



## Глобальный бюджет метана 2000-2017 гг.

Мариэль Сонуа<sup>1</sup>, Энн Р. Стэверт<sup>2</sup>, Бен Поултер<sup>3</sup>, Филипп Буске<sup>1</sup>, Жозеп Г. Канадель<sup>2</sup>,  
Роберт Б. Джексон<sup>4</sup>, Питер А. Реймонд<sup>5</sup>, Эдвард Дж. Длугокенки<sup>6</sup>, Sander Houweling<sup>7,8</sup>,  
Прабир К. Патра<sup>9,10</sup>, Philippe Ciais<sup>1</sup>, Вивек К. Арора<sup>11</sup>, Дэвид Баствикен<sup>12</sup>, Питер  
Бергамаски<sup>13</sup>,

Дональд Р. Блейк<sup>14</sup>, Гордон Брейлсфорд<sup>15</sup>, Лори Брухвилер<sup>6</sup>, Кимберли М. Карлсон<sup>16,17</sup>, Марк  
Кэррол<sup>70</sup>, Симона Кастальди<sup>18,19,20</sup>, Навин Чандра<sup>9</sup>, Сирил Кревуазье<sup>21</sup>, Патрик М. Крилл<sup>22</sup>,  
Кристофер Кови<sup>23</sup>, Чарльз Л. Карри<sup>24,71</sup>, Джузеппе Этиопе<sup>25,26</sup>, Кристиан Франкенберг<sup>27,28</sup>,  
Никола Гедни<sup>29</sup>,

Михаэла И. Хегглин<sup>30</sup>, Лена Хёглунд-Исакссон<sup>31</sup>, Густаф Хугелиус<sup>32</sup>, Миса Ишизава<sup>33</sup>, Акихико  
Ито<sup>33</sup>, Greet Janssens-Maenhout<sup>13</sup>, Кэтрин М. Йенсен<sup>34</sup>, Фортунат Йоос<sup>35</sup>, Томас Кляйнен<sup>36</sup>,  
Пол Б. Крюммель<sup>37</sup>, Рэй Л. Лангенфельдс<sup>37</sup>, Гульвен Г. Ларюэль<sup>38</sup>, Личенг Лю<sup>39</sup>, Тошинобу  
Мачида<sup>33</sup>, Шамиль Максюттов<sup>33</sup>, Кайл К. Макдональд<sup>34</sup>, Джо МакНортон<sup>40</sup>, Пол А.  
Миллер<sup>41</sup>, Джо Р. Мелтон<sup>42</sup>, Исаму Морино<sup>33</sup>, Юрек Мюллер<sup>35</sup>, Фабиола Мургуяй-Флорес<sup>43</sup>,  
Вайшали Наик<sup>44</sup>, Йосуке Нива<sup>33,45</sup>,

Серджио Ноче<sup>20</sup>, Саймон О'Доэрти<sup>46</sup>, Роберт Дж. Паркер<sup>47</sup>, Чанхуй Пенг<sup>48</sup>, Шуши  
Пенг<sup>49</sup>, Глен П. Питерс<sup>50</sup>, Кэтрин Придженг<sup>51</sup>, Рональд Принн<sup>52</sup>, Мишель Рамоне<sup>1</sup>,  
Пьер Регнье<sup>38</sup>, Уильям Дж. Райли<sup>53</sup>, Джудит А. Розентретер<sup>54</sup>, Арджо Сегерс<sup>55</sup>,  
Изобель Дж. Симпсон<sup>14</sup>, Хао Ши<sup>56</sup>,

Стивен Дж. Смит<sup>57,58</sup>, Л. Пол Стил<sup>37</sup>, Бретт Ф. Торнтон<sup>22</sup>, Ханьцин Тянь<sup>56</sup>, Yasunori Tohjima<sup>72</sup>,  
Франческо Н. Тубиелло<sup>59</sup>, Аки Цурута<sup>60</sup>, Никола Виови<sup>1</sup>, Apostolos Voulgarakis<sup>61,62</sup>, Томас С.  
Вебер<sup>63</sup>, Michiel van Weele<sup>64</sup>, Гвидо Р. ван дер Верф<sup>8</sup>, Рэй Ф. Вайс<sup>65</sup>, Даг Уорти<sup>66</sup>, Дебра Ванч<sup>67</sup>,  
И Инь<sup>1,27</sup>, Юкио Йошида<sup>33</sup>, Вэньсинь Чжан<sup>41</sup>, Чжэнь Чжан<sup>68</sup>, Юаньхун Чжао<sup>1</sup>, Бо Чжэн<sup>1</sup>, Qing  
Zhu<sup>53</sup>, Qian Zhu<sup>69</sup>, и Qianlai Zhuang<sup>39</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория наук о климате и окружающей среде, LSCE-IPSL (CEA-CNRS-UVSQ), Университет  
Париж-Сакле Жиф-сюр-Иветт 91191, Франция

<sup>2</sup>Глобальный углеродный проект, CSIRO Oceans and Atmosphere,  
Аспендейл, штат Вика и 3195 Канберра, штат АСТ Австралия 2601

<sup>3</sup>Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, Лаборатория биосферных наук, Гринбелт, штат  
Массачусетс, США 20771,

<sup>4</sup>Факультет наук о земных системах, Институт окружающей среды Вудса и Институт энергетики  
Прекорт, Стэнфордский университет, Стэнфорд, Калифорния, 94305-2210, США

<sup>5</sup>Йельская школа окружающей среды, Йельский университет, Нью-Хейвен, штат Коннектикут  
США 06511,

<sup>6</sup>Лаборатория глобального мониторинга НОАА, Бродвей 325, Боулдер, СО США 80305,

<sup>7</sup>SRON Нидерландский институт космических исследований, Sorbonnelaan CA 2, 3584 Утрехт,  
Нидерланды

<sup>8</sup>Vrije Universiteit Amsterdam, факультет наук о Земле, кластер Земли и климата,  
VU Amsterdam, Амстердам, Нидерланды

<sup>9</sup>Научно-исследовательский институт глобальных изменений, JAMSTEC, 3173-25 Showa-machi,  
Канадзава, Йокогама, 236-0001, Япония

<sup>10</sup>Центр дистанционного зондирования окружающей среды, Университет Чива, Чива, Япония

<sup>11</sup>Канадский центр моделирования и анализа климата, Отдел климатических исследований,

Министерство окружающей среды и изменения климата Канады, Виктория, Британская Колумбия,  
V8W 2Y2, Канада

<sup>12</sup>Факультет тематических исследований - изменение окружающей среды, Университет Линчепинга,  
Линчепинг58183, Швеция

<sup>13</sup>Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии, улица Э. Ферми Испра2749,21027  
(Ва), Италия

<sup>14</sup>Химический факультет, Калифорнийский университет в Ирвайне, Роуленд570 Холл, Ирвайн,  
Калифорния, США92697,

<sup>15</sup>Национальный институт исследования воды и атмосферы, Эванс301 Бэй Парад, Веллингтон, Новая  
Зеландия

<sup>16</sup>Факультет экологических исследований, Нью-Йоркский университет, Нью-Йорк, США10003,

<sup>17</sup>Факультет природных ресурсов и управления окружающей средой,  
Гавайский университет, Гонолулу, HI США96822,

- <sup>18</sup>Dipartimento di Scienze Ambientali, Biologiche e Farmaceutiche, Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, via Vivaldi Caserta43,81100, Italy
- <sup>19</sup>Кафедра ландшафтного дизайна и устойчивых экосистем, Университет РУДН, Москва, Россия
- <sup>20</sup>Отдел воздействия на сельское хозяйство, леса и экосистемные услуги, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Via Augusto Imperatore Lecce16,73100, Italy
- <sup>21</sup>Лаборатория динамической метеорологии, LMD-IPSL, Политехническая школа, Палезо91120, Франция
- <sup>22</sup>Факультет геологических наук и Центр климатических исследований Болина, Стокгольмский университет, Svante Arrhenius väg Stockholm8,10691, Швеция
- <sup>23</sup>Программа экологических исследований и наук, Скидморский колледж, Саратога-Спрингс, штат Нью-Йорк, США12866,
- <sup>24</sup>Тихоокеанский консорциум по воздействию на климат, Университет Виктории, Университетский дом P1,.O. Vox STN1700 CSC Виктория, Британская Колумбия V8W 2Y2, Канада
- <sup>25</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma via2, V. Murata Rome60500143, Italy
- <sup>26</sup>Факультет экологических наук и инженерии, Университет Бабеша Боляи, Клуж-Напока, Румыния
- <sup>27</sup>Отдел геологических и планетарных наук, Калифорнийский технологический институт, Пасадена, Калифорния, США91125,
- <sup>28</sup>Лаборатория реактивного движения, Калифорнийский технологический институт, Пасадена, Калифорния, США91125,
- <sup>29</sup>Met Office Hadley Centre, Объединенный центр гидрометеорологических исследований, Maclean Building, Wallingford OX10 8BB, Великобритания
- <sup>30</sup>Кафедра метеорологии, Университет Рединга, Эрли Гейт, Рединг RG6 6BB, Великобритания
- <sup>31</sup>Программа по качеству воздуха и парниковым газам (AIR), Международный институт прикладного системного анализа (IIASA), Лаксенбург2361, Австрия
- <sup>32</sup>Факультет физической географии и Центр климатических исследований Болина, Стокгольмский университет, 10691 Стокгольм, Швеция
- <sup>33</sup>Центр глобальных экологических исследований, Национальный институт экологических исследований (NIES), Оногава 16-2, Цукуба, Ибараки 305-8506, Япония
- <sup>34</sup>Факультет наук о Земле и атмосфере, Городской колледж Нью-Йорка, Городской университет Нью-Йорка, Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США10031,
- <sup>35</sup>Физика климата и окружающей среды, Институт физики и Центр Оешгера по исследованию изменения климата, Бернский университет, Sidlerstr. 5,3012 Берн, Швейцария
- <sup>36</sup>Институт метеорологии Макса Планка, Бундесстр. 53,20146 Гамбург, Германия
- <sup>37</sup>Центр климатологии, CSIRO Oceans and Atmosphere, Аспендейл, Виктория Австра3195,лия
- <sup>38</sup>Факультет геонаук, окружающей среды и общества, Брюссельский университет, 1050-Брюссель, Бельгия
- <sup>39</sup> Факультет наук о Земле, атмосфере и планетах, агрономический факультет, Университет Пердью, Вест-Лафайет, штат Индиана, США47907,
- <sup>40</sup>Исследовательский отдел, Европейский центр прогнозов погоды на средние сроки, Рединг, Великобритания
- <sup>41</sup>Факультет физической географии и науки об экосистемах, Лундский университет, Сельвегатан Лунд12,22362,, Швеция
- <sup>42</sup>Отдел климатических исследований, Министерство окружающей среды и изменения климата Канады, Виктория, Британская Колумбия, V8W 2Y2, Канада
- <sup>43</sup>Школа географических наук, Бристольский университет, Бристоль, BS8 1SS, Великобритания
- <sup>44</sup>NOAA/ Лаборатория геофизической гидродинамики (GFDL), Форрестал201 Рд., Принстон, штат Нью-Джерси США08540,
- <sup>45</sup>Институт метеорологических исследований (MRI), Нагаминэ 1-1, Цукуба, Ибараки 305-0052, Япония
- <sup>46</sup> Химический факультет Бристольского университета, Кантокс Клоуз, Клифтон, Бристоль BS8 1TS, Великобритания
- <sup>47</sup>Национальный центр наблюдения за Землей, Университет Лестера, Лестер, LE1 7RH, Великобритания
- <sup>48</sup>Факультет биологических наук, Институт наук об окружающей среде, Университет Квебека в Монреале, Монреаль, QC H3C 3P8, Канада
- <sup>49</sup>Китайско-французский институт наук о земных системах, Колледж городских и экологических наук,

- Пекинский университет, Пекин, Китай100871,
- <sup>50</sup>Центр международных климатических исследований CICERO, Пб. 1129 Блиндерн, Осло0318,  
Норвегия
- <sup>51</sup>Парижская обсерватория, Университет PSL, Университет Сорбонны, CNRS, LERMA, Париж,  
Франция
- <sup>52</sup>Факультет наук о Земле, атмосфере и планетах, Массачусетский технологический институт (MIT),  
здание 54-1312, Кембридж, штат Массачусетс, США02139,
- <sup>53</sup>Отдел наук о климате и экосистемах, Национальная лаборатория Лоуренса Беркли,  
1 Циклотрон Роуд, Беркли, Калифорния США94720,
- <sup>54</sup>Центр прибрежной биогеохимии, факультет окружающей среды, науки и инженерии, Университет  
Южного Креста, Лисмор, Новый Южный Уэльс, Австра2480,лия

- <sup>55</sup>TNO, Департамент климата, воздуха и устойчивости, абонентский ящик NL-3508-TA80015,, Утрехт, Нидерланды
- <sup>56</sup>Международный центр исследований климата и глобальных изменений, Школа лесного хозяйства и наук о дикой природе, Обернский университет, Дункан602 Драйв, Оберн, штат АЛ США36849,
- <sup>57</sup>Объединенный институт исследований глобальных изменений, Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория, Колледж-Парк, штат Массачусетс, США20740,
- <sup>58</sup>Факультет атмосферных и океанических наук, Университет Мэриленда, Колледж Парк, MD США Отдел 20740,<sup>59</sup>статистики, Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО), Виале делле Терме ди Каракалла, Рим00153, Италия
- <sup>60</sup>Финский метеорологический институт, Р.О. Vox Хельсинки503,00101,, Финляндия
- <sup>61</sup>Кафедра физики, Имперский колледж Лондона, Лондон SW7 2AZ, Великобритания
- <sup>62</sup>Факультет экологической инженерии, Технический университет Крита, Ханья, Греция
- <sup>63</sup>Факультет наук о Земле и окружающей среде, Рочестерский университет, Рочестер, штат Нью-Йорк, США14627,
- <sup>64</sup>KNMI, Р.О. Vox AE201,3730, Де Билт, Нидерланды
- <sup>65</sup>Океанографический институт Скриппса (SIO), Калифорнийский университет Сан-Диего, Ла-Джолла, Калифорния, США92093,
- <sup>66</sup>Министерство охраны окружающей среды и изменения климата Канады, улица4905, Дафферин, Торонто, Канада
- <sup>67</sup>Факультет физики, Университет Торонто, 60 Сент-Джордж-стрит, Торонто, Онтарио, Канада<sup>68</sup> Факультет географических наук, Университет Мэриленда, Колледж Парк, MD США20740,<sup>69</sup> Колледж гидрологии и водных ресурсов, Университет Хохай, Нанкин, Китай210098,
- <sup>70</sup>Центр космических полетов НАСА им. Годдарда, Управление вычислительных и информационных наук и технологий, Гринбелт, штат Массачусетс, США20771,
- <sup>71</sup>Школа наук о Земле и океане, Университет Виктории, Р.О. Vox STN1700 CSC, Виктория, V8W 2Y2 Британская Колумбия, Канада
- <sup>72</sup>Центр экологических измерений и анализа, Национальный институт экологических исследований (NIES), Оногава16-2, Цукуба, Ибараки 305-8506, Япония

**Корреспонденция:** Мариэль Сонуа (marielle.saunois@lsce.ipsl.fr)

Получено: 22 Июль2019 - Обсуждение начато: 19 Август 2019

Пересмотрено: 20 Май2020 - Принято: 29 май2020 - Опубликовано: 15 Июль 2020

**Аннотация.** Понимание и количественная оценка глобального бюджета метана (CH<sub>4</sub>) важны для оценки реалистичных путей смягчения изменения климата. Атмосферные выбросы и концентрация CH<sub>4</sub> продолжают расти, что делает CH<sub>4</sub> вторым по значимости парниковым газом, подверженным антропогенному воздействию, с точки зрения воздействия на климат после диоксида углерода (CO<sub>2</sub>). Относительная важность CH<sub>4</sub> по сравнению с CO<sub>2</sub> зависит от его более короткого времени жизни в атмосфере, более сильного потенциала потепления и изменений в скорости роста атмосферы за последнее десятилетие, причины которых все еще обсуждаются. Две основные проблемы в уменьшении неопределенности в скорости роста атмосферы возникают из-за разнообразия географически перекрывающихся источников CH<sub>4</sub> и разрушения CH<sub>4</sub> короткоживущими гидроксильными радикалами (ОН). Для решения этих проблем мы создали консорциум междисциплинарных ученых под эгидой Глобального углеродного проекта для синтеза и стимулирования новых исследований, направленных на улучшение и регулярное обновление глобального бюджета метана. Вслед за Saunois et al. (2016) мы представляем здесь вторую версию живого обзорного документа, посвященного десятилетнему бюджету метана, объединяющего результаты нисходящих исследований (атмосферные наблюдения в рамках обратного моделирования атмосферы) и восходящих оценок (включая основанные на процессах модели для оценки выбросов с поверхности суши и химии атмосферы, инвентаризации антропогенных выбросов и экстраполяции на основе данных).

Для десятилетия 2008-2017 гг. глобальные выбросы метана оцениваются с помощью инверсии атмосферы (подход "сверху вниз") в Tg576 CH<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>. (диапазон 550-594, соответствующий минимальным и максимальным оценкам ансамбля моделей). Из этого общего количества 359 Tg CH<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> или 60 % приходится на антропогенные источники, то есть выбросы, вызванные непосредственной деятельностью человека (т.е. антропогенные выбросы; диапазон 336-376 Tg CH<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> или %6550 %).

Среднегодовая общая эмиссия за новое десятилетие (2008-2017 гг.) на 29 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  превышает нашу оценку за предыдущее десятилетие (2000-2009 гг.) и на 24 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  больше, чем в предыдущем бюджете на 2003-2012 годы (Saunois et al., 2016). Поскольку глобальные выбросы  $\text{CH}_4$  отслеживают самые теплые сценарии

оцененных Межправительственной группой экспертов по изменению климата. Методы "снизу вверх" показывают почти на %30 большие глобальные выбросы (737 Тг  $\text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ , диапазон 594-881), чем методы инверсии "сверху вниз". Действительно, оценки снизу вверх для природных источников, таких как естественные водно-болотные угодья, другие внутренние водные системы и геологические источники, выше, чем оценки сверху вниз. Атмосферные ограничения на нисходящий бюджет позволяют предположить, что по крайней мере некоторые из этих нисходящих выбросов завышены. Широтное распределение выбросов, основанных на атмосферных наблюдениях, указывает на преобладание тропических выбросов (~65 % глобального бюджета, <  $N30^\circ$ ) по сравнению с

2017 гг.

средних широтах (30 %, 30-60° с.ш.) и высоких северных широтах (4 %, 60-90° с.ш.). Наиболее важным источником неопределенности в бюджете метана являются естественные выбросы, особенно из водно-болотных угодий и других внутренних вод.

Некоторые из наших оценок глобальных источников меньше, чем в ранее опубликованных бюджетах (Saunois et al., 2016; Kirschke et al., 2013). В частности, выбросы от водно-болотных угодий примерно на 35 Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  меньше из-за улучшения раздела водно-болотных угодий и других внутренних вод. Выбросы из геологических источников и от диких животных также меньше на Тг7  $\text{CH}_4$   $\text{г}^{-1}$ . и Тг8  $\text{CH}_4$   $\text{г}^{-1}$ . соответственно. Однако общее расхождение между оценками снизу вверх и сверху вниз уменьшилось всего на %5 по сравнению с данными Saunois et al. (2016), что связано с более высокой

оценка выбросов из внутренних вод, что подчеркивает необходимость более детального исследования факторов выбросов. Приоритеты для улучшения бюджета метана включают (i) глобальную карту высокого разрешения водонасыщенных почв и затопленных территорий, выделяющих метан, основанную на надежной классификации различных типов выделяющих его местообитаний; (ii) дальнейшую разработку основанных на процессах моделей для выбросов из внутренних вод; (iii) интенсификацию наблюдений за метаном в местных масштабах (например, FLUXNET- $\text{CH}_4$ ) и мониторинга городского масштаба для ограничения восходящих моделей поверхности земли, а также в региональных масштабах (поверхностные сети и спутники) для ограничения атмосферных инверсий; (iv) совершенствование транспортных моделей и представление фотохимических поглотителей в нисходящих инверсиях; и

(v) разработка системы трехмерной вариационной инверсии с использованием изотопных и/или соизлучающих видов, таких как этан, для улучшения разделения источников.

Представленные здесь данные можно загрузить с сайта <https://doi.org/10.18160/GCP-CH4-2019> (Saunois et al., 2020) и с сайта Global Carbon Project.

## 1 Введение

Мольная доля атмосферного метана ( $\text{CH}_4$ ) в сухом воздухе у поверхности достигла ppb1857 в (2018рис. 1), приблизительно

В 2,6 раза больше, чем его расчетное доиндустриальное равновесное значение в Этот 1750.рост в значительной степени объясняется увеличением антропогенных выбросов, возникающих, прежде всего, в результате сельскохозяйственной деятельности (например, животноводство, выращивание риса, сжигание биомассы), производства и использования ископаемого топлива, захоронения отходов, а также изменения естественных потоков метана из-за повышения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере и изменения климата (Ciais et al., 2013). Атмосферный  $\text{CH}_4$  является более сильным поглотителем теплового инфракрасного излучения Земли, чем диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), что оценивается по его потенциалу глобального потепления (ПГП) относительно  $\text{CO}_2$ . Для 100-летнего временного горизонта и без учета климатических обратных связей GWP( $\text{CH}_4$ ) (IPCC28 AR5; Myhre et al., 2013). Хотя Глобальные антропогенные выбросы  $\text{CH}_4$  оцениваются примерно в 366 Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  (Saunois et al., 2016), что составляет лишь %3 от глобальных антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  в единицах потока массы углерода, рост концентрации  $\text{CH}_4$  в атмосфере вносит свой вклад в %23 (Вт  $0.62\text{м}^{-2}$ ).

на дополнительный радиационный форсинг, накопленный в нижнем

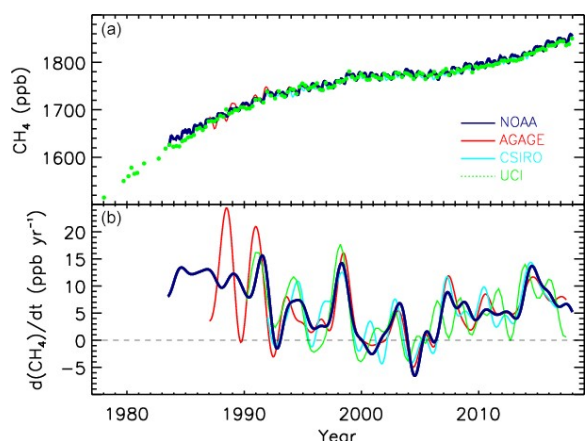
атмосферы с 1750 года (Etminan et al., 2016). Изменения в других химических соединениях (таких как оксиды азота,  $\text{NO}_x$ , или монооксид углерода,  $\text{CO}$ ) также влияют на форсинг атмосферного  $\text{CH}_4$  через изменение времени его жизни в атмосфере. С точки зрения выбросов, общая радиационная форсировка, связанная с антропогенными выбросами  $\text{CH}_4$ , в настоящее время составляет около  $0,97$  Вт  $\text{м}^{-2}$  (Myhre et al., 2013). Выбросы  $\text{CH}_4$  способствуют образованию озона, стратосферной воды паров и  $\text{CO}_2$  и, что самое важное, влияет на собственную жизнь...

время (Myhre et al., 2013; Shindell et al., 2012). CH<sub>4</sub> имеет короткое время жизни в атмосфере (около 9 лет для 2010 года; Prather et al., 2012); следовательно, стабилизация или сокращение выбросов CH<sub>4</sub> быстро, в течение нескольких десятилетий, приводит к стабилизации или сокращению его концентрации в атмосфере и, следовательно, его радиационного воздействия. Поэтому сокращение выбросов CH<sub>4</sub> признано эффективным вариантом быстрого смягчения последствий изменения климата, особенно в десятилетнем масштабе (Shindell et al., 2012), поскольку срок его жизни короче, чем у CO<sub>2</sub>.

Вызывает озабоченность тот факт, что текущая траектория антропогенных выбросов метана, по оценкам, находится между двумя самыми теплыми сценариями МГЭИК- AR5 (Nisbet et al., 2016, 2019), т.е. RCP8.5 и RCP6.0, что соответствует повышению температуры более чем на 3° C к концу этого столетия. Эта траектория подразумевает, что крупные сокращение выбросов метана необходимо для достижения цели 1,5-2 °C, предусмотренной Парижским соглашением (Collins et al., 2013; Nisbet et al., 2019). Более того, CH<sub>4</sub> является прекурсором важных загрязнителей воздуха, таких как озон, и, таким образом, его выбросы являются подпадает под действие двух международных конвенций: Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (КЛРТАП), что является еще одним стимулом для сокращения выбросов.

Изменения в величине и временных вариациях (от годовых до межгодовых) источников и поглотителей метана за последние десятилетия характеризуются большой неопределенностью (Kirschke et al., 2013; Saunio et al., 2017; Turner et al., 2019). Кроме того, десятилетний бюджет предполагает относительную неопределенность (здесь и далее указываются диапазоны min-max) в %-3520 % для инвентаризации антропогенных выбросов в конкретных секторах (например, агрокультура, отходы, ископаемое топливо), 50 % для сжигания биомассы и естественных выбросов болот, и достигающую 100 % или более для других природных источников (например, внутренние воды, геологические источники).





**Рисунок 1.** Усредненное по всему миру содержание CH<sub>4</sub> в атмосфере (ppb) (а) и скорость его годового роста *GATM* (ppb yr<sup>-1</sup>) (б) по данным четырех измерений...

программы, Национальное управление океанических и атмосферных исследований.

(NOAA), Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) и University of California, Irvine (UCI). Более подробное описание методов приведено в дополнительном материале Kirschke et al. (2013).

Неопределенность в химической потере метана с помощью OH, преобладающего поглотителя атмосферного метана, оценивается примерно от 10 % (Prather et al., 2012) до 15 % (на основе восходящих подходов в Saunio et al., 2016). Для нисходящих методов это представляет собой минимальную относительную неопределенность, связанную с глобальными выбросами метана, поскольку другие поглотители метана (окисление атомарным кислородом и хлором, поглощение почвой) гораздо меньше, а скорость роста атмосферы хорошо определена (Dlugokencky et al., 2009). В глобальном масштабе вклад природных выбросов CH<sub>4</sub> в общие выбросы может быть определен путем объединения оценок продолжительности жизни с реконструированными доиндустриальными концентрациями метана в атмосфере по ледяным кернам (например, Ehhalt и др., 2001). На региональном уровне неопределенность в выбросах может достигать 40 %-60 % (например, для Южной Америки, Африки, Китая и Индии; см. Saunio et al., 2016).

Для проверки будущих сокращений выбросов, например, для проведения инвентаризации Парижского соглашения, необходим постоянный и долгосрочный мониторинг цикла метана для достижения более точной оценки тенденций и снижения неопределенности в антропогенных выбросах (Bergamaschi et al., 2018a; Rasala, 2010). Снижение неопределенности в отдельных источниках метана и, следовательно, в общем бюджете метана является сложной задачей по крайней мере по четырем причинам. Во-первых, метан выбрасывается в результате различных процессов, включая природные и антропогенные источники, точечные и диффузные источники, а также источники, относящиеся к трем

различным классам выбросов (т.е. биогенные, термогенные и пирогенные). Эти многочисленные источники и процессы требуют интеграции данных из различных научных сообществ. Тот факт, что антропогенные выбросы являются результатом непреднамеренной утечки при производстве ископаемого топлива или в сельском хозяйстве, еще больше усложняет получение точных данных.

оценки выбросов "снизу вверх". Во-вторых, атмосферный метан удаляется в результате химических реакций в атмосфере с участием радикалов (в основном ОН), которые имеют очень короткое время жизни (обычно 1 с). Пространственное и временное распределение ОН очень изменчиво. Хотя ОН может быть измерен локально, расчет глобальных потерь СН<sub>4</sub> через измерения ОН потребует измерений ОН с высоким разрешением (обычно полчаса для интеграции облачного покрова и 1 км пространственно для учета высокой реактивности и неоднородности ОН). В результате, такой расчет в настоящее время возможен только с помощью моделирования. Однако имитация концентрации ОН с помощью химико-климатических моделей все еще показывает неопределенное пространственно-временное распределение в региональном и глобальном масштабах (Zhao et al., 2019). В-третьих, только чистый бюджет метана (источники минус поглотители) ограничен точными наблюдениями скорости роста атмосферы (Dlugokencky et al., 2009), а сумма источников и сумма поглотителей остается более неопределенной. Одним из упрощений для СН<sub>4</sub> по сравнению с СО<sub>2</sub> является то, что океанический вклад в глобальный бюджет метана невелик (1 %-3 %), поэтому оценка источников является преимущественно континентальной проблемой (USEPA, 2010b). Наконец, у нас нет наблюдений, позволяющих ограничить

- (1) модели процессов, которые дают оценки площади водно-болотных угодий (Kleinen et al., 2012; Stocker et al., 2014) и выбросов водно-болотных угодий (Melton et al., 2013; Poulter et al., 2017; Wania et al., 2013),
- (2) других источников внутренних вод (Bastviken et al., 2011; Wik et al., 2016a),
- (3) инвентаризации антропогенных выбросов (Höglund-Isaksson,

2017, 2012.; Janssens-Maenhout et al., 2019; USEPA, 2012), и (4) атмосферные инверсии, целью которых является оценка выбросов метана от глобального до регионального масштаба (Bergamaschi et al., 2018b, 2013.; Houweling et al., 2014; Kirschke et al., 2013; Saunio et al., 2016; Spahni et al., 2011; Thompson et al., 2017; Tian et al., 2016).

Глобальный бюджет метана, выведенный из атмосферных наблюдений с помощью атмосферных инверсий, опирается на региональные данные сетей атмосферных проб, которые относительно плотные для северных средних широт, с рядом высокоточных и высокоточных поверхностных станций, но более скудные в тропических широтах и в Южном полушарии (Dlugokencky et al., 2011). В последнее время плотность атмосферных наблюдений в тропиках увеличилась благодаря спутниковым платформам, которые обеспечивают усредненные по колонке коэффициенты смешивания метана. Несмотря на постоянное повышение точности и достоверности космических измерений (например, Buchwitz et al., 2017), систематические ошибки, превышающие несколько частей на миллиард в суммарном столбе наблюдений, все еще ограничивают использование таких данных для ограничения поверхностных выбросов (Alexe et al., 2015; Bousquet et al., 2018; Chevallier et al., 2017; Locatelli et al., 2015). Разработка надежных поправок на смещение существующих данных может помочь преодолеть эту проблему (например, Inoue et al., 2016), а спутниковые инверсии были предложены для снижения неопределенности глобальных и региональных потоков по сравнению с инверсиями на поверхности (например, Fraser et al., 2013).

Глобальный углеродный проект (GCP) стремится создать полную картину углеродного цикла путем формирования ком- монентных, последовательных научных знаний для поддержки политики де-

2017 гг.

и действий по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу (<https://www.globalcarbonproject.org/>, последнее заседание: июнь 24 2020 г.). Целью данной работы является анализ и синтез текущих знаний о глобальном метановом бюджете путем сбора результатов наблюдений и моделей для лучшего понимания и количественной оценки основных надежных характеристик этого бюджета и его остающихся неопределенностей, а также для выработки рекомендаций. Мы объединяем результаты большого числа подходов "снизу вверх" (например, основанные на процессах модели для естественных водно-болотных угодий, основанные на данных подходы для других природных источников, инвентаризация антропогенных выбросов и сжигания биомассы, а также модели атмосферной химии) и "сверху вниз" (включая сети атмосферных наблюдений за метаном, атмосферные инверсии, инферирующие выбросы и поглотители из ассимиляции атмосферных наблюдений в модели атмосферного переноса и химии). Основное внимание в этой работе уделяется десятилетним бюджетам и обновлению предыдущей оценки, сделанной для периода 2003-2012 годов, до более позднего десятилетия 2008-2017 годов. Более глубокий анализ тенденций и изменений от года к году оставлен для будущих публикаций. Региональный бюджет далее обсуждается в Stavert et al. (2020) и синтезируется в Jackson et al., 2020. Наша текущая работа представляет собой "живой" обзор, публикуемый с интервалом примерно в 3 года и содержащий обновление и новое обобщение имеющихся данных наблюдений, статистики и моделей для общего бюджета  $\text{CH}_4$  и его отдельных компонентов.

Кишке и др. (2013) были первыми, кто провел синтез выбросов  $\text{CH}_4$ , за ними последовали Сауна и др. (2016). Кишке и др. (2013) представили данные о средних десятилетних выбросах и поглотителях  $\text{CH}_4$  с 1980 по 2009 год на основе подходов "снизу вверх" и "сверху вниз". Saunois et al. (2016) сообщили о выбросах метана за три временных периода: (1) последнее календарное десятилетие (2000-2009), (2) последнее доступное десятилетие (2003-2012) и (3) последний доступный год (2012) на тот момент. Здесь мы обновляем данные о выбросах и поглотителях метана за десятилетие 2000-2009 годов, за последнее десятилетие 2008-2017 годов, по которому имеются данные, и за 2017 год, сокращая временной лаг между последним отчетным годом и анализом. Бюджет метана представлен здесь в глобальном и широтном масштабах, а данные можно загрузить с сайта <https://doi.org/10.18160/GCP-CH4-2019> (Saunois et al., 2019).

За этим введением следуют пять разделов. В разделе 2 представлена методология, использованная в бюджете (единицы измерения, определения категорий источников и регионов, анализ данных), и обсуждается задержка между периодом исследования бюджета и датой выпуска. В разделе 3 представлены текущие

знания об источниках и поглотителях метана, основанные на совокупности представленных здесь восходящих подходов (модели, кадастры, подходы, основанные на данных). В разделе 4 представлены атмосферные наблюдения и нисходящие инверсии атмосферы, собранные для данной работы. В разделе 5, основанном на разделах 3 и 4, представляет обновленный анализ глобального бюджета метана, сравнивая оценки "снизу вверх" и "сверху вниз" и выделяя различия. Наконец, в Разделе 5 обсуждаются будущие разработки, ошибки...

и наиболее важные остающиеся неопределенности, основанные на нашем обновлении глобального бюджета метана.

## 2 Методология

### 2.1 Используемые единицы

Если не указано, потоки выражены в тераграммах  $\text{CH}_4$  в год ( $1 \text{ Tg CH}_4 \text{ в год}^{-1} = 10^{12} \text{ г CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ ), а концентрации в атмосфере выражены как молярные доли сухого воздуха, в частях на миллиард (ppb), при этом годовой прирост метана в атмосфере,  $G_{\text{АТМ}}$ , выражен в частях на миллиард в год.

В таблицах представлены средние значения и диапазоны для двух десятилетий 2000-2009 и 2008-2017 годов, а также результаты за последний доступный год (2017). Результаты, полученные из предыдущих обобщений (например, Saunois et al., 2016), также приводятся для десятилетия 2000-2009 гг. Следуя Saunois et al. (2016) и учитывая, что количество исследований относительно невелико для многих отдельных источников и поглотителей, неопределенности представлены в виде минимальных и максимальных значений доступных исследований в скобках. При этом мы признаем, что не рассматриваем неопределенность отдельных оценок, а выражаем неопределенность как диапазон имеющихся средних оценок, т.е. различий между рассматриваемыми измерениями и методологиями. Эти минимальные и максимальные значения соответствуют представленным в Разделе и 2.5 исключают выявленные отклонения.

Оценки выбросов  $\text{CH}_4$  представлены с точностью до трех цифр, для согласованности по всем

компонентам потоков бюджета и для обеспечения точности агрегированных потоков. Тем не менее, учитывая величину неопределенностей в бюджете метана, мы призываем читателя считать значимыми не более двух цифр.

### 2.2 Период действия бюджета и доступность данных

Оценки "снизу вверх" основываются на глобальных антропогенных кадастрах, моделях поверхности земли для выбросов с водно-болотных угодий и опубликованной литературе для других природных источников. Глобальные антропогенные кадастры на сетке обновляются нерегулярно, обычно раз в несколько лет. На момент начала исследования последними годами доступных инвентаризаций были 2012, 2014 или 2016. Для этого бюджета, чтобы охватить рассматриваемый период (2000-2017 гг.), необходимо было экстраполировать некоторые из этих наборов данных, как объясняется в разд. 3.1.1. Модели поверхностных земель были запущены на весь период 2000-2017 гг. с использованием динамических водно-болотных угодий (Раздел 3.2.1).

Для нисходящих оценок мы используем атмосферные инверсии, охватывающие 2000-2017 годы. Моделирование продолжается до середины 2018 года, но последний год, когда были представлены результаты инверсии, - 2017, что представляет собой отставание от настоящего времени на 3 года, что на 2 года короче, чем в последнем выпуске (Saunois et al., 2016). Спутниковые наблюдения связаны с оперативными цепочками данных и обычно доступны через несколько дней или недель после записи спектров. Поверхностные наблюдения могут запаздывать от нескольких месяцев до нескольких лет, поскольку

времени на анализ колб и проверку данных в (в основном) неработающих цепочках. Последние месяцы инверсий обычно игнорируются (spin down), поскольку расчетные потоки не ограничиваются таким количеством наблюдений, как в предыдущие периоды.

### 2.3 Определение регионов

Географически выбросы представлены в глобальном масштабе и для трех широтных полос (90 °ю.-30 с.ш., 30-60° с.ш., 60-90° с.ш., только для грид-продуктов). При экстраполяции оценок выбросов вперед во времени (см. раздел 3.1.1) и для регионального бюджета, представленного Stavert et al. (2020), набор регионов 19 (океаны и 18 континентальных регионов; см. рис. S1 в Приложении) были использованы. Поскольку антропогенные выбросы часто сообщаются по странам, мы определили эти регионы на основе списка стран (Таблица S1). Этот подход был совместим со всеми рассмотренными подходами "сверху вниз" и "снизу вверх". Количество регионов было выбрано таким образом, чтобы оно было близко к широко используемой карте межсравнительного анализа TransCom (Gurney et al., 2004), но с субрегионами для разделения вклада важных для цикла метана стран или регионов (Китай, Южная Азия, тропическая Америка, тропическая Африка, США и Россия). Полученное определение региона совпадает с тем, которое используется для бюджета NO GCP<sub>2</sub> (Tian et al., 2019).

### 2.4 Определение категорий источников

Метан выделяется в результате различных процессов (т.е. биогенных, термогенных или пирогенных) и может иметь антропогенное или природное происхождение. Биогенный метан - это конечный продукт разложения органических веществ метаногенными археями в анаэробных средах, таких как водонасыщенные почвы, болота, рисовые поля, морские отложения, свалки, очистные сооружения канализации и сточных вод или пищеварительные системы животных. Термогенный метан образуется в геологические сроки в результате распада захороненных органических веществ под воздействием тепла и давления глубоко в земной коре. Термогенный метан попадает в атмосферу через морские и наземные геологические газовые просачивания. Эти выбросы метана увеличиваются в результате деятельности человека, например, при добыче и распределении ископаемого топлива. Пирогенный метан образуется в результате неполного сгорания биомассы и других органических материалов. Торфяные пожары, сжигание биомассы на обезлесенных или деградированных территориях, лесные пожары и сжигание биотоплива являются крупнейшими источниками пирогенного метана. Гидраты метана - льдоподобные клетки с захваченным метаном, обнаруженные на континентальных шельфах и склонах, а также под подводной и сухопутной вечной

мерзлотой, - могут иметь как биогенное, так и термогенное происхождение. Каждая из этих трех категорий процессов имеет как антропогенные, так и природные компоненты.

Далее мы представим различные источники метана в зависимости от их антропогенного или природного происхождения, что имеет значение для климатической политики. Здесь "природные источники" относятся к выбросам до сельскохозяйственной деятельности, даже если они подверглись антропогенному изменению климата, а "антропогенные

источники" вызваны непосредственной деятельностью человека с доиндустриального/досельскохозяйственного периода (3000-2000 гг. до н.э.; Nakazawa et al., 1993), включая сельское хозяйство, утилизацию отходов и деятельность, связанную с ископаемым топливом. Естественные выбросы делятся на "водно-болотные" и "другие естественные" выбросы (например, не водно-болотные внутренние воды, дикие животные, термиты, наземные геологические источники, океанические геологические и биогенные источники и вечная мерзлота). Антропогенные выбросы содержат "выбросы от агрокультуры и отходов", "выбросы от ископаемого топлива" и "выбросы от сжигания биомассы и биотоплива", предполагая, что все виды пожаров вызывают антропогенные источники, хотя они частично имеют природное происхождение (рис. 6; см. также таблицы и 36).

Наше определение природных и антропогенных источников не совсем соответствует определению, используемому РКИК ООН в соответствии с руководящими принципами МГЭИК (IPCC, 2006), где по прагматическим причинам все выбросы с управляемых земель указываются как антропогенные, что в данном случае не так. Например, мы рассматриваем все водно-болотные угодья как естественные выбросы, несмотря на то, что некоторые водно-болотные угодья являются управляемыми и их выбросы частично отражены в национальных сообщениях РКИК ООН. Вызванное деятельностью человека возмущение климата, атмосферного CO<sub>2</sub>, осаждение азота и серы может привести к изменениям в источниках, которые мы классифицировали как природные. Согласно нашему определению, выбросы из болот, внутренних вод или таяния вечной мерзлоты будут учитываться в природных выбросах, хотя мы признаем, что изменение климата - антропогенное

возмущение - может вызвать увеличение выбросов из этих источников. Выбросы метана из водохранилищ считаются естественными, несмотря на то, что водохранилища созданы человеком, а с 2019 года, когда МГЭИК внесла уточнения в руководящие принципы (IPCC, 2006, 2019), выбросы из водохранилищ и других затопленных земель рассматриваются РКИК ООН как антропогенные.

Следуя Saunio et al. (2016), мы сообщаем об антропогенных и природных выбросах метана по пяти основным категориям источников для подходов "снизу вверх" и "сверху вниз".

Нижние оценки выбросов метана для некоторых процессов получены на основе моделей, ориентированных на процесс (например, биогеохимические модели для водно-болотных угодий, модели для термитов), моделей инвентаризации (выбросы сельского хозяйства и отходов, выбросы ископаемого топлива, выбросы от сжигания биомассы и биотоплива), спутниковых моделей (крупномасштабное сжигание биомассы) или моделей масштабирования на основе наблюдений для других источников (например, внутренние воды, геологические источники). На основе этих восходящих подходов можно получить оценки для более детальных подкатегорий источников внутри каждой основной категории GCP (см. бюджет в Таблице 3). Однако общая эмиссия метана, полученная из суммы независимых восходящих оценок, остается неопределенной.

Для атмосферных инверсий (подход "сверху вниз") ситуация иная. Атмосферные наблюдения дают ограничение на глобальный общий источник и разумное ограничение на глобальный сток, полученный из метилхлороформа (Montzka et al., 2011; Rigby et al., 2017). Инверсии, о которых сообщается в данной работе, решают задачи либо для общего потока метана (например, Pison et al., 2013), либо для ограниченного числа категорий источников (например).

2017 гг.

Bergamaschi et al., 2013). В большинстве обратных систем концентрации атмосферных окислителей задаются с помощью предварительно оптимизированных или масштабированных полей ОН, и, таким образом, атмосферный сток не решается. Ассимиляция только наблюдений за СН<sub>4</sub>, как сообщается в данном обобщении, может помочь разделить источники с различным местоположением или временными вариациями, но не может полностью разделить отдельные источники, поскольку они часто перекрываются в пространстве и времени в некоторых регионах. Глобальные и региональные выбросы метана по категориям источников сверху вниз были получены непосредственно из оптимизированных потоков по сетке, если инверсия решалась для отдельных пяти основных категорий ППП. В противном случае, если инверсия решалась только для общих выбросов (или для категорий, отличных от основных пяти, описанных выше), то предварительное распределение каждой категории источников в пространственном разрешении инверсии масштабировалось отношением общего (или вложенного в категорию) оптимизированного потока, деленного на общий (или вложенный в категорию) предварительный поток (Kirschke et al., 2013). Другими словами, при обновлении общих выбросов с учетом атмосферных обслуживания сохраняется предварительное относительное сочетание источников при разрешении модели. Поглощение почвой было представлено отдельно, чтобы представить общие валовые поверхностные выбросы вместо чистых потоков (источники минус поглощение почвой).

В целом, восходящие модели и кадастры составляются для всех процессов источников и для пяти основных категорий, определенных выше, в глобальном масштабе. Нисходящие инверсии перепортируются на глобальном уровне и только для пяти основных категорий выбросов.

## 2.5 Обработка карт выбросов и представление бюджетов выбросов в виде квадратных диаграмм

Общие процедуры анализа данных применялись к различным восходящим моделям, кадастрам и атмосферным инверсиям во всех случаях, когда существовали продукты с сеткой. Решетчатые выбросы из атмосферных инверсий и моделей поверхности земли для водно-болотных угодий или сжигания биомассы были представлены в месячном масштабе. Выбросы из антропогенных кадастров обычно доступны в виде годовых оценок. Эти месячные или годовые потоки были представлены на сетке  $1^\circ \times 1^\circ$  или перемасштабированы до  $1^\circ \times 1^\circ$  затем пересчитаны в единицы тераграммов метана на ячейку сетки. Версии с разрешением грубее  $1^\circ$  были понижены до масштаба

$1^\circ$  каждой группы моделирования. Потоки с суши в прибрежных пикселях были перераспределены на соседний пиксель суши в соответствии с нашей маской  $1^\circ$  суша-море, и наоборот для океанических потоков. Годовые и декадные средние, используемые в данном исследовании, были рассчитаны следующим образом из месячных или годовых карт  $1^\circ \times 1^\circ$  с сеткой.

Бюджеты представлены в виде квадратных диаграмм с квантилями (25 %, медиана, 75 %), отклонения, а также минимальные и максимальные значения без отклонения. Выпадающие значения определялись как значения ниже первого квантиля минус 3-кратный интерквартильный размах или значения выше третьего квантиля плюс кратность 3 интерквартильного размаха. Средние значения, представленные в таблицах, представлены как Символы "+" на соответствующих рисунках.

### 3 Источники и поглотители метана: оценки снизу вверх

Для каждой категории источников дается краткое описание соответствующих процессов, исходных наборов данных (измерений, моделей) и повторно используемой методологии. Более подробную информацию можно найти в ссылках на оригинальные публикации и в дополнении к данному исследованию.

#### 3.1 Антропогенные источники

##### 3.1.1 Собранные глобальные запасы

Основные базы данных глобального кадастра "снизу вверх", охватывающие антропогенные выбросы из всех секторов (табл. 1), предоставлены Агентством по охране окружающей среды США (USEPA, 2012), моделью взаимодействия и синергии парниковых газов и загрязнителей воздуха (GAINS), разработанной Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA) (Gomez Sanabria et al., 2018; Höglund-Isaksson, 2012, 2017), и База данных выбросов для глобальных атмосферных исследований (EDGARv3.2.2; Janssens-Maenhout et al., 2019), составленная Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии (EC- JRC) и Агентством по оценке окружающей среды Нидерландов (PBL). Мы также использовали Систему данных о выбросах сообщества для исторических выбросов (CEDS) (Hoesly et al., 2018), разработанную для моделирования климата, и базу данных о выбросах Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) (Tubiello, 2019), которая охватывает только выбросы от сельского хозяйства и землепользования (включая торфяники и пожары биомассы).

Эти кадастровые наборы данных сообщают о выбросах от производства, передачи и распределения ископаемого топлива; энтеральной ферментации скота; использования и применения навоза; выращивания риса; твердых отходов; и сточных вод. Поскольку уровень детализации по странам и секторам в разных кадастрах различается, данные были сведены в общие категории в соответствии с таблицей S2. Например, выбросы от сжигания сельскохозяйственных отходов и отходов, рассматриваемые как отдельная категория в EDGAR, GAINS и FAO, включены в сектор биотоплива в кадастре USEPA и в сельскохозяйственный сектор в CEDS. Оценки GAINS, EDGAR и FAO по сжиганию сельскохозяйственных отходов были исключены из данного анализа (они составили 1-3 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ) в последние десятилетия, чтобы предотвратить любое непреднамеренное совпадение с отдельными оценками выбросов от сжигания биомассы (например, GFEDv4.1s). В используемых

здесь кадастрах выбросы для данного региона/страны и данного сектора обычно...

рассчитывается по методологии МГЭИК (IPCC, 2006) как произведение коэффициента деятельности и коэффициента выбросов для этой деятельности. Дополнительно используется коэффициент снижения выбросов для учета любых нормативных актов, внедренных для контроля выбросов (см., например, Höglund-Isaksson et al., 2015). Эти наборы данных различаются по своим допущениям и данным, используемым для расчета, однако они не являются полностью независимыми, поскольку следуют одним и тем же руководящим принципам МГЭИК (IPCC, 2006) и, по крайней мере для сельского хозяйства, используют одни и те же данные FAOSTAT по активности. В то время как в кадастре USEPA приняты выбросы



**Таблица** Модели и кадастры "снизу вверх1." для антропогенных оценок и оценок сжигания биомассы, использованных в данном исследовании. <sup>a</sup> Из-за ограниченной разбивки по секторам эта база данных использовалась в Таблице 3 только для основных категорий, заменяя оценки на основе CEDS по странам. <sup>b</sup> Для данного исследования расширена до 2017 года, как описано в Разделе. 3.1.1.

