Estimating methane emissions in the Arctic nations using surface observations from 2008 to 2019, EGU sphere [preprint]. 2023. DOI: 10.5194/egusphere-2022-1257.
9. *Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T.* Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6. P. 045214.
10. *Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W., Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C.* Cold season emissions dominate the Arctic tundra methane budget // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2016. V. 113, N 1. P. 40–45.
11. *Глаголев М.В., Клептова И.Е., Филиппов И.В., Казанцев В.С., Максюттов Ш.Ш.* Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры Западной Сибири // *Вестн. Том. гос. педагогич. ун-та.* 2010. № 3. С. 78–86.
12. *Yin Y., Chevallier F., Ciais P., Bousquet P., Saunois M., Zheng B., Worden J., Bloom A.A., Parker R.J., Jacob D.J., Dlugokencky E.J., Frankenberg C.* Accelerating methane growth rate from 2010 to 2017: Leading contributions from the tropics and East Asia // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 12631–12647.
13. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* / T. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner et al. (eds.). Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
14. *Bey I., Jacob D.J., Yantosca R.M., Logan J.A., Field B., Fiore A.M., Li Q., Liu H., Mickley L.J., Schultz M.* Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 23073–23096.
15. *Janssens-Maenhout G., Crippa M., Guizzardi D., Muntean M., Schaaf E., Dentener F., Bergamaschi P., Pagliari V., Olivier J.G.J., Peters J.A.H.W., van Aardenne J.A., Monni S., Doering U., Petrescu A.M.R., Solazzo E., Oreggioni G.D.* EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2019. V. 11. P. 959–1002.
16. *van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R.S., Jin Y., van Leeuwen T.T.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 11707–11735.
17. *Bloom A.A., Bowman K.W., Lee M., Turner A.J., Schroeder R., Worden J.R., Weidner R., McDonald K.C., Jacob D.J.* A global wetland methane emissions and uncertainty dataset for atmospheric chemical transport models (WetCHARTs version 1.0) // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10. P. 2141–2156.
18. *Bicheron P., Defourny P., Brockmann C., Schouten L., Vancutsem C., Huc M., Bontemps S., Leroy M., Achard F., Herold M., Ranera F., Arino O.* GlobCover – Products Description and Validation Report. Toulouse (France): MEDIAS-France, 2008. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC49240> (last access: 26.04.2023).
19. *Maasakkers J.D., Jacob D.J., Sulprizio M.P., Scarpelli T.R., Nesser H., Sheng J.-X., Zhang Y., Hersher M., Bloom A.A., Bowman K.W., Worden J.R., Janssens-Maenhout G., Parker R.J.* Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010–2015 // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. P. 7859–7881.
20. *Stohl A., Eckhardt S., Forster C., James P., Spichtinger N.* On the pathways and timescales of intercontinental air pollution transport // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N D23. P. 4684.
21. *Yang H., Waugh D.W., Orbe C., Patra P.K., Jöckel P., Lamarque J.-F., Tilmes S., Kinnison D., Elkins J.W., Dlugokencky E.J.* Evaluating simulations of interhemispheric transport: Interhemispheric exchange time versus SF<sub>6</sub> age // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 1113–1120.
22. *Holzer M.* Analysis of passive tracer transport as modeled by an atmospheric general circulation model // *J. Clim.* 1999. V. 12. P. 1659–1684.
23. *Bowman K.P., Cohen P.J.* Interhemispheric exchange by seasonal modulation of the Hadley circulation // *J. Atmos. Sci.* 1997. V. 54, N 16. P. 2045–2059.
24. *Derwent R.G., Parrish D.D., Simmonds P.G., O'Doherty S.J., Spain T.G.* Seasonal cycles in baseline mixing ratios of a large number of trace gases at the Mace Head, Ireland atmospheric research station // *Atmos. Environ.* 2020. V. 233. P. 117531.
25. *Стародубцев В.С.* Исследование вариаций концентрации метана и углекислого газа в Арктической зоне // *Вестн. СВФУ.* 2018. Т. 65, № 3. С. 80–88.
26. *Решетников А.И., Ивахов В.М.* Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными судовых наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // *Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова* / под ред. В.М. Кат-

цова, В.П. Мелешко. СПб.: Гидрометеиздат, 2012. С. 257–269.

27. Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Васильева А.В., Хайманн М. Источники и вариации

тропосферного СО в центральной Сибири: численные эксперименты и наблюдения на высотной мачте ZOTTO // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2016. Т. 52, № 1. С. 51.

*K.B. Moiseenko, Yu.A. Shtabkin, A.V. Vasileva, A.I. Skorokhod, E.I. Fedorova.* **Regional sources and CH<sub>4</sub> seasonal cycle in Central Siberia and Arctic: observations and numerical calculations.**

Contribution of anthropogenic and wetland methane emissions in North Eurasia (>40°N) and Russia into the near-surface CH<sub>4</sub> abundance at ZOTTO, Teriberka, and Tixi measurement sites is quantified using GEOS-chem global chemical-transport model. Numerical results agree well with the proposed semi-analytical solution, in which the total response in the CH<sub>4</sub> level at a given site is represented as the sum of direct (synoptic) and global terms. The annual average direct contribution of Russian anthropogenic emissions into CH<sub>4</sub> mixing ratio measured at ZOTTO (38.6 ppbv) is twice as large as that for Western Europe sources (17.7 ppbv). For the Arctic sites, the anthropogenic input from Russian and European anthropogenic sources is roughly similar (19.5 ppbv and 12.4 ppbv, correspondingly). The input from continental sources into methane abundance and its annual variability at the Arctic sites are generally lower compared to those at the ZOTTO site due to larger transport times from upstream CH<sub>4</sub> source regions. Atmospheric responses in methane levels at the Teriberka and Tixi sites to CH<sub>4</sub> continental sources are found to be very close, which is explained by spatial homogenization of the anthropogenic and biogenic signals in high latitudes.