Восходящие модели и инвентаризации	Взнос	Период времени (разрешение)	Сетка	Ссылки
CEDS (по странам)	Ископаемое топливо, сельское хозяйство и отходы, биотопливо	1970-2015b (ежегодно)		Использует данные о деятельности в основном животноводству, представленные странами в FAO (Tubiello et al., 2013), и применяет в основном методологию уровня 1 МГЭИК для коэффициентов выбросов (МГЭИК, 2006), которые зависят от географической ло-
CEDS (решётка) <sup>a</sup>	Ископаемое топливо, сельское хозяйство и отходы, биотопливо	1970-2015b (ежемесячно)		0.5° × 0.5° (Hoesly и др. (2018))
EDGARv4.2.3	Ископаемое топливо, сельское хозяйство и отходы, биотопливо	1990-2012b (ежегодно)		0.1° × 0.1° Janssens-Maenhout и др. (2019)
IIASA GAINS ECLIP-SEv6	Ископаемое топливо, сельское хозяйство и отходы, биотопливо	1990-2015b (1990-2015 гг. ежегодно, 2015> 5-летний интервал in-пересчитано на год 1990-2030 гг.)		0.5° × 0.5° Хёглунд-Исакссон (2012)
USEPA	Ископаемое топливо, сельское хозяйство и отходов, биотопливо, сжигание биомассы	(10-летний интервал, привязаны к году)		нет USEPA (2012)
FAO-CH4	Сельское хозяйство, биомасса сжигание	1961-2016b (ежегодно)		нет Фредеричи и др. (2015); Tubiello и др. (2013); Тубиелло (2019)
FINNv1.5	Сжигание биомассы	2002-2018 (ежедневно)		1 км × км1 Видинмайер и др. (2011)
GFASv1.3	Сжигание биомассы	2003-2016 (ежедневно)		0.1° × 0.1° Кайзер и др. (2012)
GFEDv4.1s	Сжигание биомассы	1997-2017 (ежемесячно)		0.25° × 0.25° Giglio и др. (2013)
РКИК ООН, другие кадастры (FAOSTAT, EDGAR (в модели GFEDv4.1s) производят свои собственные оценки 2000-2017 используя последовательный подход для всех стран. (в этих других кадастрах собираются данные об активности и коэффициентах выбросов по конкретной стране или, в случае их отсутствия, используются коэффициенты по умолчанию МГЭИК (Höglund-Isaksson, 2012; Janssens-Maenhout et al., 2019; Tubiello, 2019). В CEDS используется другой подход, начиная с уже существующих оценок выбросов по умолчанию; для метана используется комбинация оценок EDGAR и ФАО, масштабированных для соответствия другим индивидуальным или региональным кадастровым значениям, если они доступны. Этот процесс позволяет сохранить пространственную информацию в кадастрах выбросов по умолчанию, сохраняя при этом согласованность с данными на уровне страны. Набор данных FAOSTAT (далее FAO-CH4) был использован для получения оценок выбросов метана на уровне страны, но ограничен сельским хозяйством (энтеральная ферментация, уборка помещений, выращивание риса, использование энергии, сжигание растительных остатков и предписанное выжигание саванн) и землепользованием (сжигание биомассы).	0.1° × 0.1° Дарменов и да Сильва (2015)			

кация и статус развития страны. Для навоза необходимая температура в масштабах страны была получена из базы данных ФАО по глобальным агроэкологическим зонам (GAEZv3.0, 2012). Хотя страны ежегодно сообщают РКИК ООН о выбросах в странах Приложения I и эпизодически - в странах, не входящих в Приложение I, пробелы в данных национальных инвентаризаций не позволяют включить эти оценки в данный анализ.

В данном бюджете мы используем следующие версии этих баз данных (см. таблицу 1):

- EDGARv4.3.2, в котором представлены годовые грид-выбросы по секторам с по (19702012Janssens-Maenhout et al., 2019);
- Сценарий модели GAINS ECLIPSE v6 (Gomez Sanabria et al., 2018; Höglund-Isaksson, 20172012.), который предоставляет как годовые секторальные итоговые данные по странам с 1990 по 2015 год и прогноз на 2020 год (который предполагает текущее законодательство по выбросам на будущее), так и годовой ~~сценарий~~ грид-продукт с 19902015 года;
- USEPA (USEPA, 2012), в котором представлены 5-летние секторальные итоги по странам с по1990 (2020оценки с последующего2005 периода являются прогнозом), при этом распределение по сетке не доступно;

2017 гг.

- CEDS версии 2017-05-18, в котором представлены как ежемесячные, так и ежегодные данные о выбросах по странам с разбивкой по секторам от до (19702014Hoesly et al., 2018);
- FAO-CH<sub>4</sub> (база данных, доступ к которой получен в феврале 2019 года, FAO, 2019), содержащая ежегодные данные на уровне страны за 1961-2016 годы по рису, навозу и энтеральной ферментации и за 1990-2016 годы по выжиганию саванны, растительным остаткам и несельскохозяйственному сжиганию биомассы.

Чтобы представить данные о выбросах за период 2000-2017 годов, мы расширили и интерполировали некоторые наборы данных, как описано в разделе 2.2. Набор данных USEPA был линейно интерполирован для получения годовых значений. Набор данных FAO-CH<sub>4</sub>, заканчивающийся в 2016 году, был экстраполирован на 2017 год с помощью линейной подгонки на основе данных 2014-2016 годов. EDGARv4.3.2 был экстраполирован на 2017 год с использованием расширенных выбросов FAO-CH для энтеральной ферментации, уборки, хранения навоза и выращивания риса, а также с использованием статистического обзора BP по производству и потреблению ископаемого топлива (BP Statistical Review of World Energy, 2019) для выбросов от секторов угля, нефти и газа. В этом экстраполированном кадастре, называемом EDGARv4.3.2<sub>EXT</sub>, выбросы метана за год  $t$  устанавливаются равными выбросам EDGAR за 2012 год (последний год) ( $E_{EDGARv4.3.2}$ ), умноженным на соотношение между выбросами FAO-CH<sub>4</sub> (или статистикой BP) за год  $t$  ( $E_{FAO-CH_4}(t)$ ) и выбросами FAO-CH<sub>4</sub> (или статистикой BP) за 2012 год ( $E_{FAO-CH_4}(2012)$ ). Для каждого сектора выбросов, удельные выбросы по регионам в EDGARv4.3.2<sub>EXT</sub> в год  $t$  рассчитываются в соответствии с уравнением (1):

$$E_{EDGARv4.3.2_{ext}}(t) = E_{EDGARv4.3.2}(2012) \times E_{FAO-CH_4}(t) / E_{FAO-CH_4}(2012). \quad (1)$$

Транспорт, промышленность, отходы и источники биотоплива были линейно экстраполированы в EDGARv4.3.2<sub>EXT</sub> на основе данных за последние 3 года, в то время как другие источники оставались неизменными на уровне 2012 года. Для проведения сравнений до 2017 года набор данных CEDS также был экстраполирован по идентичному методу создания CEDS<sub>EXT</sub>. Однако, в отличие от набора данных EDGARv4.3.2, набор данных CEDS предоставляет только объединенный нефтегазовый сектор; поэтому мы расширили этот сектор, используя сумму выбросов нефти и газа BP. Набор данных GAINS по странам был

линейно спрогнозировано по секторам для каждой страны с использованием тенденции между историческими значениями 2015 года и прогнозируемыми значениями 2020 года. Эти прогнозы по странам были агрегированы по глобальным 19 регионам (раздел 2.3 и рис. S1) и использованы для расширения набора данных сетки GAINS аналогично тому, как это описано в уравнении (1). Хотя мы используем только расширенные вентриты, в дальнейшем суффикс "EXT" будет опущен для ясности.

### 3.1.2 Общие антропогенные выбросы

Во избежание двойного учета и для обеспечения последовательности в каждом кадастре, диапазон (мин-макс) и средние значения общих антропогенных выбросов не рассчитывались, так как

сумма среднего и диапазона трех антропогенных категорий ("сельское хозяйство и отходы", "ископаемое топливо" и "сжигание биомассы и биотоплива"). Вместо этого мы рассчитали отдельно общие антропогенные выбросы для каждого кадастра путем сложения значений для сельского хозяйства и отходов, ископаемого топлива и биотоплива с диапазоном имеющихся крупномасштабных выбросов от сжигания биомассы. Этот подход был использован для кадастров EGDARv4.3.2, CEDS и GAINS, но мы сохранили кадастр USEPA в первоначальном виде, поскольку он включает собственные оценки выбросов от сжигания биомассы. FAO-CH<sub>4</sub> был включен только в диапазон, указанный для категории сельского хозяйства и отходов. Для последней мы рассчитали диапазон и среднее значение как сумму среднего и диапазона трех оценок антропогенных подкатегорий "энтеральная ферментация и навоз", "рис" и "свалки и отходы". Таким образом, значения, представленные для антропогенных категорий верхнего уровня (сельское хозяйство и отходы, ископаемое топливо, сжигание биомассы и биотоплива), согласуются с суммой их подкатегорий, хотя могут быть небольшие процентные различия между представленными общими антропогенными выбросами и суммой трех категорий верхнего уровня. Этот подход обеспечивает более точное отражение диапазона оценок выбросов, избегая артификального расширения неопределенности, связанной с тонкими различиями в определении категорий подсекторов в разных кадастрах.

На основе совокупности баз данных, подробно описанных выше, общие антропогенные выбросы составили 366 [349-393] Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> за десятилетие 2008-2017 гг. (таблица включает сжигание биомассы и биотоплива) и [334321-358] Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> за десятилетие 2000-2009 гг. Наша оценка для предыдущего

десятилетия статистически согласуется с данными Saunio et al. (2016) (338 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [329-342]) и Kirschke et al. (2013) (331 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [304-368]) за тот же период. Несколько больший диапазон, представленный в данном отчете, по сравнению с предыдущим

в основном объясняется большим диапазоном в оценках сжигания биомассы, поскольку в данном обновлении учтено больше продуктов сжигания биомассы. Диапазон, связанный с нашими оценками (10 %-12 %), меньше, чем диапазон, представленный в работе Höglund-Isaksson et al. (2015) (20 %), возможно, потому, что они анализировали данные из более широкого диапазона кадастров и прогнозов, к тому же в этом исследовании данные относились только к одному году (2005), а не усреднялись за десятилетие, как в данной работе.

На рисунке 2а приведены данные о глобальных выбросах метана из антропогенных источников (включая сжигание биомассы и биотоплива) по различным наборам данных за период с 2000 по

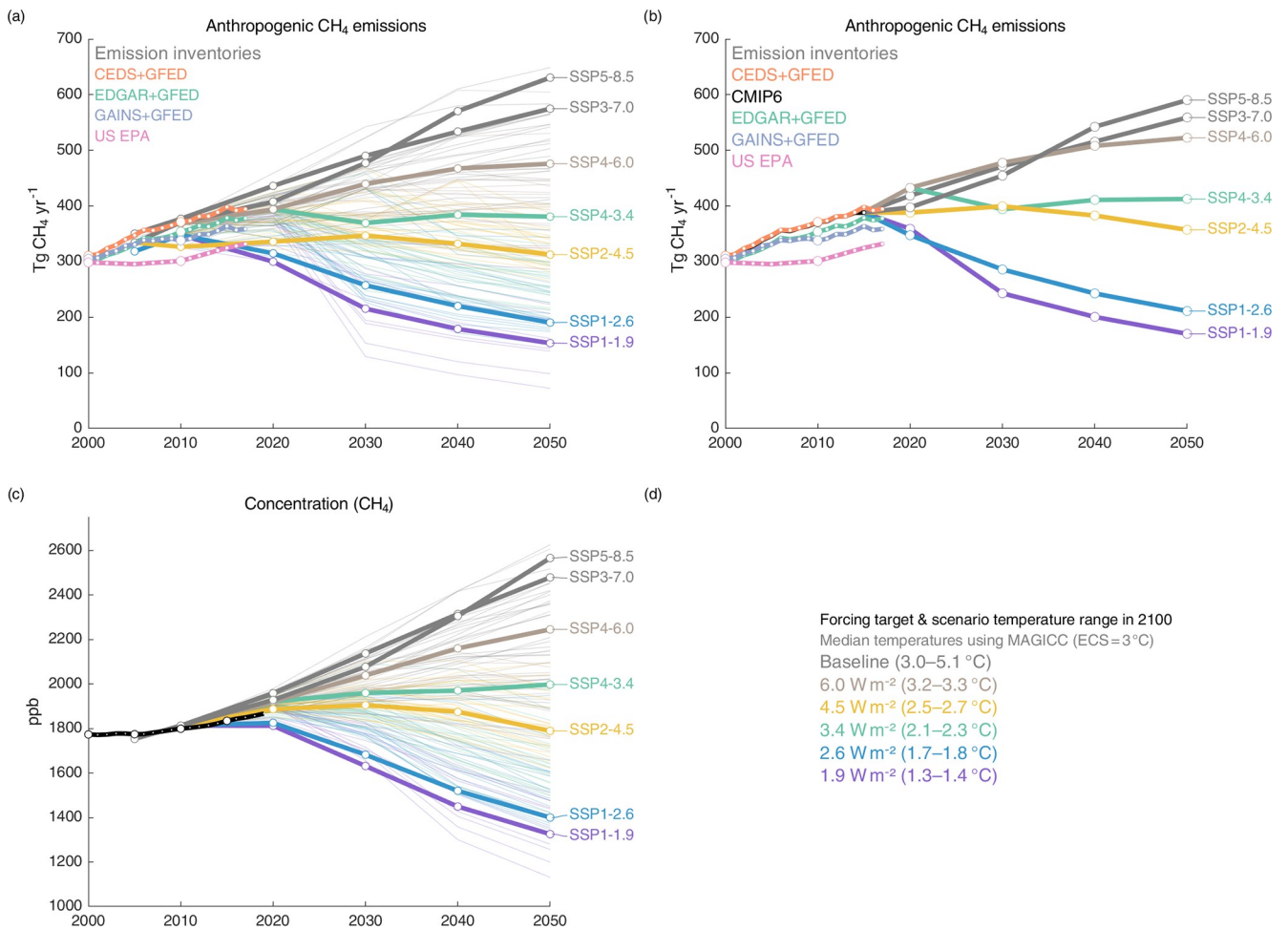
гг.2050.

наборы данных последовательно оценивают общие антропогенные выбросы в 300 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> в 2000 году. Основным расхождением между кадастрами является их тенденция после 2005 года, причем наименьшие выбросы прогнозируются GAINS, а наибольшие - CEDS. С учетом прогноза Агентства по охране окружающей среды США (EPA), который был составлен после 2005 года. 2005

и далее, его значения и тенденции отклоняются от других. Для Шестого оценочного доклада МГЭИК были определены семь основных общих социально-экономических путей (SSP) для прогнозов будущего климата в рамках фазы проекта межсравнительного анализа связанных моделей (6CMIP6) (Gidden et al., 2019; O'Neill et

~

~



**Рисунок 2.** (а, б) Глобальные антропогенные выбросы метана (включая сжигание биомассы) по данным исторических инвентаризаций и будущих прогнозов (Тг СН<sub>4</sub> г/г<sup>1</sup>). (а) Кадастры и негармонизированные общие социально-экономические пути (Riahi et al., 2017), выделенные сценарии представляют сценарии, оцененные в CMIP6 (O'Neill, et al., 2016). (б) Выбранные сценарии, гармонизированные с историческими выбросами (CEDS) для деятельности CMIP6 (Gidden et al., 2019). Оценки USEPA и GAINS были линейно интерполированы от 5-летних исходных продуктов к годовым значениям. После USEPA2005, исходные оценки являются прогнозами. (с) Глобальные концентрации метана по наблюдениям NOAA на поверхностных площадках (черный) и прогнозы на основе SSPs (Riahi et al., 2017) с концентрациями, оцененными с помощью MAGICC (Meinshausen et al., 2011).

al., 2016) в диапазоне от до 1.9Вт8.5 м<sup>-2</sup>радиационного форсирования к 2100 году (как показано цифрой в названиях ПСП). Тенденции в выбросах метана из эсти-2010

на основе текущих кадастров отслеживают пути с наибольшим радиационным воздействием в 2100 году (на основе негармонизированных сценариев, разработанных моделями комплексной оценки, рис. 2а). Для периода 1970-2015 годов исторические выбросы, используемые в CMIP6 (Feng et al., 2019), объединяют антропогенные выбросы из CEDS (Hoesly et al., 2018) и климатологическое значение из кадастра сжигания биомассы GFEDv4.1s (van Marle et al., 2017). Оценки антропогенных выбросов CEDS, основанные на EDGARv4.2, на 10-20 Тг выше, чем более современные EDGARv4.3.2 (van Marle et al., 2017). Хар-

монизированные сценарии, используемые для работы CMIP6, начинаются с 2015388 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>. Поскольку выбросы метана продолжают следовать сценариям, предполагающим отсутствие или минимальную климатическую политику,

Это может указывать на то, что климатическая политика, когда она проводится, еще не дала достаточных результатов, чтобы существенно изменить траекторию выбросов (Nisbet et al., 2019). После 2015 года ПСП охватывают целый ряд возможных результатов, но текущие выбросы, по-видимому, будут следовать траектории более высоких выбросов в течение следующего десятилетия (рис. 2b). Это иллюстрирует проблему снижения выбросов метана, которая стоит впереди, чтобы помочь достичь целей Парижского соглашения. Кроме того, оценки атмосферных концентраций метана, полученные в рамках негармонизированного сценария (Riahi et al., 2017), показывают, что данные наблюдений за глобальными концентрациями метана находятся в пределах диапазона сценария (рис. 2c). Концентрации метана оцениваются с помощью простого экспоненциального распада с предполагаемыми естественными выбросами (Meinshausen et al., 2011), и появление какой-либо тенденции между наблюдениями и сценариями должно быть подтверждено в последующие годы. В будущем будет важно

2017 гг.

отслеживать тенденции с года (2015 Парижское соглашение), оцененные в кадастрах и по данным атмосферных наблюдений, и сравнивать их с различными сценариями.

### 3.1.3 Производство и использование ископаемого топлива

Большинство антропогенных выбросов метана, связанных с ископаемым топливом, происходит при добыче, транспортировке и использовании угля, нефти и природного газа. Дополнительные выбросы, зарегистрированные в этой категории, включают небольшие промышленные выбросы, такие как производство химикатов и металлов, пожары на ископаемом топливе (например, пожары на угольных шахтах в недрах земли и нефтегазовые пожары в Кувейте), а также транспорт (автомобильный и внедорожный транспорт). Выбросы метана от нефтяной промышленности (например, нефтепереработки) и производства древесного угля оцениваются всего в несколько тераграммов метана в год и включены в кадастр в раздел трансформационной промышленности. Сжигание ископаемого топлива включено в подкатегорию "нефть и газ". Выбросы от промышленных предприятий, автомобильного и внедорожного транспорта представлены отдельно от двух основных подкатегорий.

категории "нефть и газ" и "добыча угля", вопреки данным Saunois et al. (2016); каждая из них составляет около 5 Тг  $\text{CH}_4$  г.<sup>-1</sup> (Таблица 3). Большой диапазон (0-12 Тг  $\text{CH}_4$  г.<sup>-1</sup>) объясняется трудностями в отнесении некоторых секторов к этим подсекторам последовательно в различных кадастрах (см. таблицу S2). Пространственное распределение выбросов метана от ископаемого топлива представлено на рис. на основе 3 средних карт с привязкой к сетке, предоставленных CEDS, EDGARv4.3.2 и GAINS за десятилетие 2008-2017 годов; у USEPA отсутствует продукт с привязкой к сетке.

Средние глобальные выбросы от деятельности, связанной с ископаемым топливом, других отраслей промышленности и транспорта, по оценкам четырех глобальных кадастров (Таблица 1), составляют [128113-154] Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> за десятилетие 2008-2017 годов (Таблица 3), но с большими различиями в темпах изменения в течение этого периода во всех кадастрах. На этот сектор приходится в среднем 35 % (диапазон %-4230 %) от общего объема глобальных антропогенных выбросов.

#### Добыча угля

В процессе добычи метан выбрасывается в основном из вентиляционных шахт, где большие объемы воздуха

закачиваются в шахту для поддержания коэффициента смешивания  $\text{CH}_4$  ниже %0.5 во избежание воспламенения, а также в результате операций по обезвоживанию. В странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) метан, выделяющийся из вентиляционных шахт, в принципе, используется в качестве топлива, но во многих странах он по-прежнему выбрасывается в атмосферу или сжигается в факелах, несмотря на эфф-форты для регенерации угольных шахт в рамках Механизма чистого развития РКИК ООН (<http://cdm.unfccc.int>, последнее обращение: июнь 29 2020 года). Утечки метана происходят также при обработке, переработке и транспортировке после добычи. Часть  $\text{CH}_4$  повторно поступает из угольных отвалов и заброшенных шахт; хотя считалось, что выбросы из этих источников невелики (МГЭИК, 2000), недавние работы оценили их в 22 млрд м<sup>3</sup> (по сравнению с млрд 103 м<sup>3</sup> из действующих угольных шахт).

в 2010 году с прогнозируемым ростом выбросов в будущем (Холод и др., 2020).

В 2017 году почти 40 % (IEA, 2019b) электроэнергии в мире по-прежнему производилось из угля. В 2000-х годах этот вклад увеличивался на несколько процентов в год, чему способствовал экономический рост в Азии, где имеются большие запасы, однако с 2014 года мировое потребление угля сократилось. В 2018 году на долю 10 крупнейших угледобывающих стран приходилось 90 % всех мировых выбросов метана при добыче угля; среди них три крупнейших производителя (Китай, США и Индия) производили почти две трети (64 %) угля в мире (IEA, 2019a).

Глобальные оценки выбросов CH<sub>4</sub> от добычи угля показывают большой диапазон в 29-61 Тг СН в год<sup>-1</sup> за 2008-2017 годы, частично из-за отсутствия полных данных по всем основным странам-производителям. Наибольшее значение диапазона получено из кадастра CEDS, а наименьшее - из USEPA.

Похоже, что в CEDS выбросы от угледобычи в Китае завышены почти в разы, что, скорее, всего, связано с тем, что они находятся в кадастре выбросов EDGARv4.2. По данным Sauniois et al. (2016), инвентаризация выбросов метана в Китае на основе округов также подтверждает завышение примерно на %38, при этом общие антропогенные выбросы оцениваются в размере

на уровне 43 6 Тг CH<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> (Peng et al., 2016). Кадастр EDGARv4.2 соответствует руководящим принципам МГЭИК и использует европейский стандарт.

усредненный коэффициент выбросов CH<sub>4</sub> от добычи угля для замены недостающих данных по Китаю, которые, как оказалось, были завышены примерно в 2 раза. Эти различия подчеркивают значительные ошибки, возникающие при использовании коэффициентов выбросов, и применение подходов уровня 1 для выбросов угольных шахт не является достаточно точным, как указано в руководстве МГЭИК. В недавно выпущенной версии EDGARv4.3.2, используемой здесь, коэффициенты выбросов метана от угольных шахт Китая пересмотрены в сторону уменьшения и распространены на более чем 80 раз большее количество мест добычи угля в Китае. Коэффициенты выбросов при добыче угля сильно зависят от типа добычи угля (подземная добыча выбрасывает в 10 раз больше, чем открытая), ~~копийной~~ подземной структуры (зависит от региона), истории (поднятие бассейна) и качества угля (бурый уголь выбрасывает больше, чем каменный). Наконец, добыча угля является основным источником, объясняющим различия между кадастрами в глобальном масштабе (рис. 2).

За десятилетие 2008-2017 гг. выбросы метана от добычи угля составляют 33 % от общего объема выбросов метана, связанных с ископаемым топливом (42 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>, диапазон 29-61). Дополнительный очень небольшой источник соответствует пожарам ископаемого топлива (в основном подземные

угольные пожары, ТГ0.15 в год<sup>-1</sup> в 2012, EDGARv4.3.2).

## Нефтяные и газовые системы

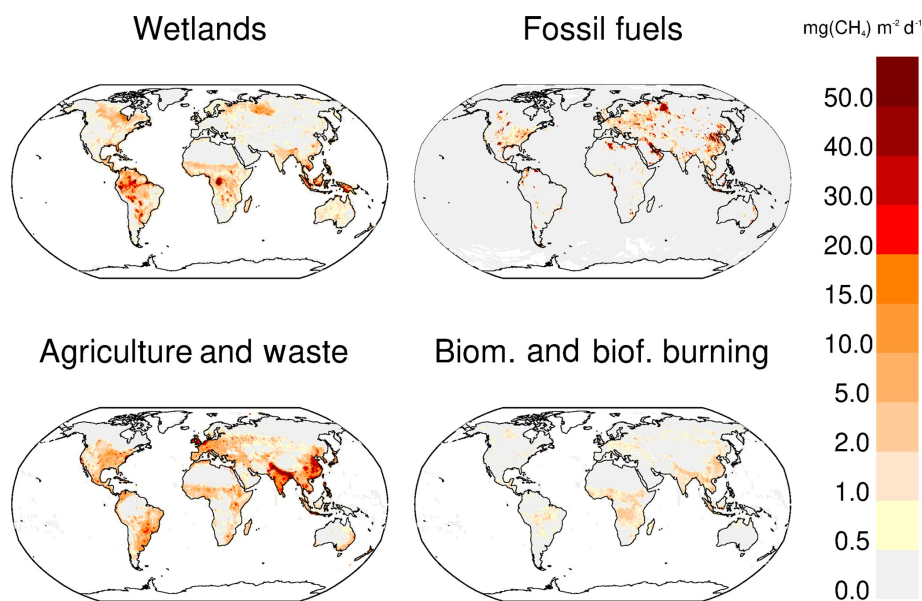
Эта подкатегория включает выбросы как при добыче традиционной, так и сланцевой нефти и газа. Природный газ состоит в основном из метана, поэтому как летучие, так и запланированные выбросы во время бурения скважин на газовых месторождениях, добычи, транспортировки, хранения, распределения газа, конечного использования и неполного использования.

+

±

~





**Рисунок 3.** Выбросы метана из четырех категорий источников: естественные водно-болотные угодья (исключая озера, пруды и реки), сжигание биомассы и биотоплива, сельское хозяйство и отходы, ископаемое топливо за десятилетие 2008-2017 годов (мг CH<sub>4</sub> м<sup>-2</sup> д<sup>-1</sup>). Карта выбросов водно-болотных угодий представляет собой среднесуточное значение выбросов по биогеохимическим 13 моделям, перечисленным в таблице и за десятилетие 2008-2017 гг. Ископаемое топливо, сельское хозяйство и отходы. Карты выбросов получены из средних оценок моделей CEDS, EGDARv4.3.2 и GAINS. Карта сжигания биомассы и биотоплива получена из среднего значения кадастров сжигания биомассы, перечисленных в Таблице 1, добавленного к среднему значению оценки биотоплива из моделей CEDS, EDGARv4.3.2 и GAINS.

при сжигании газа на факелах выделяется метан (Lamb et al., 2015; Shorter et al., 1996). Постоянные летучие выбросы (например, из-за негерметичности клапанов и компрессоров) следует отличать от периодических выбросов в результате технического обслуживания (например, продувки и дренажа труб). Во время транспортировки летучие выбросы могут происходить в нефтяных цистернах, бензовозах и газопроводах, что связано с коррозией, производственными и сварочными дефектами. Согласно данным Lelieveld и др. (2005), летучие выбросы CH<sub>4</sub> из газопроводов должны быть относительно низкими, однако распределительные сети в старых городах могут иметь более высокие показатели, особенно те, где используются чугунные и незащищенные стальные трубопроводы (Phillips и др., 2013). Измерительные кампании в городах США и Европы показали, что значительные выбросы происходят в определенных местах (например, хранилища, городские ворота, точки опрессовки скважин и трубопроводов) вдоль распределительных сетей (например, Jackson et al., 2014a; McKain et al., 2015; Wunch et al., 2016). Однако выбросы метана значительно различаются в разных городах, что отчасти зависит от возраста городской инфраструктуры и качества ее технического обслуживания, что затрудняет масштабирование городских выбросов. На многих объектах, таких как газовые и нефтяные месторождения, нефтеперерабатывающие заводы и морские платформы, вентиляция природного газа в

настоящее время заменена сжиганием с почти полным преобразованием в CO<sub>2</sub>; эти два процесса обычно рассматриваются вместе в кадастрах нефтяной и газовой промышленности. Кроме того, при одномоментном разрушении газовой инфраструктуры может происходить утечка метана с высокой скоростью в течение нескольких месяцев, как, например, при взрыве в каньоне Алисо в Лос-Анджелесе,

СА, бассейн (Conley et al., 2016) или недавний взрыв скважины сланцевого газа в Огайо (Pandey et al., 2019), что затрудняет стратегии контроля выбросов. Добыча природного газа в результате эксплуатации до сих пор непродуктивных горных пород, особенно сланцевых, началась в 1970-х годах в США в экспериментальном или мелкомасштабном режиме, а затем, с начала 2000-х годов, добыча стала осуществляться в крупных коммерческих масштабах. Вклад сланцевого газа в общее производство сухого природного газа в США достиг 62 % в 2017 году, быстро увеличившись с 40 % в 2012 году, при этом до 2005 года добывались лишь небольшие объемы (EIA, 2019). Возможные более значительные факторы выбросов сланцевого газа по сравнению с традиционным широко обсуждались (например, Cathles et al., 2012; Howarth, 2019; Lewan, 2020). Однако последние исследования склоняются к выводу, что подобные коэффициенты выбросов находятся в узком диапазоне 1 %-3 % (Alvarez et al., 2018; Peischl et al., 2015; Zavala-Araiza et al., 2015), что отличается от широко распространенных показателей 10 %-173 % из предыдущих исследований (например, Caulton et al., 2014; Schneising et al., 2014).

Выбросы метана из нефтяных и газовых систем сильно различаются в разных глобальных кадастрах (от 72 до 97 Тг в год<sup>-1</sup> в 2017 году, Таблица 3). Кадастры, как правило, опираются на одни и те же источники и величины данных о деятельности, поэтому различия в них обусловлены, главным образом, различиями в объемах выбросов. используемые методологии и параметры, включая факторы выбросов. Эти факторы зависят от конкретной страны или даже участка, а имеющиеся немногочисленные полевые измерения часто объединяют нефтегазовую деятельность (Brandt et al., 2014) и остаются в значительной степени неизвестными.

2017 гг.

для большинства основных нефте- и газодобывающих стран. В зависимости от страны, сообщаемые коэффициенты выбросов могут отличаться на 2 порядка величины для добычи нефти и на 1 порядок величины для добычи газа (Таблица S5.1 Höglund- Isaksson, 2017). Например, оценка GAINS выбросов метана при добыче нефти в два раза выше, чем EDGARv4.3.2. Для природного газа неопределенность имеет аналогичный порядок величины. В процессе добычи нефти образующийся природный газ может быть либо извлечен (повторно закачан в пласт или использован в качестве источника энергии), либо не извлечен (сожжен или выброшен в атмосферу). Коэффициенты извлечения различаются в зависимости от страны (в США, Европе и Канаде они гораздо выше, чем в других странах) и от типа нефти: сжигание в факелах менее распространено для скважин с тяжелой нефтью, чем для обычных (Höglund-Isaksson et al., 2015). Учет коэффициентов извлечения может привести к двукратному увеличению выбросов метана с учетом коэффициентов выработки и извлечения попутного газа в зависимости от страны по сравнению с использованием значений по умолчанию (Höglund-Isaksson, 2012). Это различие в методологии частично объясняет, почему оценки GAINS выше, чем оценки EDGARv4.3.2.

Большинство исследований (Alvarez et al., 2018; Brandt et al., 2014; Jackson et al., 2014b; Karion et al., 2013; Moore et al., 2014; Olivier and Janssens-Maenhout, 2014; Pétron et al., 2014; Zavala-Araiza et al, 2015), хотя и не все (Allen et al., 2013; Cathles et al., 2012; Peischl et al., 2015), свидетельствуют о том, что выбросы метана от нефтегазовой промышленности недооцениваются кадастрами и агентствами, включая USEPA. Zavala-Araiza и др. (2015) показали, что в США доминируют несколько объектов с высоким уровнем выбросов, т.е. суперэмиттеров, которые игнорируются в кадастрах. Этих точек с высоким уровнем выбросов, расположенных в обычной части предприятия, можно избежать за счет улучшения условий эксплуатации и устранения неисправностей. По мере роста производства в США абсолютные выбросы метана почти наверняка увеличатся. За последнее десятилетие добыча сырой нефти в США также удвоилась, а добыча природного газа выросла более чем на 50 % (EIA, 2019). Однако глобальные последствия быстрого роста добычи сланцевого газа в США еще предстоит точно определить.

Для десятилетия 2008-2017 гг. выбросы метана из секторов добычи и переработки нефти и природного газа составляют около 63 % от общего объема двывбросов ископаемых углеводородов (80 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>., диапазон 68-92 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>., Таблица 3), с более низким диапазоном неопределенности, чем для выбросов угля для большинства секторов.

страны.

### 3.1.4 Сельское хозяйство и сектор отходов

Эта основная категория включает выбросы метана, связанные с животноводством (т.е. с энтеральной ферментацией у жвачных животных и уборкой навоза), выращиванием риса, свалками и обработкой сточных вод. В глобальном масштабе и в большинстве стран самым крупным источником СН<sub>4</sub> является животноводство, за которым следуют обработка отходов и выращивание риса. И наоборот, сжигание сельскохозяйственных остатков на полях является незначительным источником

CH<sub>4</sub>, о которых сообщается в кадастрах выбросов. Пространственное распределение выбросов метана от сельского хозяйства и переработки отходов представлено на рис. 3 на основе среднесеточных карт, предоставленных CEDS, EDGARv4.3.2 и GAINS за десятилетие 2008-2017 гг.

Глобальные выбросы от сельского хозяйства и отходов за период 2008-2017 гг. оцениваются в 206 Тг CH<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> (диапазон 191-223, Таблица 3), что составляет 56 % от общих антропогенных выбросов.

#### Животноводство: энтеральная ферментация и уборка навоза

Домашние жвачные животные, такие как крупный рогатый скот, буйволы, овцы, козы и верблюды, выделяют метан в качестве побочного продукта анаэробной микробной деятельности в их пищеварительной системе (Johnson et al., 2002). Очень стабильные значения температуры (около 39° C) и pH (6,5-6,8) в рубце домашних жвачных животных, наряду с

постоянное поступление растительной массы с пастбища (скот пасется много часов в день), позволяет метаногенным археям, обитающим в рубце, производить метан. Метан выделяется из рубца в основном через рот многожелудочных жвачных животных (эрупция, 87 % выбросов) или всасывается в кровеносную систему. Метан, произведенный в кишечнике и частично переданный через прямую кишку, составляет лишь 13%.

Общее количество домашнего скота продолжает неуклонно расти. В настоящее время (2017 год) в мире насчитывается около миллиарда голов крупного и среднего скота, миллиард овец и почти столько же коз (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/GE>, последнее обращение: 29 июня 2020 года). Количество скота линейно связано с выбросами CH<sub>4</sub> в изобретениях, использующих подход уровня 1 МГЭИК, например, FAOSTAT. На практике может возникнуть некоторая нелинейность из-за зависимости выбросов от общего веса животных и их рациона, которые лучше отражаются в подходах уровня 2 и выше. На крупный рогатый скот, в связи с его большим поголовьем, крупными размерами особей и особенностями пищеварения, приходится большая часть выбросов CH<sub>4</sub> от энтеральной ферментации в животноводстве во всем мире (Tubiello, 2019), особенно в интенсивных сельскохозяйственных системах в богатых странах и странах с развивающейся экономикой, включая США (USEPA, 2016). Выбросы метана от энтерической ферментации также различаются в разных странах, поскольку скот может находиться в различных условиях жизни, которые варьируются в пространственном и временном отношении, особенно в тропиках (Chang et al., 2019).

Анаэробные условия часто характеризуют разложение навоза в различных системах уборки, хранения и использования навоза во всем мире (например, [Earth Syst. Sci. Data, 1561-1623, 12,2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020)

жидкая/навозная жижа, обрабатываемая в отстойниках, прудах, резервуарах или ямах), при этом летучие твердые вещества в навозе образуют CH<sub>4</sub>. В отличие от этого, когда навоз обрабатывается в твердом виде (например, в штабелях или сухих партиях) или складывается на пастбищах, пастбищах или загонах, он, как правило, разлагается аэробно и практически не производит CH<sub>4</sub>. Однако аэробное разложение навоза приводит к образованию оксида азота (N<sub>2</sub>O), который оказывает большее воздействие на потепление, чем CH<sub>4</sub>. Температура окружающей среды, влажность, содержание энергии в корме, состав навоза, а также время хранения или выдержки навоза влияют на количество производимого CH<sub>4</sub>. Несмотря на эти ком...

сложности, большинство глобальных данных, используемых в настоящем документе, применяют упрощенный подход МГЭИК Tier, где объемы обработанного навоза зависят от количества животных и упрощенных климатических условий по странам.

Глобальные выбросы метана от энтеральной ферментации и использования навоза оцениваются в диапазоне от 99 до 115 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> для 2010 года в модели GAINS и CEDS, USEPA, FAO- $\text{CH}_4$  и EDGARv4.3.2.

теории. Эти значения несколько выше, чем оценка<sup>2</sup> уровня МГЭИК, полученная Дангалом и др. (2017) (95,7 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup> для 2010 года) и оценка<sup>3</sup> уровня МГЭИК, полученная Херреро и др. (2013) (83,2 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup> для 2000 года), но согласуются с повторной оценкой<sup>2</sup> уровня МГЭИК, полученной Чангом и др. (2019) (99 Тг<sup>12</sup>  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup> для 2012 года).

За период 2008-2017 гг. мы оценили общие выбросы в 111 [106-116] тт  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> для энтеральной ферментации и использования навоза, что составляет около одной трети от общих глобальных антропогенных выбросов.

### Выращивание риса

Большая часть риса в мире выращивается на затопляемых рисовых полях (Baicich, 2013). Системы управления водными ресурсами, в частности, затопление, используемые для выращивания риса, являются одним из наиболее важных факторов, влияющих на выбросы  $\text{CH}_4$ , и одним из наиболее перспективных подходов к снижению выбросов  $\text{CH}_4$ : периодический дренаж и аэрация не только вызывают окисление существующих почвенных  $\text{CH}_4$ , но и подавляют дальнейшее производство  $\text{CH}_4$  в почве (Simpson et al., 1995; USEPA, 2016; Zhang, 2016). Возвышенные рисовые поля обычно не затопляются и поэтому не являются значительным источником  $\text{CH}_4$ . Другие факторы, влияющие на выбросы  $\text{CH}_4$  с затопленных рисовых полей, включают практику внесения удобрений (т.е. использование мочевины и органических удобрений), температуру почвы, тип почвы (текстура и размер агрегатов), сорт риса и практику выращивания (например, обработку почвы, посев и прополку) (Conrad et al., 2000; Kai et al., 2011; USEPA, 2011; Yan et al., 2009). Например, выбросы метана с рисовых полей увеличиваются при внесении органических удобрений (Cai и др., 1997), но могут быть уменьшены за счет применения других видов удобрений (минеральных, компостов, остатков биогаза) или использования влажного посева (Wassmann и др., 2000).

Географическое распределение выбросов риса оценивалось с помощью глобальных (например, Janssens-Maenhout et al., 2019; Tubiello, 2019; USEPA, 2012) и региональных (например, Castelán-Ortega et al., 2014; Chen et al., 2013; Chen and Prinn, 2006; Peng et al., 2016; Yan et al., 2009; Zhang and Chen, 2014) кадастры или модели поверхности земли (Li et al., 2005; Pathak et

al., 2005; Ren et al., 2011; Spahni et al., 2011; Tian et al., 2010, 2011; Zhang, 2016). Выбросы демонстрируют сезонный цикл, достигая пика в летние месяцы во внутритропиках в связи с муссонами и землепользованием. Как и выбросы от скота, выбросы от рисовых полей зависят не только от площади рисовых полей (аналогично численности скота), но и от изменений в продуктивности растений (Jiang et al., 2017), поскольку они изменяют выбросы  $\text{CH}_4$ .

коэффициент выбросов, используемый в кадастрах. Тем не менее, рассматриваемые здесь кадастры в значительной степени основаны на методах I уровня МГЭИК, которые в основном масштабируются на культивируемые площади, но включают коэффициенты выбросов, специфичные для конкретного региона.

Наибольшие выбросы от выращивания риса наблюдаются в Азии, составляя от 30 % до 50 % глобальных выбросов (рис. 3). Снижение выбросов  $\text{CH}_4$  от выращивания риса в последние десятилетия подтверждается в большинстве кадастров, что связано с уменьшением площади рисовых плантаций, изменениями в сельскохозяйственной практике и смещением посевов риса на север с 1970-х годов, как, например, в Китае (например, Chen et al., 2013).

На основе глобальных кадастров, рассмотренных в данном исследовании, глобальные выбросы метана с рисовых полей оцениваются в 30 [25-38] Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> за десятилетие 2008-2017 гг. (Table 3), или около 8 % от общих глобальных антропогенных выбросов метана. Эти оценки согласуются с 29 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup> оцененными для 2000 года Карлсоном и др. (2017).

#### Управление отходами

Этот сектор включает выбросы от управляемых и неуправляемых свалок (захоронение твердых отходов на земле), а также обработку сточных вод, куда попадают все виды отходов. Производство метана из отходов зависит от рН, влажности и температуры материала. Оптимальный уровень рН для выделения метана составляет от 6,8 до 7,4 (Thorneloe et al., 2000).

Образование карбоновых кислот приводит к низкому рН, что ограничивает выделение метана. Пищевые или органические отходы, листья и скошенная трава ферментируются довольно легко, в то время как древесина и древесные продукты ферментируются медленно, а целлюлоза и лигнин еще медленнее (USEPA, 2010a).

В 2000 году на управление отходами приходилось около 11 % от общего объема глобальных антропогенных выбросов метана (Kirschke et al., 2013). Недавняя оценка выбросов метана в США показала, что на свалки приходится почти 26 % всех антропогенных выбросов метана в США, что является самым большим вкладом среди всех источников  $\text{CH}_4$  в США (USEPA, 2016). В Европе газовый контроль является обязательным на всех свалках с 2009 года, следуя амбициозной цели, поставленной в Директиве ЕС о свалках (1999) по сокращению захоронения биоразлагаемых отходов на 65 % ниже уровня 1990, достигнутого к этому времени. 2016. Снижение выбросов осуществляется путем разделения источников и обработки разделенных биоразлагаемых отходов в компостах, биоперерабатывающих установках и бумажной переработке.

Сточные воды из бытовых и промышленных источников очищаются на городских очистных сооружениях и частных очистных сооружениях. Основным фактором, определяющим потенциал образования  $\text{CH}_4$  в сточных водах, является количество разлагающегося органического материала в сточных водах. Сточные воды с высоким содержанием органических веществ обрабатываются анаэробно, что приводит к увеличению выбросов (André et al., 2014). Чрезмерное и быстрое развитие городов во всем мире, особенно в Азии и Африке, может привести к увеличению выбросов метана из отходов, за исключением случаев, когда

2017 гг.

разработка и быстрое внедрение адекватной политики смягчения последствий.

Модель GAINS и кадастры CEDS и EDGAR дают надежные оценки выбросов от твердых отходов в диапазоне 29-41 Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  для года и 2005 более неопределенные оценки.

выбросы сточных вод в диапазоне 14-33 Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$ .

В нашем исследовании глобальная эмиссия метана от управления отходами оценивается в диапазоне от 6069 до Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  за период 2008-2017 гг. со средним значением Тг65  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$ , что составляет около %12 от общего объема глобальных антропогенных выбросов.

### 3.1.5 Сжигание биомассы и биотоплива

Эта категория включает выбросы метана от сжигания биомассы в лесах, саваннах, лугах, торфах, сельскохозяйственных отходах, а также от сжигания биотоплива в жилых помещениях (печи, котлы, камины). При сжигании биомассы и биотоплива метан выделяется в условиях неполного сгорания (т.е. когда доступ кислорода недостаточен для полного сгорания), например, при производстве древесного угля и тлеющих костров. Количество метана, выделяемого при сжигании биомассы, зависит в первую очередь от количества биомассы, условий сжигания и конкретного сжигаемого материала.

В данном исследовании мы используем данные о крупномасштабном сжигании биомассы (фор-эст, саванна, луга и торфяные пожары) из пяти кадастров сжигания биомассы (описаны ниже) и вклад сжигания биотоплива из кадастров антропогенных выбросов (EDGARv4.3.2, CEDS, GAINS и USEPA).

Пространственное распределение выбросов от сжигания биомассы и биотоплива за десятилетие 2008-2017 гг. представлено на рис. 3 на основе данных, приведенных в таблице 1.

В глобальном масштабе в период 2008-2017 годов сжигание биомассы и биотоплива привело к выбросам метана в размере [3026-40] Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  (Таблица 3), из которых %50%30 приходится на сжигание биотоплива.

#### Сжигание биомассы

Пожар является важным нарушением в наземных экосистемах по всему миру (van der Werf et al., 2010) и может быть как естественного (обычно 10 % пожаров возникают от ударов молнии или случайно), так и антропогенного происхождения (90 % - пожары, инициированные человеком) (USEPA, 2010b, глава 9.1). Антропогенные пожары сосредоточены в тропиках и субтропиках, где леса, саванны и пастбища могут сжигаться для расчистки земель под

сельскохозяйственные нужды или для поддержания пастбищ и пастбищных угодий. Небольшие пожары, связанные с сельскохозяйственной деятельностью, такие как выжигание полей и сжигание сельскохозяйственных отходов, часто плохо обнаруживаются методами дистанционного зондирования и вместо этого оцениваются на основе обрабатываемой площади.

Уровень выбросов при сжигании биомассы зависит от загрузки биомассы (в зависимости от биомов) в месте пожара, эффективности пожара (в зависимости от типа растительности), типа пожара (тлеющий или горящий) и коэффициента выбросов.

(масса рассматриваемого вида / масса сожженной биомассы). В зависимости от подхода, эти параметры могут быть де-ривированы с использованием спутниковых данных и/или биогеохимической модели, или с помощью более простых подходов МГЭИК по умолчанию.

В данном исследовании мы используем пять продуктов для оценки выбросов от сжигания биомассы. Глобальная база данных по выбросам от пожаров (GFED) является наиболее широко используемым глобальным набором данных по выбросам от сжигания биомассы и предоставляет оценки от Здесь1997. мы используем GFEDv4.1s (van der Werf et al., 2017), основанную на биогеохимической модели Карнеги-Амес-Стенфордского подхода (CASA) и спутниковых оценках выжженной площади (с датчика MODIS), активности пожаров и продуктивности растений. GFEDv4.1s (с небольшим

Пожары) доступны с разрешением  $0.25^\circ$  и на ежедневной основе от до 1997Одна 2017.особенность GFEDv4.1s

Выгоревшая площадь - это то, что небольшие пожары лучше учитываются по сравнению с GFEDv4.1 (Randerson et al., 2012), что увеличивает выбросы автобона примерно на %35 в глобальном масштабе.

Quick Fire Emissions Dataset (QFED) рассчитывается с использованием метода излучательной способности пожара (FRP), при котором тепловая энергия, излучаемая активными пожарами (обнаруженными MODIS), преобразуется в оценку потока метана с использованием коэффициентов выбросов, специфичных для конкретного биома, и уникального метода учета облачности. Более подробную информацию об этом методе и выведении коэффициентов выбросов для конкретных биомов можно найти в работе Дарменов и да Сильва (Darmenov and da Silva, 2015). Здесь мы используем исторический продукт QFEDv2.5, доступный ежедневно на 1сетке  $0.10^\circ$  для2000 2017.

Инвентаризация пожаров от NCAR (FINN; Wiedinmyer et al., 2011) предоставляет ежедневные оценки с разрешением 1 км выбросов газов и частиц от открытого сжигания биомассы (включая лесные пожары, сельскохозяйственные пожары и предписанные выжигания) по всему миру за период 2002-2018 гг. FINNv1.5 использует спутниковые наблюдения MODIS для активных пожаров, почвенного покрова и плотности растительности.

Мы используем версию 1.3 Глобальной системы ассимиляции пожаров (GFAS; Kaiser et al., 2012), которая рассчитывает выбросы от сжигания биомассы путем ассимиляции наблюдений за излучательной способностью пожаров (FRP) из MODIS с ежедневной частотой и резуль- $0.5^\circ$  татом и доступна для 2000-2016 гг.

Ежегодные данные ФАО-ЧГ<sub>4</sub> о выбросах от сжигания биомассы основаны на самых последних продуктах MODIS 6 о сгоревших площадях в *Earth Syst. Sci. Data*, 1561-1623, 12,2020

сочетании с реализацией подхода МГЭИК уровня 1 на уровне пикселей ( $500\text{ м}$ ) и доступны с 1990 по 2016 год (Таблица 1).

Различия в оценках выбросов при сжигании биомассы обусловлены конкретными географическими и метеорологическими условиями и составом топлива, которые сильно влияют на полноту учета и коэффициенты выбросов. Последние варьируются сильно зависит от типа пожара, варьируясь от  $2,2\text{ г СН}_4\text{ кг}^{-1}$  сухого вещества, сожженного при пожарах в саваннах и лугах, до  $21\text{ СН}_4\text{ кг}^{-1}$  сухого вещества, сожженного при торфяных пожарах (van der Werf et al., 2010).

В данном исследовании, на основе пяти вышеупомянутых продуктов, выбросы от сжигания биомассы оцениваются в  $\text{Tг17 СН}_4\text{ г/г.}^{-1}$

×



[14-26] за 2008-2017 годы, составляя около 5 % от общего объема глобальных антропогенных выбросов метана.

#### Сжигание биотоплива

±

Биомасса, используемая для производства энергии для бытовых, промышленных, коммерческих или транспортных целей, здесь и далее называется сжиганием биотоплива. Доминирующая доля выбросов метана от биотоплива происходит в результате приготовления пищи или отопления в домашних условиях в печах, котлах и каминах, в основном на открытых кострах, где сжигается древесина, древесный уголь, сельскохозяйственные остатки или навоз животных. По оценкам, более 2 миллиардов человек, в основном в развивающихся странах, ежедневно используют твердое биотопливо для приготовления пищи и обогрева жилья (André et al., 2014), и все же выбросам метана при сжигании биотоплива уделяется относительно мало внимания. Оценки сжигания биотоплива собраны из кадастров CEDS, USEPA, GAINS и EDGAR. Из-за секторальной разбивки кадастров EDGAR и CEDS компонент бюджета, связанный с биотопливом, был оценен как эквивалент сектора "RCO - энергия для зданий", как определено в Worden et al. (2017) и Hoesly et al. (2018) (см. таблицу S2). Это эквивалентно сумме категорий отчетности МГЭИК 1A4a\_коммерческо-институциональная, 1A4b\_жилая, 1A4c\_Agriculture-forestry-fishing и 1A5\_Other-unspecified. Это определение соответствует определению, использованному в Saunois и др. (2016) и Kirschke и др. (2013). Хотя этот сектор включает использование биотоплива, он также включает использование других горючих материалов (например, угля или газа) для маломасштабного производства тепла и электроэнергии в жилых и коммерческих помещениях. Данные, представленные в кадастре GAINS, показывают, что этот подход может переоценить выбросы от биотоплива на 5 % или %50.

В нашем исследовании сжигание биотоплива оценивается как вклад  $\text{Tg}_{12} \text{CH}_4$  в год  $^{-1}$ [10-14] в глобальный бюджет метана, что составляет около 3 % от общего объема глобальных антропогенных выбросов метана за 2008-2017 гг.

#### 3.1.6 Другие антропогенные источники (не включенные в данное исследование)

Другие антропогенные источники, не включенные в данное исследование, связаны с сельским хозяйством и управлением землепользованием. В частности, увеличение мирового производства пальмового масла привело к расчистке естественных торфяных лесов, сокращению площади торфяных земель и связанных с этим естественных выбросов  $\text{CH}_4$ . Хотя ~~исследования~~ исследования уже давно показали, что выбросы  $\text{CH}_4$  из дренажных канав торфяных болот, вероятно, значительны (например, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

Minkinen и Laine, 2006), выбросы  $\text{CH}_4$ , связанные с плантациями пальмового масла, еще не были должным образом оценены. Тейлор и др. (2014) количественно оценили глобальные потоки сточных вод от очистки пальмового масла.

составляет  $\text{Tg}_{432} \text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  для 2010-2013 гг. В настоящее время это представляет собой небольшой и весьма неопределенный источник метана, но потенциально растущий в будущем.

## 3.2 Природные источники

К природным источникам метана относятся растительные выбросы водно-болотных угодий и внутренние водные системы (озера, небольшие пруды, реки), наземные геологические источники (газонефтяные просачивания, грязевые вулканы, микропросачивания, геотермальные проявления и вулканы), дикие животные, термиты, оттаивание наземной и морской вечной мерзлоты, а также океанические источники (биогенные, геологические и гидратные). В водонасыщенных или затопленных экосистемах разложение органических веществ постепенно уничтожает большую часть кислорода в почве, что приводит к анаэробным условиям и выделению метана. После образования метан может попасть в атмосферу в результате комбинации трех процессов: (1) диффузионная потеря растворенного  $\text{CH}_4$  через границу воздух-вода; (2) поток эбултиона из отложений; и (3) поток, опосредованный появляющимися водными макрофитами и наземными растениями (растительный транспорт). На пути в атмосферу, в толще почвы или воды, метан может быть частично или полностью окислен группой бактерий, называемых метанотрофами, которые используют метан в качестве единственного источника энергии и углерода (USEPA, 2010b). Кроме того, метан из атмосферы может диффундировать в толщу почвы и окисляться (см. раздел о поглощении 3.3.4 почвой).

### 3.2.1 Заболоченные земли

Водно-болотные угодья обычно определяются как экосистемы, в которых почвы или торф насыщены водой или где поверхностное затопление (постоянное или нет) доминирует в биогеохимии почвы и определяет видовой состав экосистемы (USEPA, 2010b). Чтобы уточнить такое слишком широкое определение выбросов метана, мы определяем водно-болотные угодья как экосистемы с ненасыщенными или насыщенными почвами или торфами, где анаэробные условия приводят к производству метана (Matthews and Fung, 1987; USEPA, 2010b). Выбросы солоноватых вод рассматриваются отдельно в разд. 3.2.6. Наше определение водно-болотных угодий включает торфяные болота (болота и болота), водно-болотные угодья с минеральной почвой (болота и болота), а также сезонные или постоянные поймы. Оно исключает открытые водные поверхности без всплывающих макрофитов, такие как озера, реки, эстуарии, пруды и водохранилища (рассматриваются в следующем разделе), а также рисовое сельское хозяйство (см. раздел "3.1.4, Выращивание риса") и пруды со сточными водами. Оно также исключает прибрежные растительные экосистемы (мангровые заросли, морские травы, солончаки), соленость которых обычно  $> 0,5$  psu (см. раздел 3.2.6). Даже при таком

определении некоторые водно-болотные угодья могут считаться антропогенными системами, на которые повлияли изменения в землепользовании человека, такие как создание водохранилищ, осушение или восстановление (Woodward et al., 2012). В дальнейшем мы сохраняем общее обозначение "водно-болотные угодья" для природных и антропогенных водно-болотных угодий, как обсуждалось в разд. 2.2.

Три наиболее важных фактора, влияющих на выделение метана в болотах, - это пространственная и временная степень аноксии (связанная с насыщением водой), температура и доступность субстрата (Valentine et al., 1994; Wania et al., 2010; Whalen, 2005).

2017 гг.

Модели поверхности земли оценивают выбросы  $\text{CH}_4$  через **ново** процессов, включая производство, окисление и перенос  $\text{CH}_4$ . Затем модели форсируются с учетом изменяющихся факторов окружающей среды (Melton et al., 2013; Poulter et al., 2017; Tian et al., 2010; Wania et al., 2013; Xu et al., 2010). Выбросы метана из водно-болотных угодий рассчитываются как произведение плотности потока выбросов и площади, продуцирующей метан, или площади поверхности (см. Приложение; Bohn et al., 2015; Melton et al., 2013). Площадь водно-болотных угодий, по-видимому, вносит основной вклад в неопределенность абсолютного потока выбросов метана из водно-болотных угодий, а метеорологическая реакция является основным источником неопределенности для сезонной и межгодовой изменчивости (Bohn et al., 2015; Desai et al., 2015; Poulter et al., 2017).

В данной работе 13 моделей поверхности суши, рассчитывающих чистые выбросы  $\text{CH}_4$  (Таблица 2), были запущены по общему протоколу с 30-летним спин-апом (1901-1930) и последующим моделированием до конца 2017 года с принудительным использованием реконструированных климатических полей CRU-JRA (Harris, 2019). Из 13 моделей 10 ранее были представлены в работе Saunois et al. (2016), три модели были новыми для данного выпуска (JSBACH, LPJ-GUESS и TEM-MDM) (Таблица S3). Атмосферный  $\text{CO}_2$ , влияющий на чистое производство примари (NPP) водно-болотных угодий, также был прописан в моделях. Во всех моделях использовался один и тот же набор данных о площади и динамике болот, основанный на дистанционном зондировании, под названием WAD2M (Wetland Area Dynamics for Methane Modeling). WAD2M предоставляет изменяющиеся от года к году ежемесячные глобальные площади водно-болотных угодий за 2000-2017 годы, частично решая известные проблемы, такие как разделение между водно-болотными угодьями и другими внутренними водами (Poulter et al., 2017). WAD2M объединяет данные микроволнового дистанционного зондирования из Schroeder et al. (2015) с различными региональными инвентаризационными данными для создания ежемесячного глобального набора данных о площади водно-болотных угодий, который будет представлен в ближайшем будущем Zhang et al. (2020). Нерастительные внутренние воды водно-болотных угодий (т.е. озера, реки и пруды) были вычтены с использованием глобального набора данных о поверхностных водах Pekel et al. (2016), предполагая, что постоянными водами являются те, которые присутствуют > 50 % времени в течение 32-летнего периода наблюдений. Затем для определения среднегодовой площади водно-болотных угодий в долгосрочной перспективе использовались данные по водно-болотным угодьям для тропиков (Gumbricht et

al., 2017), высоких широт (Hugelius et al., 2014; Widhalm et al., 2015) и умеренных регионов (Lehner and Döll, 2004), к которым добавлялся сезонный цикл фракционной поверхностной воды по данным Surface Water Microwave Product Series version 3.2 (SWAMPS) (Jensen and McDonald, 2019; Schroeder et al., 2015). Рисовое сельское хозяйство было удалено с использованием набора данных MIRCA2000 примерно за 2000 год, как фиксированное распределение. Комбинированный продукт дистанционного зондирования и инвентаризации WAD2M позволяет получить максимальную площадь водно-болотных угодий 14,9 М км<sup>2</sup> в пиковый сезон (8,4 М км<sup>2</sup> в среднем за год, с диапазоном до 8,0

8,9 млн км<sup>2</sup> с 2000 по 2017 год, около 5,5 % глобальной поверхности суши). Самые большие площади водно-болотных угодий в WAD2M находятся в Амазонии, бассейне Конго и Западно-Сибирской низменности, которые в предыдущих исследованиях были недооценены изобретателями (Bohn et al., 2015).

Средняя карта выбросов от водно-болотных угодий за 2008-2017 годы, построенная на основе моделей<sup>13</sup>, представлена на рис. 3. Зоны с наибольшими выбросами - бассейн Амазонки, экваториальная Африка и Азия, Канада, Западная Сибирь, Восточная Индия и Бангладеш. Регионы, в которых выбросы метана не соответствуют действительности (определяются как регионы, в которых средний поток превышает стандартное отклонение моделей), представляют 61 % от общего потока метана, обусловленного естественными водно-болотными угодьями. Эта доля на 80 % ниже, чем в работе Saunois et al. (2016), вероятно, из-за другого ансамбля моделей, собранных здесь, и более строгого исключения внутренних вод. Основные зоны первичных выбросов согласуются между моделями, чему явно способствует предписанная общая площадь влажных земель. Однако различная чувствительность моделей к температуре, давлению пара, осадкам и радиации может привести к существенно отличающимся картинкам, как, например, в Индии. Некоторые второстепенные (по величине) зоны выбросов также последовательно выводятся между моделями: Скандинавия, континентальная Европа, Восточная Сибирь, центральная часть США и тропическая Африка.

Полученный глобальный диапазон потоков выбросов естественных болот составляет 101-179 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> за период 2000-2017 гг. со средним значением 148 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> и стандартным односигмальным отклонением в Тг25 СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>. Для последнего десятилетия, 2008-2017, г., среднее значение выбросов по ансамблю составило Тг149 СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>. с диапазоном 102-182 (Таблица 3). Используя прогностический набор

При моделировании, где модели использовали свой собственный внутренний подход для оценки площади и динамики водно-болотных угодий, среднее значение выбросов составило 161 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> с диапазоном 125-218 за период 2008-2017 гг. Большой диапазон неопределенности от прогностических моделей площади объясняется неограниченностью площадь водно-болотных угодий, но в целом величина и межгодовая изменчивость согласуются между диагностическим и прогностическим подходами к площади. Выбросы водно-болотных угодий составляют около %20 от общего количества источников метана (природных плюс антропогенных), оцененных с помощью восходящих подходов. Большой разброс в оценках выбросов СН<sub>4</sub> из водно-болотных угодий обусловлен трудностями в определении районов производства СН<sub>4</sub> из водно-болотных угодий, а также в параметризации наземных анаэробных условий, которые определяют источники, и окислительных условий, ведущих к поглотителям (Melton et al., 2013; Poulter et al., 2017; Wania et al., 2013). Среднее значение ансамбля выбросов с использованием диагностической площади водно-болотных угодий в моделях ниже на

35 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>, чем сообщалось ранее (см. Таблицу 3, для 2000-2009 гг. с сопоставлением с данными Saunois et al., 2016). Это различие является результатом уменьшения двойного учета вследствие (i) уменьшения площади водно-болотных угодий в WAD2M, es...

особенно для высокоширотных регионов, где были удалены внутренние воды, т.е. озера, небольшие пруды и озера, и (ii) в некоторой степени улучшенное удаление площади рисового сельского хозяйства с использованием базы данных MIRCA2000.

За последнее десятилетие, 2008-2017 годы, среднее значение выбросов по ансамблю составило Тг149 СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> с диапазоном 102-182.

~

**Таблица 2.** Биогеохимические модели, рассчитывающие выбросы водно-болотных угодий, использованные в данном исследовании. Расчеты проводились для всего периода 2000-2017 гг. Модели запускались с прогностическими (с использованием собственного расчета площадей водно-болотных угодий) и/или диагностическими (с использованием WAD2M) площадями поверхности водно-болотных угодий (см. раздел 3.2.1).

Модель	Учреждение	изменение только на 21 участке по всему миру. Совсем недавно Stanley и др. (2016) собрали воедино данные по всем объектам 385 и оценили диффузионную эмиссию в $\text{Tg CH}_4$ в $\text{год}^{-1}$ (5-95-й перцентили: 0.01-160 $\text{Tg CH}_4$ в $\text{год}^{-1}$ ). Детальнее региональные исследования в тропиках Тиан и др. (2010, 2015) и водосборах умеренного пояса (Borges et al., 2015; Campeau и дель Джорджо, 2014) поддерживают поток в диапазоне
КЛАСС-КТЭМ	Окружающая среда и изменение климата Канады	у
DLEM	Университет Оберн	у
ELM	Национальная лаборатория имени Лоуренса Беркли	у
JSBACH	MPI	у
ЖЮЛЬ	УКМО	у
LPJ-GUESS	Лундский университет	у
LPJ-MPI	MPI	у
LPJ-WSL	HACA GSFC	у
LPX-Bern	Бернский университет	у
ORCHIDEE	LSCE	у
TEM-MDM	Университет Пердью	у
TRIPLEX_GHG	UQAM	у
ПОСЕТИТЕ	НИЭС	у

### 3.2.2 Другие внутренние водные системы (озера, пруды, водохранилища, ручьи, реки)

В эту категорию входят выбросы метана из пресноводных систем (озер, прудов, водохранилищ, ручьев и рек). На сегодняшний день существует очень мало моделей, основанных на процессах, для этих потоков, полагаясь на подходы, основанные на данных и экстраполяции. Мета-анализ данных по метану затруднен из-за сочетания методологических подходов, которые фиксируют различные составляющие выбросов, и различных масштабов в пространстве и времени, зависящих от метода и времени развертывания и обработки данных (Stanley et al., 2016). В целом, такое несоответствие в сборе данных делает детальное моделирование потоков весьма неопределенным. Для многих озер, особенно небольших мелководных озер и прудов, установлено, что эбуллизация и потоки растений (в озерах со значительными сообществами эмерджентных макрофитов) могут составлять существенный вклад в потоки, потенциально составляя от 50 % до более чем 90 % потока из этих водоемов. Хотя вклад эбуллитации в реках, по-видимому, ниже, в настоящее время в этих системах недостаточно данных для определения ее роли (Crawford et al., 2014; Stanley et al., 2016). Потоки эбуллитации очень сложно измерить из-за высокой степени пространственно-временной изменчивости, когда очень высокие потоки возникают в отдельных частях экосистемы в течение нескольких секунд, а затем следуют длительные периоды без эбуллитации.

Потоки пресноводного метана из ручьев и рек впервые были оценены в  $1,5 \text{ Tg CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (Bastviken et al., 2011). Однако в этом исследовании были проведены

водоемы (пруды) имеют высокое отношение площади поверхности к объему и небольшую глубину, и они, вероятно, являются заметным источником метана, по крайней мере

27 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> по сравнению с первоначальными 1,5 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup>. Однако малое количество измерений, отсутствие ясности в отношении потоков эбуллитации и большая степень разброса в измерения не позволяют точно представить пространственные потоки метана в ручьях и реках. Каналы и канавы недавно были выделены как крупные ареальные эмиттеры (например, Stanley et al., 2016), и их вклад в крупномасштабную эмиссию обычно включается в оценки для общих проточных вод до настоящего времени. После выхода Stanley et al. (2016) и Saunois et al. (2016) новых глобальных оценок не публиковалось.

В результате здесь мы используем ту же оценку для ручьев и рек, что и в работе Saunois et al. (2016): 27 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup>.

Выбросы метана из озер сначала оценивались в 1-20 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> на основе измерений в двух системах (Грейт Фреш Крик, Мэриленд, и озеро Эри; Ehhalt, 1974). Последующая глобальная оценка выбросов составила 11- 55 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> на основе измерений из трех арктических озер и нескольких умеренных и тропических систем (Smith and Lewis, 1992) и 8-48 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> с использованием расширенных данных из разных широт (73 озера; Bastviken et al., 2004).

Основываясь на данных по озерам421 и прудам, Баствикен и др. (2011) обновили свои значения до 71,6 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup>, включая выбросы из несоленых озер и прудов. В последнее время озерам высоких широт уделяется большое внимание.

десятилетие. Они включают как послеледниковые, так и термокарстовые озера (небольшие водоемы, образовавшиеся при разрушении торфа над тающей мерзлотой); последние имеют большие выбросы на квадратный метр, но меньшие региональные выбросы, чем первые, из-за их меньшей площади (Wik et al., 2016b). Глубина водоема, тип отложений и эоклиматический регион являются ключевыми факторами, объясняющими различия в потоках метана из озер (Wik et al., 2016b). Небольшие искусственные

~

**Таблица 3.** выбросы метана по типам источников (Tg CH<sub>4</sub> г/г<sup>1</sup>) по данным Saunois et al. (2016) (пара левых колонок) и данной работы с использованием подходов "снизу вверх" и "сверху вниз". Поскольку нисходящие модели не могут полностью разделить отдельные процессы, представлены только пять категорий выбросов (см. текст). Неопределенности представлены в виде диапазона [min-max] по данным исследований. Разница в 1 Tg CH<sub>4</sub> г/г<sup>1</sup> в итоговых данных может возникнуть из-за ошибок округления.

Saunois и др. (2016)		Эта работа						
Период времени	2000-2009		2000-2009		2008-2017		2017	
Подходы	Снизу вверхСверху вниз		Снизу вверхСверху вниз		Снизу вверхСверху вниз		Снизу вверх	Сверху вниз
<b>Природные источники</b>								
Заболоченные земли	183 [151-222]	[125-204]	147 [179-180]	[102-153-196]	149 [182-181]	[102-159-200]	145 [100-183]	194 [155-217]
Другие природные источники	199 [297]	[104-68]	222 [306]	[143-35]	222 [306]	[143-37]	222 [143-306]	39 [21-50]
Другие земельные источники	185 [99-272]		209 [134-284]		306 [21-50]			
Пресноводные водоемы	122 [60-180]		159 [117-212]					
Геологические (на суше)	40 [30-56]		38 [13-53]					
Дикие животные	10 [5-15]		2 [1-3]					
Дикие пожары	9 [3-15]		9 [3-15]					
Термиты	3 [1-5]		3 [1-5]					
Почвы	1 [0-1]		1 [0-1]					
Прибрежная полоса мерзлоты (прямые)	2 [0-5]		6 [4-10]					
Растительность								
Океанические источники								
Геологические (морские)								
Биогенные открытые								
<b>Всего природных источников</b>	<b>382 [255-519]</b>	<b>234 [194-292]</b>	<b>369 [245-485]</b>	<b>215 [176-243]</b>	<b>371 [245-488]</b>	<b>218 [183-248]</b>	<b>367 [243-489]</b>	<b>232 [194-267]</b>
<b>Антропогенные источники</b>								
Нефтегазовая	76 [64-85] <sup>e,f</sup>		73 [60-85]		80 [68-92]		84 [72-97]	
Сельское хозяйство и отходы	190 [174-201]	183 [112-241]	192 [178-206]	202 [198-219]	206 [191-223]	217 [207-240]	213 [198-232]	227 [205-246]
Энергетика	30 [26-34]	35 [16-53]	4 [1-11]	29 [23-35]	4 [1-12]	30 [22-36]	29 [24-38]	28 [25-32]
Сжигание биомассы	103 [95-109]		104 [95-109]		111 [106-116]		115 [110-121]	
Сжигание биотоплива	18 [15-20]		19 [15-32]		17 [14-26]		16 [11-24]	
Ископаемое топливо	57 [51-61] <sup>d</sup>		60 [55-63]		65 [60-69]		68 [64-71]	
Сжигание биомассы	12 [9-14]		12 [9-14]		12 [10-14]		13 [10-14]	
Сжигание биотоплива	Выращивание риса	29 <sup>g</sup>	28 [23-34]		30 [25-38]		30 [24-40]	
Сжигание биотоплива	112 [101-77-]		110 [129]	[94-101]	128 [154]	[113-111]	135 [164]	[121-108]
Сжигание биотоплива	Добыча угля	36 <sup>g</sup>	32 [24-42]		42 [29-61]		44 [31-63]	
<b>Всего антропогенных</b>	<b>338 [329-342]</b>	<b>319 [255-357]</b>	<b>334 [321-358]</b>	<b>332 [312-347]</b>	<b>366 [349-393]</b>	<b>359 [336-376]</b>	<b>380 [359-407]</b>	<b>364 [340-381]</b>
<b>Дисбаланс между источниками и поглотителями</b>								
<b>Раковины</b>								
Всего источников	719 [583-861]	[535-566]	552 [514]	566 [489-749]	547 [524-566]	594 [489-749]	531 [502-540]	594 [481-737]
Общая химическая потеря	690 [583-638]	514 <sup>e</sup>	595 [489-749]	505 [459-476]	595 [489-749]	596 [572-632]	595 [489-749]	531 <sup>h</sup> [502-540]
Общая химическая потеря	632 [592-785]	[548-677]	625 [548-677]	625 [548-677]	625 [548-677]	625 [548-677]	625 [548-677]	625 [548-677]
Тропосферная ОН	556 [501-574]	500-798	8625 [31-12-37]	571 [540-585]	571 [540-585]	571 [540-585]	571 [540-585]	571 [540-585]
Стратосферная потеря	28 [9-47]		30 [11-49]		30 [11-49]		30 [11-49]	
Атмосферный рост	16.0 [4,9-6,6]	5.8 [3,2-2,7]	38 [2,7-3,8]	34 [2,7-4,1]	38 [2,7-4,5]	38 [2,7-4,5]	38 [2,7-4,5]	38 [2,7-4,5]
Атмосферный рост	16.0 [4,9-6,6]	5.8 [3,2-2,7]	38 [2,7-3,8]	34 [2,7-4,1]	38 [2,7-4,5]	38 [2,7-4,5]	38 [2,7-4,5]	38 [2,7-4,5]

<sup>a</sup> Пресноводные водоемы: озера, пруды, водохранилища, ручьи и реки. <sup>b</sup> Включает поток от гидратов, рассматриваемых в данном исследовании, включает эстуарии. <sup>c</sup> Для кадастра ПАСА в разбивке источников сельского хозяйства и отходов (рис, энтеральная ферментация и навоз, свалки и отходы) и ископаемого топлива (уголь, нефть, газ и промышленность) использовались кадастры EDGAR и USEPA в Saunois et al. (2016). <sup>d</sup> Общий сток был выведен из глобального баланса массы и не рассчитан напрямую в Saunois et al. (2016). <sup>e</sup> Рассчитано как разница между глобальным поглотителем и источниками в Saunois et al. (2016). <sup>f</sup> Выбросы промышленности и транспорта были включены в категорию нефти и газа в Saunois et al. (2016). <sup>g</sup> Общие антропогенные выбросы основаны на данных антропогенных выбросов на сумму категорий сельское хозяйство и отходы, ископаемое топливо и сжигание биомассы и сжигание биотоплива. <sup>h</sup> Общие антропогенные выбросы основаны на химическом сток не был указан. Эти значения получены из полнотелесной инверсии. <sup>i</sup> Атмосферный рост приведен в тех же единицах (Tg CH<sub>4</sub> г/г<sup>1</sup>) на основе коэффициента пересчета Tg 7.5 CH<sub>4</sub> г/г<sup>1</sup>.

приведенного Prather et al. (2012), и темпов атмосферного роста, представленных в тексте в частях на миллиард в год.<sup>j</sup> Неопределенно, но, вероятно, невелико для возвышенных лесов и аэробных выбросов, потенциально велико для лесных водно-болотных угодий, но, вероятно, включено в другие данные.<sup>k</sup> Мы прекращаем представлять это значение, чтобы избежать потенциального двойного учета со спутниковыми данными о сжигании биомассы (см. раздел 3.1.5).



в региональном масштабе (Grinham et al., 2018; Ollivier et al., 2019). Эти исследования показали, что выбросы различаются в зависимости от типа пруда (например, плотины ферм для разведения скота по сравнению с плотинами ферм для выращивания сельскохозяйственных культур по сравнению с городскими прудами по сравнению с плотинами). Приблизительная оценка глобального воздействия этого источника выбросов выглядит следующим образом = значительные, от 3 до 8 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (рассчитанные с использованием средних показателей выбросов по данным Гринхема и Ollivier et al., 2019) и оценка глобальной площади поверхности водохранилищ ферм в  $77000 \text{ км}^2$  (Downing et al., 2006). Эта приблизительная оценка подчеркивает потенциальную значимость этих источников, хотя возможен двойной учет с текущими неопределенными оценками естественных внутренних водных систем (Thornton et al., 2016a).

Региональная оценка для широт выше северной  $50^\circ$  (Wik et al., 2016b) оценила выбросы метана из озер и прудов в  $16,5 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (по сравнению с  $13,4 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  в Bastviken et al. (2011), выше  $54^\circ$ ). Тан и др. (2016) использовали методы атмосферной инверсии и оценили, что современные панарктические (к северу от  $60^\circ$ ) озера выбрасывают  $2,4$ -

$14,2 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ , в то время как биогеохимический анализ озера, основанный на процессах.

итрическая модель (bLake4Me) оценила выбросы в  $11,9$  [7,1-17,3] Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (Tan and Zhuang, 2015). Эти цифры для северных или арктических озер необходимо рассматривать с учетом широтной зоны, которая различается в разных исследованиях (Thornton et al., 2016a). Saunois et

al. (2016) оценки выбросов из природных озер и прудов были основаны на оценках Баствикена и др. (2011), с использованием выбросов из северных высоких широт выше  $50^\circ$  из Wik et al. (2016b), что привело к округленному среднему значению

значение  $75 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ . На основе грида bLake4Me карта из Tan and Zhuang (2015), мы рассчитали выбросы озер и прудов в  $5,2 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  над  $66^\circ$ , близкие к  $6,8 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ , найденных Баствикеном и др. (2011). Усреднение этих двух значений для выбросов выше  $66^\circ$  северной широты и объединение с оценками Баствикена и др. (2011) к югу от  $66^\circ$  северной широты ( $64,8 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ .) приводит к округленной средней глобальной оценке  $71 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ , близкой к оценке Баствикена и др. (2011) ( $71,6 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  в глобальном масштабе).

В дополнение к путям выбросов, описанным для внутренних водоемов.

У водохранилищ есть свои особенности, включая дегазацию  $\text{CH}_4$  от турбин (только у водохранилищ гидроэлектростанций) и эле-ватные диффузионные выбросы в реках ниже по течению от водохранилища - эти последние выбросы усиливаются, если отток воды

происходит из аноксичных богатых  $\text{CH}_4$  гиполимнионных вод водохранилища (Bastviken et al., 2004; Guérin et al., 2006, 2016). В работе Saunois et al. (2016) выбросы метана из водохранилищ были оценены как более высокие.

вуары были оценены в  $20 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  по данным Bastviken et al. (2011), которые были основаны на данных систем32. А

Более поздний и обширный обзор оценил общие выбросы водохранилищ в  $18 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (95% доверительный интервал  $12$ - $30 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ ; n Deemer75, et al., 2016) и использован для пересмотра нашей оценки в данном исследовании.

Объединив выбросы из озер и прудов, полученные Баствикеном и др. (2011) ( $71,6 \text{ Тг } \text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ ) с недавней оценкой Димера и др. (2016) для водохранилищ и ручьев, можно сделать вывод, что выбросы из озер и прудов, полученные Баствикеном и др.

и речных оценок из Stanley et al. (2016) приводит к общим выбросам пресной воды на суше в размере  $117 \text{ Tg CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ . Недавно, используя новый подход к увеличению масштаба, основанный на взвешивании размеров продукции и хлорофилла  $a$ , DelSontro и др. (2018) представили объединенные оценки озер и водохранилищ (1045-95-я пер.).

центили: 67-165), 149 (5-й-95-й процентиля: 95-236) и 185 (5-й-95-й процентиля: 119-295)  $\text{Tg CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ , используя распределения размеров озер по данным Downing et al. (2006), Messenger et al. (2016) и Verpoorter et al. (2014), соответственно. Эти оценки выше (на %10, %57 и почти %100, повторно

спектрально), чем ранее сообщалось в работе Saunois et al. (2016) (т.е.  $95 \text{ Tg CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  для озер, прудов и водохранилищ).

Ранее Киршке и др. (2013) сообщили о диапазоне  $8\text{--}73 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для этого ансамбля выбросов, а Сауноа и др. (2016) - о среднем значении  $122 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  ( $75 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для озер и прудов, добавление  $20 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для водохранилищ (Bastviken и др., 2011) и  $27 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для ручьев и рек; Stanley и др., 2016). Это среднее значение повторно

портированный Saunois et al. (2016), был основан на одном наборе оценок, к которым была привязана 50 % неопределенность в виде диапазона ( $60\text{--}180 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ). Здесь новые оценки DelSontro и др. (2018) приводят к средней оценке всех внутренних пресных вод в  $159 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ , связанной с

диапазоне  $117\text{--}212 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ , что отражает минимум и

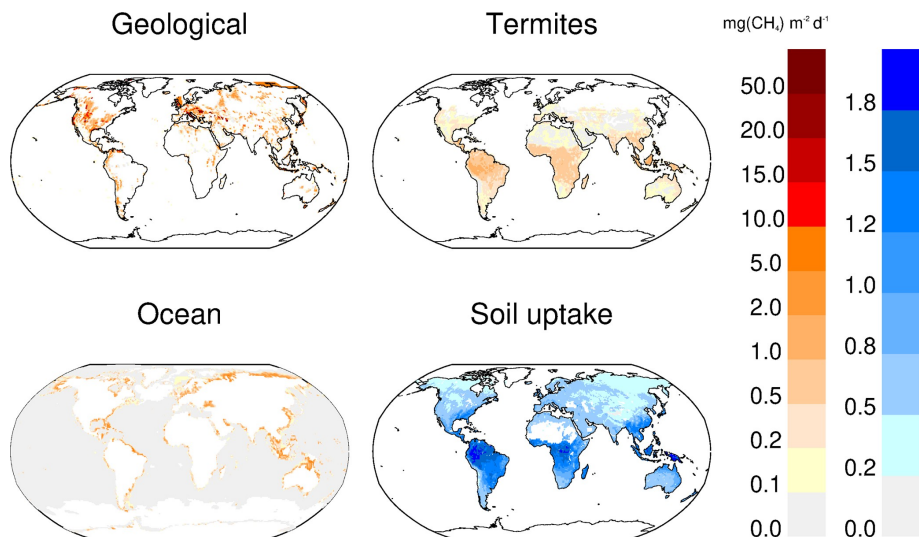
максимальные значения из имеющихся исследований (см. Методологию,

Раздел 2). Однако следует отметить, что этот диапазон не учитывает неопределенность отдельных исследований. Важно отметить, что эти текущие оценки не включают наименьший размерный класс озер или эфемерных ручьев, что приводит к возможной неправильной оценке потоков пресной воды в водно-болотные экосистемы, несмотря на попытки исключить выбросы из открытых вод из оценки влажных земель (см. выше). Настоящие данные показывают, что на озера или естественные пруды, затопленные земли-резервуары и ручьи-реки приходится %70, %13 и %17 среднего потока во внутренние водные экосистемы, соответственно (учитывая большую неопределенность, процентные значения следует рассматривать только как приблизительные относительные величины). Антропогенная часть потоков внутренних вод лучше всего ограничена для больших водохранилищ, но остается менее ясной для других затопленных человеком земель. Следует отметить, что вопросы пространственно-временной изменчивости в настоящее время не рассматриваются последовательно (Natchimuthu et al., 2015; Wik et al., 2016a). Учитывая несоответствия в данных о потоках и оценках площадей, цель частого обновления данных

о выбросах метана в настоящее время невозможна для выбросов во внутренних водах. Даже в большей степени, чем для других категорий выбросов, различия в значениях потоков во внутренних водах, используемых для оценки выбросов, а также способ обработки данных, скорее всего, представляют собой различия между данными, а не отражают реальные временные тенденции в окружающей среде.

Улучшение количественной оценки потоков внутренних вод в значительной степени зависит от наличия более точных оценок площади их поверхности. Для ручьев и рек километраж  $355000^2$ , использованный в работе Bastviken et al. (2011), был переоценен до  $540000 \text{ км}^2$  в работе Stanley et al. (2016) в связи с новой оценкой площади поверхности по данным Raymond et al. (2013). Что касается озер

2017 гг.



**Рисунок 4.** Выбросы метана ( $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) из трех природных источников (левая цветовая шкала): геологических (Etiopre et al., 2019), термитов (данное исследование) и океанов (Weber et al., 2019). Поглощение метана в почвах ( $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) представлено в положительных единицах (правая цветовая шкала) и основано на данных Murguia-Flores et al. (2018).

и водохранилищ, три текущих кадастра (Downing et al., 2006; Messenger et al., 2016; Verpoorter et al., 2014) показывают типичные различия в 2-5 раз по классам размеров. Кроме того, было отмечено, что малые пруды, которые не были включены в теории Даунинга и др. (2006) или Верпуртера и др. (2014), имеют диффузионный поток выше, чем любой другой размерный класс озер (Hol-gerson and Raymond, 2016). Дальнейший анализ и, возможно, более совершенные модели, основанные на процессах, по-прежнему необходимы и актуальны для оценки этих глобальных укрупненных оценок в сравнении с региональными подходами, такими как в Wik et al. (2016a) для северных высокоширотных озер.

В данном бюджете мы приводим среднее значение  $\text{Tg159 CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  из пресноводных систем (озера, пруды, водохранилища, ручьи и реки), с диапазоном 117-212  $\text{Tg CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ . Этот диапазон показывает минимальные и максимальные оценки, но исключает неопределенность каждой отдельной оценки, которая, как ожидается, будет большой.

### 3.2.3 Наземные и морские геологические источники

Значительное количество метана, образующегося в земной коре, естественным образом мигрирует в атмосферу через тектонические разломы и трещиноватые породы. Основные выбросы связаны с добычей углеводородов в осадочных бассейнах (микробный и термогенный метан), через непрерывные или эпизодические выделения из наземных и мелководных морских углеводородных просачиваний и через диффузное микропросачивание почвы (Etiopre, 2015). В частности, были рассмотрены пять категорий источников. Четыре - наземные источники: газонефтяные просачивания, грязевые вулканы,

диффузное микропросачивание и геотермальные проявления, включая вулканы. Один источник - морской: подводные просачивания, которые могут включать те же типы газопроявлений, что и на суше. Этиопре и др. (Etiopre et al., 2019) представили первый

карты геологических выбросов метана и их изо-тем для этих пяти категорий, с глобальным общим количеством

37.4 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  (воспроизведено на рис. 4). По их мнению, карты сетки не представляют, однако, фактический глобальный ге-

ологических выбросов  $\text{CH}_4$ , поскольку наборы данных, использованные для построения сетки спатий (разработанные для целей моделирования), были неполными или не содержали информации, необходимой для улучшения всех предыдущих оценок. Объединение наилучших оценок для пяти категорий геологических источников (из карт сетки или из предыдущих статистических и основанных на процессах моделей), разбивка по категориям показывает, что береговые ми-

доминирует просачивание (24 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ), в то время как другие категории имеют аналогичные меньшие вклады: средние значения - 4,7 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для геотермальных проявлений, около 7 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для подводного просачивания и 9,6 Тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для береговых просачиваний и грязевых вулканов. Эти значения приводят к

среднее значение глобальной геологической эмиссии "снизу вверх" составляет [4527-63] Тг  $\text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  (Etiope and Schwietzke, 2019).

Хотя все оценки "снизу вверх" и некоторые "сверху вниз", фол-

используя различные и независимые методы разных авторов, последовательно предполагают глобальную эмиссию гео- $\text{CH}_4$  порядка 40-50 Тг в  $\text{год}^{-1}$ , данные по радиоуглероду ( $^{14}\text{C} \text{ CH}_4$ ) в ледяных ядрах, представленные Hmiel и др. (2020), по-видимому, снижают оценку, с минимумом около 1,6 Тг  $\text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  и

максимальное расчетное значение 5,4 Тг  $\text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  (95 %) для

доиндустриального периода. Расхождение между Hmiel et al. (2020) и всех других оценок продолжает подпитывать де-бат. Выбросы Восточно-Сибирского арктического шельфа (ESAS) были оценены в 3 Тг  $\text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  на основе современных наблюдений за поверхностью атмосферы (Thornton и др., 2020), что соответствует тому же порядку величины, что и оценка, полученная из статьи "Выбросы в атмосферу".

Hmiel и др. (2020) для глобальных геологических выбросов. Как -

В любом случае, выбросы ESAS, вероятно, имеют как термогенное, так и биогенное происхождение (например, Berchet et al., 2020). Для уменьшения этого расхождения необходимы дополнительные исследования и конфронтация между результатами, полученными сверху вниз и снизу вверх.

Ожидая дальнейших исследований на эту тему, мы решили сохранить лучшие оценки из Etiope и Shwietzke (2019) для средних значений и связать их с самыми низкими оценками, представленными в Etiope et al. (2019). Таким образом,

мы сообщаем, что общая глобальная геологическая эмиссия составляет [4518- 63] Тг СН в год<sup>-1</sup>, с разделением на выбросы на шельфе в размере [75-10] Тг СН в год<sup>-1</sup> и на суше в размере 38 [13-53] Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>. Обновленная оценка снизу вверх несколько ниже, чем предыдущий бюджет, в основном за счет перераспределения выбросов на суше.

вычитание расчетных выбросов береговых и морских просачиваний (3.2.6 более подробное объяснение вклада шельфа см. в Разделе).

### 3.2.4 Термиты

Термиты - это инфраотряд насекомых (Isoptera), обитающих преимущественно в тропических и субтропических широтах (Abe et al., 2000). СН<sub>4</sub> высвобождается во время анаэробного де-состава растительной биомассы в их кишечнике (Sanderson, 1996). Неопределенность, связанная с этим источником СН, очень высока, поскольку выбросы СН<sub>4</sub> термитами в различных типах экосистем могут варьировать и определяться рядом факторов, а количество полевых измерений, как биомассы термитов, так и выбросов, относительно невелико (Kirschke et al., 2013).

В работе Kirschke et al. (2013) (см. Приложение) был предложен повторный анализ выбросов СН<sub>4</sub> от термитов в глобальном масштабе. Их выбросы СН<sub>4</sub> на единицу площади были рассчитаны как произведение биомассы термитов, выбросов СН<sub>4</sub> термитов на единицу массы термитов и скалярного коэффициента, выражающего влияние изменения землепользования и покрова; последние два термина были оценены на основе повторного анализа опубликованной литературы. Для тропического климата биомасса термитов оценивалась с помощью простой регрессионной модели, представляющей ее зависимость от валовой первичной продуктивности (GPP), в то время как для лесных и травянистых экосистем теплого умеренного климата и для кустарниковых болот средиземноморского субклимата биомасса термитов оценивалась по данным Sanderson (1996). На сайте

Коэффициент выбросов СН<sub>4</sub> на единицу биомассы термитов (гтермит) оценивался как 2,8 мг СН<sub>4</sub> (гтермит)<sup>-1</sup>ч<sup>-1</sup> для тропических экосистем и средиземноморских кустарников (Kirschke et al., 2013) и 1,7 мг СН<sub>4</sub> (гтермит)<sup>-1</sup> ч<sup>-1</sup> для лесов и лугов умеренной зоны (Fraser et al., 1986). Выбросы были

масштабированы

Восходящие и годовые потоки СН были рассчитаны для трех периодов 1982-1989, 1990-1999 и 2000-2007 годов, представляющих 1980-е, 1990-е и 2000-е годы, соответственно.

Повторный анализ выбросов термитов, предложенный в работе Saunois et al. (2016), сохранил тот же подход, но данные были рассчитаны с использованием климатического районирования (по классификации Кёппена-Гейгера), примененного к обновленным климатическим базам данных Сантини и ди Паола (2015), и были адаптированы для учета различных комбинаций биомассы термитов на единицу площади и коэффициента выбросов СН<sub>4</sub> на единицу биомассы термитов.

Здесь этот анализ расширен и охватывает периоды 2000-2007 и 2010-2016 гг. Эта последняя оценка соответствует подходу, описанному выше для Saunois et al. (2016). Однако, чтобы расширить анализ до 2016 года, для оценки биомассы термитов использовалась альтернативная мера GPP на основе MODIS, полученная от Zhang et al. (2017), а не от Jung et al. (2009) и Jung et al. (2011). Чтобы иметь согласованные наборы данных по GPP и землепользованию, последняя переменная, ранее полученная из Ramankutty и Foley (1999), была заменена на карты MODIS (Channan et al., 2014; Friedl et al., 2010). Эти новые оценки охватывали 2000-2007 и 2010-2016 годы с использованием данных 2002 года и MODIS2012 в качестве среднего опорного года для каждого периода, соответственно.

Выбросы  $\text{CH}_4$  термитов демонстрируют лишь незначительную межгодовую и междекадную изменчивость ( $0,1 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ ), в то время как существует сильная региональная изменчивость, основными источниками которой являются тропическая Южная Америка и Африка (23 % и 28 % от то...

тальных выбросов, соответственно) из-за протяженности их естественных лесных и саванных экосистем (рис. 4). Изменение источников данных ГПП и землепользования оказало лишь незначительное влияние на глобальный поток термитов в 2000-2007 годах, увеличив...

с  $8,7 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ , как было установлено в первых двух повторных анализах (Kirschke et al., 2013; Saunois et al., 2016), до

$9,9 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  (современные данные), что вполне соответствует расчетной неопределенности ( $8,73 \pm 1 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ). Однако это оказало заметное влияние на пространственное распределение потока (рис. S2).

Наиболее очевидным из этих изменений является

уменьшение вдвое потока в Юго-Восточной Азии, что согласуется со сдвигами в базовом продукте GPP. Предыдущие исследования (Mercado et al., 2009; Zhang et al., 2017) связывали эти сдвиги GPP с методологической проблемой эффективности использования света, которая привела к недооценке GPP вечнозеленых широколиственных и вечнозеленых иглистых деревьев, биомов, преобладающих в тропиках. Это значение близко к средней оценке, полученной в ходе предыдущих исследований по расширению масштаба, в которых были представлены значения от до

$22 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  (Ciais и др., 2013).

В данном исследовании мы сообщаем десятилетнее значение в  $9 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  (диапазон  $[3-15] \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$ , Таблица 3).

### 3.2.5 Дикие животные

Дикие жвачные животные выделяют метан в результате микробного процесса ферментации, происходящего в их рубце, аналогично домашним животным (USEPA, 2010b). Используя общую популяцию животных в 100-500 миллионов, Крутцен и др. (1986) оценили глобальные выбросы  $\text{CH}_4$  от диких жвачных животных. нанты в диапазоне  $2-6 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$ . Недавно Перес-Барберия (2017) понизил эту оценку до  $1,1-$

$2,7 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ , используя оценку общей численности животных в миллион214 (диапазон 210-219), утверждая, что максимальная

количество животных (500 миллионов), использованное Крутценом и др. (1986), было плохо обосновано. Более того, Перес-Барберия (2017) также заявил, что значение  $15 \text{ Тг } \text{CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ , найденное в последних отчетах МГЭИК, намного выше их оценки, поскольку это значение получено в результате экстраполяции работы Крутцена для

2017 гг.

Последний ледниковый максимум, когда популяция диких животных была намного больше, как первоначально предлагали Шапеллаз и др. (1993).

Исходя из этих выводов, диапазон, принятый в данном обновленном бюджете метана, составляет [21-3] Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  (Таблица 3).

### 3.2.6 Океанические источники

Океанические источники включают в себя выбросы метана в прибрежной зоне океана и в открытом океане. Возможные источники океанического  $\text{CH}_4$  включают

(1) производство из морских (голых и растительных) отложений или оттаивающей субморской вечной мерзлоты; (2) производство *in situ* в толще воды, особенно в прибрежном океане из-за субморского сброса подземных вод (USEPA, 2010b); (3) утечки в результате геологического морского просачивания (см. также раздел 3.2.3); и

(4) выбросы в результате дестабилизации морских гидратов. Попав на морское дно, метан может переноситься через толщу воды путем диффузии в растворенной форме (особенно в зонах апвеллинга) или эбуллизации (газовые пузырьки), например, из геологических морских просачиваний), например, на мелководье континентальных шельфов. В прибрежных растительных местообитаниях метан также может переноситься в атмосферу через *аэренхиму* появляющихся водных растений (Ramachandran et al., 2004).

Наиболее часто встречающееся в литературе значение биогенной эмиссии в океане - Тг10  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  (Rhee et al., 2009b). Как видно, большинство исследований опирается на работу Ehhalt (1974), где величина была оценена на основе мер...

Свиннертон и соавторы (Lamontagne et al., 1973; Swinnerton and Linnenbom, 1967) для открытого океана в сочетании с чисто умозрительными выбросами с континентального шельфа. На основе наблюдений в масштабах всего бассейна с использованием обновленных методологий в трех исследованиях были получены оценки ранговых выбросов.

от 0,2 до 3 Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  (Bates et al., 1996; Conrad and Seiler, 1988; Rhee et al., 2009b), связанные с супер...

насыщенности поверхностных вод, которые на порядок меньше, чем предполагалось ранее, как для открытого океана (аномалия насыщенности 0,04; см. Rhee et al., 2009a, Eq. 4), так и для континентального шельфа (аномалия насыщенности 0,2). В своем обобщении, косвенно ссылаясь на исходные наблюдения, Rhee et al. по данным Ламберта и Шмидта (1993), Уэбблс и Хейхоу (2002) используют значение 5 Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$ .

Предлагаемые объяснения расхождений относительно выбросов метана из моря в воздух в открытом океане связаны с экспериментальными ошибками в прежних исследованиях Свиннертона и Линненбома (Rhee et al., 2009b). Это может объяснить, почему ком-пильция Банге и др. (1994) приводит глобальный источник 11-18

Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$  с доминирующим вкладом прибрежных регионов. Здесь мы повторно рассматриваем диапазон 0-5 Тг  $\text{CH}_4$  г $^{-1}$ , со средним значением Тг2  $\text{CH}_4$  г $^{-1}$  для биогенных выбросов из открытого и прибрежного океана (исключая эстуарии).

Биогенные выбросы из солоноватых вод (эстуарии, прибрежные водно-болотные угодья) не были представлены в предыдущем бюджете (Saunois et al., 2016). Выбросы метана из эстуариев были первоначально оценены Bange и др. (1994), Upstill.

Goddard et al. (2000) и Middelburg et al. (2002) в пределах от 1 до 3 Тг СН в  $\text{год}^{-1}$ . Этот диапазон был позже пересмотрен в сторону увеличения Борхесом и Абрилем (2011) до примерно 7 Тг СН в  $\text{год}^{-1}$  на основе методологии, различающей различные типы эстуариев и учитывающей кон...

распределение приливных отмелей, болот и мангровых зарослей, для общего количества систем 39 и глобальной площади "внутренней" поверхности эстуария в размере

1.  $1 \text{ км} \cdot 10^{62}$  (Laruelle et al., 2013). Та же методология, что и в работе Laruelle et al. (2013), была применена здесь к тем же системам с использованием расширенной базы данных местных и повторных региональных измерений (72 системы) и, тем не менее, позволяет предположить, что глобальные эстуарные выбросы  $\text{CH}_4$  были переоценены и могут быть завышены.

фактически не превышает 3-3,5 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ . Несмотря на это общее снижение, удельный вклад осадочных пород и воды

Однако выбросы из мангровых экосистем выше и составляют  $<0.1$  до  $1.7 \text{ Тг} \text{ CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  в глобальном масштабе (Rosentreter et al., 2018). Эта эстуарная оценка не включает неопределенный вклад от крупных речных пломов, выступающих на

шельфа. Площадь их поверхности достигает около  $3 \cdot 10^6 \text{ км}^2$  (Kang et al., 2013), но из-за значительно более низкой концентрации  $\text{CH}_4$  (например, Osudar et al., 2015; Zhang et al., 2008), чем во внутренних эстуариях, газовыделение, связанное с этими шельфами, является более значительным.

вероятно, не превышает 1-2 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ . Морские луга также не включены, хотя они могут выделять  $< 0,1 - 2,7 \text{ Тг} \text{ CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (Garcias-Bonet and Duarte, 2017). Эти выбросы метана из растительных прибрежных экосистем

может частично компенсировать (Rosentreter et al., 2018) их поглощение "голубыми автомобилями"

(например, Mcleod et al., 2011; Nellemann et al., 2009). Обратите внимание, что последние два вклада могут частично перекрываться с оценками океанических (открытых и прибрежных) источников. Общий (внутренний и внешний) эстуарный поток выбросов, который основан на

только около 80 систем, таким образом, находится в диапазоне  $4-5 \text{ Тг} \text{ CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (включая болота и мангровые заросли). Высокая неопределенность в Оценки выбросов в прибрежном океане могут быть уменьшены путем более точного определения различных типов прибрежных экосистем и их границ, чтобы избежать двойного учета (например, эстуарии, солончатые болота, пресноводные болота), обновления площади поверхности каждой из этих прибрежных систем и более точной количественной оценки темпов выбросов метана в каждом типе экосистем.

В результате, здесь мы сообщаем о диапазоне  $4-10 \text{ Тг} \text{ CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  для выбросов из прибрежной зоны и открытого океана (включая эстуарии), со средним значением  $6 \text{ Тг} \text{ CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ .

Производство метана на морском дне известно следующим образом

быть значительными. Например, морские фильтраты выбрасывают до  $65 \text{ Тг} \text{ CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  в глобальном масштабе на уровне морского дна (USEPA, 2010b). Неопределенным остается поток океанического метана, попадающего в атмосферу. Например, пузырьковые шлейфы  $\text{CH}_4$  от

на морском дне наблюдались в толще воды, но не были обнаружены в арктической атмосфере (Fisher et al., 2011; Westbrook et al., 2009). Существует несколько барьеров, препятствующих выбросу метана в атмосферу (James et al., 2016). От дна моря до поверхности моря газовые гидраты и вечная мерзлота служат барьером для миграции флюидов и газа к морскому дну; микробная активность вокруг морского дна может сильно окислять выбросы или производство метана;



дальнейшее окисление происходит в толще воды; океанический пикноклин действует как физический барьер на пути к поверхностным водам, включая эффективное растворение пузырьков; и, наконец, поверхностные воды океана являются аэробными и способствуют окислению растворенного метана. Однако поверхностные воды могут быть более супернасыщенными, чем глубинные, что приводит к метановому парадоксу (Sasakawa et al., 2008). Возможные объяснения включают (i) апвеллинг в районах с поверхностным смешанным слоем, покрытым морским льдом (Damm et al., 2015), (ii) высвобождение метана в результате разложения фосфонатов растворенного органического вещества в аэробных условиях (Repeta et al., 2016), (iii) производство метана морскими водорослями (Lenhart et al., 2016), или (iv) производство метана в аноксическом центре тонущих частиц (Sasakawa et al., 2008), но для окончательного решения этого кажущегося парадокса необходимо провести дополнительную работу.

Для геологических выбросов наиболее используемое значение долгое время составляло 20 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup>, опираясь на знания экспертов и обобщение литературы, предложенное на семинаре, о котором сообщалось в Kven- volden et al. (2001); авторы этого исследования признают, что

Это была первая оценка, и она нуждается в пересмотре. С тех пор были организованы океанографические кампании, особенно для отбора проб в зонах активного пузырения газовых фильтратов на морском дне. Например, Шахова и др. (2010, 2014) предполагают, что 8-...

17 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> в выбросах только для Восточно-Сибирского арктического шельфа (ESAS), на основе экстраполяции численных данных.

но локальных измерений, и, возможно, связано с оттаиванием подпочвенной вечной мерзлоты (Шахова и др., 2015). Из-за крайне неоднородного распределения растворенного  $\text{CH}_4$  в прибрежных регионах, где пузырьки легче всего попадают в атмосферу, экстраполяция локальных измерений *in situ* на глобальный масштаб может быть опасной и привести к необъективным глобальным оценкам. Действительно, используя очень точные и аккуратные непрерывные наблюдения за атмосферным метаном в Арктическом регионе с берегов суши, Берше и др. (2016) обнаружили диапазон

выбросов для ESAS в размере 2.5 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> (диапазон [0-5]), что в 4-8 раз ниже оценок Шаховой. Такое снижение

Оценка выбросов ESAS также была получена на основе океанических наблюдений Торнтоном и др. (2016b) с максимальным потоком  $\text{CH}_4$  из морского воздуха в 2,9 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> для этого региона. Етиоре и др. (2019) предположили, что минимальная глобальная суммарная эмиссия подводных просачиваний составляет 3.9 Тг  $\text{CH}_4$  в год, <sup>-1</sup>просто суммируя публичные данные.

подготовлены региональные оценки выбросов для районов 15, где выявлены...

фицированных областей выбросов (более 7 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup>. при экстраполяции на неизмеренные области). Эти последние результаты, основанные на различных подходах, свидетельствуют о том, что текущая оценка 20 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup>. слишком велика и требует пересмотра.

Поэтому, как обсуждалось в разд. 3.2.2, мы сообщаем здесь об уменьшенном диапазоне 5-10 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup> для морских геологических выбросов по сравнению с предыдущим бюджетом, со средним значением 7 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup>.

Среди различных источников происхождения океанического метана, гидраты

привлекли большое внимание. Гидраты метана (или клатраты) - это льдоподобные кристаллы, образующиеся при определенных условиях температуры и давления (Мильков, 2005). Гидраты метана могут быть либо биогенного происхождения (образуются *in situ* при

на глубине осадка в результате деятельности микроорганизмов) или термогенического происхождения (небиогенный газ мигрировал из более глубоких отложений и оказался в ловушке из-за условий давления-температуры или из-за какой-либо закрывающей геологической структуры, например, морской вечной мерзлоты). Общий запас морских гидратов метана велик, но неопределен, глобальные оценки варьируются от десятков до тысяч Пг  $\text{CH}_4$  (Klauda and Sandler, 2005; Wallmann et al., 2012).

Что касается более конкретно атмосферных выбросов от морских гидратов, Etiope (2015) указывает, что текущие оценки воздушно-морского потока метана от гидратов (210 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> в Ciais и др., 2013, или Kirschke и др., 2013) происходят от гипотетических значений Cicerone и

Oremland (1988). С тех пор в цепочке ссылок не было явного описания экспериментальных данных или процедур оценки (Denman et al., 2007; IPCC, 2001; Kirschke et al., 2013; Lelieveld et al., 1998). Было подсчитано, что за многие годы в толще воды высвобождается Тг473  $\text{CH}_4$  100 (Kretschmer et al., 2015).

Эти несколько тераграммов в год становятся пренебрежимо малыми после учета потребления в ~~т~~ воды. Хотя такие события, как подводные оползни, могут вызывать локальные выбросы значительных количеств метана из гидратов, которые могут попасть в атмосферу (Etiope, 2015; Paull et al., 2002), в глобальном масштабе современные атмосферные выбросы метана из гидратов не являются значительным источником в атмосферу, и по крайней мере  
Формально, мы должны рассматривать выбросы 0 (< 0,1) Тг  $\text{CH}_4$  в год.<sup>-1</sup>

Комбинация (биогенных и геологических) выбросов из открытого и прибрежного океана. Суммирование биогенных, геологических и гидратных выбросов из открытого и прибрежного океана (исключая эстуарии) приводит к общему значению 9 Тг  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup> (диапазон 5- 17). В недавней работе (Weber et al., 2019) предложена новая ро-

оценка климатологического океанического потока: диффузионный поток был оценен как 2-6 Тг  $\text{CH}_4$  в год,<sup>-1</sup> а эбу-литивный поток как 2-11 Тг  $\text{CH}_4$  в 4год<sup>-1</sup>, что дает общую оценку океанического потока (открытого и прибрежного) в 6-15 Тг  $\text{CH}_4$  в 4год<sup>-1</sup> (90% доверительный интервал), когда распределения вероятностей для

два пути объединяются. Распределение потоков в открытом и прибрежном океане по данным Weber et al. (2019) показано на рис. 4. Эта более надежная оценка была получена в результате синтеза натуральных измерений концентраций метана в атмосфере и поверхностных ~~ва-~~ терных слоях и зон пузырьков, а также разработки моделей океанических выбросов метана, основанных на процессах. Другая недавняя оценка, основанная на биогеохимической модели PlankTOM10 (Le Quéré et al., 2016), рассчитывает поток метана в открытом и прибрежном океане (исключая эстуариев) 8 [ 13/49] Тг  $\text{CH}_4$  г.<sup>-1</sup> (Buitenhuis et al., 2020), с вкладом прибрежной зоны 44 %. Наша оценка (9 [5-17] Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup>) хорошо согласуется с оценками 6-15 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup> по данным Weber и др. (2019) и 8 Тг  $\text{CH}_4$  г<sup>-1</sup> (Buitenhuis и др., 2020).

Выбросы метана из солоноватой воды не были учтены в Sauniois et al. (2016), и в данном бюджете указаны дополнительные Тг4  $\text{CH}_4$  в год<sup>-1</sup>. В результате, в том числе

<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561->

2017 гг.

в океаническом бюджете, мы сообщаем о диапазоне от 922 до  $13 \text{ Tg CH}_4 \text{ год}^{-1}$ , со средним значением  $13 \text{ Tg CH}_4 \text{ год}^{-1}$ , что приводит к сходным общим океаническим выбросам, несмотря на снижение оценки выбросов в геологическом шельфе по сравнению с данными Saunois et al. (2016).

### 3.2.7 Земная вечная мерзлота и гидраты

Вечная мерзлота определяется как замерзшая почва, осадок или горная порода, температура которой находится на уровне или ниже  $0^\circ \text{C}$  в течение как минимум 2 лет подряд (Harris et al., 1988). Общая протяженность вечной мерзлоты в Северном полушарии составляет около 14 млн  $\text{km}^2$  или 15 % открытой поверхности суши (Obu et al., 2019). Поскольку климат

При потеплении большие участки вечной мерзлоты также нагреваются, и если температура почвы переходит через  $0^\circ \text{C}$ , происходит оттаивание вечной мерзлоты. Оттаивание вечной мерзлоты наиболее выражено в южных и курортно-изолированных зонах вечной мерзлоты, но оно происходит и в северной сплошной мерзлоте (Obu et al., 2019). Оттаивание происходит либо

как постепенное, часто широко распространенное углубление активного слоя или как более быстрое локализованное оттаивание, связанное с потерей значительного количества грунтового льда (термокарст) (Schuur et al., 2015). Всего в верхних 3 м вечной мерзлоты может находиться 1035–150 Пг углерода, или 1300 (1100–1500) Пг C для всей вечной мерзлоты (Hugelius et al., 2014).

Оттаивающая вечная мерзлота может генерировать прямые и косвенные выбросы метана. Прямые выбросы метана зависят от повторной аренды метана, содержащегося в оттаивающей вечной мерзлоте. Этот поток в атмосферу невелик и оценивается как макс.

в настоящее время составляет  $1 \text{ Tg CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  (USEPA, 2010b). Выбросы метана в атмосферу, вероятно, более важны. Они

полагаются на (1) метаногенез, вызываемый высвобождением органического материала, содержащегося в оттаивающей вечной мерзлоте, (2) связанные с этим изменения гидрологии поверхности земли, возможно, усиливающие производство метана (McCalley et al., 2014), и (3) образование большего количества термокарстовых озер в результате эрозии и разрушения почвы. Такое производство метана, вероятно, является значительным уже сегодня и, вероятно, станет более важным в будущем в связи с изменением климата и сильной положительной обратной связью от таяния вечной мерзлоты (Schuur et al., 2015). Однако косвенные выбросы метана в результате оттаивания вечной мерзлоты в настоящее время трудно оценить, поскольку данных для этого очень мало, и в любом случае они в значительной степени перекрываются с выбросами влажной земли и пресной воды, происходящими над или вокруг оттаивающих территорий. Например, на основе измерений озер и почв...

Вальтер Энтони и др. (2016) обнаружили, что выбросы метана ( $13 \text{ Tg CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ ) из термокарстовых озер, которые расширились за последние 60 лет, прямо пропорциональны массе почвенного углерода, поступившего в озера в результате эрозии оттаивающей вечной мерзлоты.

Здесь мы решили сообщить только о прямых выбросах в диапазоне  $0\text{--}1 \text{ Tg CH}_4 \text{ в год}^{-1}$ , помня о том, что текущие выбросы метана из болот, термокарстовых озер и других пресноводных водоемов уже, вероятно, включают значительный косвенный вклад, происходящий от таяния вечной мерзлоты.

### 3.2.8 Растительность

Здесь рассматриваются три различных пути производства и эмиссии метана живой растительностью (обширный обзор см. в 2019, Covey и Megonigal). Во-первых, растения производят метан в результате абиотического фотохимического процесса, вызванного стрессом (Keppler et al., 2006). Первоначально этот путь был подвергнут критике (например, Duesck et al., 2007; Nisbet et al., 2009), и хотя многочисленные исследования с тех пор подтвердили аэробные выбросы растений и лучше определили их физические факторы (Fraser et al., 2015), глобальные оценки по-прежнему различаются на 2 порядка (Liu et al., 2015). Однако этот растительный источник не был подтвержден в полевых условиях, и хотя потенциальные последствия для глобального бюджета метана остаются неясными, выбросы из этого источника, безусловно, намного меньше, чем первоначально оценивалось в работе Keppler et al. (2006) (Bloom et al., 2010; Fraser et al., 2015). Во-вторых, что имеет более важное значение, растения действуют как "солонинки", втягивая и высвобождая микробный метан из аноксичных почв (Cicerone and Shetter, 1981; Rice et al., 2010). Например, в лесных водно-болотных угодьях Амазонии стебли деревьев являются доминирующим экосистемным путем потока метана, производимого почвой; поэтому включение выбросов стеблей в экосистемные бюджеты может привести к уточнению региональных оценок снизу вверх и сверху вниз (Pangala et al., 2017). В-третьих, стволы как живых деревьев (Covey et al., 2012), так и мертвой древесины (Covey et al., 2016) создают среду, подходящую для микробного метаногенеза. Статические камеры демонстрируют локально значительный сквозной поток коры как из

почвы (Pangala et al., 2013, 2015), так и от метаногенов, обитающих в стволах деревьев (Pitz and Megonigal, 2017; Wang et al., 2016). Недавнее обобщение показывает, что выбросы СН из стволов значительно увеличивают силу источника лесных водно-болотных угодий и незначительно уменьшают силу поглотителя возвышенных лесов (Covey and Megonigal, 2019). Научная деятельность, связанная с выбросами СН<sub>4</sub> в лесных экосистемах, показывает гораздо более сложную историю, чем считалось ранее, с взаимодействием продуктивных и потребительских, аэробных и анаэробных, биотических и абиотических процессов, происходящих между почвами, деревьями и атмосферой. Понимание сложных процессов, регулирующих динамику источника-стока СН<sub>4</sub> в лесах, и оценка их вклада в глобальный бюджет метана требуют междисциплинарных исследований, дополнительных наблюдений и новых моделей, способных преодолеть классическую бинарную классификацию заболоченных и возвышенных лесов и выделяющих и поглощающих почв (Barba et al., 2019; Covey and Megonigal, 2019). Хотя мы признаем, что эти выбросы потенциально велики (особенно перенос деревьев из затопленной почвы), глобальные оценки для каждого из этих путей остаются крайне неопределенными и/или в настоящее время приписываются другим источникам потоков (например, внутренним водам, водно-болотным угодьям, возвышенным почвам).

### 3.3 Поглотители метана и продолжительность жизни

Метан является наиболее распространенным реактивным следовым газом в тропосфере, и его реактивность важна как для тропосферной, так и для атмосферной атмосферы.

и химии стратосферы. Основным атмосферным поглотителем метана (90% от общего механизма поглощения) является окисление гидроксильным радикалом (ОН), в основном в тропосфере (Ehhalt, 1974). Другие потери связаны с фотохимией в стратосфере (реакции с атомами хлора, Cl, и возбужденным атомарным кислородом, O(<sup>1</sup>D)), окислением в почвах (Curry, 2007; Durtoglu and Verchot, 2007) и фотохимией в морском пограничном слое (реакция с Cl; Allan et al., 2007; Thornton et al., 2010). Погрешности в общем поглотителе метана, оцененном с помощью моделей атмосферной химии, составляют порядка 40-20% (Saunois et al., 2016). Она значительно меньше (10%-20%) при использовании методов атмосферных прокси (например, метилхлороформа; см. ниже), а также при атмосферных инверсиях (Saunois et al., 2016). В настоящем выпуске глобального бюджета метана мы оцениваем химические поглотители и время жизни метана снизу вверх, основываясь главным образом на результатах глобальных моделей, полученных в рамках Инициативы по химическим климатическим моделям (CCMI) (Morgenstern et al., 2017).

### 3.3.1 Окисление ОН в тропосфере

Радикалы ОН образуются в результате фотолиза озона (O<sub>3</sub>) в присутствии водяного пара. ОН разрушается в результате реакций с CO, CH<sub>4</sub> и неметановыми летучими органическими соединениями.

Вслед за проектом ACCMIP (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project), в рамках которого изучались долгосрочные изменения состава атмосферы в период до 1850-2100 года (Lamarque et al., 2013), новая серия экспериментов была проведена несколькими химико-климатическими и химико-транспортными моделями, участвующими в Инициативе химико-климатических моделей (CCMI) (Morgenstern et al., 2017). Взвешенные по массе тропосферные концентрации ОН не отражают потери метана, поскольку пространственное и вертикальное распределение ОН влияет на эти потери, в частности, через зависимость от температуры и распределение метана (например, Zhao et al., 2019). Однако оценка концентрации ОН, пространственного и вертикального распределения является ключевым шагом в оценке потерь метана через ОН. За период 2000-2010 гг. среднее мультимодельное значение (11 моделей) глобальной взвешенной по массе концентрации ОН в тропосфере составило 11.71 ± 0.10

10<sup>5</sup> молекул см<sup>-3</sup> (диапазон 9.9-14.4 молекул 10<sup>5</sup> см<sup>-3</sup>; Zhao et al., 2019) согласуется с предыдущими оценками ACCMIP (11.71 ± 0.10 молекул см<sup>-3</sup>, с диапазоном 10.3-13.4 молекул см<sup>-3</sup>; Voulgarakis et al., для 2013, 2000 года) и оценками Prather et al. (2012) в 11.2 ± 1.3 · 10<sup>5</sup> молекул см<sup>-3</sup>. Nicely et al. (2017) связывают различия в ОН, моделируемом диф-

различных химико-транспортных моделей до, в порядке убывания важности, различных химических

механизмов, различных трактовок скорости фотолиза озона и смоделированных озона и монооксида углерода. Помимо неопределенности в отношении глобальных концентраций ОН, существует неопределенность в пространственном и температурном распределении ОН. Модели часто моделируют более высокий уровень ОН в Северном полушарии, что приводит к соотношению NH / SH ОН

больше, чем (Naik et al., 2013; Zhao et al., 2019). Однако существуют доказательства равенства межполушарных концентраций ОН (Patra et al., 2014), что должно быть подтверждено другими оценками, полученными с помощью наблюдений и моделей.

Концентрации ОН и их изменения могут быть чувствительны к изменчивости климата (Dlugokencky et al., 1996; Holmes et al., 2013; Turner et al., 2018), сжиганию биомассы (Voulgarakis et al., 2015) и антропогенной деятельности. Например, увеличение окислительной способности тропосферы в Южной и Восточной Азии, связанное с увеличением выбросов NO (Mijling et al., 2013) и уменьшением выбросов CO (Yin et al., 2015), возможно, усиливает окисление CH<sub>4</sub> и, следовательно, ограничивает атмосферное воздействие увеличивающихся выбросов (Dalsøren et al., 2009). Несмотря на такие большие региональные изменения, средняя глобальная концентрация ОН, как предполагается, изменилась незначительно за последние 150 лет (Naik et al., 2013). Это объясняется компенсирующим эффектом одновременного увеличения положительного влияния на ОН (водяной пар, тропосферный озон, выбросы оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и УФ-излучение из-за уменьшения стратосферного озона) и поглотителей ОН (бремя метана, выбросы и бремя монооксида углерода и неметановых летучих органических соединений). Модели ССМІ показывают межгодовую изменчивость ОН от 0,4 % до 1,8 % (Zhao et al., 2019) в течение 2000 года - 2010, ниже, чем значение, полученное из измерений метилхлороформа (прокси, подход "сверху вниз"). Однако эти модели учитывают изменчивость метеорологии, но не межгодовую изменчивость

выбросов (например, от сжигания биомассы), и поэтому ожидается, что они будут моделировать меньшую межгодовую изменчивость ОН, чем в реальности. Используя эмпирическую модель, ограниченную глобальными наблюдениями озона, водяного пара, метана и температуры, а также смоделированными эффектами изменения выбросов NO и расширения тропиков, Nicely и др. (2017) обнаружили межгодовую изменчивость ОН около 1,3 %-1,6 % между 1980 и 2015 годами, что согласуется с прокси метилхлор-формом (Montzka и др., 2011).

Мы сообщаем здесь климатологический диапазон для тропосферных потерь метана при окислении ОН в [553476-677] тг CH<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>, полученный из семи моделей, которые участвовали в ССМІ, для общей тропосферной потери метана.

в результате окисления ОН за период 2000-2009 гг. (высота тропопаузы 200 гПа), что несколько выше, чем в моделях АССМІР (528 [454-617] Тг CH<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>., о чем сообщается в Kirschke et al. (2013) и Saunio et al. (2016).

### 3.3.2 Потеря стратосферы

В стратосфере CH<sub>4</sub> теряется в результате реакций с атомарным кислородом O(<sup>1</sup>D), атомарным хлором (Cl), атомарным фтором (F) и ОН (Brasseur and Solomon, 2005; le Texier et al., 1988). Неопределенности в химических потерях стратосферного метана велики из-за неопределенных межгодовых изменений в стратосферном переносе, а также его химического взаимодействия и обратной связи со стратосферным озоном (Portmann et al., 2012). В частности, доля стратосферных потерь

2017 гг.

за счет различных окислителей до сих пор не определено, возможно, 20 %-35 % за счет галонов, около 25 % за счет  $O(^1D)$ , в основном в высокой стратосфере, а остальное за счет стратосферного  $OH$  (McCarthy et al., 2003).

В данном исследовании семь химико-климатических моделей проекта CCM1 (Таблица S4) используются для получения оценок химических потерь метана, включая реакции с  $OH$ ,  $O(^1D)$  и  $Cl$ ; фотолиз  $CH_4$  также включен, но происходит только над стратосферой. Учитывая высоту тропопаузы 200 гПа, модели CCM1 дают оценку [3112-

37] Тг  $CH_4$  в год<sup>-1</sup> для стратосферного поглотителя метана за период 2000-2010 гг. (Таблица S4). Разница между TГ20 ком-

по сравнению со средним значением, представленным Kirschke et al. (2013) и Saunois et al. (2016) за тот же период (51 [16- 84] Тг  $CH_4$  в год<sup>-1</sup>), вероятно, связано с вероятным двойным учетом окисления  $O(^1D)$  и  $Cl$  в нашем предыдущем расчете, так как химико-климатические модели обычно сообщают общее количество окислений  $O(D)$  и  $Cl$  в год.

химическая потеря метана (не только окисление  $OH$ ).

Мы сообщаем здесь о климатологическом диапазоне 12 - 37 Тг  $CH_4$  в год<sup>-1</sup>, связанном со средним значением TГ31  $CH_4$  г<sup>-1</sup>.

### 3.3.3 Тропосферная реакция с $Cl$

Атомы галогенов также могут участвовать в окислении метана в тропосфере. Аллан и др. (2005) измерили коэффициенты смешивания метана и  $\delta^{13}C$   $CH_4$  на двух станциях в Южном полушарии с 1991 по 2003 год и обнаружили, что видимый кинетический изотопный эффект (КИЭ) атмосферного поглотителя метана был значительно больше, чем тот, который объясняется только  $OH$ . Сезонно изменяющийся поглотитель, обусловленный

Атомный хлор ( $Cl$ ) в морском пограничном слое в количестве от 13 до 37 Тг  $CH_4$  в год<sup>-1</sup> был предложен в качестве объяснительного механизма (Allan et al., 2007; Platt et al., 2004). По оценкам, этот сток происходит в основном над прибрежными и горными районами, где  $NaCl$  из испарившихся капель морской воды.

вода реагирует с  $NO_2$ , в конечном итоге образуя  $Cl_2$ , который затем диссоциирует под действием ультрафиолета на  $Cl$ . Однако недавно сообщалось о значительном производстве хлорида ни-трила ( $ClNO_2$ ) на континентальных участках (Riedel et al., 2014), что позволяет предположить более широкое сохранение  $Cl$ , что в свою очередь расширит значение поглотителя  $Cl$  в тропосфере. Недавно, используя химико-транспортную модель, Hossaini и др. (2016) предположили, что поглотитель хлор-рина находится в нижнем диапазоне Allan и др. (2007), 12-

13 Тг  $CH_4$  в год<sup>-1</sup> (около 2,5 % от тропосферного стока). По их оценкам,  $ClNO_2$  также поглощает Тг1 метана в год<sup>-1</sup>. Другое модельное исследование (Wang et al., 2019b) показало, что

более комплексный анализ глобальной химии хлор-рина в тропосфере и обнаружил поглощение хлора в размере 5 Тг в год<sup>-1</sup>, что составляет лишь 1 % от общего поглощения метана в тропосфере. Как подход КИЭ, так и моделирование на основе химико-транспортных моделей несут в себе неопределенность (экстраполяции, основанные только на для первого случая; отсутствующие источники, грубое разрешение, недооценка некоторых антропогенных источников - для второго). Однако, Громов и др.

al. (2018) обнаружили, что хлор может внести только 0.23 в тропосферный поглотитель метана (около 1 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ ), чтобы сбалансировать глобальный бюджет  $^{13}\text{C}(\text{CO})$ .

В ожидании дальнейшей работы по более точной оценке величины поглотителя хлора в бюджете метана, мы предлагаем более низкую оценку, но больший диапазон, чем в работе Saunois et al. (2016), и используем следующее климатологическое значение для 2000-х годов: 11 [1-35] Тг  $\text{CH}_4$   $\text{г}^{-1}$ .

### 3.3.4 Поглощение почвой

Ненасыщенные окисленные почвы являются поглотителями атмосферного метана благодаря присутствию метанотрофных бактерий, которые потребляют метан в качестве источника энергии. Dutaur и Verchot (2007) провели всесторонний мета-анализ полевых измерений поглощения  $\text{CH}_4$  в различных экосистемах. Экстраполируя на глобальный масштаб, они сообщили о диапазоне 36-23 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ , но они также показали, что стратификация результатов по климатическим зонам, экосистемам и типу почвы привела к тому, что к более узкому диапазону (и более низкой средней оценке) Тг2212  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ . Модельные исследования, использующие метеорологические данные в качестве внешнего воздействия, также дали значительный диапазон оценок. Используя усредненную по глубине почвы формулу... лизации на основе закона Фика с параметризацией для диффузии и биологического окисления  $\text{CH}_4$ , Риджвелл и др. (1999) оценили силу глобального поглощения в Тг38  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ , при этом в диапазоне 20-51 тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ , что отражает структурную модель

неопределенность в параметре базового окисления. Карри (2007)

улучшили последнюю, используя точное решение одномерного уравнения диффузии-реакции в приповерхностном слое почвы (т.е. экспоненциальное снижение концентрации  $\text{CH}_4$  ниже поверхности), модель гидрологии поверхности земли и калибровку скорости окисления по полевым измерениям.

Это привело к глобальной оценке Тг28  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (9-47 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ ), результат, о котором сообщили Zhuang et al. (2013), Kirschke et al. (2013) и Saunois et al. (2016). Ито и

Inatomi (2012) использовал методологию ансамбля для изучения вариаций в оценках, полученных этими и другими параметризациями, которые охватывают диапазон 25-35 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ . Murguia-Flores et al. (2018) дополнительно уточнили расчет Curry (2007).

структурные и параметрические представления модели ключевых факторов почвенной метанотрофии, продемонстрировав хорошее согласие с наблюдаемым широтным распределением почвенного поглощения (Dutaur and Verchot, 2007). Их модель имитировала почвенного поглотителя метана в 32 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  за период 2000- (2017рис. 4), по сравнению с 38Тг29  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  при использовании параметриза- Ridgwell et al. (1999) и Curry (2007).

соответственно, при одинаковом метеорологическом воздействии. В рамках более комплексной модели, учитывающей ряд источников и поглотителей метана, Tian и др. (2010, 2015, 2016) рассчитали вертикально усредненное поглощение  $\text{CH}_4$  почвой с учетом дополнительных механизмов водной диффузии и опосредованного растениями (*азренхима*) переноса, придя к оценке

мат 30 19 Тг  $\text{CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  (Tian et al., 2016). Еще более комплексная биогеохимическая модель Райли и др. (2011)



включали вертикально разрешенные представления тех же процессов, которые рассматривались в работе Tian et al. (2016), в дополнение к фракционному затоплению ячеек сетки и, что важно, совместному ограничению поглощения как  $\text{CH}_4$ , так и  $\text{O}_2$  в почвенной толще. Райли и др. (2011) оценили глобальный уровень почвенного  $\text{CH}_4$

поглотителя в  $31 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ . со структурной неопределенностью  $15\text{-}38 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  (более высокий верхний предел обусловлен элементарной диффузией газа для имитации конвективного переноса; так как это обычно не рассматривается, мы принимаем нижнюю верхнюю границу как социальную при отсутствии ограничения поглощения при низкой влажности почвы). Модель такой степени сложности необходима для явного моделирования ситуаций, когда содержание воды в почве увеличивается настолько, что препятствует диффузии кислорода, и почва становится источником метана (Lohila et al., 2016). Этот переход может происходить быстро, в результате чего образуются участки (например, сезонные болота), которые могут быть как источником, так и поглотителем метана в зависимости от сезона.

Предыдущая оценка Curry (2007) может быть пересмотрена в сторону увеличения на основе последующих работ и увеличения концентрации  $\text{CH}_4$  с того времени, что дает центральную оценку в  $30,1 \text{ Tg CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$ . Учитывая структурную неопределенность в предположениях и параметрах различных моделей, мы сообщаем следующее здесь медиана и диапазон Tian et al. (2016):  $30 [11\text{-}49] \text{ Tg CH}_4$  в  $\text{год}^{-1}$  для периодов 2000-2009 и 2008-2017 гг.

### 3.3.5 Срок службы $\text{CH}_4$

Время жизни данного газа в атмосфере в устойчивом состоянии может быть определено как глобальное атмосферное бремя (Тг), деленное на общее поглощение (Тг в  $\text{год}^{-1}$ ) (IPCC, 2001). Глобальные модели дают оценку потерь газа за счет отдельных поглотителей, которая затем может быть использована для вычисления времени жизни за счет конкретного газа.

Например, время жизни метана в тропосфере определяется как глобальное бремя метана в атмосфере, деленное на потери от окисления  $\text{OH}$  в тропосфере, иногда называемое "химическим временем жизни". Общее время жизни метана соответствует глобальному бремени, разделенному на общие потери, включая тропосферные потери от окисления  $\text{OH}$ , стратосферной химии и поглощения почвой. Модели CCM1 (описанные в Morgenstein et al., 2017) оценивают время жизни тропосферного метана примерно в лет 9 (среднее значение за 2000-2009 годы), с диапазоном 7,2-10,1 лет (см. Таблицу S4). Хотя этот диапазон согласуется с предыдущими значениями, найденными в ACCMIP (9,3 [7,1-10,6] лет; Voulgarakis et al., 2013), среднее значение, представленное здесь, ниже, чем сообщалось ранее, вероятно, из-за меньшего и

различного ансамбля климатических моделей. Добавив  $30 \text{ Tg}$  для учета поглощения почвой к общей химической потере моделей CCM1, мы получили общее время жизни метана 7,8 лет (среднее значение за 2000-2009 гг. с диапазоном 6,5-8,8 лет). Эти обновленные модельные оценки общего времени жизни метана согласуются с предыдущими оценками ACCMIP (8,2 [6,4-9,2] лет для 2000 года; Voulgarakis et al., 2013). Уменьшение большого разброса в продолжительности жизни метана (между моделями и между моделями и оценками на основе наблюдений) (1) принесет

улучшенное ограничение глобальных общих выбросов метана и

(2) обеспечить точный прогноз будущего климата.

#### 4 Атмосферные наблюдения и нисходящие инверсии

##### 4.1 Атмосферные наблюдения

Систематические наблюдения за атмосферным  $\text{CH}_4$  начались в 1978 году (Blake et al., 1982) с нечастых измерений из разрозненных проб воздуха, собранных в Тихом океане в диапазоне широт от северной  $67^\circ$  до южной  $53^\circ$ . Поскольку большинство этих проб воздуха были взяты из хорошо перемешанных океанических воздушных масс, а измерения...

Вскоре после этого (Блейк и Роулэнд, 1986 г.) пространственный и температурный охват был значительно улучшен с добавлением Лаборатории по поиску систем Земли из Океанического и Атмосферного управления США (NOH, 1986 г.). Пространственный и температурный охват был значительно улучшен вскоре после этого (Blake and Rowland, 1986) с добавлением сети колб Лаборатории по поиску систем Земли Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA/ESRL) (Steele et al., 1987, рис. 1) и Эксперимента по изучению глобальных атмосферных газов (AGAGE) (Cunnold et al., 2002; Prinn et al., 2000), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO; Francey et al., 1999), University of California Irvine (UCI; Simpson et al., 2012), а также измерений *in situ* и колб региональных

сетей, таких как сеть ICOS (Integrated Carbon Observation System) в Европе (INGOS, 2018; ICOS-RI, 2019; <https://www.icos-ri.eu/>, last access: 29 июнь 2020 года). Объединенные наборы данных обеспечивают самый длинный временной ряд глобальных средних значений обилия  $\text{CH}_4$ . С начала 2000-х годов усредненные по колонке молярные доли  $\text{CH}_4$  были получены с помощью пассивного дистанционного зондирования из космоса (Buchwitz et al., 2005a, b; Butz et al., 2011; Crevoisier et al., 2009; Frankenberg et al., 2005; Hu et al., 2018). Наземные инфракрасные измерения с преобразованием Фурье (FTIR) в фиксированных точках также обеспечивают наблюдения столба метана с временным разрешением в дневное время и валидационный набор данных для оценки спутниковых измерений, таких как сеть TCCON (например, Pollard et al., 2017; Wunch et al., 2011) или Сеть обнаружения изменения состава атмосферы (NDACC) (например, Bader et al., 2017).

В этом бюджете наблюдения *in situ* из различных сетей были использованы в нисходящих атмосферных инверсиях для оценки источников и поглотителей метана за период 2000-2017 гг. Спутниковые наблюдения с помощью прибора TANSO/FTS на борту спутника GOSAT были использованы для оценки источников и поглотителей метана за период 2009-2017 гг. Другие атмосферные данные (FTIR, воздушные измерения, AirCore, изотопные измерения и т.д.) использовались для валидации некоторыми группами, но не конкретно в данном исследовании. Однако более подробная информация представлена в Дополнении, и планируется более полная проверка инверсий с использованием некоторых из этих данных.

2017 гг.

#### 4.1.1 Наблюдения *in situ* CH<sub>4</sub> и скорость роста атмосферы у поверхности земли

Мы используем усредненные по всему миру молярные доли CH<sub>4</sub> на поверхности Земли, полученные из четырех сетей наблюдений (NOAA/ESRL, AGAGE, CSIRO и UCI). Данные архивируются во Всемирном центре данных по парниковым газам (WDCGG) Глобальной службы наблюдения за атмосферой ВМО (WMO GAW), включая измерения с других объектов, которые не являются частью четырех сетей. Сеть мониторинга CH<sub>4</sub> *in situ* значительно выросла за последнее десятилетие благодаря появлению лазерных диодных спектрометров, которые достаточно надежны и точны, чтобы позволить развертывание с минимальным обслуживанием, что позволило создать более плотные сети в развитых странах (Stanley et al., 2018; Yver Kwok et al., 2015) и новые станции в отдаленных районах (Bian et al., 2015; Nisbet et al., 2019).

Сети отличаются стратегиями отбора проб, включая частоту наблюдений, пространственное распределение и методы расчета глобально усредненных молярных фракций CH<sub>4</sub>. Подробности приведены в приложении Kirschke et al. (2013). Средние глобальные значения концентраций CH<sub>4</sub>, представленные на рис. 1, рассчитаны с использованием измерений в течение длительного времени с помощью газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ФИД), хотя хроматографические схемы различаются в разных лабораториях. Поскольку ГХ-ФИД является относительным методом измерения, отклик прибора должен быть откалиброван по эталонам. Текущая эталонная шкала ВМО, поддерживаемая NOAA/ESRL, WMO-X2004A (Dlugokencky et al., 2005), была обновлена в июле 2015 года. Глобальные средние значения NOAA и CSIRO соответствуют этой шкале. AGAGE использует независимую стандартную шкалу, поддерживаемую Университетом Тохоку (Aoki et al., 1992), но прямые сравнения стандартов и косвенные сравнения атмосферных измерений показывают, что различия составляют менее 5 ppb (Tans and Zwellberg, 2014; Vardag et al., 2014). UCI использует другую независимую шкалу, которая была создана в 1978 году и прослеживается в NIST (Flores et al., 2015; Simpson et al., 2012), но она не была включена в обмен стандартами с другими сетями, поэтому различия с другими сетями не могут быть определены количественно. Дополнительные экспериментальные подробности представлены в дополнительных материалах Kirschke et al. (2013) и ссылках на них.

На рис. (1,а) глобально усредненное значение CH<sub>4</sub> и (б) скорость его роста (производная кривой десезонированного тренда) по годам 2017 построены для четырех программ измерений с использованием процедуры разложения сигнала, описанной в Thoning et al. (1989). Мы определяем годовой  $G_{\text{ATM}}$  как увеличение

концентрации в атмосфере с января 1 одного года по январь 1 следующего года. Согласие между четырьмя сетями является хорошим для глобального темпа роста, тем более что 1990.большие различия, наблюдаемые в основном до этого, вероятно 1990, отражают различный пространственный охват каждой сети. Долгосрочное поведение глобально усредненного атмосферного CH<sub>4</sub> показывает уменьшающуюся, но положительную скорость роста (определяемую как производная десезонизированного коэффициента смешивания).

с начала 1980-х годов по 1998 год, почти стабилизация концентраций CH<sub>4</sub> с 1999 по 2006 год, и возобновление периода с положительными постоянными темпами роста, которые стали немного в 2007, больше после 2014 года. Когда предполагается постоянное время жизни атмосферы, снижение темпов роста с 1983 по 2006 года может означать, что атмосферный CH<sub>4</sub> приближается к устойчивому состоянию, без тенденции к выбросам. Средняя глобальная концентрация CH<sub>4</sub> по данным NOAA была подобрана с помощью функции, которая описывает приближение к устойчивому состоянию первого порядка (индекс  $\tau$ ):

$CH_4(t) = CH_4(ss) + (CH_4(1980) - CH_4(ss))e^{-t/\tau}$ ; решение для времени жизни,  $\tau$ , дает годы 9.3, что очень близко к текущему значению

литературные значения (например, Prather et al., 2012, 9.10..9 лет). Такой подход включает неопределенности, особенно из-за сильного предположения об отсутствии тенденции в выбросах и поглотителях, что не согласуется с некоторыми исследованиями, объясняющими период стабилизации уменьшением выбросов, связанным с увеличением поглотителей (например, Voss et al., 2006). Тем не менее, это значение кажется согласованным, хотя и выше, чем оценки химии и климата (8,2 года; см. раздел 3.3.5).

С 1999 по 2006 год ежегодный прирост атмосферного CH<sub>4</sub> был удивительно мал и составлял 0.60..1 ppb в год<sup>-1</sup>. С тех пор темпы роста 2006, атмосферы восстановились до уровня, аналогичного уровню середины 1990-х годов (5 ppb уг<sup>-1</sup>), или даже 1980-х годов в 2014 и 2015 годах (> 10

ppb уг<sup>-1</sup>). В десятилетнем масштабе годовой прирост составляет в среднем  $2.1 \pm 0.3$  ppb в год<sup>-1</sup> для 2000-2009 годов,  $6.6 \pm 0.3$  ppb в год<sup>-1</sup> для 2008-...

2017 года, и  $6.1 \pm 1.0$  ppb в год<sup>-1</sup> для года 2017.

#### 4.1.2 Спутниковые данные среднего значения CH<sub>4</sub>

В этом бюджете мы используем спутниковые данные спутника JAXA Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT), запущенного в январе (2009 Butz et al., 2011; Morino et al., 2011), оснащенного прибором TANSO-FTS, который ведет наблюдения в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR). В распоряжении сообщества имеются различные результаты поиска метана на основе продуктов TANSO-FTS GOSAT: от NIES (Yoshida et al., 2013), от SRON (Schepers et al., 2012) и от Университета Лестера (Parker et al., 2011). Эти три данных используются нисходящими системами (Таблицы 4 и S6). Хотя данные GOSAT все еще демонстрируют значительные необъяснимые смещения и ограниченную выборку в регионах с облачным покровом и зимой в высоких широтах, они представляют собой значительное улучшение по сравнению с первым спутником, измеряющим метан из космоса, SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric Cartography) для случайных и системных ошибок наблюдения (см. таблицу S2 в Buchwitz et al., 2017).

Инверсии атмосферы на основе данных SCIAMACHY и GOSAT CH<sub>4</sub> были представлены в работе Saunio et al. (2017). Здесь используются только инверсии с использованием данных GOSAT.

#### 4.2 Инверсии сверху вниз, используемые в бюджете

Атмосферная инверсия - это оптимальное сочетание атмосферных наблюдений, модели атмосферного переноса и химии, предварительной оценки источников и поглотителей метана и их неопределенностей, чтобы получить улучшенные оценки источников и поглотителей и их неопределенности. Теоретический принцип инверсии метана подробно изложен в Дополнении (раздел S2), а обзор различных методов, применяемых к метану, представлен в Houweling et al. (2017).

Мы рассматриваем ансамбль инверсий, собирающих различные модели химического переноса, различающиеся по вертикальному и ~~кризному~~ разрешению, метеорологическому форсингу, схемам адвекции и конвекции, а также перемешиванию пограничного слоя. Включение этих различных систем является консервативным подходом, который позволяет нам охватить различные потенциальные неопределенности инверсии, среди которых перенос модели, вопросы настройки и зависимость от предшествующих факторов. Общие характеристики систем инверсии приведены в Таблице 4. Более подробную информацию можно найти в документах, на которые даны ссылки, и в Приложении. Каждой группе было предложено предоставить оценки потоков в сетке за период 2000-2017 годов, используя либо поверхностные, либо спутниковые данные, но никаких дополнительных ограничений не накладывалось, так что каждая группа могла использовать предпочтительную систему инверсии. Набор предварительных распределений выбросов был построен на основе самых последних кадастров или оценок на основе моделей (см. Приложение), но его использование не было обязательным (Таблица S6). Этот подход соответствует оценке потоков, но не сравнительному анализу моделей, так как протокол был не слишком строгим. Оценка апостериорной неопределенности требует много времени и компьютерных ресурсов, особенно для подходов 4D-Var и методов Монте-Карло. Постериорная неопределенность была предоставлена только двумя группами, и оказалось, что она ниже, чем разброс по ансамблю. Действительно, химико-транспортные модели различаются в межполушарном переносе, профилях стратосферного метана и распределении ОН, которые не полностью учитываются в индивидуальной апостериорной неопределенности. В результате мы не используем апостериорные неопределенности, представленные этими двумя группами, а сообщаем минимальный-максимальный диапазон среди различных нисходящих подходов.

В данном исследовании использовались девять систем инверсии атмосферы с использованием глобальных эйлеровых моделей переноса по сравнению с восемью в работе Saunois et al. (2016). Каждая система инверсии обеспечивала одну или несколько симуляций, включая тесты чувствительности, варьирующие

ассимилированные наблюдения (поверхностные или спутниковые) или настройки инверсии. Это представляет собой в общей сложности 22 прогона инверсии с различным временным охватом: в целом 2000-2017 гг. для наблюдений на поверхности и 2010-2017 гг. для инверсий на основе GOSAT (Таблицы 4 и S6). В плохо наблюдаемых регионах поверхностные инверсии сверху вниз могут опираться на предварительные оценки и привносить мало или вообще не привносить никакой дополнительной информации для ограничения (часто) пространственно перекрывающихся выбросов (например, в Индии, Китае). Кроме того, напомним, что многие нисходящие системы решают только для суммарных потоков на поверхности или для некоторых категорий, которые могут отличаться от категорий ПГП. Когда многочисленные тесты на чувствительность

были выполнены, использовалось среднее значение этого ансамбля, чтобы не перегружать одну конкретную инверсионную систему. Следует также отметить, что некоторые спутниковые инверсии фактически являются комбинированными спутниковыми и поверхностными инверсиями, поскольку в них одновременно используются спутниковые повторные испытания и поверхностные измерения (Alexe et al., 2015; Bergamaschi et al., 2013; Houweling et al., 2014). Тем не менее, эти инверсии по-прежнему называются спутниковыми инверсиями.

Каждая группа предоставила карты месячных выбросов в виде сетки как для предшествующих, так и для последующих сумм, а также для источников по категориям (см. категории в Разделе 2.3). Результаты представлены в Разд. 5. Атмосферные поглотители, полученные с помощью нисходящих подходов, были представлены для этого бюджета и сравниваются со значениями, представленными в Kirschke et al. (2013). Не все обратные системы сообщают о своих химических поглотителях; в результате глобальный дисбаланс массы для нисходящего бюджета определяется как разница между суммарными источниками и суммарными поглотителями для каждой модели, когда сообщались оба потока.

## 5 Бюджет метана: сравнение сверху вниз и снизу вверх

### 5.1 Глобальный бюджет метана

#### 5.1.1 Глобальные общие выбросы метана

В глобальном масштабе общие выбросы, рассчитанные по результатам 22 инверсий,

составляют  $576 \text{ Тг CH}_4 \text{ г}^{-1}$  [550-594] за десятилетие 2008-2017 гг. (Таблица 3), с самым высоким средним значением выбросов  $596 \text{ Тг CH}_4 \text{ г}^{-1}$  [572-614] за 2017 год. Глобальные выбросы за 2000-2009 гг. ( $547 \text{ Тг CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ) согласуются с данными Saunio et al. (2016), а диапазон для глобальных выбросов в 2000-2009 гг.  $524\text{-}560 \text{ Тг CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  соответствует диапазону, указанному в работе Saunio et al. (2016) (535-569), хотя ансамбль

обратных систем, внесших вклад в этот бюджет, отличается от бюджета Saunio et al. (2016). Действительно, только шесть обратных систем из девяти рассмотренных здесь (Таблица S7) ранее внесли свой вклад в бюджет Saunio et al. (2016). Представленный диапазон дает минимальные и максимальные значения среди исследований и не отражает полную неопределенность каждого отдельного случая. Кроме того, большинство нисходящих моделей используют одно и то же распределение ОН из эксперимента TRANSCOM (Patra et al., 2011), что приводит к довольно ограниченному глобальному бюджету, вероятно, объясняя довольно низкий диапазон (10 %) по сравнению с восходящими оценками (см. ниже).

Оценки, полученные с помощью рассматриваемых здесь подходов "снизу вверх", значительно отличаются от результатов "сверху вниз", при этом глобальные выбросы почти на %30 больше -  $737 \text{ Тг CH}_4 \text{ в год}^{-1}$  [594-881] за 2008-2017 годы (Таблица 3). Более того, диапазон, оцененный с помощью подходов "снизу вверх", не перекрывается

с оценками "сверху вниз". Оценки "снизу вверх" даются суммой отдельных антропогенных и природных процессов, без каких-либо ограничений на общую сумму. За период 2000-2009 гг. расхождение между оценками "снизу вверх" и "сверху вниз" составило %30 от оценок "сверху вниз" в

<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561->

2017 гг.

**Таблица Нисходящие4.** исследования, использованные в нашем анализе, с указанием их вклада в десятилетние и годовые оценки. В случае десятилетних оценок нисходящие исследования должны предоставить по крайней мере годных данных за десятилетие, чтобы внести свой вклад в оценку.

Модель	Учреждение	Используемое наблюдение	Период времени	Количество инверсий	2000-2009	2008-2017	2017	Ссылки
CarbonTracker	FMI	Поверхностные станции	2000-2017	1	y	y	y	Цурута и др. (2017)
Европа CH <sub>4</sub> CarbonTracker	FMI	ГОСАТ НИЭС L2 v2.72	2010-2017	1	n	y	y	Цурута и др. (2017)
Европа CH <sub>4</sub> GELCA	НИЭС	Поверхностные станции	2000-2015	1	y	y	n	Ишизава и др. (2016)
LMDz-PYVAR	LSCE/CEA	Поверхностные станции	2010-2016	2	n	y	n	Инь и др. (2015)
LMDz-PYVAR	LSCE/CEA	GOSAT Leicester v7.2	2010-2016	4	n	y	n	Инь и др. (2015)
LMDz-PYVAR	LSCE/CEA	GOSAT Leicester v7.2	2010-2017	2	n	y	y	Zheng et al. (2018b, a)
MIROC4-ACTM	JAMSTEC	Поверхностные станции	2000-2016	1	y	y	n	Патра и др. (2016, 2018)
НИКАМ-ТМ	НИЭС	Поверхностные станции	2000-2017	1	y	y	y	Niwa и др. (2017a, b)
NIES-ТМ-FLEXPART	НИЭС	Поверхностные станции	2000-2017	1	y	y	y	Максютов и др. (2020); Wang et al. (2019a)
NIES-ТМ-FLEXPART	НИЭС	GOSAT NIES L2 v2.72	2010-2017	1	n	y	y	Максютов и др. (2020); Wang et al. (2019a)
ТМ5-CAMS	TNO/VU	Поверхностные станции	2000-2017	1	y	y	y	Бергамаски и др. (2010, 2013); Пандей и др. (2016); Segers и Houwelling (2018)
ТМ5-CAMS	TNO/VU	GOSAT ESA/CCI v2.3.8 (в сочетании с наблюдения за поверхностью)	2010-2017	1	n	y	y	Бергамаски и др. (2010, 2013); Пандей и др. (2016); Segers и Houwelling (2018)
ТМ5-4DVAR	ЕС-JRC	Поверхностные станции	2000-2017	2	y	y	y	Бергамаски и др. (2013, 2018)
ТМ5-4DVAR	ЕС-JRC	GOSAT OCPР v7.2 (в сочетании с поверхностью наблюдения)	2010-2017	2	n	y	y	Бергамаски и др. (2013, 2018)
ТОМСАТ	Университет Лидса	Поверхностные станции	2003-2015	1	n	y	n	МакНортон и др. (2018)

Saunois et al. (2016) (167 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>); это снижение незначительно (теперь 156 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> за тот же период 2000-2009 гг.). Это снижение обусловлено (1) улучшением

согласие в антропогенных выбросах (разница между "сверху вниз" и "снизу вверх" уменьшается от до 19Тг2 СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>),

(2) снижение оценбк некоторых природных источников, помимо водно-болотных угодий, на основе последних литературных данных (на 7 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> из геологических источников, на 8 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> из диких животных и на 3 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> из распределения лесных пожаров на сжигание биомассы и биотоплива; см. таблицу 3), и (3) снижение на 35 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> в восходящих оценках выбросов водно-болотных угодий с помощью моделей при исключении озер и площадок.

умирает как водно-болотные угодья (см. раздел

ниже5.1.2). Эти сокращения (70 тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>) в восходящем бюджете частично компенсируются пересмотренными выбросами пресной воды с более высокими значениями (37 тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>), полученными в результате интеграции повторного исследования выбросов озер, прудов и водохранилищ (DelSon-...

tro et al., 2018; см. разд. 3.2.2) и включение выбросов эстуария в этот бюджет (4 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>). В целом, диапазон неопределенности некоторых природных выбросов уменьшился в данном исследовании по сравнению с Kirschke et al. (2013) и Saunois et al. (2016), например, для океанов, термитов, диких животных и геологических источников. Однако неопределенность в

глобальный бюджет остается высоким из-за большого диапазона, повторно установленного для выбросов из пресноводных систем. Тем не менее, как отмечается в Kirschke et al. (2013), такие большие глобальные выбросы, полученные с помощью восходящих подходов, не согласуются с нисходящими оценками, которые основаны на нагрузке ОН, ограниченной атмосферными наблюдениями метилхло-рида, и, скорее всего, являются завышенными. Эта переоценка, вероятно, является результатом ошибок, связанных с увеличением масштаба местных измерений и двойным учетом некоторых природных источников (например, болот, других внутренних водных систем; см. раздел 5.1.2).

#### 5.1.2 Глобальные выбросы метана по категориям

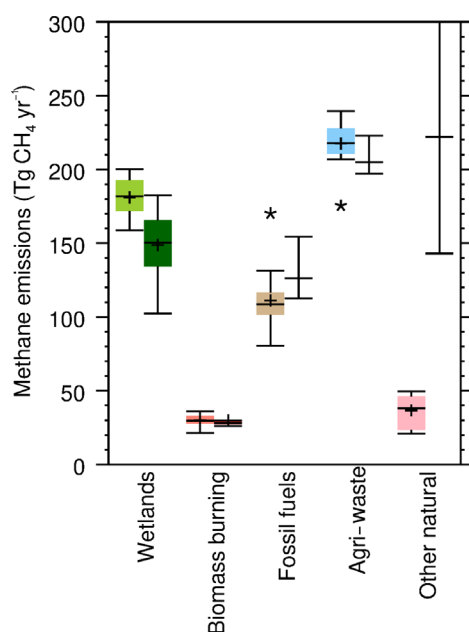
Earth Syst. Sci. Data, 1561-162312,,  
2020

#### Источников

Глобальные выбросы метана из природных и антропогенных источников (см. раздел 2.3) за 2008-2017 годы представлены на рис. 5 и 6 и в таблице 3. Согласно нисходящим оценкам, около 60 % от общего объема выбросов приходится на антропогенную деятельность (диапазон 55-70 %) и 40 % - на природные выбросы. Поскольку природные выбросы, оцененные по восходящим методикам, намного больше, соотношение антропогенных и природных выбросов почти не 1, согласуется с данными ледяных кернов. Преобладающая в настоящее время роль антропогенных источников эмиссии метана согласуется с данными ледяных кернов и полностью подтверждается имеющимися данными.

2020<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561->





**Рисунок** Глобальные выбросы метана **5**. от пяти широких категорий

(см. раздел 2.3) за десятилетие 2008-2017 гг. для нисходящих моделей инверсии (левые светлые квадратные диаграммы,  $\text{Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ) и для восходящих моделей и кадастров (правые темные цветные квадратные диаграммы). Медиана значение и первый и третий квартили представлены в ячейках. Усики представляют минимальные и максимальные значения, когда предполагаемые выбросы удалены (см. раздел 2.2). Подозрительные выбросы отмечены звездочками, если они существуют. Для восходящих оценок, за исключением выбросов с водно-болотных угодий, нижние квартили недоступны. Средние значения представлены символами " "; это значения, представленные в таблице 3.

ледяных кернов и атмосферных записей метана. Эти данные показывают, что атмосферный метан колебался около 700 ppb в течение последнего тысячелетия, а затем увеличился в 2.61800 ppb с доиндустриальных времен. Учитывая снижение среднего времени жизни в индустриальный период, Пратер и др. (2012) на основе этих данных оценили объем выбросов в атмосферу в 2010 году в 554 56  $\text{Tg CH}_4$ , из которых около 64 % (352 45  $\text{Tg CH}_4$ ) было антропогенного происхождения, что соответствует диапазону наших оценок сверху вниз.

Для водно-болотных угодий в 2008-2017 гг. нисходящие и восходящие оценки 181  $\text{Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  (диапазон 159-200) и 149  $\text{Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  (диапазон 102-182), соответственно, статистически согласуются. Средние выбросы водно-болотных угодий, рассчитанные снизу вверх для

за период 2000-2009 гг. в данном исследовании меньше, чем у Saunois et al. (2016). И наоборот, текущие 2009средние оценки водно-болотных угодий за период 2000-2009 гг. по модели "сверху вниз" больше, чем у Saunois et al. (2016) (Таблица 3). Сокращение выбросов от водно-болотных угодий в моделях "снизу вверх"

связано с обновленным набором данных о площади водно-болотных угодий (WAD2M; см. раздел 3.2.1). Оценки выбросов с водно-болотных угодий по модели "сверху вниз" в среднем выше, но диапазон сократился на 50% по сравнению с данными Saunois et al. (2016) за 2000-2009 гг. В оценках "снизу вверх" амплитуда диапазона выбросов 102-179 аналогична

по сравнению с данными Saunois et al. (2016) (151-222 для 2000-2009 гг.), и сузилась на треть по сравнению с предыдущими оценками Melton et al. (2013) (141-264) и Kirschke et al. (2013) (177-284). Здесь и в работе Saunois et al. (2016) модели поверхности суши были принудительно нагружены одинаковыми показателями протяженности водно-болотных угодий и климатического воздействия (см. раздел 3.2.1) в отличие от Melton et al. (2013) и Kirschke et al. (2013). Это позволяет предположить, что различия в площади водно-болотных угодий объясняют примерно треть (30 % - 40 %) прежнего диапазона оценок выбросов глобальных естественных водно-болотных угодий. Оставшийся диапазон объясняется различиями в структурах и параметрах моделей. В данном исследовании оценки выбросов водно-болотных угодий "снизу вверх" и "сверху вниз" отличаются в большей степени

( $\text{Tg}30 \text{ год}^{-1}$  для среднего значения), чем в Saunois et al. (2016) ( $\text{Tg}17 \text{ год}^{-1}$ ), из-за уменьшения оценок от восходящих моделей и увеличения оценок от нисходящих моделей.

Естественные выбросы из пресноводных систем не включены в предварительные потоки, входящие в нисходящие подходы. Однако выбросы от этих незаболоченных систем могут быть учтены в апостериорных оценках нисходящих моделей, поскольку эти два источника близки и, вероятно, перекрываются при довольно грубом разрешении нисходящих моделей. В бюджете "сверху вниз" естественные водно-болотные угодья составляют в среднем 30 % от общих выбросов метана, но только 22 % в бюджете "снизу вверх" (из-за более высоких общих предполагаемых выбросов). Ни восходящий, ни нисходящий подходы, включенные в данное исследование, не указывают на значительные изменения в выбросах водно-болотных угодий между двумя десятилетиями 2000-2009 и 2008-2017 гг. в глобальном масштабе.

Для других природных выбросов расхождение между бюджетами сверху вниз и снизу вверх является наибольшим для общего объема природных выбросов, который составляет  $\text{Tg}371 \text{ CH}_4$  в год  $^{-1}[245-488]$  для

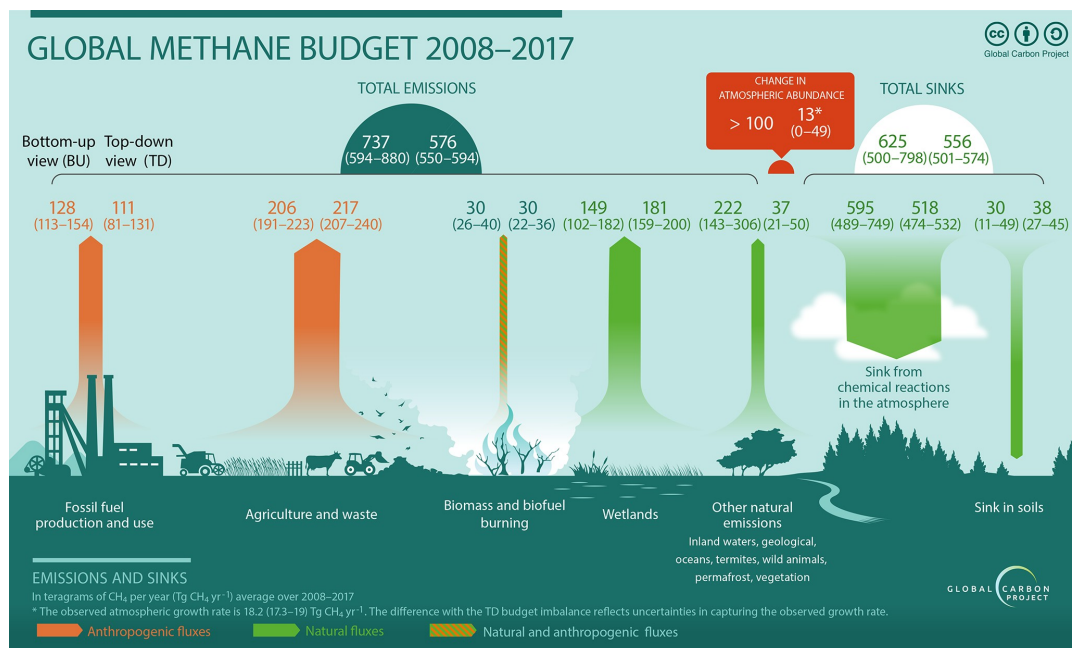
снизу вверх и только  $\text{Tg}218 \text{ CH}_4$  в год  $^{-1}[183-248]$  для сверху вниз.

снизились за десятилетие 2008-2017 гг. Это расхождение происходит

от оценок в "других природных" выбросах (пресноводные системы, геологические источники, термиты, океаны и мерзлота). Действительно, за десятилетие 2008-2017 гг. нисходящие инверсии показывают, что выбросы на незаболоченных землях составляют  $37 \text{ Tg CH}_4$  в год  $^{-1}[21-50]$ , тогда как сумма отдельных восходящих выбросов составляет  $222 \text{ Tg CH}_4$  в год  $^{-1}[143-306]$ . Атмосферные инверсии дают примерно такое же количество выбросов за десятилетие 2000-2009 годов, как и за 2008-2017 годы,

что почти вдвое меньше значения, представленного в работе Saunois et al. (2016) ( $68 [21-130] \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ). Это уменьшение объясняется либо (1) более последовательным способом учета других природных выбросов в различных инверсионных системах, либо (2) различием в ансамбле нисходящих инверсий.

версии, представленные здесь. Стоит отметить, что, не имея продуктов grid- ded для использования в своих предварительных сценариях, большинство моделей "сверху вниз" включают в свои предварительные сценарии только выбросы океана и термитов. Некоторые из них теперь включают геологические источники, но ни одна из них не включает выбросы пресной воды или вечной мерзлоты в свои предварительные потоки и, следовательно, в свои апостериорные оценки. Что касается бюджета "снизу вверх", то два основных вклада в большую общую сумму "снизу вверх" - это пресные воды (75%) и геологические выбросы (15%), оба из которых имеют большую неопределенность и отсутствие пространственно явного представления с помощью гриддированных продуктов, доступных на сегодняшний день, для пресных вод, например...



**Рисунок 6.** Глобальный бюджет метана на десятилетие 2008–2017 гг. Как восходящие (слева), так и нисходящие (справа) оценки (Тг СН<sub>4</sub> г/г<sup>1</sup>) представлены для каждой категории выбросов и поглотителей, а также для общих выбросов и общих поглотителей. Выбросы от сжигания биомассы и биотоплива представлены здесь как природные и антропогенные выбросы, в то время как в таблицах и тексте бюджета (раздел 3.1.5) они полностью включены в антропогенные выбросы.

ре. Из-за этого расхождения категория прочих природных выбросов составляет %7 от общего объема выбросов в бюджете сверху вниз, но до %25 в бюджете снизу вверх.

Геологические выбросы связаны с относительно большой неопределенностью, а выбросы от морских просачиваний все еще широко обсуждаются (Thornton et al., 2020). Однако, суммируя все из ископаемых источников, связанных с углекислым газом (включая антропогенные выбросы), приводит к суммарному выбросу Тг173 СН<sub>4</sub> в 4год<sup>-1</sup>[131– 219] в 2008–2017 годах, что составляет около 30 % от глобальных выбросов метана сверху вниз и %23 от общего объема выбросов снизу вверх.

глобальная оценка. Эти результаты согласуются со значением % 30 вклада ископаемого СН<sub>4</sub> в глобальные выбросы, полученным на основе<sup>14</sup> изотопного анализа атмосферы (Etiore и др., 2008; Lassey и др., 2007b). Этот общий объем выбросов ископаемого топлива, полученный с помощью восходящих подходов, хорошо согласуется с оценкой Шви на<sup>13</sup>основе С.

etzke et al. (2016) на уровне Тг19232 СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>. Неопределенности в восходящих оценках природных выбросов приводят к вероятности переоценили общий объем выбросов метана, что привело к более низкому вкладу по сравнению с данными Lassey et al. (2007b). Все негеологические и не пресноводные категории источников на суше (дикие животные, термиты, вечная мерзлота) были оценены

ниже, чем в Kirschke et al. (2013) и Saunois et al. (2016) и вносят в глобальные выбросы всего 13 Тг СН<sub>4</sub> в 4год<sup>-1</sup>[4–19]. С точки зрения нисходящего анализа, сумма всех природных выбросов в атмосферу в течение года составляет всего лишь 1 тг СН<sub>4</sub> в год.

ральных источников является более надежным, чем разделение между водно-болотными угодьями и другими природными источниками. Более надежное ограничение разделения выбросов метана между водно-болотными угодьями и пресноводными системами, включая выбросы от таяния вечной мерзлоты,

может быть ключом к согласованию нисходящего и восходящего бюджета на природные источники. Кроме того, включение всех известных пространственно-временных распределений природных выбросов в предварительные потоки "сверху вниз" стало бы шагом вперед для последовательного сравнения ~~прид~~ антропогенных общих выбросов между подходами "сверху вниз" и "снизу вверх".

Общие антропогенные выбросы за период 2008-2017 гг. были оценены как статистически согласованные между "сверху вниз" (359 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>, диапазон 336-376) и "снизу вверх".

(366 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>, диапазон 349-393). Разделение антропогенных выбросов между сельским хозяйством и отходов, добычи и использования ископаемого топлива, сжигания биомассы и биотоплива также демонстрирует хорошую согласованность между подходами "сверху вниз" и "снизу вверх", хотя подходы "сверху вниз" предполагают меньшие выбросы от ископаемого топлива и большие выбросы от сельского хозяйства и отходов, чем оценки "снизу вверх" (таблица и Зрис. и 56).

В 2008-2017 гг. на сельское хозяйство и отходы приходилось 217 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [207-240] для бюджета "сверху вниз" и 206 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [191-223] для бюджета "снизу вверх". Выбросы ископаемого топлива составили 111 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [81- 131] для бюджета "сверху вниз" и 128 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [113- 154] для бюджета "снизу вверх". Выбросы от сжигания биомассы и биотоплива составили 30 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [22-36] для бюджета сверху вниз и 30 Тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup> [26-40] для бюджета снизу вверх. Выбросы метана от биотоплива основываются на очень немногих оценках, полученных в настоящее время.

рентабельно (Wuebbles and Hayhoe, 2002). Хотя биотопливо является небольшим источником в глобальном масштабе (12 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>), для правильной оценки неопределенности необходимо больше оценок. В целом

~

при инверсии сверху вниз глобальная доля общих выбросов для различных категорий источников составляет 38 % для сельского хозяйства и отходов, 19 % для ископаемого топлива и 5 % для сжигания биомассы и биотоплива. За исключением выбросов биотоплива, неопределенность, связанная с глобальными антропогенными выбросами, меньше, чем у природных источников, но с асимметричным распределением неопределенности (среднее значение значительно отличается от медианы). Относительное согласие между подходами "сверху вниз" и "снизу вверх" может указывать на ограниченную способность инверсии разделять выбросы, поэтому к ней следует относиться с осторожностью. Действительно, в плохо наблюдаемых регионах инверсии "сверху вниз" опираются на предварительные оценки и практически не дают дополнительной информации для ограничения (часто пространственно перекрывающихся) выбросов (например, в Индии, Китае). Кроме того, поскольку многие нисходящие системы решают для суммарных потоков на поверхности или для некоторых категорий, которые могут отличаться от категорий ППП, их апостериорное разделение опирается на предварительные оценки между категориями, которые определяются с помощью восходящих кадастров.

### 5.1.3 Глобальный бюджет общих поглотителей метана

Для нисходящих оценок химическое удаление СН из атмосферы оценивается в 518 тг СН в год<sup>-1</sup> за период 2008-2017 гг. с неопределенностью около 5 % (диапазон 474-532 тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>). Все обратные модели учитывают окисление СН<sub>4</sub> с помощью ОН и О(<sup>1</sup>D), а некоторые включают стратосферное окисление.

окисление хлора (Таблица S6). Кроме того, большинство моделей "сверху вниз" используют распределения ОН из эксперимента TRANSCOM (Patra et al., 2011), что, вероятно, объясняет довольно низкий диапазон оценок по сравнению с оценками "снизу вверх" (см. ниже). Различия между моделями переноса влияют на химическое удаление СН<sub>4</sub>, что приводит к различным скоростям химической потери даже при одинаковом распределении ОН. Однако неопределенности в распределении и величине ОН (Zhao et al., 2019) не учитываются в нашем исследовании, хотя это может привести к значительному изменению химического поглотителя и затем к полученным задним числом выбросам через обратный процесс (Zhao et al., 2020). Химический сток составляет более 90 % от общего стока, остальное приходится на долю

на поглощение почвой (38 [27-45] тг СН в год<sup>-1</sup>). В половине моделей сверху вниз используется климатологическая величина поглощения почвой (37-38 тг СН в год<sup>-1</sup>) и распределение из Ridgwell и др. (1999), в то время как в половине моделей используется

оценка из

биогеохимической модели VISIT (Ito and Inatomi, 2012), которая рассчитала изменяющееся поглощение от 31 до 38 тг СН в год<sup>-1</sup> за период 2000-2017 гг. Эти оценки поглощения, использованные в качестве предварительной оценки в инверсиях, в целом выше, чем средняя оценка почвенного поглощения, рассчитанная с помощью восходящих моделей (30 тг СН в год<sup>-1</sup>, раздел 3.3.4).

Для восходящих оценок общая потеря химических веществ для

2000-х годов, о которых сообщается здесь, составляет 595 тг СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>, с погрешностью в 22 % (тг 130 СН<sub>4</sub> г<sup>-1</sup>). Различия в химических схемах (особенно в стратосфере) и в летучих веществах.

обработка органическими соединениями, вероятно, объясняет большую часть расхождений между моделями (Zhao et al., 2019).

## 5.2 Широтный бюджет метана

### 5.2.1 Широтный бюджет общих выбросов метана

Широтная разбивка выбросов, полученная на основе инверсии атмосферы, показывает преобладание тропических выбросов - 368 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> [337-399], что составляет 64 % от глобального объема (Таблица 5). В общей сложности 32 % выбросов приходится на средние широты (186 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> [166-204]) и

4 % приходится на высокие широты (выше северной широты 60°). Диапазоны вокруг средние широтные выбросы больше, чем для глобального

источников метана. В то время как неопределенность "сверху вниз" составляет около 5 % в глобальном масштабе, она увеличивается до 10% для тропиков и северных средних широт и более чем до 25 % в

северных высоких широтах (за 2008-2017 годы, Таблица 5). Как нисходящий, так и восходящий подходы последовательно показывают, что десятилетние выбросы метана увеличились примерно на 20 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> в тропиках и на 7-18 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> в северных средних широтах в период с 2000-2009 гг. по 2008- гг.

2017, но не в северных высоких широтах.

В 2010-2017 гг. в глобальном масштабе спутниковые инверсии показывают практически идентичные выбросы с наземными инверсиями (разница составляет 3 [0-7] Тг СН<sub>4</sub> г.<sup>-1</sup>) при последовательном сравнении поверхностных и спутниковых инверсий для каждой системы. Эта разница намного меньше, чем диапазон, полученный между различными системами (диапазон 20 Тг СН<sub>4</sub> г.<sup>-1</sup>. при использовании поверхностных или спутниковых инверсий). Этот результат отражает, что различия в атмосферном переносе между системами, вероятно, оказывают большее влияние, чем типы наблюдений.

ассимилированных на оцененных глобальных выбросах. В работе Saunio et al. (2016) спутниковые инверсии показали на 12 Тг более высокие глобальные выбросы метана по сравнению с поверхностными инверсиями. Различия в ансамбле, использование только данных GOSAT и обработка спутниковых данных в каждой системе по сравнению с Saunio et al. (2016) объясняют контрастные результаты.

Как и ожидалось, региональные распределения предполагаемых излучений отличаются в зависимости от характера используемых наблюдений (спутниковые или поверхностные). Наибольшие различия (спутниковые инверсии минус инверсии на

поверхности) наблюдаются на территории в тропическом регионе - от 13 до 26 Тг СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup> (90 °юг - север 30°), и в северных средних широтах (от 2015 Тг-СН<sub>4</sub> в год<sup>-1</sup>)<sup>+</sup> Спутниковые данные дают более четкие представления о потоках в тропических регионах, чем данные с поверхности, что обусловлено следующим гораздо большему пространственному охвату. Поэтому неудивительно, что различия между этими двумя типами наблюдений обнаруживаются в тропическом диапазоне и, следовательно, в северных и южных средних широтах для баланса общих выбросов, что влияет на градиент выбросов с севера на юг. Однако региональные модели этих различий не совпадают в различных инверсионных системах. Действительно, некоторые системы обнаружили более высокие выбросы в тропиках при использовании GOSAT вместо sur-.

± ±

±

2017 гг.

**Таблица 5.** Глобальные и широтные суммарные выбросы метана ( $\text{Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ ), как десятилетние средние (2000-2009 и 2008-2017) и для года для 2017, данной работы с использованием подходов "снизу вверх" и "сверху вниз". Глобальные выбросы за 2000-2009 гг. также сравниваются с данными Saunois et al. (2016) и Kirschke et al. (2013) при использовании подходов "сверху вниз" и "снизу вверх". Широтные суммарные выбросы за 2000-2009 гг. сравниваются с данными Saunois et al. (2016) только для исследований "сверху вниз". Погрешности представлены в виде диапазона [min-max]. Различия  $\text{Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$  в итоговых значениях могут иметь место из-за ошибок округления.

Период	2000-2009		2008-2017		2017	
Подход	Снизу вверхСверху вниз		Снизу вверхСверху вниз		Снизу вверхСверху вниз	
<b>Глобальный</b>						
Эта работа	703	[566-842]547[524-560]	737	[594-881]576[550-594]	747	[602-896]596[572-614]
Saunois и др. (2016)	719	[583-861]552[535-566]		--		--
Кишке и др. (2013)	678	[542-852]553[526-569]		--		--
<b>90° S-30° N</b>						
Эта работа	408	[322-532]346[320-379]	430	[338-547]368[337-399]	434	[343-568]383[351-405]
Saunois и др. (2016)		356		--		--
<b>30-60° N</b>						
Эта работа	252	[202-342]178[159-199]	267	[218-349]186[166-204]	272	[223-351]188[171-209]
Saunois и др. (2016)		176		--		--
<b>60-90° N</b>						
Эта работа	42	[28-70]23[17-32]	43	[26-72]22[17-29]	40	[24-70]24[21-28]
Saunois и др. (2016)		20		--		--

наблюдений, в то время как другие обнаружили обратное. Это различие между системами может зависеть от того, применяется или нет коррекция смещения к спутниковым данным, основанным на наблюдениях на поверхности, а также от моделируемых горизонтальных и вертикальных модельных переносов в тропосфере и стратосфере.

### 5.2.2 Широтные выбросы метана по категориям источников

Анализ широтного бюджета метана по категориям источников (рис. 7) может быть выполнен как в рамках восходящего, так и нисходящего подходов, но с ограничениями. При восходящем подходе некоторые природные выбросы (пока) недоступны в региональном масштабе (в основном внутренние воды). Поэтому для выбросов пресной воды мы применили широтное распределение Bastviken и др. (2011) к глобальным значениям. Более подробная информация представлена в Дополнении, чтобы объяснить, как обрабатывались различные источники "снизу вверх". В отношении "сверху вниз", как уже отмечалось, разделение

выбросов по категориям источников следует рассматривать с осторожностью. В самом деле, использование только наблюдений за атмосферным метаном для определения выбросов метана делает это разделение в значительной степени зависящим от предшествующих выбросов. Однако различия в пространственной структуре и сезонности выбросов могут быть использованы для распределения выбросов различных категорий по наблюдениям за атмосферным метаном (инверсии, решающие проблемы различных категорий источников, см. в разделе 2.3).

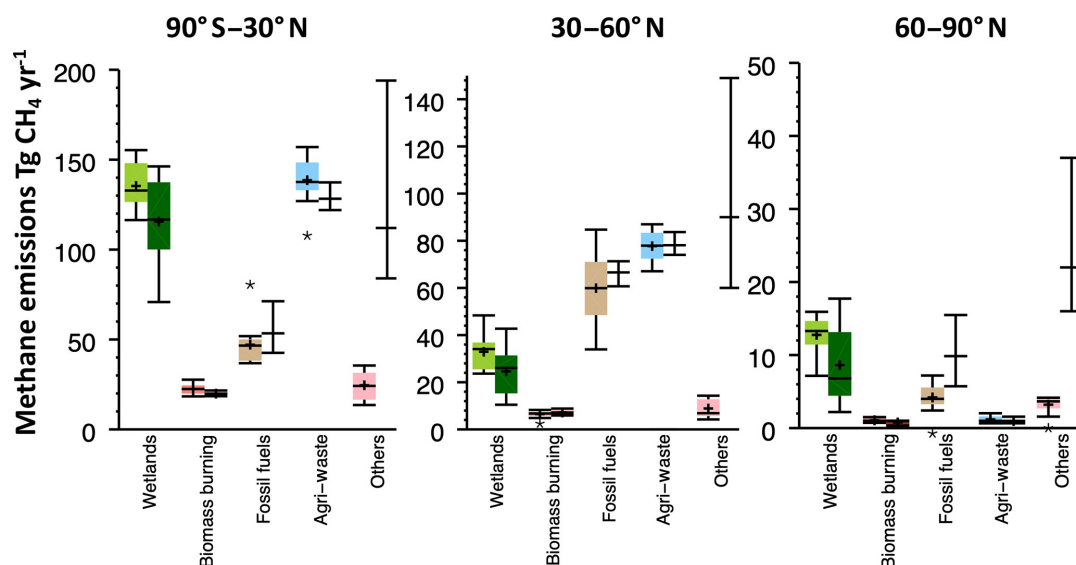
Сельское хозяйство и отходы являются крупнейшими источниками выбросов метана в тропиках (130 [121-137] тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для бюджета "снизу вверх" и 139 [127-157] тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для бюджета "сверху вниз", около %38 от общих выбросов метана).

в этом регионе). Однако выбросы водно-болотных угодий почти такие же большие: [11671-146] тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для восходящего бюджета и [135116-155] тг  $\text{CH}_4 \text{ г}^{-1}$  для нисходящего бюджета. Одна из нисходящих моделей предполагает более низкие выбросы от сельскохозяйственных угодий.

сельского хозяйства и отходов по сравнению с ансамблем, но предполагает более высокие выбросы от ископаемого топлива: это напоминает о необходимой осторожности при обсуждении секторального разделения при использовании нисходящих инверсий. Антропогенные выбросы доминируют в средних широтах, с наибольшим вкладом выбросов от сельского хозяйства и отходов (42 % от общих выбросов), за которыми следуют выбросы от ископаемого топлива (31 % от общих выбросов). В бореальных регионах в основном преобладают выбросы от водно-болотных угодий (60 % от общего объема выбросов).

Неопределенность в отношении выбросов с водно-болотных угодий больше в восходящих моделях, чем в нисходящих, в то время как неопределенность в отношении антропогенных выбросов больше в нисходящих моделях, чем в кадастрах. Большая неопределенность в выбросах с тропических болот (65%) обусловлена значительными региональными различиями между восходящими моделями поверхности суши. Хотя они используют одну и ту же площадь водно-болотных угодий, их реакция с точки зрения плотности потока показывает различную чувствительность к температуре, давлению водяного пара, осадкам и радиации.





**Рисунок 7.** Широтные выбросы метана из пяти широких категорий (см. раздел 2.3) за десятилетие 2008-2017 гг. для нисходящих инверсионных моделей (левые светло-окрашенные квадратные диаграммы,  $\text{Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ) и для восходящих моделей и кадастров (правые темно-окрашенные квадратные диаграммы). Медианное значение и первый и третий квартили представлены в ячейках. Усики представляют минимальные и максимальные значения, когда предполагаемые выбросы удалены (см. раздел 2.2). Предполагаемые выбросы отмечены звездочками, как показано на рисунке. Для восходящих оценок, за исключением выбросов с водно-болотных угодий, нижние квартили недоступны. Средние значения представлены символами "+"; это значения, представленные в таблице 6.

**Таблица 6.** Широтные выбросы метана в тераграммах  $\text{CH}_4$  в год за последнее десятилетие 2008-2017 гг. на основе нисходящего и восходящего подходов. Погрешности представлены в виде диапазона [min-max] по данным исследований. Различия в общих суммах в  $\text{Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$  в год могут возникать из-за ошибок округления. Оценки антропогенного воздействия снизу вверх основаны только на грид-продуктах EDGARv4.3.2, GAINS и CEDS.

Широтная полоса	90° S-30° N		30-60° N		60-90° N	
	Снизу вверх	Сверху вниз	Снизу вверх	Сверху вниз	Снизу вверх	Сверху вниз
Природные источники	228 [155-340]	160 [130-189]	115 [70-192]	42 [29-54]	31 [18-55]	16 [11-20]
Естественные водно-болотные угодья	116 [71-146]	135 [116-155]	25 [10-43]	33 [24-48]	9 [2-18]	13 [7-16]
Прочее натуральное	112 [84-194]	25 [14-36]	90 [60-149]	9 [4-14]	22 [16-37]	3 [2-4]
Антропогенные источники	202 [183-217]	208 [186-229]	152 [148-157]	144 [117-170]	12 [8-14]	6 [2-10]
Сельское хозяйство и отходы	130 [121-137]	139 [127-157]	80 [77-84]	78 [67-87]	1 [1-1]	1 [1-2]
Ископаемое топливо	53 [43-71]	47 [37-52]	67 [61-71]	60 [34-85]	10 [6-15]	4 [2-7]
Сжигание биомассы и биотоплива	20 [18-22]	22 [18-28]	7 [6-9]	6 [5-8]	1 [0-1]	1 [1-1]
Сумма источников	430 [338-557]	368 [337-399]	267 [218-349]	186 [166-204]	43 [26-72]	22 [17-29]

Более региональные обсуждения были разработаны в Saunois et al. (2016) и обновлены в Stavert et al. (2020).

## 6 Будущее развитие, недостающие элементы и остающиеся неопределенности

В этом бюджете были выделены неопределенности в <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

отношении источников и поглотителей, оцененных по восходящему и нисходящему подходам, а также расхождения между двумя бюджетами. Также были выделены ограничения различных подходов. Четыре недостатка бюджета метана уже были определены в Kirschke et al. (2013) и Saunois et al. (2016). Несмотря на достигнутый прогресс, они все еще актуальны и требуют принятия мер. Однако эти действия могут быть

различными.

временные рамки и стороны. Далее мы вновь рассмотрим четыре недостатка, или направления исследований, текущего бюджета метана: как каждый недостаток был исправлен с момента публикации Saunio et al. (2016), а затем приведем список рекомендаций, от более приоритетных до менее приоритетных, связанных с вовлеченными сторонами.

1. *К снижению высокой неопределенности в количестве метана, выделяемого водно-болотными угодьями и внутренними водными системами, и уменьшению проблемы двойного учета.*

Оставшиеся большие неопределенности убедительно свидетельствуют о необходимости проведения дополнительных исследований, объединяющих различные системы (водно-болотные угодья, пруды, озера, водохранилища, ручьи, реки, эстуарии и морские системы), чтобы избежать двойного учета, связать соответствующие выбросы с каждой категорией, но

2017 гг.

также для учета латеральных потоков. После публикации Saunois et al. (2016) несколько семинаров (например, Turner et al., 2019) и публикаций (например, Knox et al., 2019; Thornton et al., 2016a) способствовали реализации предыдущих рекомендаций и стратегий по устранению неопределенности в отношении выбросов метана, обусловленных болотами и другими пресноводными системами. Одним из достижений является снижение оценка (на  $\pm 20\%$ , т.е.  $\pm 35 \text{ CH}_4$  в  $\text{ггод}^{-1}$ ) глобальных выбросов с влажных земель, благодаря уточненному анализу площади водно-болотных угодий и модификации калибровки модели поверхности земли.

Изменения в методологии, которые могут быть включены в следующие выпуски бюджета метана, включают в себя

- калибровка моделей поверхности земли независимо от оценок сверху вниз,
- оценка моделей поверхности земли в сравнении с данными натуральных наблюдений, таких как FLUXNET- $\text{CH}_4$  (Knox et al., 2019), и
- использование различных продуктов для определения объема выбросов с водно-болотных угодий (например, WAD2M, GIEMS-2; Prigent et al., 2020).

Следующие шаги в краткосрочной перспективе для моделирования могут быть предложены сообществом биогеохимиков суши.

- Завершить глобальную классификацию насыщенных почв и затопленных поверхностей с высоким разрешением (обычно в десятки метров) на основе спутниковых данных (видимых и микроволновых), инвентаризации поверхности и знаний экспертов. Это доказанное распределение площадей предотвратит двойной учет водно-болотных угодий и других пресноводных систем при использовании моделей поверхности земли.
- Завершить текущие усилия по разработке основанных на процессах подходов к моделированию для оценки выбросов метана в пресных водах, включая боковые потоки, и избегая проблем масштабирования, как это недавно сделали Маавара и др.
- Использование собранных измерений потоков в рамках деятельности FLUXNET- $\text{CH}_4$  (Knox et al., 2019) для создания глобальных карт потоков на основе подходов машинного обучения (Peltola et al., 2019).

В долгосрочной перспективе развитие систем

измерения поможет улучшить оценки источников водно-болотных и внутренних вод и еще больше снизить неопределенность.

- Более систематические измерения в местах, отражающих разнообразные морфологии озер, позволят нам лучше понять краткосрочный биологический контроль над изменчивостью эбуллитизации, который остается малоизученным (Wik et al., 2016a, 2014).
- Расширение круглогодичного мониторинга потоков метана из различных природных источников (болот, пресных водоемов), дополненного экологическими метаданными (например, температура и влажность почвы, типы растительности, вода).

температура, кислотность, концентрация питательных веществ, NPP, плотность углерода в почве) позволит нам обогатить набор данных наблюдений FLUXNET-CH и лучше определить потоки метана и их изотопные сигнатуры в мдтх поверхности суши (Глаголев и др., 2011; Турецкий и др., 2014; Ganesan и др., 2019).

2. *К лучшей оценке неопределенностей для глобальных поглотителей метана в нисходящем и восходящем бюджетах.*

Используемые здесь обратные системы имеют те же предостережения, что и в работе Saunois et al. (2016) (то же поле OH, тот же вид прокси-метода для его оптимизации), что приводит к довольно напряженным атмосферным поглотителям и, следовательно, общим глобальным источникам метана. Хотя мы использовали современный ансамбль моделей химического транспорта (CTMs) и климато-химических моделей (CCMs) из CCMi (Chemistry-Climate Model Initiative, Morgenstern et al., 2017), неопределенность полученных химических потерь CH<sub>4</sub> из химико-климатических моделей остается на том же (большом) уровне по сравнению с предыдущим проектом ACCMIP (Lamarque et al., 2013). Nicely et al. (2017) обнаружили, что основной причиной больших различий в представлении времени жизни CH в СТМ являются различия в химических механизмах, реализованных в моделях. Используя ансамбль СТМ и ССМ из эксперимента CCMi, Zhao и др. (2019) определили, что диапазон потерь CH<sub>4</sub>, индуцированных ансамблем полей OH, эквивалентен примерно половине расхождений между наблюдениями и моделированием CH, вызванных текущими антропогенными кадастрами. Эти результаты подчеркивают необходимость сначала оценить, а затем улучшить модели атмосферного переноса и химии, особенно в вертикальном направлении, и интегрировать надежное представление полей OH в атмосферные модели.

Изменения в методологии, которые могут быть включены в следующий бюджет метана, включают в себя

- интегрирование тестов на чувствительность к предварительным потокам (использование обновленных потоков для природных источников, поглощение почвой) и
- интеграция тестов на чувствительность к химическим поглотителям (различные поля OH, включая межгодовую изменчивость).

Следующие шаги, в краткосрочной перспективе, могут включать разработки сообщества по моделированию атмосферы.

- Оценить влияние использования обновленных и изменяющихся оценок поглощения почвой,

особенно с учетом более теплого климата (Ni и Groffman, 2018). Действительно, для нисходящих моделей, решающих вопрос о чистом потоке CH<sub>4</sub> на поверхности, включение большей оценки поглощения почвой позволит увеличить выбросы и затем уменьшить неопределенность с восходящими оценками общих источников CH.

- Дальнейшее изучение реактивности воздушных посылок в химико-климатических моделях и определение новой диагностики для оценки смоделированного времени жизни CH.

- Разработать надежное представление трехмерных полей ОН для использования в обратных моделях: на основе химико-климатических моделей и с использованием коррекции из измерений, на основе многовидовых ассимилирующих систем (например, Gaubert et al., 2017; Miyazaki et al., 2015) или на основе простой параметризации, применяемой в масштабах сетки.
- Интегрировать вышеупомянутые различные потенциальные химические поля ОН, также включая межгодовую изменчивость, для оценки влияния на бюджет метана, следуя Zhao et al. (2020).

В долгосрочной перспективе другие параметры должны быть (лучше) интегрированы в нисходящие подходы, среди них

- величина потерь СН за счет окисления хлором в тропосфере, процесс, обсуждаемый в недавней литературе. Необходимо провести дополнительные модельные (Thanwerdas et al., 2019) и инструментальные исследования для уменьшения неопределенности этого потенциального дополнительного поглотителя, прежде чем включать его в нисходящие модели.

### 3. *К лучшему разделению источников и поглотителей метана по регионам и процессам с использованием нисходящих моделей.*

В этой работе мы сообщаем об инверсиях, ассимилирующих спутниковые данные GOSAT, которые позволяют получить больше ограничений, чем дают только наземные станции, особенно над тропическими континентами. Однако мы обнаружили, что спутниковые и наземные инверсии, а также различные системы инверсии не дают одинаковых выводов о региональном распределении потоков.

Изменения в методологии, которые могут быть включены в следующие выпуски бюджета метана, включают следующее.

- Интеграция GOSAT и GOSAT-2 (запущен в октябре 2018 года, с ожидаемой повышенной точностью и аккуратностью, JAXA, 2019) для спутниковой инверсии.
- Исследовать причины региональных различий, обусловленных обратными системами, на основе оценки моделей и более подробного вопросника для разработчиков моделей по обработке спутниковых данных (коррекция смещения) и стратосферных профилей.

Следующие шаги, в краткосрочной перспективе, могут включать в себя разработки, которые будут сделаны сообществом "сверху вниз".

<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

- Оценить преимущества использования новых спутниковых миссий с высоким пространственным разрешением и "возможностями визуализации" (Crisp et al., 2018) в глобальном масштабе, таких как прибор TROPOMI на спутнике Sentinel 5P, запущенном в октябре (2017Hu et al., 2018).
- Интегрировать недавно доступные обновленные грид-продукты для различных природных источников CH<sub>4</sub> в их предшествующие потоки, чтобы достичь полного пространственного описания источников и поглотителей и иметь возможность лучше сравнить нисходящий бюджет с восходящим бюджетом.

- Более регулярное обновление и сравнение кадастров выбросов с целью улучшения предварительных сценариев обратных исследований и уменьшения необходимости их расширения за пределы имеющегося охвата.
- Разработать систему 4D вариационной инверсии с использованием изо- топов и/или совместно излучаемых видов в бюджете сверху вниз. Действительно, изотопы метана могут обеспечить дополнительные ограничения для разделения различных источников и поглотителей CH<sub>4</sub>, если изотопные сигнатуры могут быть лучше известны пространственно и временно (Ganesan et al., 2018). Радиоуглерод может помочь для ископаемых и неископаемых выбросов (Lassey et al., 2007b, a; Petrenko et al., 2017), <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> и CHD<sub>3</sub> для биогенно-пирогенно-термогенных выбросов и потерь OH (Röckmann et al., 2011), и новые измерения сгущенных изотопов для биогенно-термогенных выбросов (Stolper et al., 2014) и потерь OH (Haghnegah- dar et al., 2017). Кроме того, окись углерода (например, Fortems- Cheiney et al., 2011) может обеспечить полезные ограничения для выбросов от сжигания биомассы, а этан - для летучих выбросов (например, Simpson et al., 2012; Turner et al., 2019).
- Повысить доступность данных *in situ* для научного сообщества, особенно тех, которые охватывают слабо документированные регионы, такие как Китай (Fang et al., 2015), Индия (Lin et al., 2015; Tiwari and Kumar, 2012) и Сибирь (Sasakawa et al., 2010; Winderlich et al., 2010), которые до сих пор не были включены в международные базы данных.

В долгосрочной перспективе интеграция большего количества измерений и повторных региональных исследований поможет улучшить системы "сверху вниз" и еще больше уменьшить неопределенность.

- Интегрировать глобальные данные от будущих спутниковых инструментов с присущей им низкой погрешностью, таких как активные лидарные методы с MERLIN (Ehret et al., 2017), которые обещают преодолеть проблемы систематических ошибок (Bousquet et al., 2018) и должны обеспечить измерения над Дугой, в отличие от существующих и планируемых пассивных погрешностей.
- Расширение поверхностных сетей CH<sub>4</sub> на плохо наблюдаемые регионы (например, тропики, Китай, Индия, высокие широты) и на вертикальное измерение: регулярные авиационные кампании (например, Paris et al., 2010; Sweeney et al., 2015), кампании AirCore (например, Andersen

et al., 2018; Membrive et al., 2017) и наблюдения TCCON (например, Wunch et al., 2011, 2019). Эти наблюдения по-прежнему крайне важны для дополнения спутниковых данных, которые плохо наблюдаются в облачных регионах и на высоких широтах, а также для оценки и, в конечном счете, коррекции спутниковых смещений (Buchwitz et al., 2017).

- Расширение и развитие непрерывных изотопных измерений метана с помощью лазерных приборов, чтобы помочь определить источники метана и включить их в 4D вариационные изотопные инверсии.

2017 гг.

– Разработать региональные компоненты бюджета  $\text{CH}_4$  для улучшения глобальных суммарных показателей путем использования региональных нисходящих и восходящих подходов; например, повторных региональных инверсий с использованием региональных измерений и моделей высокого разрешения, таких как проект INGOS (Bergamaschi et al., 2018b; INGOS, 2018) или проект VERIFY (<https://verify.lsce.ipsl.fr>, последний доступ: июнь 29 2020) с европейской сетью ICOS (ICOS- RI, h2019, <https://www.icos-gi.eu/home>, последний доступ: 29 июня 2020). Проект RECCAP-2 также должен обеспечить научную основу для дальнейшего уточнения бюджетов парниковых газов, включая метан, в региональных масштабах (<http://cci.esa.int/reccap2>, последний доступ: июнь 29 2020 года).

#### 4. К уменьшению неопределенностей в моделировании атмосферного переноса в моделях, используемых в нисходящем бюджете.

Эксперимент TRANSCOM, обобщенный в работе Patra et al. (2011), показал большую чувствительность представления атмосферного переноса к концентрации метана в атмосфере. В частности, оказалось, что смоделированный бюджет  $\text{CH}_4$  сильно зависит от скорости обмена между тропосферой и стратосферой и, следовательно, от структуры вертикальной сетки модели и циркуляции в нижней стратосфере. Кроме того, региональные изменения бюджета метана зависят от характеристик моделей переноса в атмосфере, используемых при инверсии (Bruhwiler et al., 2017; Locatelli et al., 2015). Это направление исследований требует важного развития со стороны сообщества атмосферных моделей. Ожидание будущих улучшений (более тонкие горизонтальные и вертикальные разрешения, более точная физическая параметризация, увеличение вычислительных ресурсов и т.д.) и оценка ошибок атмосферного переноса и их влияния на нисходящий бюджет остаются крайне важными.

Изменения в методологии, которые могут быть включены в следующие выпуски бюджета метана, включают в себя

– оценка предоставленных инверсий в сравнении с независимыми измерениями, такими как регулярные авиационные кампании (например, Paris et al., 2010; Sweeney et al., 2015), кампании AirCore (например, Andersen et al., 2018; Membrive et al., 2017) и наблюдения TCCON (например, Wunch et al., 2019, 2011), и использование этой оценки для взвешивания различных моделей, используемых в бюджете метана.

Следующие шаги, в краткосрочной перспективе, могут включать некоторые разработки, которые

должны быть рассмотрены сообществом "сверху вниз" для уменьшения ошибок атмосферного переноса:

– разработка дальнейших методологий для извлечения парциальных количеств стратосферы из данных наблюдений, таких как данные TCCON (Saad et al., 2014; Wang et al., 2014), AirCore или даже спутниковые данные ACE-FTS или MIPAS, и их использование для замены ошибочных смоделированных стратосферных профилей.

В долгосрочной перспективе развитие моделей атмосферного транспорта, таких как внедрение гибридных вертикальных

координат (Patra et al., 2018) или гексагонально-икосаэдрической сетки с более тонким разрешением (Dubos et al., 2015; Niwa et al., 2017a) и улучшения в моделируемой динамике пограничного слоя являются перспективными для уменьшения атмосферных транспортных ошибок.

## 7 Доступность данных

Представленные здесь данные доступны в уверенности, что их распространение приведет к лучшему пониманию и новым научным представлениям о метановом бюджете и его изменениях, а также поможет уменьшить его неопределенность. Свободный доступ к данным не означает разрешения на их публикацию. Для исследовательских проектов, если используемые данные важны для публикуемой работы или если заключение или результаты в значительной степени зависят от этих данных, следует рассмотреть вопрос о соавторстве. Полная контактная информация и сведения о том, как сослаться на данные, приведены в сопроводительной базе данных.

Сопровождающая база данных включает один файл Excel, объединенный в следующие электронные таблицы, и два файла NetCDF, определяющие регионы, используемые для расширения антропогенных инвентаризаций.

Файл Global\_Methane\_Budget\_2000-2017\_v2.0.xlsx включает (1) резюме, (2) наблюдаемый коэффициент смешивания метана и темпы его роста по данным четырех глобальных сетей (NOAA, AGAGE, CSIRO и UCI), (3) эволюцию глобальных антропогенных выбросов метана (включая выбросы от сжигания биомассы), использованных для получения рис. (2,4) глобальный и широтный бюджеты за 2000-2009 гг. на основе восходящих подходов, (5) глобальные и широтные бюджеты за 2000-2009 гг. на основе подходов "сверху вниз", (6) глобальные и широтные бюджеты за 2008-2017 гг. на основе подходов "снизу вверх", (7) глобальные и широтные бюджеты за 2008-2017 гг. на основе подходов "сверху вниз", (8) глобальные и широтные бюджеты за год на основе 2017 подходов "снизу вверх", (9) глобальные и широтные бюджеты за 2017 год на основе подходов "сверху вниз" и (10) список авторов, с которыми можно связаться для получения дополнительной информации по конкретным данным.

Эта база данных доступна в ICOS (<https://doi.org/10.18160/GCP-CH4-2019>, Saunois et al., 2020) и Global Carbon Project (<http://www.globalcarbonproject.org>, последнее обращение: 29 Июнь 2020).

## 8 Выводы

Мы построили глобальный бюджет метана путем

использования и синтеза большого ансамбля новых и опубликованных методов и результатов, используя последовательный и прозрачный подход, включая атмосферные наблюдения и инверсии (нисходящие модели), основанные на процессах модели выбросов с поверхности суши и химии атмосферы, а также инвентаризацию антропогенных выбросов (восходящие модели и изобретения). Для десятилетия 2008-2017 гг. глобальные выбросы  $\text{CH}_4$  составляют  $576 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ . (диапазон  $550\text{-}594 \text{ Tg CH}_4 \text{ г}^{-1}$ ), как и было установлено.



с помощью нисходящих инверсий. Около 60 % глобальных выбросов являются антропогенными (диапазон 50 %-70 %). Модели и кадастры "снизу вверх" предполагают гораздо большие глобальные выбросы (737 Тг  $\text{CH}_4$  в год  $^{-1}$ [594-881]) в основном из-за больших и более неопределенных природных выбросов из внутренних водных систем, естественных болот и геологических утечек, а также возможен нераскрытый двойной учет этих источников. Также вероятно, что некоторые из отдельных оценок выбросов по восходящей линии слишком высоки, что приводит к большим глобальным выбросам по восходящей линии, чем предполагают атмосферные ограничения.

Широтная разбивка, полученная с помощью нисходящих подходов, показывает доминирующую роль тропических выбросов (64 %) по сравнению со средними (32 %) и высокими (4 %) выбросами северных широт (выше  $\text{N}60^\circ$ ).

Наши результаты, включая расширенный набор атмосферных в...

версии, сравниваются с предыдущими синтезами бюджетов Kirschke et al. (2013) и Saunois et al. (2016) и показывают общую хорошую согласованность при сравнении одного и того же десятилетия (2000-2009) в глобальном и широтном масштабах, хотя методы оценки и представленные исследования изменились между тремя бюджетами. В то время как сравнение оценок выбросов сверху вниз, определенных с использованием спутниковых данных и без них, хорошо согласуется в глобальном масштабе, они значительно отличаются в широтном масштабе. Что особенно тревожно, эти различия не совпадают даже по знаку: некоторые модели показывают заметное увеличение данного широтного потока, а другие - уменьшение. Это говорит о том, что хотя включение спутниковых данных может в будущем значительно повысить нашу способность определять потоки на региональном уровне, в настоящее время этого не происходит из-за существующих присущих им погрешностей, а также непоследовательного применения методов для учета этих погрешностей и различий в модельном переносе, особенно в стратосфере (см. рекомендации в разделе б).

Среди различных неопределенностей, затронутых в Kirschke et al. (2013), Saunois et al. (2016) оценили, что 40-30 % большого диапазона, связанного с моделированными выбросами водно-болотных угодий в Kirschke et al. (2013), обусловлено оценкой площадь водно-болотных угодий. Здесь выбросы от водно-болотных угодий на  $\text{Tg}35 \text{ CH}_4$  в год $^{-1}$  меньше, чем предыдущие оценки, благодаря уточнению выбросов от водно-болотных угодий.

суши. Величина и неопределенность всех других природных источников были пересмотрены и обновлены, что привело к меньшим оценкам выбросов для океанов, геологических источников и диких животных, но к более высоким оценкам выбросов,

связанным с большим диапазоном для неболотных пресноводных систем. В результате приоритетной задачей номер один является снижение неопределенности в выбросах от внутренних водных систем путем более точного определения коэффициентов выбросов каждой подсистемы (ручьи, реки, озера, пруды) и уменьшения неопределенного масштабирования и вероятного двойного учета выбросов от водно-болотных угодий. В качестве второго приоритета необходимо лучше оценить неопределенность в отношении химических потерь метана как в нисходящем, так и в восходящем бюджетах. Наша работа также предполагает необходимость более тесного взаимодействия между группами, разрабатывающими кадастры выбросов, для уточнения определения секторальной разбивки.

в инвентаризации. Такой подход позволит легче проводить сравнения на уровне подкатегорий.

Наша цель состоит в том, чтобы постоянно обновлять этот синтез бюджета как живой обзорный документ на регулярной основе (каждые 2-3 года). Каждое обновление будет представлять более свежий десятилетний бюджет  $\text{CH}_4$ , учитывать изменения в выбросах и тенденциях, а также включать новые доступные данные и усовершенствования моделей.

В дополнение к десятилетнему бюджету  $\text{CH}_4$ , представленному в данной работе, и после предыдущих исследований (например, Bousquet et al., 2006), тенденции и изменения цикла метана от года к году продолжают тщательно обсуждаться в современной литературе (например, Nisbet et al., 2019; Turner et al., 2019). После почти десятилетней стагнации в конце 1990-х и начале 2000-х годов (Dlu-

gokencky et al., 2011; Nisbet et al., 2016), устойчивая скорость роста в атмосфере более чем на 5 ppb в год<sup>-1</sup> наблюдается с 2007 года, с дальнейшим ускорением после 2014 года (Nisbet et al., 2019) и несколькими годами с двузначным ат-

мосферного роста, как в 1980-х годах. На сегодняшний день еще не достигнут консенсус в объяснении тренда  $\text{CH}_4$ , поскольку 2007.вероятный объяснительный сценарий, уже представленный в работе Sauniois et al. (2017) и исследованный с тех пор в ряде других исследований, включает, в порядке убывания степени уверенности, положительный вклад микробных и ископаемых источников (например, Nisbet et al., 2019; Schwietzke et al, 2016), отрицательный вклад выбросов от сжигания биомассы до 2014 года (Giglio et al., 2013; Worden et al., 2017), пересмотр в сторону уменьшения выбросов Чи-незии, незначительная роль изменений арктических выбросов (например, Nisbet et al., 2019; Sauniois et al., 2017) и тропическое доминирование растущих выбросов (например, Sauniois et al., 2017). Изменения концентрации ОН в атмосфере, крупнейшего поглотителя метана, возможно, способствовали недавнему росту концентрации метана (например, Dalsøren et al., 2016; Holmes et al., 2013; McNorton et al., 2016, 2018; Morgenstern et al., 2018; Rigby et al., 2017; Turner et al., 2017), но значительная неопределенность в межгодовой изменчивости ОН и тенденциях требует дальнейшего изучения. Вызывающее и устойчивое увеличение атмосферного  $\text{CH}_4$  в течение последнего десятилетия все еще требует дополнительных исследований для полного понимания (Nisbet et al., 2019; Turner et al., 2019). GCP продолжит принимать участие в анализе и синтезе последних изменений в глобальном и региональном цикле метана на основе совокупности нисходящих и восходящих исследований, собранных для представленного здесь анализа бюджета.

2017 гг.

## Приложение А

**Таблица А1.** Финансирование, поддерживающее производство различных компонентов глобального бюджета метана в дополнение к поддерживающим авторам учреждениям (см. также Благодарности).

Финансирование и номер гранта (при необходимости)	Авторы/симуляции/наблюдения
Проект ARC Linkage	LP150100519 Джудит Розентретер
Австралийская национальная программа наук об окружающей среде - Центр земных систем и климата	Джозеф Г. Канаделл
Служба мониторинга атмосферы "Коперник"	(СAMS73) Архо Сегерс и Сандер Хоувелинг
Фонд исследований окружающей среды и развития технологий (2-1701)	Навин Чандра, Прабир К. Патра и
Министерства окружающей среды, Япония	Йосукэ Нива
Фонд исследований окружающей среды и развития технологий (2-1710)	Акихико Ито
Министерства окружающей среды, Япония	
ESA	GHG-CCI Robert Parker
Европейский исследовательский совет (ERC; грант №	METLAKE725546, Дэвид Баствикен
Программа исследований 2020 и инноваций "Горизонт" Европейского Союза в рамках грантового соглашения (проект VERIFY) №. 776810	Пьер Регнье и Глен П. Питерс
F.R.S.- FNRS для финансирования постдокторантуры в	ULB Goulven Laruelle
Федеральное министерство образования и научных исследований Германии (BMBF) в рамках проекта PalMod, грант № 01LP1507B	Томас Кляйн
Фонд Гордона и Бетти Мур через грант GBMF5439 "Продвижение понимания глобального цикла метана" Стэнфордскому университету	Роб Джексон; соведущие Филипп Буске, Мариэль Сонуа, Юаньхун Чжао,
	Жозеп Канадель, Густав Хугелиус и Бен Поултер
Фонд Гордона и Бетти Мур через грант GBMF "2995 Инициатива по глобальным ландшафтам" в Университете Миннесоты	Кимберли М. Карлсон
	Университет Линчепинга Дэвид Баствикен
Министерство охраны окружающей среды,	Япония Шамиль Максютов
Грант НАСА	NNX16AK04G Donald R. Blake и Isobel J. Simpson
(UCI)	
Грант НАСА	NNX17AI74G Питер Реймонд
Грант НАСА NNX17AK11G Томас	Вебер
Грант НАСА	NNX17AK20G Qianlai Zhuang и Licheng Liu
НАСА в рамках	программы экологии суши Бен Поултер
Грант на открытие Национального совета по научным и инженерным исследованиям Канады (NSERC)	Чанхуэй Пэн
Проект NERC MOYA (NE/N015657/1),	
Фонд Ньютона через Партнерство Метрополитена по климатическим наукам для обслуживания Бразилии (CSSP Brazil)	Великобритания Джо МакНортон
	Никола Гедни
РУДН	Проект NIES GOSAT Шамиль Максютов
Шведский исследовательский совет (VR) и проект Formas №	"5-100" Симона Кастальди
	2016-01201 Пола А. Миллер, Адриан Густафсон
Шведский исследовательский совет	и Вэньсинь Чжан
Шведские исследовательские советы VR и	VR Патрик Крилл
Шведский исследовательский совет (2018-04516) и проект ЕС H2020	FORMAS Дэвид Баствикен
Research and Innovation Nunataryuk (№ 773421)	Густав Хугелиус

Таблица A1. Продолжение.

Финансирование и номер гранта (при	необходимости) Авторы/симуляции/наблюдения
Швейцарский национальный научный фонд (№ Национальный центр наблюдения за Землей Великобритании Министерство энергетики США, BER, RGCM, проект RUBISCO по контракту №. AK02-05Ч11231	200020_172476)ФортунаТЙоос и Юрек Мюллер (pseo020005)РобертПаркер Уильям Дж. Райли и Цин Чжу
Вычислительные ресурсы	
Вычислительные ресурсы ECMWF в рамках специального проекта "Улучшение европейских и глобальных инверсий потоков CH <sub>4</sub> и 2NO (2018- 2020)" Вычислительные	Питер Бергамаски  ресурсы LSCЕМариэльСонуа, Филипп Буске, Бо Чжэн, и И Инь
НАСА: гранты NAG5-12669, NNX07AE89G, NNX11AF17G и NNX16AC98G в Массачусетский технологический институт Шведская национальная инфраструктура вычислений (SNIC) в Центре научно-технических вычислений Лундского университета (Lunarc), проект № 2017/1-423 - ресурс Au- roga	Теория MIT и обратное  моделирование Моделирование  LPJ-GUESS
Поддержка атмосферных наблюдений	
Австралийский антарктический отделСеть колб СИРО Австралийский институт морских наукСеть колб CSIRO Бюро метеорологии (Австралия) Организация научных и промышленных исследований Содружества (CSIRO, Австралия) Департамент окружающей среды и энергетики (DoEE, Метеорологическая служба КанадыСеть колб НАСА: гранты NAG5-12669, NNX07AE89G, NNX11AF17G и NNX16AC98G для MIT; гранты NAG5-4023, NNX07AE87G, NNX07AF09G, NNX11AF15G и NNX11AF16G для SIO контракт RA133R15CN0008 Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) с Бристольским университетом NOAA Соединенные ШтатыСеть колб Регенерация хладагента Контракт TRN1537/06/2018 Министерства бизнеса, энергетики и промышленной стратегии Великобритании (BEIS) с Бристольским университетом Высокопроизводительный вычислительный центр ALICE в Университете Лестера	Сеть колб CSIRO Cape Grim AGAGE, сеть колб CSIRO Cape Grim AGAGE, сеть колб CSIRO Австралия)CapeGrim AGAGE CSIRO Эксплуатация станций AGAGE Mace Head, Trinidad Head, Barbados, American Samoa и Cape Grim и калибровка SIO Barbados  CSIRO АвстралияКейпГрим AGAGE Булавовидная головка  Поисковые данные GOSAT , Роберт Паркер Министерство окружающей среды GOSAT, Роберт Паркер Данные GOSAT, Роберт Паркер
ЯпонииДанные Японское агентство аэрокосмических исследований, Национальный институт экологических исследований	

2017 гг.

**Примечание к предыдущей версии**

Предыдущая версия этой статьи была опубликована в декабре 2016 года и доступна по адресу <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>.

**Дополнение.** Дополнение к этой статье доступно онлайн по адресу: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020-supplement>.

**Вклад авторов.** MS, AS и BP собрали наборы данных "снизу вверх" и "сверху вниз" и выполнили постобработку и анализ.

MS, AS, BP, PB, PeC и RJ координировали глобальный бюджет. MS, AS, BP, PB, PeC, RJ, SH, PP и PCi внесли свой вклад в обновление полного текста, а все соавторы добавили свои комментарии. MS, ED и GP подготовили рисунки. VA, NG, AI, FJ, TK, LL, KMcD, PM, JMe, JMu, CP, SP, WR, HS, HT, WZ, ZZ, QinZ, QiuZ и QiaZ пер...

моделирования модели поверхности земли для расчета выбросов водно-болотных угодий. DB, MC, PC, SC, KC, GE, GH, KMJ, GL, SN, CP, PRa, Pre,

BT, NV и TW предоставили наборы данных, полезные для оценки природных выбросов и/или внесли вклад в текст по восходящим природным выбросам. LHI, GJM, FT, GvW и KMC предоставили антропогенные наборы данных и внесли свой вклад в текст данного раздела. PP, BP, NC, MI, SM, JMcN, YN, AS, AT, YY и BZ выполнили инверсию атмосферы для расчета оценок выбросов метана "сверху вниз". DRB, GB, CCr, CF, PK, RL, TM, IM, SO'D, RJP, RP, MR, IJS, PS, YT, RFW, DWo,

DWu и YYo являются руководителями атмосферных наблюдений, используемых в инверсиях сверху вниз, и/или внесли свой вклад в текст, описывающий атмосферные наблюдения за метаном. YZ, MvW, AV, VN и MIN внесли вклад в раздел "Химический сток", предоставив наборы данных, обработав данные, и/или внесли свой вклад в текст. FMF и CСu предоставили данные для почвенного поглотителя и внесли свой вклад в текст этого раздела.

**Конкурирующие интересы.** Авторы заявляют, что у них нет конфликтующих интересов.

**Отказ от ответственности.** Мнения, выраженные в данной публикации, принадлежат автору(ам) и не обязательно отражают взгляды или политику ФАО.

**Благодарности.** Данная работа является результатом совместных международных усилий под эгидой Глобального углеродного проекта, проекта Future Earth и научного партнера Всемирной программы исследования климата. Мы выражаем признательность всем людям и учреждениям, которые предоставили данные, использованные в глобальном бюджете метана, а также учреждениям, финансирующим часть этой работы (см. таблицу A1). Мы выражаем признательность

группам моделирования за предоставление своих симуляций для данного анализа, совместной инициативе ВПИК SPARC/IGAC Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) за организацию и совместное проведение анализа модельных данных, а также Британскому центру атмосферных данных (BADC) за сбор и архивирование результатов моделирования CCMI. Мы выражаем признательность Адриану Густафсону за его вклад в подготовку симуляций LPJ-GUESS. Пол А. Миллер,

Адриан Густафсон и Вэнсинь Чжан признают эту работу вкладом в стратегическую исследовательскую область MERGE. Сбор, анализ и распространение данных FAOSTAT финансируются из средств регулярного бюджета ФАО. Мы выражаем благодарность соответствующим экспертам из стран-членов. Мы выражаем признательность Юха Хатакка (FMI) за проведение измерений метана на станции Пал-лас и обмен данными с сообществом.

**Финансовая поддержка.** Полный список спонсоров приведен в Приложении (Таблица A1).

**Заявление о рецензировании.** Эта статья была отредактирована Дэвидом Карлсоном и рецензирована Майклом Пратером и одним анонимным рецензентом.

## Ссылки

- Abe, Y., Bignell, D. E., and Higashi, T. (Eds.): *Termites: Эволюция, социальность, симбиозы, экология*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2000.
- Алекс, М., Бергамаски, П., Сегерс, А., Детмерс, Р., Бутц, А., Хасекамп, О., Герлет, С., Паркер, Р., Боеш, Х., Франкенберг, К., Шипмакер, Р. А., Длугокенки, Е., Суини, К., Вофси, С. С., and Kort, E. A.: Inverse modeling of CH<sub>4</sub> emissions for 2010-2011 using different satellite retrieval products from GOSAT and SCIAMACHY, *Atmos. Chem. Phys.*, 113-13315,, <https://doi.org/10.5194/acp-15-113-2015>, 2015.
- Аллан, В., Лоу, Д. К., Гомес, А. Ж., Стратерс, Х., и Брейлсфорд, Г. В.: Межгодовая вариация <sup>13</sup>C в тропосферном метане: последствия для возможного поглотителя атомарного хлора в ма-риновом пограничном слое, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 110, D11306, <https://doi.org/10.1029/2004JD005650>, 2005.
- Аллан, В., Стратерс, Х., и Лоу, Д. С.: Изотопные эффекты углерода метана, вызванные атомарным хлором в морском пограничном слое: Результаты глобальной модели в сравнении с измерениями на Южном полушарии, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 112, D04306, <https://doi.org/10.1029/2006jd007369>, 2007.
- Аллен, Д. Т., Торрес, В. М., Томас, Ж., Салливан, Д. В., Харрисон, М., Хендлер, А., Херндон, С. К., Колб, К. Е., Фрейзер, М. П., Хилл, А. Д., Lamb, V. K., Miskimins, J., Sawyer, R. F., and Seinfeld, J. H.: Измерения выбросов метана на участках добычи природного газа в Соединенных Штатах, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 110, 17768-17773, <https://doi.org/10.1073/pnas.1304880110>, 2013.
- Альварес, Р. А., Завала-Арайза, Д., Лайон, Д. Р., Аллен, Д. Т., Баркли, З. Р., Брандт, А. Р., Дэвис, К. Ж., Херндон, С. С., Jacob, D. J., Karion, A., Kort, E. A., Lamb, V. K., Lauvaux, T., Maasackers, J. D., Marchese, A. J., Omara, M., Pacala, S. W., Peischl, J., Robinson, A. L., Shepson, P. B., Sweeney, C., Townsend-Small, A., Wofsy, S. C., and Hamburg, S. P.: Оценка выбросов метана из цепочки поставок нефти и газа в США, *Science*, 186-188361,, <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>, 2018.

Андерсен, Т., Шеерен, Б., Петерс, В., и Чен, Х.: Активная система AirCore на базе БПЛА для измерения парниковых газов, *Атмосфера. Meas. Tech.*, 2683-269911,, <https://doi.org/10.5194/amt-11-2683-2018>, 2018.

- Андре, Ж.-К., Буше, О., Буске, П., Шанин, М.-Л., Шапеллаз, Ж., и Тардье, Б.: Метан?: откуда он появился и каково его влияние на климат, EDP Sciences, Академия наук и технологий, Париж, 2014.
- Aoki, S., Nakazawa, T., Murayama, S., and Kawaguchi, S.: Measurements of atmospheric methane at the Japanese Antarctic Station. *Syowa, Tellus B*, 273-28144., <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-3-00005.x>, 1992.
- Анора, В. К., Мелтон, Дж. Р., и Пламмер, Д.: Оценка природных потоков метана, моделируемых моделью CLASS-STEM, *Biogeosciences*, 4683-470915., <https://doi.org/10.5194/bg-15-4683-2018>, 2018.
- Бадер В., Бови Б., Конвей С., Стронг К., Смейл Д., Тернер А. Дж., Блюменсток Т., Бун К., Колло Коэн М., Кулон А., Гарсия О., Гриффит Д. У. Т., Хасе Ф., Хаусманн П., Джонс Н., Крюммель П., Мурата И., Морино И., Nakajima, H., O'Doherty, S., Paton-Walsh, C., Robinson, J., Sandrin, R., Schneider, M., Servais, C., Sussmann, R., and Mahieu, E.: The recent increase of atmospheric methane from the years 10 of ground-based NDACC FTIR observations since Atmos2005., *Chem. Phys.*, 2255-17, 2277, 2017.
- Байчич, П.: The Birds and Rice Connection, *Bird Watch. Dig.*, доступно по адресу: [http://www.greatbirdingprojects.com/images/BWD\\_J-A\\_13\\_BIRDS\\_N\\_RICE.pdf](http://www.greatbirdingprojects.com/images/BWD_J-A_13_BIRDS_N_RICE.pdf) (последнее обращение: июнь 2020 г.), 2013.
- Bange, H. W., Bartell, U. H., Rapsomanikis, S., and Andreae, M. O.: Methane in the Baltic and North Seas and a reassessment of the marine emissions of methane, *Global Biogeochem. Cy.*, 8, 465-480, <https://doi.org/10.1029/94gb02181>, 1994.
- Барба, Ж., Брэдфорд, М. А., Брюэр, П. Е., Брун, Д., Кови, К., ван Харен, Ж., Мегонигал, Ж. П., Миккельсен, Т. Н., Пангала, С. Р., Пих-лати, М., Поултер, Б., Ривас-Убах, А., Шадт, К. В., Terazawa, K., Warner, D. L., Zhang, Z., and Vargas, R.: Methane emissions from tree stems: a new frontier in the global carbon cycle, *New Phytol.*, 18-28222., <https://doi.org/10.1111/nph.15582>, 2019.
- Bastviken, D., Cole, J., Pace, M., and Tranvik, L.: Methane emissions from lakes: Зависимость от характеристик озера, две региональные оценки и глобальная оценка, *Global Biogeochem. Cy.*, GB400918., <https://doi.org/10.1029/2004gb002238>, 2004.
- Bastviken, D., Tranvik, L. J., Downing, J. A., Crill, P. M., and Enrich-Prast, A.: Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink, *Science*, 50-50331., <https://doi.org/10.1126/science.1196808>, 2011.
- Бейтс, Т. С., Келли, К. К., Джонсон, Дж. Е., и Гаммон, Р. Х.: Переоценка источника метана в атмосферу из открытого океана, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 6953-6961101., <https://doi.org/10.1029/95jd03348>, 1996.
- Berchet, A., Bousquet, P., Pison, I., Locatelli, R., Chevallier, F., Paris, J.-D., Dlugokencky, E. J., Laurila, T., Hatakka, J., Viisanen, Y., Worthy, D. E. J., Nisbet, E., Fisher, R., France, J., Lowry, D., Ivakhov, V., and Hermansen, O.: Атмосферные ограничения на выбросы метана с Восточно-Сибирского шельфа, *Ат-мос. хим. Phys.*, 4147-415716., <https://doi.org/10.5194/acp-16-4147-2016>, 2016.
- Берше, А., Пизон, И., Крилл, П. М., Торнтон, Б., Буске, П., Тонат, Т., Хокинг, Т., Танвердас, Ж., Парис, Ж.-Д., и Сонуа, М.: Использование корабельных наблюдений изотопного соотношения метана в Северном Ледовитом океане для понимания метана.

- источники в Арктике, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 3987-3998, <https://doi.org/10.5194/acp-20-3987-2020>, 2020.
- Бергамаски, П., Крол, М., Мейринк, Ж. Ф., Дентенер, Ф., Сегерс, А., ван Аарденн, Ж., Монни, С., Вермеулен, А. Т., Шмидт, М., Рамонет, М., Ивер, К., Meinhardt, F., Nisbet, E. G., Fisher, R. E., O'Doherty, S., and Dlugokencky, E. J.: Inverse modeling of European CH<sub>4</sub> emissions 2001-2006, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 115, D22309, <https://doi.org/10.1029/2010JD014180>, 2010.
- Bergamaschi, P., Houweling, S., Segers, A., Krol, M., Frankenberg, C., Scheepmaker, R. A., Dlugokencky, E., Wofsy, S. C., Kort, E. A., Sweeney, C., Schuck, T., Brenninkmeijer, C., Chen, H., Beck, V., and Gerbig, C.: Atmospheric CH<sub>4</sub> in the first decade of the 21st century: Анализ обратного моделирования с использованием результатов спутниковых измерений SCIAMACHY и измерений NOAA, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 118, 7350-7369, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50480>, 2013.
- Бергамаски П., ДАНИЛА А. М., Вайс Р., Томпсон Р. Л., Бруннер Д., Левин И., Мейер Й., Шевалье Ф., Янссенс-Маенхаут Г., Бовенсманн Х., Крист Д., Басу С., Длугок-Энки Э. Я., Энгелен Р., Гербиг К., Гюнтер Д., Хаммер С., Хенне С., Хувелинг С., Карстенс У., Корт Э. А., Майоне М., Маннинг А. Я., Миллер Я., Монца С., Пандей С., Петерс В., Пейлин П., Пинти Б., Рамоне М., Рейманн С., Рёкманн Т., Шмидт М., Строгисс М., Суссамс Дж, Tarasova, O., Van Aardenne, J., Vermeulen, A., and Vogel, F.: Atmospheric monitoring and inverse modeling for verification of greenhouse gas inventories, EUR - Scientific and Technical Research Reports, Publications Office of the European Union, available at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/atmospheric-monitoring-and-inverse-modelling-verification-greenhouse-gas-inventories> (last access: March 17 2020), 2018a.
- Бергамаски, П., Карстенс, У., Мэннинг, А. Ж., Сонуа, М., Цу-рута, А., Берше, А., Вермеулен, А. Т., Арнольд, Т., Янссенс-Маенхаут, Г., Хаммер, С., Левин, И., Шмидт, М., Рамонет, М., Лопес, М., Лаврик, Ж., Аалто, Т., Чен, Х., Фейст, Д. Г., Гер- биг, К., Хашпра, Л., Хермансен, О., Манка, Дж, Moncrieff, J., Meinhardt, F., Necki, J., Galkowski, M., O'Doherty, S., Para- monova, N., Scheeren, H. A., Steinbacher, M., and Dluго- kencky, E.: Inverse modeling of European CH<sub>4</sub> emissions dur- ing 2006-2012 using different inverse models and reassessed atmospher observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 901-920, <https://doi.org/10.5194/acp-18-901-2018>, 2018b.
- Bian, L., Gao, Z., Sun, Y., Ding, M., Tang, J., and Schnell, R. C.: 4Мониторинг СН и фоновая концентрация на станции Чжуншань, Антарктида, *Atmos. Clim. Sci.*, 6, 135-144, <https://doi.org/10.4236/acs.2016.61012>, 2015.
- Blake, D. R. and Rowland, F. S.: World-wide increase in tropo- spheric methane, 1978-1983, *J. Atmos. Chem.*, 43-62, 4, 1986.
- Блейк Д. Р., Майер Э. У., Тайлер С. К., Макиде Й., Монтегю Д. К. и Роулэнд Ф. С.: Глобальное увеличение концентрации метана в атмосфере между и 1978 *Geophys. Res. Lett.*, 9, 477-480, 1982.
- Блум, А. А., Ли-Тейлор, Ж., Мадронич, С., Посланник, Д. J., Palmer, P. I., Reay, D. S., and McLeod, A. R.: Global methane emission estimates from ultraviolet irradia- tion of terrestrial plant foliage, *New Phytol.*, 187, 417-425, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03259.x>, 2010.
- <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>



2017 гг.

- Bohn, T. J., Melton, J. R., Ito, A., Kleinen, T., Spahni, R., Stocker, B. D., Zhang, B., Zhu, X., Schroeder, R., Glagolev, M. V., Maksyutov, S., Brovkin, V., Chen, G., Denisov, S. N., Eliseev, A. V., Gallego-Sala, A., McDonald, K. C., Rawlins, M. A., Riley, W. J., Subin, Z. M., Tian, H., Zhuang, Q., and Kaplan, J. O.: WETCHIMP-WSL: сравнение моделей выбросов метана болотными угодьями над Западной Сибирью, *Biogeosciences*, 3321-334912,, <https://doi.org/10.5194/bg-12-3321-2015>, 2015.
- Боргес, А. В. и Абриль, Г.: Динамика диоксида углерода и метана в эстуариях, в: *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Academic Press, Waltham5,, 119-161, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00504-0>, 2011.
- Borges, A. V., Darchambeau, F., Teodoru, C. R., Marwick, T. R., Tamooh, F., Geeraert, N., Omengo, F. O., Guerin, F., Lambert, T., Morana, C., Okuku, E., and Bouillon, S.: Globally significant greenhouse-gas emissions from African inland waters, *Nat. Geosci.*, 637-6428,, <https://doi.org/10.1038/ngeo2486>, 2015.
- Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., Hauglustaine, D. A., Prigent, C., Van der Werf, G. R., Peylin, P., Brunke, E. G., Carouge, C., Langenfelds, R. L., Lathiere, J., Papa, F., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L. P., Tyler, S. C., and White, J.: Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature*, 439-443, 443,2006.
- Буске, П., Пьеранджело, К., Бакур, К., Маршалл, Ж., Пейлин, П., Айяр, П.В., Эрст, Г., Бреон, Ф.-М., Шевалье, Ф., Кревуазье, К., Жибер, Ф., Раиру, П., Киемле, К., Арманте, Р., Бес, К., Кассе, В., Чино, Ж., Шометт, О., Delahaye, T., Edouard, D., Estève, F., Fix, A., Friker, A., Klonecki, A., Wirth, M., Alpers, M., and Millet, B.: Error Budget of the Methane Remote Lidar Mission and Its Impact on the Uncertainties of the Global Methane Budget, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 123, 11766-11785, <https://doi.org/10.1029/2018JD028907>, 2018.
- BP Statistical Review of World Energy :<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf> (последнее обращение: июль 2020), 2019.
- Брандт А. Р., Хит Г. А., Корт Е. А., О'Салливан Ф., Петрон, Г., Jordaаn, S. M., Tans, P., Wilcox, J., Gopstein, A. M., Arent, D., Wofsy, S., Brown, N. J., Bradley, R., Stucky, G. D., Eardley, D., and Harriss, R.: Methane Leaks from North American Natural Gas Systems, *Science*, 343, 733-735, <https://doi.org/10.1126/science.1247045>, 2014.
- Брассер, Г. П. и Соломон, С.: *Аэрономия средней атмосферы: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, 3rd edn., Springer Netherlands, 2005.
- Bruhwieler, L. M., Basu, S., Bergamaschi, P., Bousquet, P., Dlugokencky, E., Houweling, S., Ishizawa, M., Kim, H.-S., Locatelli, R., Maksyutov, S., Montzka, S., Pandey, S., Patra, P. K., Petron, G., Saunois, M., Sweeney, C., Schwietzke, S., Tans, P. and Weatherhead, E. C.: Выбросы CH<sub>4</sub> в США при добыче нефти и газа: Было ли недавнее значительное увеличение был обнаружен?, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 4070-4083122,, <https://doi.org/10.1002/2016JD026157>, 2017.
- Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J., Meirink, J. F., Goede, A. P. H., Berga-

- Atmos. Chem. Phys., 941-9625,, <https://doi.org/10.5194/acp-5-941-2005>, 2005a.
- Buchwitz, M., de Beek, R., Noël, S., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Bremer, H., Bergamaschi, P., Körner, S., and Heimann, M.: Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: year 2003 initial data set, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 3313-3329, <https://doi.org/10.5194/acp-5-3313-2005>, 2005b.
- Бухвиц М., Дильс Б., Боеш Х., Кревуазье К., Детмерс Р., Франкенберг К., Хасекамп О., Хьюсон В., Лаенг А., Ноэль С., Нотхольд Я., Паркер Р., Ройтер М., Шнейзинг О. и др: Отчет о валидации и сравнении продуктов (PVIR) для основной климатической переменной (ECV) парниковых газов (GHG), Инициатива ЕКА по изменению климата (CCI), версия отчета доступна<sup>4</sup>, по адресу: [http://cci.esa.int/sites/default/files/PVIR-GHG-CCI-v5\\_final.pdf](http://cci.esa.int/sites/default/files/PVIR-GHG-CCI-v5_final.pdf) (последний доступ: июнь29 2020 года), 2017.
- Buitenhuis, E. T., Suntharalingam, P., and Le Quééré, C.: Новая оценка потока метана из океана в атмосферу, включая первую формальную оценку неопределенности, готовится, 2020.
- Бутц, А., Герле, С., Хасекамп, О., Шеперс, Д., Галли, А., Абен, И., Франкенберг, К., Хартманн, Ж.М., Тран, Х., Кузе, А., Кеппель-Алекс, Г., Тун, Г., Вунч, Д., Веннберг, П., Дойчер, Н., Гриффит, Д., Макагангай, Р., Мессершмидт, Я., Нотхольд, Я., и Варнеке, Т.: На пути к точной оценке CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> наблюдения с GOSAT, *Geophys. Res. Lett.*, L1481238,, 2011.
- Cai, Z. C., Xing, G., Yan, X., Xu, H., Tsuruta, H., Yagi, K., and Minami, K.: Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrous fertilizers and water management, *Plant Soil*, 7-14, 196,1997.
- Campeau, A. and del Giorgio, P. A.: Patterns in CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations across boreal rivers: Основные факторы и последствия для речных парниковых выбросов при сценариях изменения климата, *Glob. Change Biol.*, 20, 1075-1088, <https://doi.org/10.1111/gcb.12479>, 2014.
- Карлсон, К. М., Гербер, Дж. С., Мюллер, Н. Д., Херреро, М., Мак...  
Donald, G. K., Brauman, K. A., Havlik, P., O'Connell, C. S., Johnson, J. A., Saatchi, S., and West, P. C.: Интенсивность выбросов парниковых газов на пахотных землях мира, *Nat. Clim. Change*, 63-687,, <https://doi.org/10.1038/nclimate3158>, 2017.
- Кастелан-Ортега, О. А., Карлос Ку-Вера, Х., и Эстрада-Флорес, Х. Г.: Моделирование выбросов метана и инвентаризация метана для систем животноводства в Мексике, *Атмосфера*, 27, 185-191, [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71109-9](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71109-9), 2014.
- Cathles, L., Brown, L., Taam, M., and Hunter, A.: A commentary on "The greenhouse-gas footprint of natural gas in shale formations" by R .W. Howarth, R. Santoro, and Anthony Ingraffea, *Clim. Change*, 525-535113,, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0333-0>, 2012.
- Каултон Д., Шепсон П.Б., Санторо Р.Л., Спаркс Дж.П., Ховарт Р.В., Энтони Р., Инграффеа А.Р., Камбализа М. О. L., Sweeney, C., Karion, A., Davis, K. J., Stirm, B. H., Montzka, S. A., and Miller, B. R.: Toward a better understanding and quantification of methane emissions from shale gas development, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 6237-6242, <https://doi.org/10.1073/pnas.1316546111>, 2014.
- Chang, J., Peng, S., Ciais, P., Saunois, M., Dangal, S. R. S.,  
*Earth Syst. Sci. Data*, 1561-1623, 12,2020
- Herrero, M., Havlík, P., Tian, H., and Bousquet, P.: Пересмотр энтеральных выбросов метана от домашних жвачных животных и

- их сигнатура дисточника  $\delta^{13}\text{C}$   $\text{CH}_4$ , *Nat. Commun.* 10., 1-14, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11066-3>, 2019.
- Чаннан, С., Коллинз, К., и Эмануэль, В. К.: Глобальные мозаики стандартных данных MODIS о типе земного покрова, Университет Мэри-Лэнд и Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория, Колледж-Парк, Мэриленд, США, 2014.
- Chappellaz, J., Blunier, T., Raynaud, D., Barnola, J. M., Schwander, J., and Stauffert, B.: Synchronous changes in atmospheric  $\text{CH}_4$  and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP, *Nature*, 443-445366., <https://doi.org/10.1038/366443a0>, 1993.
- Chen, H., Zhu, Q., Peng, C., Wu, N., Wang, Y., Fang, X., Jiang, H., Xiang, W., Chang, J., Deng, X., and Yu, G.: Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: Синтез новой оценки, *Glob. Change Biol.*, 19, 19-32, <https://doi.org/10.1111/gcb.12034>, 2013.
- Chen, Y. H. and Prinn, R. G.: Оценка атмосферных выбросов метана между 1996 и 2001 годами с использованием трехмерной глобальной модели химического переноса, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 111, D10307, <https://doi.org/10.1029/2005JD006058>, 2006.
- Шевалье, Ф., Бергамаски, П., Фенг, Л., Хоувелинг, С., Камински, Т., Кнорр, В., Маршалл, Ж., Палмер, П. И., Ройтер, М., Шольце, М., и Voßbeck, М.: Отчет об оценке климата для проекта GHG- CCI Инициативы ЕКА по изменению климата, Климатическая инициатива ЕКА (CCI), доступно по адресу: [http://cci.esa.int/sites/default/files/GHG-CCI\\_CARv4\\_final.pdf](http://cci.esa.int/sites/default/files/GHG-CCI_CARv4_final.pdf) (последнее обращение: июнь 2020 г.), 2017.
- Снайс, П., Сабин, К., Бала, Г., Бопп, Л., Бровкин, В., Канаделл, Ж., Чхабра, А., ДеФрис, Р., Галлоуэй, Ж., Хайманн, М., Jones, С., Le Quéré, С., Мунени, Р. В., Piao, S., and Thornton, P.: Углерод и другие биогеохимические циклы, в: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Vex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2013.
- Cicerone, R. J. and Oremland, R. S.: Biogeochemical aspects of atmospheric methane, *Global Biogeochem. Cy.*, 2, 299-327, 1988.
- Cicerone, R. J. and Shetter, J. D.: Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion, *J. Geophys. Res.*, 86, 7203-7209, 1981.
- Коллинз, М., Кнутти, Р., Арбластер, Ж., Дюфрейн, Ж.-Л., Фишефет, Т., Фридлигштейн, П., Гао, Х., Гутовски, В. Ж., Джонс, Т., Криннер, Г., Шонгве, М., Тебальди, К., Уивер, А. Ж., и Вехнер, М.: Долгосрочное изменение климата: Прогнозы, обязательства и ирреальность, в: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Vex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2013.
- Конли, С., Франко, Г., Фалуна, И., Блейк, Д. Р., Пейшл, Дж. и Райерсон, Т. Б.: Выбросы метана при взрыве в 2015 году в Алисо-Каньоне в Лос-Анджелесе, Калифорния, *Science*, 1317-1320351., <https://doi.org/10.1126/science.aaf2348>, 2016.
- Conrad, R. and Seiler, W.: Influence of the surface microlayer on the flux of nonconservative trace gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $2\text{NO}$ ) across the ocean-atmosphere interface, *J. Atmos. Chem.*, 83-6, 94, 1988.

- Conrad, R., Klose, M., and Claus, P.: Phosphate Inhibits Acetotrophic Methanogenesis on Rice Roots, *Appl. Environ. Microbiol.*, 828-831, 66,2000.
- Covey, K. R. and Megonigal, J. P.: Производство и выбросы метана в деревьях и лесах, *New Phytol.*, 35-51222,, <https://doi.org/10.1111/nph.15624>, 2019.
- Кови, К. Р., Вуд, С. А., Уоррен, Р. Дж., Ли, Х., и Брэдфорд, М. А.: Повышенные концентрации метана в деревьях горного леса, *Geophys. Res. Lett.*, L1570539,, <https://doi.org/10.1029/2012gl052361>, 2012.
- Кови, К. Р., де Мескита, К. П. Б., Оберле, Б., Мейнард, Д. С., Бет-тиголе, К., Кроутер, Т. В., Дугид, М. К., Стивен, Б., Занн, А. Е., Лапин, М., Эштон, М. С., Oliver, C. D., Lee, X., and Bradford, M. A.: Greenhouse trace gases in deadwood, *Biogeochemistry*, 215-226130,, <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0253-1>, 2016.
- Кроуфорд, Дж. Т., Стэнли, Э. Х., Спаун, С. А., Финлей, Дж. К., Локен, Л. С., and Striegl, R. G.: Ebullitive methane emissions from oxygenated wetland streams, *Glob. Change Biol.*, 20, 3408-3422, <https://doi.org/10.1111/gcb.12614>, 2014.
- Crevoisier, C., Nobileau, D., Fiore, A. M., Armante, R., Chédin, A., and Scott, N. A.: Tropospheric methane in tropics - first year from IASI hyperspectral infrared observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 6337-63509,, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6337-2009>, 2009.
- Крисп, Д., Мейер, Й., Манро, Р. и др: A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space, prepared by the CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team, available at: [http://ceos.org/document\\_management/Meetings/Plenary/32/documents/CEOS\\_AC-VC\\_White\\_Paper\\_Version\\_1\\_20181009.pdf](http://ceos.org/document_management/Meetings/Plenary/32/documents/CEOS_AC-VC_White_Paper_Version_1_20181009.pdf) (last access: March25 2020), 2018.
- Crutzen, P. J., Aselmann, I., and Seiler, W.: Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna, and humans, *Tellus B*, 271-28438,, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1986.tb00193.x>, 1986.
- Каннольд, Д. М., Стил, Л. П., Фрейзер, П. Ж., Симмондс, П. Г., Принн, Р. Г., Weiss, R. F., Porter, L. W., O'Doherty, S., Langenfelds, R. L., Krummel, P. B., Wang, H. J., Emmons, L., Tie, X. X., and Dlugokencky, E. J.: In situ измерения атмосферного метана на объектах GAGE/AGAGE в 1985-2000 годах и выводы об источниках, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 107, ACH 20-1-ACH 20-18, <https://doi.org/10.1029/2001jd001226>, 2002.
- Curry, C. L.: Моделирование потребления почвой атмосферного метана в глобальном масштабе, *Global Biogeochem. Sci.*, GB401221,, <https://doi.org/10.1029/2006gb002818>, 2007.
- Dalsoren, S. B., Isaksen, I. S. A., Li, L., and Richter, A.: Effect of emission changes in Southeast Asia on global hydroxyl and methane lifetime, *Tellus B*, 588-60161,, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2009.00429.x>, 2009.
- Далсёрен, С. Б., Михре, К. Л., Михре, Г., Гомес-Пеласс, А. Ж., Сёвде, О. А., Исаксен, И. С. А., Вайс, Р. Ф., и Харт, С. М.: Эволюция атмосферного метана за последние 40 лет, *Атмос. хим. Phys.*, 16, 3099-3126, <https://doi.org/10.5194/acp-16-3099-2016>, 2016.
- Дамм, Э., Рудельс, Б., Шауэр, У., Мау, С., и Диек-манн, Г.: Избыток метана в поверхностных водах Арктики, вызванный образованием и таянием морского льда, *Sci. Rep.*, 5, 16179, <https://doi.org/10.1038/srep16179>, 2015.

2017 гг.

- Dangal, S. R. S., Tian, H., Zhang, B., Pan, S., Lu, C., and Yang, J.: Methane emission from global livestock sector during 1890-2014: Величина, тенденции и спа-тио-временные закономерности, *Glob. Change Biol.*, 4147-416123,, <https://doi.org/10.1111/gcb.13709>, 2017.
- Дарменов, А. и да Сильва, А.: Быстрый набор данных о пожарных выбросах (QFED) - Документация версий 2.1, 2.2 и 2.4, Серия технических отчетов по глобальному моделированию и ассимиляции данных, Офис глобального моделирования и ассимиляции НАСА, доступно по адресу: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Darmenov796.pdf> (последнее обращение: март 11 2020 года), 2015.
- Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J. F., Powers, S. M., dos Santos, M. A., and Vonk, J. A.: Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, *BioScience*, 66, 949-h964, <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>, 2016.
- DelSontro, T., Beaulieu, J. J., and Downing, J. A.: Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Увеличение масштаба в условиях глобальных изменений, *Limnol. Oceanogr. Lett.*, 3, 64-75, <https://doi.org/10.1002/lol2.10073>, 2018.
- Денман, К. Л., Брассер, Г., Чидтайсонг, А., Сяйс, П., Кокс, П. М., Дикинсон, Р. Е., Хаугластайн, Д., Хайнце, К., Холланд, Э., Джа-коб, Д., Лохманн, У., Рамачандран, С., да Сильва Диас, П. Л., Вофси, С. К., и Чжан, Х.: Взаимосвязь между изменениями в климатической системе и биогеохимией, Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания, Нью-Йорк, США, 2007.
- Desai, A. R., Xu, K., Tian, H., Weishampel, P., Thom, J., Вау-... Манн, Д., Эндриус, А. Е., Кук, Б. Д., Кинг, Дж. Й., и Колка, Р.: Поток наземного метана на уровне ландшафта, наблюдаемый с очень высокой башни, *Agric. For. Meteorol.*, 61-75201,, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.017>, 2015.
- Длугокенки, Э. Дж., Даттон, Э. Г., Новелли, П. К., Танс, П. П., Масари, К. А., Ланц, К. О., и Мадронич, С.: Изменения в Темпы роста CH<sub>4</sub> и CO после извержения вулкана Пинатубо и их связь с изменениями потока УФ-излучения в тропической тропосфере, *Geo- phys. Res. Lett.*, 23, 2761-2764, 1996.
- Длугокенки, Э. Дж., Майерс, Р. К., Ланг, П. М., Масари, К. А., Crotwell, A. M., Thoning, K. W., Hall, B. D., Elkins, J. W., and Steele, L. P.: Преобразование мольных долей CH<sub>4</sub> атмосферного сухого воздуха NOAA в гравиметрически подготовленную стандартную шкалу, *J. Geophys. Res.*, D18306110,, <https://doi.org/10.1029/2005JD006035>, 2005.
- Длугокенки, Э. Дж., Брухвилер, Л., Уайт, Дж. У. К., Эммонс, Л. К., Novelli, P. C., Montzka, S. A., Masarie, K. A., Lang, P. M., Crotwell, A. M., Miller, J. B., and Gatti, L. V.: Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH<sub>4</sub> burden, *Geophys. Res. Lett.*, L1880336,, <https://doi.org/10.1029/2009GL039780>, 2009.
- Длугокенки, Э. Дж., Нисбет, Э. Г., Фишер, Р., и Лоури, Д.: Глобальный атмосферный метан: бюджет, изменения и опасности, *Philos. T. Roy. Soc. A*, 2058-2072, 369, 2011.
- Downing, J. A., Prairie, Y. T., Cole, J. J., Duarte, C. M., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., McDowell, W. H., Korte- lainen, P., Caraco, N. F., Melack, J. M., and Middelburg, J. J.: Глобальное обилие и распределение по размерам озер, *Earth Syst. Sci. Data*, 1561-1623, 12, 2020
- прудов и водохранилищ, *Limnol. Oceanogr.*, 51, 2388-2397, <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2388>, 2006.
- Dubos, T., Dubey, S., Tort, M., Mittal, R., Meurdesoif, Y., and Hourdin, F.: DYNAMICO-1.0, икосаэдрическая гидростатическая динамика.

- cal core designed for consistency and versatility, *Geosci. Model Dev.*, 3131-31508,, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3131-2015>, 2015.
- Dueck, T. A., de Visser, R., Poorter, H., Persijn, S., A. Gorissen, A., W. de Visser, W., Schapendonk, A., Verhagen, J., Snel, J., Harren, F. J. M., Ngai, A. K. Y., Verstappen, F., Bouwmeester, H., Voesenek, L. A. C. J., и ван дер Верф, А.: Нет доказательств существенного аэробного выделения метана наземными растениями: подход с использованием <sup>13</sup>C-меток, *New Phytol.*, 29-35175,, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02103.x>, 2007.
- Dutaur, L. and Verchot, L. V.: A global inventory of the soil CH<sub>4</sub> sink, *Glob. Biogeochem Cy.*, GB401221,, <https://doi.org/10.1029/2006GB002734>, 2007.
- Ehhalt, D., Prather, M., Dentener, F., Derwent, R., Dlugokencky, E., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., Kirchhoff, V., Matson, P., Midgley, P., and Wang, M.: Atmospheric chemistry and green- house gases, in: Изменение климата 2001: Научные основы. Вклад Рабочей группы I в Третий доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата, под ред: Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Lin- der, P. J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C. A., Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 239287,... 2001.
- Ehhalt, D. H.: Атмосферный цикл метана, *Tellus*, 26, 58-70, <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1974.tb01952.x>, 1974.
- Ehret, G., Bousquet, P., Pierangelo, C., Alpers, M., Millet, B., Ab- shire, J. V., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Chevallier, F., Сиаис, П., Кревуазье, К., Фикс, А., Фламан, П., Франкенберг, К., Гиб- ерт, Ф., Хейм, Б., Хейманн, М., Хоувелинг, С., Хубберген, Х. В., Jockel, P., Law, K., Low, A., Marshall, J., Agusti-Panareda, A., Payan, S., Prigent, C., Rairoux, P., Sachs, T., Scholze, M., and Wirth, M.: MERLIN: A French-German Space Lidar Mis- sion Dedicated to Atmospheric Methane, *Remote Sens.*, h9,1052, <https://doi.org/10.3390/rs9101052>, 2017.
- EIA: EIA - Annual Energy Outlook 2019, U.S. Energy Informa- tion Administration, доступно по адресу: <https://www.eia.gov/outlooks/ archive/aeo19/> (последнее обращение: март18 2020), 2019.
- Etiopie, G.: Natural Gas Seepage, The Earth's Hydrocarbon De- gassing, Springer International Publishing, 2015.
- Etiopie, G. and Schwietzke, S.: Global geological methane emis- sions: an update of top-down and bottom-up estimates, *Elem. Sci. Anth.*, h7,47, <https://doi.org/10.1525/elementa.383>, 2019.
- Etiopie, G., Lassez, K. R., Klusman, R. W., and Boschi, E.: Reappraisal of the fossil methane budget and related emis- sion from geologic sources, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L09307, <https://doi.org/10.1029/2008gl033623>, 2008.
- Etiopie, G., Ciotoli, G., Schwietzke, S., and Schoell, M.: Gridded maps of geological methane emissions and their isotopic signature, *Earth Syst. Sci. Data* 1,, 1-22, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1-2019>, 2019.
- Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E. J., and Shine, K. P.: Радиационное воздействие диоксида углерода, метана и закиси азота: Значительный пересмотр радиационного воздействия метана, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 12614-12623, <https://doi.org/10.1002/2016GL071930>, 2016.
- EU-Landfill-Directive: Отходы, доступно по адресу: [http://ec.europa.eu/ environment/waste/landfill\\_index.htm](http://ec.europa.eu/ environment/waste/landfill_index.htm) (последнее обращение: июнь29 2020 г.), 1999.
- Earth Syst. Sci. Data*, 1561-1623, 12,2020

- Fang, S., Tans, P. P., Dong, F., Zhou, H., and Luan, T.: Characteristics of atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at the Shangdianzi regional background station in China, *Atmos. Environ.*, 131, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.044>, 2015.
- FAO: база данных FAOSTAT Emissions Land Use, Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Статистический отдел, доступно по адресу: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/GL>, последнее обращение: 12 апрель 2019.
- Federici, S., Tubiello, F. N., Salvatore, M., Jacobs, H., and Schmidhuber, J.: New estimates of CO<sub>2</sub> forest emissions and removals: 1990-2015, *For. Ecol. Manag.*, 89-98352, 2015.
- Feng, L., Braun, C., Arnold, S. R., and Gidden, M.: iiasa/emissions\_downscaling: Supplemental Data, Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.2538194>, 2019.
- Fisher, R. E., Sriskantharajah, S., Lowry, D., Lanoiselle, M., Fowler, C. M. R., James, R. H., Hermansen, O., Myhre, C. L., Stohl, A., Greinert, J., Nisbet-Jones, P. B. R., Mienert, J., and Nisbet, E. G.: Arctic methane sources: Изотопные доказательства атмосферных поступлений, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21803, <https://doi.org/10.1029/2011gl049319>, 2011.
- Flores, E., Rhoderick, G. C., Viallon, J., Moussay, P., Choteau, T., Gameson, L., Guenther, F. R., and Wielgosz, R. I.: Methane standards made in whole and synthetic air compared by cavity ring down spectroscopy and gas chromatography with flame ionization detection for atmospheric monitoring applications, *Anal. Chem.*, 3272-327987, <https://doi.org/10.1021/ac5043076>, 2015.
- Fortems-Cheiney, A., Chevallier, F., Pison, I., Bousquet, P., Szopa, S., Deeter, M. N., and Clerbaux, C.: Десять лет выбросов CO по данным измерений загрязнения в тропосфере (MORITT), *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 116, D05304, <https://doi.org/10.1029/2010JD014416>, 2011.
- Francey, R. J., Steele, L. P., Langenfelds, R. L., and Pak, B. C.: High precision long-term monitoring of radiatively active and related trace gases at surface sites and from aircraft in southern hemisphere atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 279-285, 56, 1999.
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., van Weele, M., Platt, U., and Wagner, T.: Assessing methane emissions from global spaceborne observations, *Science*, 1010-1014, 308, 2005.
- Фрейзер, А., Палмер, П. И., Фенг, Л., Боэш, Х., Коган, А., Паркер, Р., Длугокенки, Э. Дж., Steele, L. P., van der Schoot, M., and Weiss, R. F.: Estimating regional methane surface fluxes: the relative importance of surface and GOSAT mole fraction measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5697-5713, <https://doi.org/10.5194/acp-13-5697-2013>, 2013.
- Fraser, P. J., Rasmussen, R. A., Creffield, J. W., French, J. R., and Khalil, M. A. K.: Termites and global methane - Another assessment, *J. Atmos. Chem.*, 295-310, 4, 1986.
- Fraser, W. T., Blei, E., Fry, S. C., Newman, M. F., Reay, D. S., Smith, K. A., and McLeod, A. R.: Emission of methane, carbon monoxide, carbon dioxide and short-chain hydrocarbons from vegetation foliage under ultraviolet irradiation, *Plant Cell Environ.*, 980-98938, <https://doi.org/10.1111/pce.12489>, 2015.
- Фридл, М. А., Сулла-Менаше, Д., Тан, Б., Шнайдер, А., Раманкутти, Н., Сибли, А., и Хуанг, Х.: MODIS Collection 5 Global Land Cover: Уточнение алгоритмов и характеристика новых наборов данных, *Remote Sens Env.*, 168-182, 114, 2010.
- GAEZv3.0: Глобальные агроэкологические зоны, доступно по адресу: <http://www.gaez.iiasa.ac.at/> (последнее обращение: июнь 29 2020 г.), 2012.
- Ганесан, А. Л., Стелл, А. К., Гедни, Н., Комин-Платт, Е., Хейман, Г., Ригби, М., Поултер, Б. и Хорнибрук, Е. Р. К.: Spatially Resolved Isotopic Source Signatures of Wet-Land Methane Emissions, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 3737-3745, <https://doi.org/10.1002/2018GL077536>, 2018.
- Ганесан, А. Л., Швицке, С., Поултер, Б., Арнольд, Т., Лан, Х., Ригби, М., Фогель, Ф. Р., ван дер Верф, Г. Р., Янссен-Маенхаут, Г., Боэш, Х., Пандей, С., Маннинг, А. Дж., Jackson, R. B., Nisbet, E. G., and Manning, M. R.: Advancing scientific understanding of the global methane budget in support of the Paris Agreement, *Global Biogeochem. Cy.*, 33, 1475-1512, <https://doi.org/10.1029/2018GB006065>, 2019.
- Garcias-Bonet, N. and Duarte, C. M.: Methane Production by Seagrass Ecosystems in the Red Sea, *Front. Mar. Sci.*, h4,340, <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00340>, 2017.
- Жовер, Б., Ворден, Х. М., Ареллано, А. Ф. Х., Эммонс, Л. К., Тилмес, С., Barré, J., Alonso, S. M., Vitt, F., Anderson, J. L., Alkemade, F., Houweling, S., and Edwards, D. P.: Химическая обратная связь от снижения выбросов монооксида углерода, *Geophys. Res. Lett.*, 9985-999544, <https://doi.org/10.1002/2017GL074987>, 2017.
- Гидден, М. Дж., Риахи, К., Смит, С. Дж., Фуджимори, С., Людерер, Г., Криглер, Э., ван Вуурен, Д. П., ван ден Берг, М., Фенг, Л., Клейн, Д., Кельвин, К., Доэльман, Дж. К., Франк, С., Фрикко, О., Хармсен, М., Хасегава, Т., Хавлик, П., Хилер, Дж., Hoesly, R., Horing, J., Popp, A., Stehfest, E., and Takahashi, K.: Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century, *Geosci. Model Dev.*, 12, 1443-1475, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>, 2019.
- Giglio, L., Randerson, J. T., and van der Werf, G. R.: Analysis of daily, monthly, and annual burn area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4), *J. Geophys. Res.-Biogeod.*, 317-328118, <https://doi.org/10.1002/jgrg.20042>, 2013.
- Глаголев, М., Клепцова, И., Филиппов, И., Максютов, С., и Мачида, Т.: Региональная эмиссия метана из болотных ландшафтов Западной Сибири, *Environ. Res. Lett.*, h6,045214, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045214>, 2011.
- Гомес-Санабрия, А., Хёглунд-Исакссон, Л., Рафадж, П. и Шёпп, В.: Углерод в глобальных потоках отходов и сточных вод - его потенциал как источника энергии при альтернативных будущих режимах обращения с отходами, *Adv. Geosci.* 45, 105-113, <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-105-2018>, 2018.
- Гринхэм, А., Альберт, С., Диринг, Н., Данбабин, М., Баствикен, Д., Шерман, Б., Лавлок, К. Е., и Эванс, К. Д.: Важность небольших искусственных водоемов как источников выбросов метана в Квинсленде, Австралия, *Гидрология. Earth Syst. Sci.*, 22, 5281-h5298, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5281-2018>, 2018.
- Громов, С., Бреннинкмейер, К. А. М., и Йоккель, П.: Очень ограниченная роль тропосферного хлора как поглотителя парникового газа метана, *Atmos. Chem. Phys.*, 9831-984318, <https://doi.org/10.5194/acp-18-9831-2018>, 2018.
- Герен, Ф., Абриль, Г., Ришар, С., Бурбан, Б., Рейнуар, К., Сейлер,

П. и Дельмас, Р.: Выбросы метана и двуокиси углерода из тропических водохранилищ: Значение рек в нижнем течении, *Geophys.*



2017 гг.

- Res. Lett., 33, L21407, <https://doi.org/10.1029/2006GL027929>, 2006.
- Guérin, F., Deshmukh, C., Labat, D., Pighini, S., Vongkhamso, A., Guédant, P., Rode, W., Godon, A., Chanudet, V., Descloux, S., and Serça, D.: Effect of sporadic destratification, seasonal и искусственное перемешивание на выбросы CH<sub>4</sub> из субтропического гидроэлектрического водохранилища, Биогеофизика, 3647-3663,13, 2016.
- Gumbricht, T., Roman-Cuesta, R. M., Verchot, L., Herold, M., Wittmann, F., Householder, E., Herold, N., and Murdiyarsa, D.: Модель экспертной системы для картирования тропических болот и торфяников показывает, что Южная Америка вносит наибольший вклад, *Glob. Change Biol.*, 3581-359923, <https://doi.org/10.1111/gcb.13689>, 2017.
- Гурни, К. Р., Лоу, Р. М., Деннинг, А. С., Рейнер, П. Ж., Пак, Б. С., Baker, D., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y. H., Ciais, P., Fung, I. Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Peylin, P., Prather, M., and Taguchi, S.: Transcom intercomparison in inversion3: Средние результаты моделей для оценки сезонных источников и поглотителей углерода, *Глобальная биогеохим. Су.*, GB201018, <https://doi.org/10.1029/2003gb002111>, 2004.
- Haghnegahdar, M. A., Schauble, E. A., and Young, E. D.: A model for 12CH<sub>2</sub>D<sub>2</sub> and 13CH<sub>3</sub>D as complementary tracers for the budget of atmospheric CH<sub>4</sub>, *Global Biogeochem. Су.*, 1387-31, h1407, <https://doi.org/10.1002/2017GB005655>, 2017.
- Харрис, И. С.: CRU JRA v1.1: Набор данных форсирования поверхности суши, скомбинированный из данных Климатического исследовательского центра (CRU) и Японского анализа (JRA), январь 1901 - декабрь, Университет 2017, Восточной Англии, Климатический поисковый центр, Центр анализа экологических данных, <https://doi.org/10.5285/13f3635174794bb98cf8ac4b0ee8f4ed>, 2019.
- Harris, S. A., French, H. M., Heginbottom, J. A., Johnston, G. H., Ladanyi, B., Sego, D. C., and van Everdingen, R. O.: Glossary of permafrost and related ground-ice terms, National Research Council of Canada, Associate Committee on Geotechnical Research. Подкомитет по вечной мерзлоте, 1988.
- Hayman, G. D., O'Connor, F. M., Dalvi, M., Clark, D. B., Gedney, N., Huntingford, C., Prigent, C., Buchwitz, M., Schneising, O., Burrows, J. P., Wilson, C., Richards, N., and Chipperfield, M.: Comparison of the HadGEM2 climate-chemistry model against in situ and SCIAMACHY atmospheric methane data, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 13257-13280, <https://doi.org/10.5194/acp-14-13257-2014>, 2014.
- Херреро, М., Хавлик, П., Валин, Х., Нотенбаерт, А., Руфино, М. С., Thornton, P. K., Blummel, M., Weiss, F., Grace, D., and Obersteiner, M.: Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 110, 20888-20893, <https://doi.org/10.1073/pnas.1308149110>, 2013.
- Hmiel, B., Petrenko, V. V., Dyonisius, M. N., Buizert, C., Smith, A. M., Place, P. F., Harth, C., Beaudette, R., Hua, Q., Yang, B., Vimont, I., Michel, S. E., Severinghaus, J. P., Etheridge, D., Bromley, T., Schmitt, J., Faïn, X., Weiss, R. F. and Dlugokencky, E.: Preindustrial CH<sub>4</sub> indicates greater антропогенных выбросов ископаемых CH<sub>4</sub>, *Nature*, 409-412,578, 2020.
- Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J. J., Vu, L., Andres, R.

- J., Bolt, R. M., Bond, T. C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J.-I., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M. C. P., O'Rourke, P. R., and Zhang, Q.: Historical (1750-2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS), *Geosci. Model Dev.*, 11, 369-408, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>, 2018.
- Хёглунд-Исакссон, Л.: Глобальные антропогенные выбросы метана 2005-2030: технические возможности смягчения последствий и затраты, *Атмос. Chem. Phys.*, 9079-909612,, <https://doi.org/10.5194/acp-12-9079-2012>, 2012.
- Höglund-Isaksson, L.: Моделирование выбросов метана и этана из глобальных нефтегазовых систем с 1980 по 2012 год "снизу вверх", *Environ. Res. Lett.*, 12,024007,<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa583e>, 2017.
- Höglund-Isaksson, L., Thomson, A., Kupiainen, K., Rao, S., and Janssens-Maenhout, G.: Anthropogenic methane sources, emissions and future projections, chap. in5; AMAP Assessment 2015: Methane as an Arctic Climate Forcer, 39-59,available at <http://www.amap.no/documents/doc/AMAP-Assessment-2015-Methane-as-an-Arctic-climate-forcer/> (1285последнее обращение: июнь29 2020), 2015.
- Holgerson, M. A. and Raymond, P. A.: Large contribution to inland water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from very small ponds, *Nat. Geosci.*, 222-2269,, <https://doi.org/10.1038/ngeo2654>, 2016.
- Holmes, C. D., Prather, M. J., Søvde, O. A., and Myhre, G.: Future methane, hydroxyl, and their uncertainties: key climate and emission parameters for future predictions, *Atmos. Chem. Phys.*, 285-30213,, <https://doi.org/10.5194/acp-13-285-2013>, 2013.
- Хоссейни, Р., Чипперфилд, М. П., Саис-Лопес, А., Фернандез, Р., Монкс, С., Фенг, В., Брауэр, П., и Гласов, Р. von: Глобальная модель химического состава хлора в тропосфере: Органические и неорганические источники и влияние на окисление метана, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 14271-14297121,, <https://doi.org/10.1002/2016JD025756>, 2016.
- Houweling, S., Krol, M., Bergamaschi, P., Frankenberg, C., Dlugokencky, E. J., Morino, I., Notholt, J., Sherlock, V., Wunch, D., Beck, V., Gerbig, C., Chen, H., Kort, E. A., Röckmann, T., and Aben, I.: A multi-year methane inversion using SCIAMACHY, accounting for systematic errors using TCCON measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 3991-401214,, <https://doi.org/10.5194/acp-14-3991-2014>, 2014.
- Houweling, S., Bergamaschi, P., Chevallier, F., Heimann, M., Kaminski, T., Krol, M., Michalak, A. M., and Patra, P.: Глобальное инверсное моделирование источников и поглотителей CH<sub>4</sub>: обзор методов, *Атмосфера. Chem. Phys.*, 235-25617,, 2017.
- Howarth, R. W.: Ideas and perspectives: is shale gas a major driver of recent increase in global atmospheric methane?, *Biogeosciences*, 3033-304616,, <https://doi.org/10.5194/bg-16-3033-2019>, 2019.
- Hu, H., Landgraf, J., Detmers, R., Borsdorff, T., de Brugh, J. A., Aben, I., Butz, A., and Hasekamp, O.: Toward Global Mapping of Methane With TROPOMI: First Results and Intersatellite Comparison to GOSAT, *Geophys. Res. Lett.*, 3682-368945,, <https://doi.org/10.1002/2018GL077259>, 2018.
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E. A. G., Ping, C.-L., Schirrmeyer, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J. A., Elberling, B., Mishra, U., Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J., and Kuhry, P.: Оценочные запасы

- углерода приполярной вечной мерзлоты с определенными диапазонами неопределенности и выявленными пробелами в данных, *Biogeosciences*, 6573-659311,, <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>, 2014.
- ICOS RI: ICOS Атмосферные парниковые газы молярные фракции CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, <sup>14</sup>C и метеорологические обслуживания сентябрь 2015-апрель для 2019 станций (49 вертикальных уровней), окончательный контроль качества данных 2 уровня, <https://doi.org/10.18160/CE2R-CC91>, 2019.
- IEA: Coal Information 2019, Международное энергетическое агентство, доступно по адресу: <https://webstore.iea.org/coal-information-2019> (последнее обновление: март 18 2020 года), 2019a.
- IEA: Electricity Information 2019, International Energy Agency, доступно по адресу: <https://webstore.iea.org/electricity-information-2019> (последнее обращение: март 18 2020), 2019b.
- Иноуэ, М., Морино, И., Учино, О., Накацуру, Т., Йошида, Й., Йокота, Т., Вунч, Д., Веннберг, П. О., Рель, К. М., Гриффитс, Д. В. Т., Веласко, В. А., Деутшер, Н. М., Варнеке, Т., Нотхольт, Ж., Робинсон, Дж., Шерлок, В., Хазе, Ф., Блуменсток, Т., Реттингер, М., Суссманн, Р., Кюрё, Е., Киви, Р., Шиоми, К., Кавакामी, С., Де Мазьер, М., Арнольд, С. Г., Фейст, Д. Г., Бар-ряд, Е. А., Барни, Ж., Дубей, М., Шнайдер, М., Ираси, Л. Т., Подольске, Ж. Р., Хиллиард, П. В., Мачида, Т., Сава, Й., Цубои, К., Матсуда, Н., Сweeney, С., Танс, Р. П., Andrews, A. E., Вирауд, С. С., Фукуюма, Я., Питман, Дж. В., Корт, Е. А., and Tanaka, Т.: Коррекция погрешностей GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> и XCH<sub>4</sub> с помощью данных TCCON и их оценка с использованием данных авиационных измерений, *Atmos. Meas. Tech.*, 3491-35129,, <https://doi.org/10.5194/amt-9-3491-2016>, 2016.
- Интегрированная система наблюдений за отсутствием CO<sub>2</sub> (INGOS): Наблюдения за атмосферным метаном из сети ICOS/InGOS в 2000-2015 годах, <https://doi.org/10.18160/P7E9-EKEA>, 2018.
- МГЭИК: Руководство по надлежащей практике и управлению неопределенностью в национальных инвентаризациях парниковых газов, Межправительственная группа экспертов по изменению климата, Программа национальных инвентаризаций парниковых газов, Монреаль, IPCC-XVI/Doc.10(1.IV.2000), 2000.
- МГЭИК: Изменение климата 2001: Научная основа. Вклад рабочей группы I в третий доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания, Нью-Йорк, США, 2001.
- МГЭИК: Руководящие принципы МГЭИК для национальных инвентаризаций парниковых газов, Программа национальных инвентаризаций парниковых газов, под ред: Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K., The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC TSU NGGIP, IGES, Institute for Global Environmental Strategy, Hayama, Kanagawa, Japan, доступно по адресу: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer\\_2006GLs.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer_2006GLs.pdf) (последнее обращение: июнь 29 2020), 2006.
- МГЭИК: 2019 Уточнение к Руководящим принципам МГЭИК 2006 для национальных инвентаризаций парниковых газов - МГЭИК, доступно по адресу: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (последнее обращение: март 17 2020 г.), 2019.
- Ishizawa, M., Mabuchi, K., Shirai, T., Inoue, M., Morino, I., Uchino, O., Yoshida, Y., Belikov, D., and Maksyutov, S.: Inter-annual variability of summertime CO<sub>2</sub> exchange in Northern Eurasia по данным GOSAT XCO<sub>2</sub>, *Environ. Res. Lett.*, 11, 105001, 2016.

- Ito, A. and Inatomi, M.: Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty, *Biogeosciences*, 759-7739,, <https://doi.org/10.5194/bg-9-759-2012>, 2012.
- Джексон, Р. Б., Даун, А., Филлипс, Н. Г., Экли, Р. К., Кук, С. W., Plata, D. L., and Zhao, K.: Natural gas pipeline leaks across Washington, D.C., *Environ. Sci. Technol.*, 2051-205848,, <https://doi.org/10.1021/es404474x>, 2014a.
- Джексон, Р. Б., Венгош, А., Кэри, Дж. У., Дэвис, Р. Дж., Дар-рах, Т. Х., О'Салливан, Ф., и Петрон, Г.: Экологические издержки и выгоды от разработки месторождений, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 327-36239,, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-031113-144051>, 2014b.
- Джексон, Р. Б., Сонуа, М., Буске, П., Канаделл, Ж. Г., Пултер, Б., Ставерт, А. Р., Бергамаски, П., Нива, Й., Сегерс, А., и Цурута, А.: Растущие антропогенные выбросы метана возникают в равной степени из сельскохозяйственных и ископаемых источников топлива, *Environ. Res. Lett.*, в печати, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>, 2020. James, R. H., Bousquet, P., Bussmann, I., Haeckel, M., Kipfer, R., Leifer, I., Niemann, H., Ostrovsky, I., Piskozub, J., Rehder, G., Treude, T., Vielstädte, L., and Greinert, J.: Effects of climate change on methane emissions from seafloor sediments in the Arctic Ocean: A review, *Limnol. Oceanogr.*, S283-S29961,, 2016.
- 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., and 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*, 11, 959-1002, <https://doi.org/10.5194/essd-11-959-2019>, 2019.
- JAXA: GOSAT-2: Greenhouse gases Observing SATellite-2@ibuki2 JAXA "IBUKI-2", доступно по адресу: <https://global.jaxa.jp/projects/sat/gosat2/index.html> (последнее обращение: март25 2020 г.), 2019.
- Jensen, K. and McDonald, K.: Surface Water Microwave Product Series Version 3: A Near-Real Time and 25- Year Historical Global Inundated Area Fraction Time Series From Active and Passive Microwave Remote Sensing, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 1402-140616,, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2898779>, 2019.
- Jiang, Y., van Groenigen, K. J., Huang, S., Hungate, B. A., Kessel, C. van, Hu, S., Zhang, J., Wu, L., Yan, X., Wang, L., Chen, J., Hang, X., Zhang, Y., Horwath, W. R., Ye, R., Linnquist, B. A., Song, Z., Zheng, C., Deng, A., and Zhang, W.: Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars, *Glob. Change Biol.*, 4728-473823,, <https://doi.org/10.1111/gcb.13737>, 2017.
- Джонсон, Д. Е., Феттсплейс, Х. У., и Зайдль, А. Ф.: Выбросы метана, оксида азота и диоксида углерода из систем производства жвачных животных, под ред: Takahashi, J. and Young, B. A., Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 77-85, 2002.
- Jung, M., Reichstein, M., and Bondeau, A.: Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: validation of the model tree ensemble approach using a biosphere model, *Biogeosciences*, 2001-20136,, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>, 2009.
- Юнг, М., Райхштейн, М., Марголис, Х. А., Ческатти, А., Ричардсон, А. Д., Араин, М. А., Арнетт, А., Бернхофер, С., Бонал, Д., Чен, Ж., Гианелле, Д., Гоброн, Н., Киэли, Г., Кутш, В., Ласслоп, Г.,

2017 гг.

- Лоу, Б. Е., Линдрот, А., Мербольд, Л., Монтаньяни, Л., Морс, Е. J., Papale, D., Sottocornola, M., Vaccari, F., and Williams, C.: Глобальные закономерности потоков углекислого газа, скрытого тепла и ощущаемого тепла из атмосферы и суши, полученные на основе вихревой ковариации, спутниковых и метеорологических наблюдений, *J. Geophys. Res.*, G00J07116, <https://doi.org/10.1029/2010jg001566>, 2011.
- Kai, F. M., Tyler, S. C., Randerson, J. T., and Blake, D. R.: Reduced methane growth rate explained by reduced Northern Hemisphere microbial sources, *Nature*, 194-197, 476, 2011.
- Kaiser, J. W., Heil, A., Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J.-J., Razinger, M., Schultz, M. G., Suttie, M., and van der Werf, G. R.: Biomass burning emissions estimated with the global fire assimilation system based on observed fire radiative power, *Biogeosciences*, 9, 527-554, <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>, 2012.
- Kang, Y., Pan, D., Bai, Y., He, X., Chen, X., Chen, C.-T. A., и Wang, D: Районы глобальных крупных речных пломов, *Acta Oceanol. Sin.*, 79-8832, <https://doi.org/10.1007/s13131-013-0269-5>, 2013.
- Карион, А., Суини, К., Петрон, Г., Фрост, Г., Майкл Хардести, Р., Кофлер, Ж., Миллер, Б. Р., Ньюбергер, Т., Вольтер, С., Банта, Р., Брюэр, А., Длугокенки, Е., Ланг, П., Монцка, С. А., Шнелл, Р., Танс, П., Трейнер, М., Замора, Р., и Конли, С.: Оценка выбросов метана по данным воздушных измерений над месторождением природного газа на западе США, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4393-h4397, <https://doi.org/10.1002/grl.50811>, 2013.
- Кепплер, Ф., Гамильтон, Дж. Т. Г., Брасс, М., и Рок-Манн, Т.: Выбросы метана из наземных растений в аэробных условиях, *Природа*, 187-191, 439, 2006.
- Холод, Н., Эванс, М., Пилчер, Р. К., Рощанка, В., Руис, Ф., Коте, М., и Коллингс, Р.: Глобальные выбросы метана от добычи угля будут продолжать расти даже при снижении добычи угля, *J. Clean. Prod.*, h256,120489, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>, 2020.
- Киршке С., Буске П., Сиайс П., Сонуа М., Канаделл Ж.Г., Длугокенки Э.Ж., Бергамаски П., Бергманн Д., Блейк Д.Р., Брувилер, Л., Камерон-Смит, П., Кастальди, С., Шевалье, Ф., Фенг, Л., Фрейзер, А., Хайманн, М., Ходсон, Э. Л., Хоувел, ing, S., Josse, B., Fraser, P. J., Krummel, P. B., Lamarque, J. F., Langenfelds, R. L., Le Quere, C., Naik, V., O'Doherty, S., Палмер П. И., Пизон И., Пламмер Д., Поултер Б., Принн Р. Г., Ригби М., Рингеваль Б., Сантини М., Шмидт М., Шинделл Д. Т., Симпсон И. Я., Спахни Р., Стил Л. П., Strode, S. A., Sudo, K., Szopa, S., van der Werf, G. R., Voulgarakis, A., van Weele, M., Weiss, R. F., Williams, J. E., and Zeng, G.: Three decades of global methane sources and sinks, *Nat. Geosci.*, 6, 813-823, <https://doi.org/10.1038/ngeo1955>, 2013.
- Klauda, J. B. and Sandler, S. I.: Global distribution of methane hydrate in ocean sediment, *Energy Fuels*, 459-470, 19, 2005.
- Кляйнен, Т., Бровкин, В., и Шульдт, Р. Дж.: Динамическая модель протяженности болот и накопления торфа: результаты для голоцена, *Biogeosciences*, 235-2489, <https://doi.org/10.5194/bg-9-235-2012>, 2012.
- Кляйнен, Т., Николаевич, У., и Бровкин, В.: Сухопутные выбросы метана от последнего ледникового максимума до доиндустриального периода, *Clim. Past*, 575-59516, <https://doi.org/10.5194/cp-16-575-2020>, 2020.

- Нокс, С. Х., Джексон, Р. Б., Поултер, Б., МакНикол, Г., Флюэ-Чуинар, Э., Чжан, З., Хугелиус, Г., Буске, П., Канаделл, J. G., Saunio, M., Papale, D., Chu, H., Keenan, T. F., Baldocchi, D., Torn, M. S., Mammarella, I., Trotta, C., Aurela, M., Bohrer, G., Campbell, D. I., Cescatti, A., Chamberlain, S., Chen, J., Чен, В., Денгель, С., Десаи, А. Р., Эускирхен, Э., Фриборг, Т., Гасбарра, Д., Годед, И., Геккеде, М., Хайманн, М., Хель-биг, М., Хирано, Т., Холлингер, Д. Я., Ивата, Х., Канг, М., Клатт, Дж, Краусс, К. В., Кутцбах, Л., Лохла, А., Митра, Б., Морин, Т. Х., Нильссон, М. Б., Ниу, С., Нурметс, А., Охель, В. К., Пейхль, М., Пелтола, О., Реба, М. Л., Ричардсон, А. Д., Ранкл, Б. Р. К., Рю, Й., Сакс, Т., Шефер, К. В. Р., Шмид, Х. П., Шур-пали, Н., Зоннентаг, О., Танг, А. К. И., Уеяма, М., Варгас, Р., Весала, Т., Уорд, Э. Дж, Виндхэм-Майерс, Л., Уолфарг, Г. и Зона, Д.: FLUXNET-CH<sub>4</sub> Synthesis Activity: Цели, задачи и будущие направления, *V. Am. Meteorol. Soc.*, 100, 2607-2632, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0268.1>, 2019.
- Kretschmer, K., Biastoch, A., Rüpke, L., and Burwicz, E.: Modeling the fate of methane hydrates under global warming, *Global Biogeochem. Cy.*, 610-62529,, <https://doi.org/10.1002/2014GB005011>, 2015.
- Kvenvolden, K. A., Reeburgh, W. S., and Lorenson, T. D.: Attention turns to natural occurring methane seepages, *EOS T. Am. Geophys. Un.*, 457-457, 82,2001.
- Ламарк, Ж.-Ф., Шинделл, Д. Т., Жосс, Б., Янг, П. Ж., Ционни, И., Эйринг, В., Бергманн, Д., Камерон-Смит, П., Коллинз, У. Ж., До-герти, Р., Далсорен, С., Фалувеги, Г., Фолберт, Г., Ган, С. Дж., Хоровиц, Л. В., Ли, Й. Х., Маккензи, И. А., Нагашима, Т., Найк, В., Пламмер, Д., Риги, М., Румбольд, С. Т., Шульц, М., Skeie, R. B., Stevenson, D. S., Strode, S., Sudo, K., Szopa, S., Voulgarakis, A., and Zeng, G.: The Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP): overview and description of models, simulations and climate diagnostics, *Geosci. Model Dev.*, 179-2066,, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-179-2013>, 2013.
- Лэмб, Б. К., Эдбург, С. Л., Феррара, Т. В., Ховард, Т., Харрисон, М. Р., Kolb, C. E., Townsend-Small, A., Dyck, W., Possolo, A., and Whetstone, J. R.: Direct Measurements Show Decreasing Methane Emissions from Natural Gas Local Distribution Systems in the United States, *Environ. Sci. Technol.*, 49, 5161-5169, <https://doi.org/10.1021/es505116p>, 2015.
- Ламберт, Г. и Шмидт, С.: Переоценка океанического потока метана: неопределенности и долгосрочные изменения, *Chemosphere*, 579-58926,, [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90443-9](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90443-9)..., 1993.
- Lamontagne, R. A., Swinnerton, J. W., Linnenbom, V. J., and Smith, W. D.: Methane concentrations in various marine environments, *J. Geophys. Res.*, 5317-532478,, <https://doi.org/10.1029/JC078i024p05317>, 1973.
- Ларуэль, Г. Г., Дюрр, Х. Х., Лауервальд, Р., Хартманн, Й., Сломп, С. Р., Goossens, N., and Regnier, P. A. G.: Global multi-scale segmentation of continental and coastal waters from the watersheds to the continental margins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2029-2051, <https://doi.org/10.5194/hess-17-2029-2013>, 2013.
- Lassey, K. R., Etheridge, D. M., Lowe, D. C., Smith, A. M., and Ferretti, D. F.: Centennial evolution of the atmospheric methane budget: what do the carbon isotopes tell us?, *Atmos. Chem. Phys.*, 2119-21397,, <https://doi.org/10.5194/acp-7-2119-2007>, 2007a.

- Lassey, K. R., Lowe, D. C., and Smith, A. M.: The atmospheric cycle of radiomethane and the "fossil fraction" of the methane source, *Atmos. Chem. Phys.*, 2141-21497,, <https://doi.org/10.5194/acp-7-2141-2007>, 2007b.
- Ле Кере, К., Буйтенхуис, Э. Т., Мориарти, Р., Алвен, С., Омон, О., Бопп, Л., Шолле, С., Энрайт, К., Франклин, Д. Дж. J., Harrison, S. P., Hirst, A. G., Larsen, S., Legendre, L., Platt, T., Prentice, I. C., Rivkin, R. B., Saille, S., Sathyendranath, S., Stephens, N., Vogt, M., and Vallina, S. M.: Роль динамики зоопланктон-тона для биомассы фитопланктона Южного океана и глобальных биогеохимических циклов, *Biogeosciences*, 4111-413313,, 2016.
- ле Тексье, Х., Соломон, С., и Гарсия, Р. Р.: Роль молекулярного водорода и окисления метана в образовании водяного пара в стратосфере, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114, 281-295, <https://doi.org/10.1002/qj.49711448002>, 1988.
- Лехнер, Б. и Дёлль, П.: Разработка и проверка глобальной базы данных озёр, водохранилищ и водно-болотных угодий, *J. Hydrol.* 296,, 1-22, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>, 2004.
- Lelieveld, J., Crutzen, P. J., and Dentener, F. J.: Изменение концентрации, времени жизни и климатического воздействия атмосферного метана, *Tellus B*, 128-15050,, <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1998.t01-1-.00002.x>, 1998.
- Леливельд, Ж., Лехтенбохмер, С., Ассонов, С. С., Бреннинкмейер, С. А. М., Dienst, C., Fishedick, M., and Hanke, T.: Greenhouse gases: Низкая утечка метана из газопроводов, *Nature*, 434, 841-842, <https://doi.org/10.1038/434841a>, 2005.
- Lenhart, K., Klintzsch, T., Langer, G., Nehrke, G., Bunge, M., Schnell, S., and Keppler, F.: Evidence for methane production by the marine algae *Emiliania huxleyi*, *Biogeosciences*, 13, 3163-3174, <https://doi.org/10.5194/bg-13-3163-2016>, 2016.
- Lewan, M. D.: Комментарий к статье "Ideas and perspectives: is shale gas a major driver of recent increase in global atmospheric methane?" by Robert W. Howarth (2019), *Biogeosciences Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/bg-2019-419>, in review, 2020.
- Li, C., Frolking, S., Xiao, X., Moore, B., Boles, S., Qiu, J., Huang, Y., Salas, W., and Sass, R.: Modeling impacts of farming management alternatives on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O emissions: A case study for rice production in China, *Global Biogeochem. Cy.*, 19, <https://doi.org/10.1029/2004gb002341>, 2005.
- Линь, Х., Индира, Н. К., Рамонет, М., Дельмотт, М., Сиайс, П., Бхатт, В. С., Reddy, M. V., Angchuk, D., Balakrishnan, S., Jorphail, S., Dorjai, T., Mahey, T. T., Patnaik, S., Begum, M., Brenninkmeijer, C., Durairaj, S., Kirubakaran, R., Schmidt, M., Swathi, P. S., Vinithkumar, N. V., Yver Kwok, C. and Gaur, V. K.: Long-lived atmospheric trace gases measurements in flask samples from three stations in India, *Atmospheric Chem. Phys.*, 15(17), 9819-9849, <https://doi.org/10.5194/acp-15-9819-2015>, 2015.
- Liu, Z., Guan, D., Wei, W., Davis, S. J., Ciais, P., Bai, J., Peng, S., Zhang, Q., Hubacek, K., Marland, G., Andres, R. J., Crawford-Brown, D., Lin, J., Zhao, H., Hong, C., Boden, T. A., Feng, K., Peters, G. P., Xi, F., Liu, J., Li, Y., Zhao, Y., Zeng, N., and He, K.: Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China, *Nature*, 524, 335-338, <https://doi.org/10.1038/nature14677>, 2015.
- Locatelli, R., Bousquet, P., Saunio, M., Chevallier, F., and Cressot, C.: Чувствительность недавнего бюджета метана к LMDz под...

физические параметризации на уровне сетки, *Атмосфера. Chem. Phys.*, 15, 9765-9780, <https://doi.org/10.5194/acp-15-9765-2015>, 2015.

Lohila, A., Aalto, T., Aurela, M., Hatakka, J., Tuovinen, J.-P., Kilkki, J., Penttilä, T., Vuorenmaa, J., Hänninen, P., Sutinen, R., Viisanen, Y., and Laurila, T.: Large contribution of boreal upland forest soils to the catchment-scale CH<sub>4</sub> balance во влажный год, *Geophys. Res. Lett.*, 2946-295343,, 2016.

Маавара, Т., Лауэрвальд, Р., Ларуэль, Г. Г., Акбарзаде, З., Бускилл, Н. Я., Каппеллен, П. В., и Регнье, П.: Выбросы закиси азота из внутренних вод: Являются ли оценки МГЭИК слишком высокими?, *Glob. Change Biol.*, 473-48825,, <https://doi.org/10.1111/gcb.14504>, 2019.

Максютов С., Ода Т., Сайто М., Джанарданан Р., Беликов Д., Кайзер Ж.В., Журавлев Р., Ганшин А., Валсала В.К., Ан-Дрюс А., Чмура Л., Длугокенки, Э., Хашпра, Л., Ланген-фельдс, Р. Л., Мачида, Т., Наказава, Т., Рамонет, М., Суини, К., и Уорти, Д.: Техническая записка: инверсионный метод высокого разрешения. метод моделирования для оценки поверхностных потоков CO<sub>2</sub>, основанный на модели переноса NIES-TM - FLEXPART и ее соединении, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-251>, в обзоре, 2020.

Мэтьюс, Э. и Фунг, И.: Эмиссия метана из естественных водно-болотных угодий: Глобальное распределение, площадь и экологические характеристики источников, *Global Biogeochem. Cy.*, 61-861,, <https://doi.org/10.1029/GB001i001p00061>, 1987.

McCalley, C. K., Woodcroft, B. J., Hodgkins, S. B., Wehr, R. A., Kim, E.-H., Mondav, R., Crill, P. M., Chanton, J. P., Rich, V. I., Tyson, G. W., and Saleska, S. R.: Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw, *Nature*, 514, 478-481, <https://doi.org/10.1038/nature13798>, 2014.

McCarthy, M. C., Boering, K. A., Rice, A. L., Tyler, S. C., Connell, P., and Atlas, E.: Carbon and hydrogen isotopic compositions of stratospheric methane: Two-dimensional model results and implications for kinetic isotope effects, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, h108,4461, <https://doi.org/10.1029/2002JD003183>, 2003.

McGuire, A. D., Christensen, T. R., Hayes, D., Herault, A., Euskirchen, E., Kimball, J. S., Koven, C., Laflour, P., Miller, P. A., Oechel, W., Peylin, P., Williams, M., and Yi, Y.: Assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions, *Bio-geosciences*, 3185-32049,, <https://doi.org/10.5194/bg-9-3185-2012>, 2012.

McKain, K., Down, A., Raciti, S. M., Budney, J., Hutyra, L. R., Floerchinger, C., Herndon, S. C., Nehr Korn, T., Zahniser, M. S., Jackson, R. B., Phillips, N., and Wofsy, S. C.: Methane emissions from natural gas infrastructure and use in the urban region of Boston, Massachusetts, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 112, 1941-1946, <https://doi.org/10.1073/pnas.1416261112>, 2015.

McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., and Siliman, B. R.: A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>, *Front. Ecol. Environ.*, 552-5609,, 2011.

МакНортон, Дж., Чипперфильд, М. П., Глор, М., Уилсон, К., Фенг, В., Хейман, Г. Д., Ригби, М., Крюммель, П. Б., О'Доэрти, С., Принн, Р. Дж.



2017 гг.

- глобальной скорости роста CH<sub>4</sub> в атмосфере с 1999 по 2006 год, *Atmos. Chem. Phys.*, 7943-795616,, <https://doi.org/10.5194/acp-16-7943-2016>, 2016.
- McNorton, J., Wilson, C., Gloor, M., Parker, R. J., Boesch, H., Feng, W., Hossaini, R., and Chipperfield, M. P.: Атрибуция недавнего увеличения атмосферного метана с помощью 3-D инверсного моделирования, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 18149-18168, <https://doi.org/10.5194/acp-18-18149-2018>, 2018.
- Meinshausen, M., Smith, S., Calvin, K., Daniel, J., Kainuma, M., Lamarque, J. F., Matsumoto, K., Montzka, S., Raper, S., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G., and van Vuuren, D. P.: RCP концентрации парниковых газов и их экстремальность от до 1765Clim2300., *Change*, 213-241109,, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>, 2011.
- Melton, J. R. and Arora, V. K.: Competition between plant functional types in the Canadian Terrestrial Ecosystem Model (STEM) v. Geosci2.0., *Model Dev.*, 323-3619,, 2016.
- Мелтон, Дж. Р., Вания, Р., Ходсон, Э. Л., Поултер, Б., Рингеваль, Б., Спахни, Р., Бон, Т., Авис, К.А., Бирлинг, Дж.С., Чен, Г., Елисеев, А.В., Денисов, С.Н., Хопкрофт, П.О., Леттенмайер, Д.П., Райли, В.Ж., Сингарайер, Ж.С., Субин, З.М., Тиан, Х., Цюрхер, С., Brovkin, V., van Bodegom, P. M., Kleinen, T., Yu, Z. C., and Kaplan, J. O.: Современное состояние моделирования глобальной площади болот и метана в болотах: выводы, сделанные в ходе проекта по сопоставлению моделей (WETCHIMP), *Biogeosciences*, 753-10, 788,2013.
- Membrive, O., Crevoisier, C., Sweeney, C., Danis, F., Hertzog, A., Engel, A., Bönisch, H., and Picon, L.: AirCore-HR: выборка колонок высокого разрешения для улучшения вертикального описания CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2163-2181, <https://doi.org/10.5194/amt-10-2163-2017>, 2017.
- Меркадо, Л. М., Беллуин, Н., Ситч, С., Буше, О., Хантингфорд, К., Уайлд, М., и Кокс, П. М.: Влияние изменений в диффузной радиации на глобальное поглощение углерода суши, *Nature*, 458, 1014-1017, <https://doi.org/10.1038/nature07949>, 2009.
- Messenger, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., and Schmitt, O.: Оценка объема и возраста воды, хранящейся в глобальных озерах, с помощью геостатистического подхода, *Nat. Commun.*, 7, 1-11, <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>, 2016.
- Middelburg, J. J., Nieuwenhuize, J., Iversen, N., Høgh, N., de Wilde, H., Helder, W., Seifert, R., and Christof, O.: Распределение метана в европейских приливных эстуариях, *Биогеохимия*, 59, 95-119, <https://doi.org/10.1023/A:1015515130419>, 2002.
- Mijling, B., van der A, R. J., and Zhang, Q.: Regional nitrogen oxide emission trends in East Asia observed from space, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 12003-12012, <https://doi.org/10.5194/acp-13-12003-2013>, 2013.
- Мильков, А. В.: Молекулярный и стабильный изотопный составы гидратов природного газа: Пересмотренный глобальный набор данных и основные интерпретации в контексте геологических условий, *Org. Geochem.*, 36, 681-702, 2005.
- Minkinen, K. and Laine, J.: Неоднородность растительности и каналы создают пространственную изменчивость потоков метана из торфяников, осушенных для лесного хозяйства, *Plant Soil*, 289-304285,, <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9016-4>, 2006.
- Miyazaki, K., Eskes, H. J., and Sudo, K.: A tropospheric chemistry reanalysis for years 2005-2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1011-1022, <https://doi.org/10.5194/acp-12-1011-2012>, 2012.

- mos. Chem. Phys., 8315-834815,, <https://doi.org/10.5194/acrp-15-8315-2015>, 2015.
- Монцка, С. А., Кроль, М., Длугокенки, Е., Холл, Б., Джокель, П., и Леливельд, Дж.: Малая межгодовая изменчивость глобального атмосферного гидроксидла, Наука, 67-69, 331,2011.
- Мур, К. В., Зелинска, Б., Петрон, Г. и Джексон, Р. Б.: Воздействие на воздух увеличения объемов добычи, переработки и использования природного газа: критический обзор, Environ. Sci. Technol., 48, 8349-8359, <https://doi.org/10.1021/es4053472>, 2014.
- Моргенштерн О., Хегглин М.И., Розанов Е., О'Коннор Ф.М., Абрахам Н.Л., Акиёси Х., Арчибальд А.Т., Бекки С., Бутчарт, Н., Чипперфильд, М. П., Деуши, М., Дхомсе, С. С., Гарсия, Р. Р., Хардиман, С. К., Хоровиц, Л. В., Йоккель, П., Жосс, Б., Киннисон, Д., Лин, М., Манчини, Е., Маньин, М. Е., Маршан, М., Марекал, В., Мичу, М., Оман, Л. Д., Питари, Г., Пламмер, Д. А., Ревелл, Л. Е., Сен-Мартен, Д., Шофилд, Р., Стенке, А., Стоун, К., Судо, К., Танака, Т. Я., Тильмес, S., Yamashita, Y., Yoshida, K., and Zeng, G.: Review of the global models used within the phase 1 of the Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI), Geosci. Model Dev., 10, 639-671, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-639-2017>, 2017.
- Morgenstern, O., Stone, K. A., Schofield, R., Akiyoshi, H., Yamashita, Y., Kinnison, D. E., Garcia, R. R., Sudo, K., Plummer, D. A., Scinocca, J., Oman, L. D., Manyin, M. E., Zeng, G., Rozanov, E., Stenke, A., Revell, L. E., Pitari, G., Mancini, E., Di Genova, G., Visionsi, D., Dhomse, S. S., and Chipperfield, M. P.: Чувствительность озона к изменению парниковых газов и озоноразрушающих веществ в моделировании CCM1-1, Atmos. Chem. Phys., 1091-111418,, <https://doi.org/10.5194/acrp-18-1091-2018>, 2018.
- Морино, И., Учино, О., Иноуэ, М., Йошида, Й., Йокота, Т., Веннберг, П.О., Тун, Г.К., Вунч, Д., Розль, К.М., Нотхольт, Й., Варнке, Т., Мессершмидт, Й., Гриффит, Д.В.Т., Дойчер, N. M., Sherlock, V., Connor, B., Robinson, J., Sussmann, R., and Rettinger, M.: Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra, Atmos. Meas. Tech., 1061-10764,, <https://doi.org/10.5194/amt-4-1061-2011>, 2011.
- Murguia-Flores, F., Arndt, S., Ganesan, A. L., Murray-Tortarolo, G., and Hornibrook, E. R. C.: Soil Methanotrophy Model (MeMo v1.0): модель на основе процессов для количественной оценки глобального поглощения атмосферного метана почвой, Geosci. Model Dev., 11, 2009-2032, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2009-2018>, 2018.
- Muhyre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., and Zhang, H.: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, in: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Vex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, NY, USA, 2013.
- Наик, В., Вулгаракис, А., Фиоре, А. М., Хоровиц, Л. В., Ламар-кве, Ж.-Ф., Лин, М., Пратер, М. Ж., Янг, П. Ж., Бергманн, Д., Камерон-Смит, П. Ж., Ционни, И., Коллинз, В. Ж., Далсёрен, С. Б., Доэрти, Р., Эйринг, В., Фалувеги, Г., Фолберт, Г. А., Жосс, Б., Ли, Й. Х., Маккензи, И. А., Нагашима, Т., ван Нойе, Т. П. К., Пламмер, Д. А., Риги, М., Румбольд, С. Т., Скии, Р., Шинделл,

- D. T., Stevenson, D. S., Strode, S., Sudo, K., Szopa, S., and Zeng, G.: Preindustrial to present-day changes in tropospheric hydroxyl radical and methane lifetime from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP), *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5277-5298, <https://doi.org/10.5194/acp-13-5277-2013>, 2013.
- Nakazawa, T., Machida, T., Tanaka, M., Fujii, Y., Aoki, S., and Watanabe, O.: Различия в концентрации CH<sub>4</sub> в атмосфере между Арктикой и Антарктикой в преиндустриальной/предсельскохозяйственной эпохи, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 943-94620, <https://doi.org/10.1029/93GL00776>, 1993.
- Нагчимутху, С., Сундгрэн, И., Гельфальк, М., Клемедтссон, Л., Крилл, П., Даниэльссон, А., и Баствикен, Д.: Пространственно-временные данные. изменчивость дпотоков СН в озерах и ее влияние на ежегодные оценки выбросов всего озера, *Limnol. Oceanogr.*, S13-S2661, <https://doi.org/10.1002/lno.10222>, 2015.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L., and Grimsditch, G.: Blue carbon: role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment, UNEP report, GRID-Arendal, Arendal, [Norway], available at: [https://ccom.unh.edu/sites/default/files/publications/Nellemann\\_2010\\_BlueCarbon\\_book.pdf](https://ccom.unh.edu/sites/default/files/publications/Nellemann_2010_BlueCarbon_book.pdf) (last access: June29 2020), 2009.
- Ни, Х. и Гроффман, Р. М.: Declines in methane uptake in forest soils, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 8587-8590115, <https://doi.org/10.1073/pnas.1807377115>, 2018.
- Nicely, J. M., Salawitch, R. J., Canty, T., Anderson, D. C., Arnold, S. R., Chipperfield, M. P., Emmons, L. K., Fleming, J., Huijnen, V., Kinnison, D. E., Lamarque, J.-F., Mao, J., Monks, S. A., Steenrod, S. D., Tilmes, S., and Turquety, S.: Количественная оценка причин различий в тропосферном ОН в глобальных моделях, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 1983-2007122, <https://doi.org/10.1002/2016JD026239>, 2017.
- Нисбет Э. Г., Длугокенки Э. Я., Мэннинг М. Р., Лоури Д., Фишер Р. Е., Франс Ж. Л., Мишель С. Е., Миллер Ж. Б., Уайт Дж. В. С., Vaughn, B., Bousquet, P., Pyle, J. A., Warwick, N. J., Cain, M., Brownlow, R., Zazzeri, G., Lanoisellé, M., Manning, A. C., Gloor, E., Worthy, D. E. J., Brunke, E.-G., Labuschagne, C., Wolff, E. W., and Ganesan, A. L.: Rising atmospheric methane: 2007-2014 growth and isotopic shift, *Global Biogeochem. Cy.*, 1356-137030, <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>, 2016.
- Нисбет, Э. Г., Мэннинг, М. Р., Длугокенки, Э. Я., Фишер, Р. Э., Лоури, Д., Мишель, С. Э., Михре, К. Л., Платт, С. М., Аллен, Дж, Буске, П., Браунлоу, Р., Кейн, М., Франс, Ж. Л., Хермансен, О., Хоссейни, Р., Джонс, А. Е., Левин, И., Мэннинг, А. К., Михре, Г., Pyle, J. A., Vaughn, B., Warwick, N. J., and White, J. W. C.: Очень сильный рост атмосферного метана за четыре года 2014-2017: Последствия для Парижского соглашения, *Глобальная биогеохим. Су.*, 318-34233, <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>, 2019.
- Нисбет, Р. Э. Р., Фишер, Р., Ниммо, Р. Х., Бендалл, Д. С., Крилл, П. М., Gallego-Sala, A. V., Hornibrook, E. R. C., Lopez-Juez, E., Lowry, D., Nisbet, P. B. R., Shuckburgh, E. F., Sriskantharajah, S., Howe, C. J., and Nisbet, E. G.: Emission of methane from plants, *P. Roy. Soc. B-Biol. Sci.*, 1347-1354, 276,2009.
- Niwa, Y., Tomita, H., Satoh, M., Imasu, R., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Machida, T., Sasakawa, M., Belan, B., and Saigusa, N.: A 4D-Var inversion system based on icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 1: Автономный форвард

- и смежные транспортные модели, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157-1174, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1157-2017>, 2017a.
- Niwa, Y., Fujii, Y., Sawa, Y., Iida, Y., Ito, A., Satoh, M., Imasu, R., Tsuboi, K., Matsueda, H., and Saigusa, N.: A 4D-Var inversion system based on icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 2: Optimization scheme and identical twin experiment of atmospheric CO<sub>2</sub> inversion, *Geosci. Model Dev.*, 10, 2201-2219, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2201-2017>, 2017b.
- Обу, Дж., Вестерманн, С., Бартш, А., Бердников, Н., Кристиансен, Н. Н., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Eitzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääh, A., Leibman, M. O., Lewkowicz, A. G., Panda, S. K., Romanovsky, V., Way, R. G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J., and Zou, D.: Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modeling for 2000-2016 at 1 km<sup>2</sup> scale, *Earth-Sci. Rev.*, 299-316193,, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>, 2019.
- Оливье, Дж. Г. Дж. и Янссенс-Маенхаут, Г.: Часть III: Общие выбросы парниковых газов, выбросы CO<sub>2</sub> от сжигания топлива (2014 г. изд.), Международное энергетическое агентство, Париж, ISBN-978-92-64-21709-6., 2014.
- Оливье, К. Р., Махер, Д. Т., Питфилд, К., и Макреда, П. И.: Удар выше своего веса: Большой выброс парниковых газов от небольших сельскохозяйственных плотин, *Glob. Change Biol.*, 25, 721-732, <https://doi.org/10.1111/gcb.14477>, 2019.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 3461-34829,, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016.
- Osudar, R., Matousu, A., Alawi, M., Wagner, D. and Bussmann, I.: Environmental factors affecting methane distribution and bacterial methane oxidation in the German Bight (North Sea), *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 160,, 10-21, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.03.028>, 2015.
- Пакала, С. В.: Верификация выбросов парниковых газов: Методы для поддержки международных соглашений по климату, National Academies Press, 2010.
- Pandey, S., Houweling, S., Krol, M., Aben, I., Chevallier, F., Dlugokencky, E. J., Gatti, L. V., Gloor, E., Miller, J. B., Detmers, R., Machida, T., and Röckmann, T.: Inverse modeling of GOSAT-retrieved ratios of total column CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> для и 2009Atmos2010., *Chem. Phys.*, 5043-506216,, 2016.
- Пандей, С., Гаутам, Р., Хоувелинг, С., Гон, Х. Д. ван дер Садаварте, П., Борсдорф, Т., Хасекамп, О., Ландграф, Я., Тол, П., Кемпен, Т. ван, Хугевин, Р., Неес, Р. ван, Hamburg, S. P., Maasackers, J. D., and Aben, I.: Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout, *P. Natl. Acad. Sci.*, 26376-26381116,, <https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>, 2019.
- Pangala, S. R., Moore, S., Hornibrook, E. R. C., and Gauci, V.: Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands, *New Phytol.*, 524-531197,, <https://doi.org/10.1111/nph.12031>, 2013.
- Pangala, S. R., Hornibrook, E. R. C., Gowing, D. J., and Gauci, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

V.: The contribution of trees to ecosystem methane emissions in a temperate forested wetland, *Glob. Change Biol.*, 2642-265421,, <https://doi.org/10.1111/gcb.12891>, 2015.

2017 гг.

- Пангала, С. Р., Энрич-Праст, А., Бассо, Л. С., Пейшого, Р. Б., Баствикен, Д., Хорнибрук, Э. Р. К., Гатти, Л. В., Маротта, Х., Калазанс, Л. С. Б., Сакурагуи, К. М., Бастос, В. Р., Malm, O., Gloor, E., Miller, J. B., and Gauci, V.: Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget, *Nature*, 230-234552,, <https://doi.org/10.1038/nature24639>, 2017.
- Париж, Ж.-Д., Сийс, П., Неделек, П., Штоль, А., Белан, Б.Д., Аршинов, М. У., Carouge, C., Golitsyn, G. S., and Granberg, I. G.: New insights on the chemical composition of the Siberian air shed from the YAK AEROSIB aircraft campaigns, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 91, 625-641, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2663.1>, 2010.
- Parker, R., Boesch, H., Cogan, A., Fraser, A., Feng, L., Palmer, P. I., Messerschmidt, J., Deutscher, N., Griffith, D. W. T., Notholt, J., Wennberg, P. O., and Wunch, D.: Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Сравнение с наземными данными TCCON и модельными расчетами, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L15807, <https://doi.org/10.1029/2011gl047871>, 2011.
- Pathak, H., Li, C., and Wassmann, R.: Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using DNDC model, *Biogeosciences*, 113-1232,, <https://doi.org/10.5194/bg-2-113-2005>, 2005.
- Патра, П. К., Хоувелинг, С., Крол, М., Буске, П., Беликов, Д., Бергманн, Д., Биан, Х., Камерон-Смит, П., Чипперфильд, М. П., Корбин, К., Фортес-Чейни, А., Фрейзер, А., Глор, Е., Хесс, П., Ито, А., Кава, С.Р., Лоу, Р.М., Лох, З., Максюттов, С., Мэн, Л., Palmer, P. I., Prinn, R. G., Rigby, M., Saito, R., and Wilson, C.: Моделирование CH<sub>4</sub> и сопутствующих видов в модели TransCom: связь переноса, поверхностного потока и химических потерь с изменчивостью CH<sub>4</sub> в тропосфере и нижней стратосфере, *Atmos. Chem. Phys.*, 12813-1283711,, <https://doi.org/10.5194/acp-11-12813-2011>, 2011.
- Patra, P. K., Krol, M. C., Montzka, S. A., Arnold, T., Atlas, E. L., Lintner, B. R., Stephens, B. B., Xiang, B., Elkins, J. W., Fraser, P. J., Ghosh, A., Hints, E. J., Hurst, D. F., Ishijima, K., Krummel, P. B., Miller, B. R., Miyazaki, K., Moore, F. L., Mühle, J., O'Doherty, S., Prinn, R. G., Steele, L. P., Takigawa, M., Wang, H. J., Weiss, R. F., Wofsy, S. C., and Young, D.: Observational evidence for interhemispheric hydroxyl-radical parity, *Nature*, 219-223513,, <https://doi.org/10.1038/nature13721>, 2014.
- Patra, P. K., Saeki, T., Dlugokencky, E. J., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Aoki, S., Morimoto, S., Kort, E. A., Crotwell, A., Ravikumar, K., and Nakazawa, T.: Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002-2012), *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 85-10794,, 2016.
- Patra, P. K., Takigawa, M., Watanabe, S., Chandra, N., Ishijima, K., and Yamashita, Y.: Improved Chemical Tracer Simulation by MIROC4.0-based Atmospheric Chemistry-Transport Model (MIROC4-ACTM), *SOLA*, 91-96,14, 2018.
- Полл, К. К., Брюэр, П. Г., Усслер, В., Пельтцер, Э. Т., Рехдер, Г., и Клаг, Д.: Эксперимент, демонстрирующий, что морское оползание является механизмом переноса метана из газогидратных отложений морского дна в верхние слои океана и атмосферу, *Geo-Mar. Lett.*, 198-20322,, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- <https://doi.org/10.1007/s00367-002-0113-y>, 2002.
- Пейшль, Дж., Райерсон, Т. Б., Эйкин, К. К., де Гув, Дж. А., Гилман, J. B., Holloway, J. S., Lerner, B. M., Nadkarni, R., Neuman, J. A., Nowak, J. B., Trainer, M., Warneke, C., and Parrish, D. D.: Количественная оценка атмосферных выбросов метана из

- Хейнсвилл, Файетвилл и северо-восточные районы добычи сланцевого газа Марселлус, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 120, 2119-2139, <https://doi.org/10.1002/2014jd022697>, 2015.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., and Belward, A. S.: High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, 418-422540,, <https://doi.org/10.1038/nature20584>, 2016.
- Peltola, O., Vesala, T., Gao, Y., Rätty, O., Alekseychik, P., Aurela, M., Chojnicki, B., Desai, A. R., Dolman, A. J., Euskirchen, E. S., Friborg, T., Göckede, M., Helbig, M., Humphreys, E., Jackson, R. B., Jocher, G., Joos, F., Klatt, J., Knox, S. H., Kowalska, N., Kutzbach, L., Lienert, S., Lohila, A., Mammarella, I., Nadeau, D. F., Nilsson, M. B., Oechel, W. C., Peichl, M., Pypker, T., Quinton, W., Rinne, J., Sachs, T., Samson, M., Schmid, H. P., Sonnentag, O., Wille, C., Zona, D., and Aalto, T.: Monthly gridded data product of northern wetland methane emissions based on up-scaling eddy covariance observations, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1263-1289, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1263-2019>, 2019.
- Peng, S., Piao, S., Bousquet, P., Ciais, P., Li, B., Lin, X., Tao, S., Wang, Z., Zhang, Y., and Zhou, F.: Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010, *Chem. Phys.*, 14545-1456216,, 2016.
- Pérez-Barbería, F. J.: Масштабирование выбросов метана у жвачных животных и глобальные оценки в диких популяциях, *Sci. Total Environ.*, 579, 1572-1580, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.175>, 2017.
- Петренко В.В., Смит А.М., Шефер Х., Ридель К., Брук Э., Баггенстос Д., Харт К., Хуа К., Буизерт К., Шилт А., Файн Х., Митчелл Л., Бауска Т., Орси А., Вайс Р.Ф. и Север-Ингхаус Я.П.: Minimal geological methane emissions during the Younger Dryas-Preboreal abrupt warming event, *Nature*, 548, <https://doi.org/10.1038/nature23316>, 2017.
- Петрон Г., Карион А., Суини К., Миллер Б.Р., Монца С.А., Фрост Г.Дж., Трейнер М., Танс П., Эндрюс А., Кофлер Я., Хельмиг Д., Гюнтер Д., Длугокенки Э., Ланг П., Нью-Бергер Т., Вольтер С., Холл Б., Новелли П., Брюэр А., Конли, С., Хардести, М., Банта, Р., Уайт, А., Нун, Д., Вулф, Д., и Шнелл, Р.: Новый взгляд на выбросы метана и неметановых гидроуглеродов при добыче нефти и природного газа в бассейне Денвер-Джулсбург штата Колорадо, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 6836-6852, <https://doi.org/10.1002/2013jd021272>, 2014.
- Филлипс, Н. Г., Экли, Р., Кроссон, Э. Р., Даун, А., Хутира, Л. Р., Брондфилд, М., Карр, Дж. Д., Чжао, К., и Джексон, Р. Б.: Составление карты утечек из городских трубопроводов: Утечки метана в Бостоне, *Environ. Pollut.*, 1-4173,, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.003>, 2013.
- Pison, I., Ringeval, B., Bousquet, P., Prigent, C., and Papa, F.: Stable atmospheric methane in 2000s: key role of emissions from natural wetlands, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11609-11623, <https://doi.org/10.5194/acp-13-11609-2013>, 2013.
- Pitz, S. and Megonigal, J. P.: Поглотитель метана в лесах умеренной зоны уменьшается из-за выбросов деревьев, *New Phytol.*, 1432-1439214,, <https://doi.org/10.1111/nph.14559>, 2017.
- Platt, U., Allan, W., and Lowe, D.: Hemispheric average Cl atom concentration from  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in atmospheric methane, *Atmos. Chem. Phys.*, 2393-23994,, <https://doi.org/10.5194/acp-4-2393-2004>, 2004.

- <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00522.x>, 2011.
- Репета, Д. Дж., Феррон, С., Соса, О. А., Джонсон, К. Г., Репета, Л. Д., Акер, М., ДеЛонг, Э. Ф., и Карл, Д. М.: Морской метан пара-
- Pollard, D. F., Sherlock, V., Robinson, J., Deutscher, N. M., Connor, B., and Shiona, H.: The Total Carbon Column Observing Network site description for Lauder, New Zealand, *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 977-992, <https://doi.org/10.5194/essd-9-977-2017>, 2017.
- Портманн, Р. В., Дэниел, Дж. С., и Равишанкара, А. Р.: Истощение стратосферного озона из-за закиси азота: влияние других газов, *Philos. T. Roy. Soc. B*, 1256-1264367,, <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0377>, 2012.
- Полтер, Б., Буске, П., Канаделл, Ж.Г., Сиаис, П., Перегон, А., Сонуа, М., Аропа, В.К., Бирлинг, Д.Ж., Бровкин, В., Джонс, С. Д., Joos, F., Gedney, N., Ito, A., Kleinen, T., Koven, C. D., McDonald, K., Melton, J. R., Peng, C. H., Peng, S. S., Prigent, C., Шредер, Р., Райли, В. Дж., Сайто, М., Спани, Р., Тянь, Х. К., Тейлор, Л., Виови, Н., Уилтон, Д., Уилтшир, А., Сюй, Х. У., Чжан, В. W., Zhang, Z., and Zhu, Q. A.: Global wetland contribution to 2000-2012 atmospheric methane growth rate dynamics, *Environ. Res. Lett.*, 12, 094013, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8391>, 2017.
- Prather, M. J., Holmes, C. D., and Hsu, J.: Reactive greenhouse gas scenarios: Систематическое исследование неопределенностей и роли атмосферной химии, *Geophys. Res. Lett.*, L0980339,, <https://doi.org/10.1029/2012gl051440>, 2012.
- Prigent, C., Jimenez, C., and Bousquet, P.: Satellite-Derived Global Surface Water Extent and Dynamics Over the Last 25 Years (GIEMS-2), *J. Geophys. Res.-Atmos.*, e2019JD030711125,, 2020.
- Принн, Р. Г., Вайс, Р. Ф., Фрейзер, П. Дж., Симмондс, П. Дж. холд, Д. М., Альба, Ф. Н., О'Дозэрти, С., Саламех, П., Миллер, В. Р., Huang, J., Wang, R. H. J., Hartley, D. E., Harth, C., Steele, L. P., Sturrock, G., Midgley, P. M., and McCulloch, A.: A history of chemically and radiatively important gases in air deduced from ALE/GAGE/AGAGE, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 17751-17792, 105,2000.
- Рамачандран, П., Рамачандран, Р., и Френцель, П.: Опосредованная растениями эмиссия метана из индийской роши Purvaja, *Glob. Change Biol.*, 1825-183410,, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00834.x>, 2004.
- Ramankutty, N. and Foley, J. A.: Estimating historical changes in global land cover: Пахотные земли от до1700 Глобальный 1992,биогеохим. Су., 997-102713,, 1999.
- Randerson, J. T., Chen, Y., van der Werf, G. R., Rogers, B. M., and Morton, D. C.: Глобальная площадь выжигания и выбросы от сжигания биомассы в результате небольших пожаров, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 117, G04012, <https://doi.org/10.1029/2012jg002128>, 2012.
- Raymond, P. A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., Butman, D., Striegl, R., Mayorga, E., Humborg, C., Kortelainen, P., Dürr, H., Meybeck, M., Ciais, P., and Guth, P.: Глобальные выбросы двуокиси углерода из внутренних водоемов, *Nature*, 355-359503,, <https://doi.org/10.1038/nature12760>, 2013.
- Ren, W. E. I., Tian, H., Xu, X., Liu, M., Lu, C., Chen, G., Melillo, J., Reilly, J., and Liu, J.: Spatial and temporal patterns of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in China's croplands in response to multifactor environmental changes, *Tellus B*, 63, 222-240,

- докс объясняется бактериальной деградацией растворенного органического материала, *Nat. Geosci.*, 884-8879,, <https://doi.org/10.1038/ngeo2837>, 2016.
- Rhee, T. S., Kettle, A. J., and Andreae, M. O.: Выбросы метана и закиси азота из океана: Переоценка с использованием общебассейновых наблюдений в Атлантике, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, D12304114,, <https://doi.org/10.1029/2008JD011662>, 2009a.
- Rhee, T. S., Kettle, A. J., and Andreae, M. O.: Выбросы метана и закиси азота из океана: Переоценка с использованием общебассейновых наблюдений в Атлантике, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, D12304114,, <https://doi.org/10.1029/2008jd011662>, 2009b.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Ks, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Эммерлинг, Й., Эби, К., Хасегава, Т., Хавлик, П., Хампенёдер, Ф., Да Сильва, Л. А., Смит, С., Сте- хфест, Э., Босетти, В., Ом, Й., Гернаат, Д., Масуи, Т., Рогелж, Дж, Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., and Tavoni, M.: The Shared Socioeconomic Path- ways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: Обзор, *Glob. Environ. Change*, 42, 153-168, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>, 2017.
- Rice, A. L., Butenhoff, C. L., Shearer, M. J., Теама, D., Rosenstiel, T. N., and Khalil, M. A. K.: Emissions of anaerobically produced methane by trees, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L03807, <https://doi.org/10.1029/2009GL041565>, 2010.
- Ridgwell, A. J., Marshall, S. J., and Gregson, K.: Con- sumption of atmospheric methane by soils: A process- based model, *Global Biogeochem. Cy.*, 59-7013,, <https://doi.org/10.1029/1998gb900004>, 1999.
- Ридель, Т. П., Вульф, Г. М., Данас, К. Т., Гилман, Дж. Б., Кастер, W. C., Bon, D. M., Vlasenko, A., Li, S.-M., Williams, E. J., Lerner, B. M., Veres, P. R., Roberts, J. M., Holloway, J. S., Lefter, B., Brown, S. S., и Торнтон Дж. А.: Исследование МСМ-моделирования воздействия хлорида нитрила (ClNO<sub>2</sub>) на окисление, производство озона и распределение оксидов азота в загрязненном континентальном потоке, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 3789-3800, <https://doi.org/10.5194/acp-14-3789-2014>, 2014.
- Ригби, М., Монцка, С. А., Принн, Р. Г., Уайт, Дж. У. К., Янг, Д., O'Doherty, S., Lunt, M. F., Ganesan, A. L., Manning, A. J., Симмондс, П. Г., Саламех, П. К., Харт, К. М., Мюле, Й., Вайс, Р. Ф., Fraser, P. J., Steele, L. P., Krummel, P. B., McCulloch, A., and Park, S.: Role of atmospheric oxidation in recent methane growth, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 5373-5377, 114,2017.
- Райли, У. Дж., Субин, З. М., Лоуренс, Д. М., Свенсон, С. К., Torn, M. S., Meng, L., Mahowald, N. M., and Hess, P.: Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM, *Biogeosciences*, 1925-19538,, <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>, 2011.
- Рингваль, Б., Фридлигштейн, П., Ковен, К., Сиайс, П., де Нобле-Дюоудре, Н., Дешарм, Б., и Кадуле, П.: Обратная связь между климатом и CH<sub>4</sub> из водно-болотных угодий и ее взаимодействие с обратной связи между климатом и CO<sub>2</sub>, *Биогеофизика*, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>



2017 гг.

- измерения образцов, *Атмосфера. Chem. Phys.*, 11, 13287-13304, <https://doi.org/10.5194/acp-11-13287-2011>, 2011.
- Rosentreter, J. A., Maher, D. T., Erler, D. V., Murray, R. H., and Eyre, B. D.: Methane emissions partially offset "blue carbon" burial in mangroves, *Sci. Adv.*, eaao49854, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4985>, 2018.
- Саад, К. М., Вунч, Д., Тун, Г. К., Бернат, П., Бун, К., Кон-нор, Б., Дойчер, Н. М., Гриффит, Д. У. Т., Киви, Р., Нотхольт, Я., Роел, К., Шнайдер, М., Шерлок, В. и Веннберг, П. О.: Деривация тропосферного метана по данным TCCON CH<sub>4</sub> и HF наблюдения за суммарной колонной, *Атмосфера. Meas. Tech.*, 2907-29187,, 2014.
- Сандерсон, М. Г.: Биомасса термитов и их выбросы метана и двуокиси углерода: Глобальная база данных, *Global Biogeochem. Су.*, 543-55710,, <https://doi.org/10.1029/96gb01893>, 1996.
- Сантини, М. и Ди Паола, А.: Изменения в стоке мировых рек, прогнозируемые на основе обновленного набора данных высокого разрешения для текущих и будущих климатических зон, *J. Hydrol.*, 768-780, 531,2015.
- Sasakawa, M., Tsunogai, U., Kameyama, S., Nakagawa, F., Nojiri, Y., and Tsuda, A.: Carbon isotopic characterization for the origin of excess methane in subsurface seawater, *J. Geophys. Res.- Oceans*, C03012113,, <https://doi.org/10.1029/2007jc004217>, 2008.
- Сасакава, М., Шимояма, К., Мачида, Т., Цуда, Н., Суто, Х., Аршинов, М., Давыдов, Д., Фофонов, А., Краснов, О., Саеки, Т., Кояма, Ю., и Максюттов, С.: Непрерывные измерения метана из сети вышек над Сибирью, *Теллус Б*, 62, 403- h416, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00494.x>, 2010.
- Сануа, М., Буске, П., Поултер, Б., Перегон, А., Сiais, П., Канаделл, Ж. Г., Длугокенки, Э. Ж., Этиопе, Г., Баствикен, Д., Хоувелинг, С., Янссенс-Маенхаут, Г., Тубиелло, Ф. Н., Кастальди, С., Джексон, Р. Б., Алекс, М., Арора, В. К., Бирлинг, Д. Я., Берга-Маски, П., Блейк, Д. Р., Брейлсфорд, Дж., Бровкин В., Брухвилер Л., Кревуазье К., Крилл П., Кови К., Карри К., Франкенберг К., Гедни Н., Хёглунд-Исакссон Л., Ишизава М., Ито, А., Йоос, Ф., Ким, Х.-С., Кляйнен, Т., Крюммель, П., Ламарк, Ж.-Ф., Лангенфельдс, Р., Локателли, Р., Мачида, Т., Максюттов, С., Макдональд, К. С., Marshall, J., Melton, J. R., Morino, I., Naik, V., O'Doherty, S., Parmentier, F.-J. W., Patra, P. K., Peng, C., Peng, S., Peters, G. P., Pison, I., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Riley, W. J., Saito, M., Santini, M., Schroeder, R., Simpson, I. J., Spahni, R., Steele, P., Takizawa, A., Thornton, B. F., Tian, H., Tohjima, Y., Viovy, N., Voulgarakis, A., ван Виле, М., ван дер Верф, Г. Р., Вайс, Р., Видинмайер, К., Уилтон, Д. Дж., Уилтшир, А., Вор-ти, Д., Вунч, Д., Сюй, Х., Йошида, Ю., Чжан, Б., Чжан, З., и Жу, К.: Глобальный бюджет метана 2000-2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 697-751, <https://doi.org/10.5194/essd-8-697-2016>, 2016.
- Сонуа, М., Буске, П., Поултер, Б., Перегон, А., Сiais, П., Канаделл, Ж. Г., Длугокенки, Э. Ж., Этиопе, Г., Баствикен, Д., Хоувелинг, С., Янссенс-Маенхаут, Г., Тубиелло, Ф. Н., Кастальди, С., Джексон, Р. Б., Алекс, М., Арора, В. К., Бирлинг, Д. Дж., Берга-Маски, П., Блейк, Д. Р., Брейлсфорд, Г., Брухвилер, Л., Кревуазье, К., Крилл, П., Кови, К., Франкенберг, К., Гедни, Н., Хёглунд-Исакссон, Л., *Earth Syst. Sci. Data*, 1561-1623, 12,2020

Ишизава, М., Ито, А., Йоос, Ф., Ким, Х.-С., Кляйнен, Т., Крюммель, П., Ламарк, Ж.-Ф., Лангенфельдс, Р., Локателли, Р., Мачида, Т., Максюттов, С., Мелтон, Дж. Р., Морино, И., Найк, В., О'Дозрти, С., Парментье, Ф.-Ж.В., Патра, П.К., Пенг, К.,

- Пенг С., Питерс Г. П., Пизон И., Принн Р., Рамонет М., Рилей, У. Дж., Сайто, М., Сантини, М., Шредер, Р., Симпсон, И. Дж., Спахни, Р., Такизава, А., Торнтон, Б. Ф., Тиан, Х., Тохджима, Й., Виови, Н., Вулгаракис, А., Вайс, Р., Уилтон, Д. Дж.
- Шир, А., Уорти, Д., Ванч, Д., Сюй, Х., Йошида, Й., Чжан, Б., Чжан, З. и Жу, К.: Изменчивость и квазидекадные изменения в бюджете метана за период 2000-2012 годов, *Atmos. Chem. Phys.*, 11135-1116117,, <https://doi.org/10.5194/acp-17-11135-2017>2017.
- Сонуа, М., Ставерт, А. Р., Поултер, Б., Буске, П., Канаделл, Ж. Г., Джексон, Р. Б., Раймонд, П. А., Длугокенки, Э. Ж., Хоувел-инг, С., Патра, П. К., Сiais, П., Арора, В. К., Баствикен Д., Берга-Маски П., Блейк Д. Р., Брейлсфорд Г., Брухвилер Л., Карлсон К. М., Кэррол М., Кастальди С., Чандра Н., Кревуазье К., Крилл П. М., Кови К., Карри, К. Л., Этиопе, Г., Франкенберг, К., Гедни, Н., Хегглин, М. И., Хёглунд-Исакссон, Л., Хугелиус, Г., Ишизава, М., Ито, А., Янссенс-Маенхаут, Г., Йенсен, К. М., Йоос, Ф., Kleinen, T., Krummel, P. V., Langenfelds, R. L., Laruelle, G. G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K. C., McNorton, J., Miller, P. A., Melton, J. R., Morino, I., Müller, J., Murgia-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R. J., Peng, C., Peng, S., Peters, G. P., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W. J., Rosentreter, J. A., Segers, A., Simpson, I. J., Shi, H., Smith, S. J., Steele, L. P., Торнтон, Б. Ф., Тиан, Х., Тохджима, Й., Тубиелло, Ф. Н., Цурута, А., Виови, Н., Вулгаракис, А., Вебер, Т. С., ван Виле, М., ван дер Верф, Г. Р., Вайс, Р. Ф., Уорти, Д., Вунч, Д., Инь, Й., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhu, Q., and Zhuang, Q.: Supplemental data of the Global Carbon Project Methane Budget (2019Version 2.0), Data set, Global Carbon Project, <https://doi.org/10.18160/GCP-CH4-2019>, 2020. Schepers, D., Guerlet, S., Butz, A., Landgraf, J., Frankenberg, C., Hasekamp, O., Blavier, J. F., Deutscher, N. M., Griffith, D. W. T., Hase, F., Kyro, E., Morino, I., Sherlock, V., Sussmann, R., and Aben, I.: Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: Сравнение производительности прокси- и физических алгоритмов извлечения, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, D10307,117, 2012.
- Шнайзинг О., Берроуз Дж. П., Дикерсон Р. Р., Бухвиц М., Рейтер М. и Бовенсманн Х.: Дистанционное зондирование выбросов фугитивного метана при добыче нефти и газа в североамериканских плотных геологических формациях, *Будущее Земли*, 2, 548-558, <https://doi.org/10.1002/2014EF000265>, 2014.
- Шредер, Р., Макдональд, К. К., Чапман, Б., Дженсен, К., Подест, Е., Тесслер, З., Бон, Т. Дж. и Циммерман, Р.: Разработка и оценка многолетнего набора данных о поверхности земли, полученных на основе данных активного/пассивного микроволнового дистанционного зондирования, *Remote Sens.*, 7, 16668-16732, <https://doi.org/10.3390/rs71215843>, 2015.
- Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schadel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., Hugelius, G., Koven, C. D., Kuhry, P., Lawrence, D. M., Natali, S. M., Olefeldt, D., Romanovsky, V. E., Schaefer, K., Turetsky, M. R., Treat, C. C., and Vonk, J. E.: Climate change and the permafrost carbon feedback, *Nature*, 520, 171-179, <https://doi.org/10.1038/nature14338>, 2015.
- Швицке, С., Шервуд, О. А., Брухвилер, Л. М. П., Миллер, J. В., Этиопе, Г., Dlugokencky, E. J., Michel, S. E., Arling, V. A., Vaughn, B. H., White, J. W. C., and

- Tans, P. P.: Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database, *Nature*, 88-91538,, <https://doi.org/10.1038/nature19797>, 2016.
- Segers, A. and Houweling, S.: Описание производственной цепочки инверсии CH<sub>4</sub>, отчет CAMS (Служба атмосферного мониторинга "Коперник"), доступно по адресу: [https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2018-11/CAMS73\\_2015SC3\\_D73.2.5.5-2018\\_201811\\_production\\_chain\\_v1\\_0.pdf](https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2018-11/CAMS73_2015SC3_D73.2.5.5-2018_201811_production_chain_v1_0.pdf) (последнее обращение: март27 2020), 2018.
- Шахова, Н., Семилетов, И., Салюк, А., Юсупов, В., Космач, Д., и Густафссон, О.: Extensive Methane Venting to the Atmo- sphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf, *Sci- ence*, 1246-1250327,, <https://doi.org/10.1126/science.1182221>, 2010.
- Шахова, Н., Семилетов, И., Лейфер, И., Сергиенко, В., Салюк, А., Космач, Д., Черных, Д., Стаббс, К., Никольский, Д., Тумской, В., и Густафссон, О.: Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nat. Geosci.*, 7, 64- h70, <https://doi.org/10.1038/ngeo2007>, 2014.
- Шахова, Н., Семилетов, И., Сергиенко, В., Лобковский, Л., Юсупов, В., Салюк, А., Саломатин, А., Черных, Д., Космач, Д., Пантелеев, Г., Никольский, Д., Самаркин, В., Жойе, С., Чаркин, А., Ду-дарев, О., Мелузов, А., и Густафссон, О.: Восточно-Сибирский арктический шельф: к дальнейшей оценке потоков метана, связанных с вечной мерзлотой, и роли морского льда, *Philos. T. R. Soc. S.-A*, 373, h2052, <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>, 2015.
- Шинделл Д., Куйленстьерна Ж. К. И., Виньяти Е., ван Дингенен Р., Аманн М., Климонт З., Аненберг С. К., Мюллер Н., Янссенс-Маенхаут, Г., Расс, Ф., Шварц, Ж., Фалувеги, Г., Поццоли, Л., Купияйнен, К., Хёглунд-Исакссон, Л., Эмберсон, Л., Стритс, Д., Ramanathan, V., Hicks, K., Oanh, N. T. K., Milly, G., Williams, M., Demkine, V., and Fowler, D.: Simul- taneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improv- ing Human Health and Food Security, *Science*, 335, 183-189, <https://doi.org/10.1126/science.1210026>, 2012.
- Shorter, J. H., Mcmanus, J. B., Kolb, C. E., Allwine, E. J., Lamb, B. K., Mosher, B. W., Harriss, R. C., Partchatka, U., Fischer, H., Harris, G. W., Crutzen, P. J., and Karbach, H.-J.: Измерения эмиссии метана в городских районах Восточной Германии, *J. Atmos. Chem.*, 121-140, 124, 1996.
- Simpson, I. J., Thurtell, G. W., Kidd, G. E., Lin, M., Demetriades-Shah, T. H., Flitcroft, I. D., Kanemasu, E. T., Nie, D., Bronson, K. F., and Neue, H. U.: Измерения потоков метана с орошаемого рисового поля на Филиппинах с помощью перестраиваемого диодного лазера, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 100, 7283-7290, <https://doi.org/10.1029/94jd03326>, 1995.
- Simpson, I. J., Sulback Andersen, M. P., Meinardi, S., Bruhwiler, L., Blake, N. J., Helmig, D., Rowland, F. S., and Blake, D. R.: Long-term decline of global atmospheric ethane concentrations and implications for methane, *Nature*, 488, 490-494, <https://doi.org/10.1038/nature11342>, 2012.
- Smith, L. K. and Lewis, W. M.: Seasonality of methane emissions from five lakes and associated wetlands of the Colorado Rockies, *Glob. Biogeochem. Cy.*, 323-338, 6, 1992.
- Spahni, R., Wania, R., Neef, L., van Weele, M., Pison, I., Bousquet, P., Frankenberg, C., Foster, P. N., Joos, F., Prentice, I. C., and van Velthoven, P.: Constraining global methane emis-

sions and absorptake by ecosystems, *Biogeosciences*, 1643-16658,, <https://doi.org/10.5194/bg-8-1643-2011>, 2011.

- Стэнли, Э. Х., Кассон, Н. Дж., Кристель, С. Т., Кроуфорд, Дж. Т., Локен, Л. С., and Oliver, S. K.: The ecology of methane in streams and rivers: patterns, controls, and global significance, *Ecol. Monogr.*, 146-171, <https://doi.org/10.1890/15-1027>, 2016.
- Стэнли К. М., Грант А., О'Дозерти С., Янг Д., Мэннинг А. Дж., Ставерт А. Р., Спейн Т. Г., Саламех П. К., Харт К. М., Сим... монде, П. Г., Стерджес, У. Т., Орам, Д. Е., и Дервент, Р. Г.: Измерения парниковых газов с британской сети высоких башен: техническое описание и первые результаты, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 1437-1458, <https://doi.org/10.5194/amt-11-1437-2018>, 2018.
- Ставерт, А. Р., Канаделл, Ж. Г., Сонуа, М., Буске, П., Поултер, Б., Джексон, Р. Б., Раймонд, П. А., Регнье, П., Лауэрвальд, Р., Патра, П. К., Аллен, Г. Х., Бергамаски, П., Сийс, П., Чандра, Н., Ишизава, М., Ито, А., Кляйнен, Т., Максюттов, С., МакНортон, Ж., Густафсон, А., Мелтон, Ж. Р., Мюллер, Ж., Нива, Й., Пенг, С., Riley, W. J., Segers, A., Tian, H. Q., Tsuruta, A., Yin, Y., Zhang, Z., Zheng, B., and Zhuang, Q.: Regional trends and drivers of 2000-2017 global methane budget, in preparation, 2020.
- Стил, Л. П., Фрейзер, П. Дж., Расмуссен, Р. А., Халил, М. А. К., Кон... way, T. J., Crawford, A. J., Gammon, R. H., Masarie, K. A., and Thoning, K. W.: The global distribution of methane in the troposphere, *J. Atmos. Chem.*, 125-171, 5, 1987.
- Stocker, B. D., Spahni, R., and Joos, F.: ДУРТОР: экономически эффективная реализация TOPMODEL для моделирования субсеточной пространственно-временной динамики глобальных болот и торфяников, *Geosci. Model Dev.*, 3089-31107, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-3089-2014>, 2014.
- Столпер, Д. А., Лоусон, М., Дэвис, К. Л., Феррейра, А. А., Нето, E. V. S., Ellis, G. S., Lewan, M. D., Martini, A. M., Tang, Y., Schoell, M., Sessions, A. L., and Eiler, J. M.: Formation temperatures of thermogenic and biogenic methane, *Science*, h344.1500, <https://doi.org/10.1126/science.1254509>, 2014.
- Суини К., Карион А., Вольтер С., Ньюбергер Т., Гюнтер Д., Хиггс Ж. А., Эндрюс А. Е., Ланг П. М., Нефф Д., Длугокенки Е., Миллер Дж. Б., Montzka, S. A., Miller, B. R., Masarie, K. A., Bieraud, S. C., Novelli, P. C., Crotwell, M., Crotwell, A. M., Thoning, K., and Tans, P. P.: Сезонная климатология CO<sub>2</sub> через Северную Америку по данным авиационных измерений в рамках программы NOAA/ESRL Глобальная справочная сеть по парниковым газам, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 5155-5190120, <https://doi.org/10.1002/2014jd022591>, 2015.
- Свиннертон, Дж. У. и Линненбом, В. Дж.: Газообразные углеводороды в морской воде: Определение, *Science*, 156, 1119-1120, <https://doi.org/10.1126/science.156.3778.1119>, 1967.
- Tan, Z. and Zhuang, Q.: Выбросы метана из озер Панарктики в течение 21 века: Анализ с помощью основанных на процессах моделей эволюции и биогеохимии озер, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 2641-2653120, <https://doi.org/10.1002/2015JG003184>, 2015.
- Tan, Z., Zhuang, Q., Henze, D. K., Frankenberg, C., Dlugokencky, E., Sweeney, C., Turner, A. J., Sasakawa, M., and Machida, T.: Inverse modeling of pan-Arctic methane emissions at high spatial resolution: what can we learn from assimilating satellite retrievals and using different process-based wetland and lake biogeochemical models?, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 12649-12666, <https://doi.org/10.5194/acp-16-12649-2016>, 2016.
- Tans, P. and Zwellberg, C.: 17th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2013), GAW Report, WMO, Geneva, available at: <https://library.wmo.int/index.php?>

2017 г.

- lvl=notice\_display&id=16373#.XnpBPW7jIq8 (последнее обращение: 29 июня 2020 г.), 2014.
- Тейлор, П. Г., Билински, Т. М., Фанчер, Х. Р. Ф., Кливленд, С. С., Nemergut, D. R., Weintraub, S. R., Wieder, W. R., and Townsend, A. R.: Palm oil wastewater methane emissions and bioenergy potential, *Nat. Clim. Change*, 4, 151-152, <https://doi.org/10.1038/nclimate2154>, 2014.
- Thanwerdas, J., Saunois, M., Berchet, A., Pison, I., Hauglustaine, D., Ramonet, M., Crevoisier, C., Baier, B., Sweeney, C., and Bousquet, P.: Влияние атомарного хлора на моделирование общих метана и его изотопного соотношения  $^{13}\text{C} : ^{12}\text{C}$  в глобальном масштабе, *Атмосфера. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2019-925>, на рассмотрении, 2019.
- Thompson, R. L., Sasakawa, M., Machida, T., Aalto, T., Worthy, D., Lavric, J. V., Lund Myhre, C., and Stohl, A.: Methane fluxes in high northern latitudes for 2005-2013 estimated using a Bayesian atmospheric inversion, *Atmos. Chem. Phys.*, 3553-17, h3572, <https://doi.org/10.5194/acp-17-3553-2017>, 2017.
- Тонинг, К. В., Танс, П. П., и Комхир, В. Д.: Атмосферный диоксид углерода в обсерватории Мауна-Лоа. 2. Анализ данных NOAA GMCC, 1974-1985, *J. Geophys. Res.*, 8549-94, 8565, 1989.
- Thorneloe, S. A., Barlaz, M. A., Peer, R., Huff, L. C., Davis, L., and Mangino, J.: Waste management, in *Atmospheric Methane: Its Role in the Global Environment*, edited by: Khalil, M., Springer-Verlag, New York, 234-262, 2000.
- Торнтон, Б. Ф., Вик, М., и Крилл, П. М.: Двойной учет ставит под сомнение точность инвентаризации метана в высоких широтах, *Geophys. Res. Lett.*, 12569-1257743, <https://doi.org/10.1002/2016GL071772>, 2016a.
- Торнтон, Б. Ф., Гейбель, М. К., Крилл, П. М., Хумборг, К. и Мерг, К.-М.: Потоки метана из моря в атмосферу через шельфовые моря Сибири, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5869-h5877, <https://doi.org/10.1002/2016GL068977>, 2016b.
- Торнтон, Б. Ф., Прайтерч, Дж., Андерссон, К., Брукс, И. М., Солсбери, Д., Тьернстрём, М., и Крилл, П. М.: Наблюдения за потоками метана с помощью вихревой ковариации с кораблей сдерживают выбросы арктического моря, *Sci. Adv.*, eaay79346, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay7934>, 2020.
- Thornton, J. A., Kercher, J. P., Riedel, T. P., Wagner, N. L., Козик, Дж., Холлоуэй, Дж. С., Дюбе, В. П., Вулф, Г. М., Куинн, П. К., Миддлбрук, А. М., Александр, Б., и Браун, С. С.: Большой источник атомарного хлора, выявленный на основе химии реактивного азота в середине континента, *Nature*, 464, 271-274, <https://doi.org/10.1038/nature08905>, 2010.
- Tian, H., Xu, X., Liu, M., Ren, W., Zhang, C., Chen, G., and Lu, C.: Пространственные и временные закономерности потоков  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  в территорияльных экосистемах Северной Америки в течение 1979-2008 годов: применение к глобальной модели биогеохимии, *Biogeosciences*, 7, 2673-2694, <https://doi.org/10.5194/bg-7-2673-2010>, 2010.
- Tian, H., Xu, X., Lu, C., Liu, M., Ren, W., Chen, G., Melillo, J., and Liu, J.: Net exchanges of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{N}_2\text{O}$  between China's terrestrial ecosystems and atmosphere and their contribution to the global warming of climate, *J. Geophys. Res.-Biogeosci.*, G02011, <https://doi.org/10.1029/2010jg001393>, 2011.

- Health Sustain., 1-201., <https://doi.org/10.1890/ehs14-0015.1>, 2015.
- Тянь, Х., Лу, К., Снайс, П., Михалак, А. М., Канаделл, Ж. Г., Сайкава, Э., Хантзингер, Д. Н., Гурни, К. Р., Ситч, С., Чжан, Б., Ян, Ж., Буске, П., Bruhwiler, L., Chen, G., Dlugokencky, E., Friedlingstein, P., Melillo, J., Pan, S., Poulter, B., Prinn, R., Saunois, M., Schwalm, C. R., and Wofsy, S. C.: Наземная биосфера как чистый источник парниковых газов в атмосферу, *Nature*, 225-228531., <https://doi.org/10.1038/nature16946>, 2016.
- Tian, H., Yang, J., Xu, R., Lu, C., Canadell, J. G., Davidson, E. A., Jackson, R. B., Arneeth, A., Chang, J., Ciais, P., Gerber, S., Ito, A., Joos, F., Lienert, S., Messina, P., Olin, S., Pan, S., Peng, C., Saikawa, E., Thompson, R. L., Vuichard, N., Winiwarter, W., Zechle, S., and Zhang, B.: Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Величина, атрибуция и неопределенность, *Glob. Change Biol.*, 640-65925., <https://doi.org/10.1111/gcb.14514>, 2019.
- Tiwari, Y. K. and Kumar, K. R.: Программы наблюдения за парниковыми газами в Индии, *Asian GAWgreenhouse Gases 3 Korea Meteorol. Адм. Чунгнам Южная Корея*, 2012.
- Tsuruta, A., Aalto, T., Backman, L., Hakkarainen, J., van der Laan- Luijkx, I. T., Krol, M. C., Spahni, R., Houweling, S., Laine, M., Dlugokencky, E., Gomez-Pelaez, A. J., van der Schoot, M., Langenfelds, R., Ellul, R., Arduini, J., Apadula, F., Gerbig, C., Feist, D. G., Kivi, R., Yoshida, Y., and Peters, W.: Global methane emission estimates for 2000-2012 from Carbon- Tracker Europe-CH4 v1.0, *Geosci. Model Dev.*, 1261-128910., <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1261-2017>, 2017.
- Tubiello, F. N.: Greenhouse Gas Emissions Due to Agriculture, in: Elsevier Encyclopedia of Food Systems, 1, 196-205, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21996-3>, 2019.
- Tubiello, F. N., Salvatore, M., Rossi, S., Ferrara, A., Fitton, N., and Smith, P.: База данных FAOSTAT по выбросам парниковых газов от сельского хозяйства, *Environ. Res. Lett.*, h8,015009, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015009>, 2013.
- Турецкий М.Р., Котовска А., Бубье Ж., Дисе Н.Б., Крилл П., Хорнибрук Э.Р.К., Минккинен К., Мур Т.Р., Майерс-Смит И.Х., Нюкянен Х., Олефельдт Д., Ринне Я., Саарнио С., Shurpali, N., Tuittila, E.-S., Waddington, J. M., White, J. R., Wickland, K. P., and Wilmking, M.: A synthesis of methane emissions from northern, temperate, and subtropical wetlands, *Glob. Change Biol.*, 20, 2183-2197, <https://doi.org/10.1111/gcb.12580>, 2014.
- Turner, A. J., Frankenberg, C., Wennberg, P. O., and Jacob, D. J.: Неоднозначность в причинах десятилетних тенденций в атмосферном метане и гидроксиле, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 114, 5367-5372, 2017.
- Turner, A. J., Fung, I., Naik, V., Horowitz, L. W., and Cohen, R. S.: Модуляция изменчивости гидроксила под влиянием ENSO в отсутствие внешнего воздействия, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 115, 8931-8936, <https://doi.org/10.1073/pnas.1807532115>, 2018.
- Turner, A. J., Frankenberg, C., and Kort, E. A.: Interpreting contemporary trends in atmospheric methane, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 2805-2813116., <https://doi.org/10.1073/pnas.1814297116>, 2019.
- Апстилл-Годдард, Р. К., Барнс, Ж., Фрост, Т., Паншон, С. и

- Море: Поступление с низкой соленостью, удаление из эстуариев и атмосферный поток, *Global Biogeochem. Cy.*, 1205-121714,, <https://doi.org/10.1029/1999GB001236>, 2000.
- USEPA: Методологии оценки выбросов парниковых газов для биогенных выбросов из отдельных категорий источников: Утилизация твердых отходов Очистка сточных вод Перегонка этанола, Группа по политике измерений, US EPA, доступно по адресу:  
[https://www3.epa.gov/ttnchie1/efpac/ghg/GHG\\_Biogenic\\_Report\\_draft\\_Dec1410.pdf](https://www3.epa.gov/ttnchie1/efpac/ghg/GHG_Biogenic_Report_draft_Dec1410.pdf) (последнее обращение: 11 марта 2020 г.), 2010a. USEPA: Управление атмосферных программ (6207J), Выбросы метана и закиси азота из природных источников, Агентство по охране окружающей среды США, EPA 430-R-10-001, Вашингтон, доступен 20460, по адресу: <http://nepis.epa.gov/> (последнее обращение: 29 июнь 2020), 2010b.
- USEPA: Проект: Глобальные антропогенные выбросы парниковых газов, не связанных с CO<sub>2</sub>: 1990-2030, EPA 430-R-03-002, United States Environmental Protection Agency, Washington D.C, 2011.
- USEPA: Глобальные антропогенные выбросы парниковых газов, не связанных с CO<sub>2</sub>, в 1990-2030 годах, EPA 430-R-12-006, Агентство по охране окружающей среды США, Вашингтон, округ Колумбия, 2012.
- USEPA: Проект инвентаризации выбросов и поглотителей парниковых газов США: 1990-2014, EPA 430-R-16-002, Агентство по охране окружающей среды США, Вашингтон, округ Колумбия, США, 2016.
- Валентайн, Д. В., Холланд, Е. А., и Шимель, Д. С.: Экосистемный и физиологический контроль над производством метана в северных болотах, *J. Geophys. Res.*, 1563-1571, 99,1994.
- Ван дер Верф, Г. Р., Рандерсон, Дж. Т., Джилио, Л., Коллатц, Г. Дж., Му, М., Касибхатла, П. С., Мортон, Д. К., ДеФрис, Р. С., Джин, Й., и ван Левен, Т. Т.: Глобальные выбросы от пожаров и вклад обезлесения, саванн, лесов, сельского хозяйства и торфяных пожаров (1997-2009), *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 11707-11735, 2010.
- ван дер Верф, Г. Р., Рандерсон, Дж. Т., Джилио, Л., ван Левен, Т. Т., Чен, Й., Роджерс, Б. М., Му, М., ван Марле, М. Я. Е., Мортон, Д. С., Collatz, G. J., Yokelson, R. J., and Kasibhatla, P. S.: Global fire emissions estimates during 1997-2016, *Earth Syst. Sci. Data*, 9, 697-720, <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>, 2017.
- ван Марле, М. Ж. Е., Кластер, С., Маги, Б. И., Марлон, Ж. Р., Да...  
ниау, А.-Л., Филд, Р. Д., Арнет, А., Форрест, М., Хэннон, С., Kehrwald, N. M., Knorr, W., Lasslop, G., Li, F., Man-geon, S., Yue, C., Kaiser, J. W., and van der Werf, G. R.: His-toric global biomass burning emissions for CMIP6 (BB4CMIP) based on merging satellite observations with proxies and fire models (1750-2015), *Geosci. Model Dev.*, 3329-335710,, 2017.
- Вардаг, С. Н., Хаммер, С., О'Доэрти, С., Спейн, Т. Г., Вастин, Б., Джордан, А. и Левин, И.: Сравнение непрерывных атмосферных измерений CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> и 2NO - результаты кампании с использованием передвижных приборов в Мейс Хед, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 8403-8418, <https://doi.org/10.5194/acp-14-8403-2014>, 2014.
- Verpoorter, C., Kutser, T., Seekell, D. A., and Tranvik, L. J.: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Глобальная инвентаризация озер на основе спутниковых снимков высокого разрешения, *Geophys. Res. Lett.*, 6396-640241,, <https://doi.org/10.1002/2014gl060641>, 2014.
- Вулгаракис, А., Найк, В., Ламарк, Ж.-Ф., Шинделл, Д. Т., Янг, П. Ж., Пратер, М. Ж., Уайлд, О., Филд, Р. Д., Бергманн, Д., Камерон-Смит, П., Ционни, И., Коллинз, В. Ж., Далсерен, С. Б., Доэрти, Р. М., Eyring, V., Faluvegi, G., Folberth, G. A., Horowitz, L.

- W., Josse, B., MacKenzie, I. A., Nagashima, T., Plummer, D. A., Righi, M., Rumbold, S. T., Stevenson, D. S., Strode, S. A., Sudo, K., Szopa, S., and Zeng, G.: Analysis of present day and future OH and methane lifetime in the ACCMIP simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 2563-258713,, <https://doi.org/10.5194/acp-13-2563-2013>, 2013.
- Voulgarakis, A., Marlier, M. E., Faluvegi, G., Shindell, D. T., Tsigaridis, K., and Mangeon, S.: Interannual variability of tropospheric trace gases and aerosols: Роль выбросов от сжигания биомассы, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 120, 7157-7173, <https://doi.org/10.1002/2014jd022926>, 2015.
- Вальманн, К., Пинеро, Е., Бурвич, Е., Хаккель, М., Хенсен, К., Дейл, А., и Рюпке, Л.: Глобальный кадастр гидрата метана в морских отложениях: Теоретический подход, *Энергия*, 2449-2498, 5,2012.
- Walter Anthony, K. M., Daanen, R., Anthony, P., Schneider von Deimling, T., Ping, C.-L., Chanton, J. P., and Grosse, G.: Present-day permafrost carbon feedback from thermokarst lakes, in: EPIC3XI, Международная конференция по вечной мерзлоте, Потсдам, Германия, 20-24 июня Потсдам2016,, Германия, 2016.
- Wang, F., Maksyutov, S., Tsuruta, A., Janardanan, R., Ito, A., Sasakawa, M., Machida, T., Morino, I., Yoshida, Y., Kaiser, J. W., Janssens-Maenhout, G., Dlugokencky, E. J., Mammarella, I., Lavric, J. V., and Matsunaga, T.: Methane Emission Estimates by the Global High-Resolution Inverse Model Using National Inventories, *Remote Sens.*, h11,2489,<https://doi.org/10.3390/rs11212489>, 2019a.
- Wang, X., Jacob, D. J., Eastham, S. D., Sulprizio, M. P., Zhu, L., Chen, Q., Alexander, B., Sherwen, T., Evans, M. J., Lee, B. H., Haskins, J. D., Lopez-Hilfiker, F. D., Thornton, J. A., Huey, G. L., and Liao, H.: The role of chlorine in global tropospheric chemistry, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3981-4003, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3981-2019>, 2019b.
- Wang, Z., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Dils, B., Griffith, D. W. T., Schmidt, M., Ramonet, M., and Gerbig, C.: Повторное определение дмольной доли CH<sub>4</sub> в тропосферной колонне по усредненным данным солнечной абсорбционной FTIR-спектроскопии с использованием <sup>2</sup>NO в качестве косвенного показателя, *Atmos. Измер. Tech.*, 3295-33057,, <https://doi.org/10.5194/amt-7-3295-2014>, 2014.
- Wang, Z.-P., Gu, Q., Deng, F.-D., Huang, J.-H., Megonigal, J. P., Yu, Q., Lü, X.-T., Li, L.-H., Chang, S., Zhang, Y.-H., Feng, J.-C., and Han, X.-G.: Methane emissions from the trunks of living trees on upland soils, *New Phytol.*, 211, 429-439, <https://doi.org/10.1111/nph.13909>, 2016.
- Wania, R., Ross, I., and Prentice, I. C.: Implementation and evaluation of a new methane model within a dynamic global vegetation model: LPJ-WHyMe v1.3.1, *Geosci. Model Dev.*, 3, 565-584, <https://doi.org/10.5194/gmd-3-565-2010>, 2010.
- Вания, Р., Мелтон, Дж. Р., Ходсон, Э. Л., Поултер, Б., Рингваль, Б., Спахни, Р., Бон, Т., Авис, К. А., Чен, Г., Елисеев, А.В., Хопкрофт, П. О., Райли, В. Дж., Субин, З. М., Тиан, Х., ван Боде, Р. М., Kleinen, T., Yu, Z. C., Singarayer, J. S., Zürcher, S., Lettenmaier, D. P., Beerling, D. J., Denisov, S. N., Prigent, C., Papa, F., and Kaplan, J. O.: Present state of global wetland extent and wetland methane modeling: methodology of a model inter-comparison project (WETCHIMP), *Geosci. Model Dev.*, 617-6416,, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>



2017 гг.

- в Азии III: варианты смягчения последствий и будущие потребности в исследованиях, *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 23-36, 58,2000.
- Weber, T., Wiseman, N. A., and Kock, A.: Выбросы метана в глобальном океане доминируют в мелководных прибрежных водах, *Nat. Commun.*10,, 1-10, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12541-7>, 2019.
- Вестбрук, Г. К., Тэтчер, К. Е., Ролинг, Е. Я., Пиотровски, А. М., Pålke, H., Osborne, A. H., Nisbet, E. G., Minshull, T. A., Lanoisellé, M., James, R. H., Hühnerbach, V., Green, D., Fisher, R. E., Crocker, A. J., Chabert, A., Bolton, C., Beszczynska-Möller, A., Berndt, C., and Aquilina, A.: Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15608, <https://doi.org/10.1029/2009GL039191>, 2009.
- Уолен, С. С.: Биогеохимия обмена метаном между естественными водно-болотными угодьями и атмосферой, *Environ. Eng. Sci.*, 22, 73-94, <https://doi.org/10.1089/ees.2005.22.73>, 2005.
- Widhalm, B., Bartsch, A., and Heim, V.: Новый подход к характеристике тундровых заболоченных регионов с помощью спутниковых данных SAR в диапазоне C, *Int. J. Remote Sens.*, 36, 5537-5556, <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1101505>, 2015.
- Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Emmons, L. K., Al-Saadi, J. A., Orlando, J. J., and Soja, A. J.: The Fire INventory from NCAR (FINN): глобальная модель высокого разрешения для оценки выбросов от открытого горения, *Geosci. Model Dev.*, 4, 625- 641, <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>, 2011.
- Вик, М., Торнтон, Б. Ф., Баствикен, Д., Макинтайр, С., Варнер, Р. К., and Crill, P. M.: Energy input is primary controller of methane bubbling in subarctic lakes, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2013GL058510, <https://doi.org/10.1002/2013gl058510>, 2014.
- Wik, M., Thornton, B. F., Bastviken, D., Uhlbäck, J., and Crill, P. M.: Biased sampling of methane release from northern lakes: Проблема для экстраполяции, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 1256-1262, <https://doi.org/10.1002/2015gl066501>, 2016a.
- Wik, M., Varner, R. K., Anthony, K. W., MacIntyre, S., and Bastviken, D.: Чувствительные к климату северные озера и пруды являются критическими компонентами выделения метана, *Nat. Geosci.*, 99-1059,, <https://doi.org/10.1038/ngeo2578>, 2016b.
- Wunderlich, J., Chen, H., Gerbig, C., Seifert, T., Kolle, O., Lavric, J. V., Kaiser, C., Höfer, A., and Heimann, M.: Continuous low-maintenance CO/CH<sub>4</sub>/HO<sub>2</sub> measurements at Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 1113-1128, <https://doi.org/10.5194/amt-3-1113-2010>, 2010.
- Вудворд Г., Гесснер М.О., Гиллер П.С., Гулис В., Хладыз С., Лекерф А., Мальмквист Б., Макки Б.Г., Тигс С.Д., Карисс, Х., Добсон, М., Элосеги, А., Феррейра, В., Граса, М. А. С., Флейтух, Т., Лакурсьер, Ж. О., Нистореску, М., Pozo, J., Ris-noveanu, G., Schindler, M., Vadineanu, A., Vought, L. B.-M., and Chauvet, E.: Continental-Scale Effects of Nutrient Pollution on Stream Ecosystem Functioning, *Science*, 336, 1438-1440, <https://doi.org/10.1126/science.1219534>, 2012.
- Worden, J. R., Bloom, A. A., Pandey, S., Jiang, Z., Worden, H. M., Walker, T. W., Houweling, S., and Röckmann, T.: Reduced biomass burning emissions reconcile conflicting estimates of

the post-2006 atmospheric methane budget, *Nat. Commun.*, h8,2227, <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02246-0>, 2017.  
Уэбблс, Д. Дж. и Хэйхоу, К.: Атмосферный метан и глобальные изменения, *Earth-Sci. Rev.*, 177-210, 57,2002.

- Вунч, Д., Тун, Г. К., Блавые, Ж.-Ф. Л., Washenfelder, R. A., Notholt, J., Connor, B. J., Griffith, D. W. T., Sherlock, V., and Wennberg, P. O.: The Total Carbon Column Observing Network, *Philos. T. R. Soc. S.-A.*, h369, <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>, 2011.
- Вунч, Д., Тун, Г. К., Хеделиус, Я. К., Визенор, Н., Роел, К. М., Saad, K. M., Blavier, J.-F. L., Blake, D. R., and Wennberg, P. O.: Количественная оценка потерь переработанного природного газа в воздушном бассейне Южного побережья штата Калифорния с помощью долгосрочных измерений этана и метана, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 14091-14105, <https://doi.org/10.5194/acp-16-14091-2016>, 2016.
- Wunch, D., Jones, D. B. A., Toon, G. C., Deutscher, N. M., Hase, F., Notholt, J., Sussmann, R., Warneke, T., Kuenen, J., Denier van der Gon, H., Fisher, J. A., and Maasackers, J. D.: Emissions of methane in Europe inferred by total column measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 3963-398019, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3963-2019>, 2019.
- Xu, X. F., Tian, H. Q., Zhang, C., Liu, M. L., Ren, W., Chen, G. S., Lu, C. Q., and Bruhwiler, L.: Attribution of spatial and temporal variations in terrestrial methane flux over North America, *Bio-geosciences*, 3637-36557, <https://doi.org/10.5194/bg-7-3637-2010>, 2010.
- Yan, X., Akiyama, H., Yagi, K., and Akimoto, H.: Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the Inter-2006 governmental Panel on Climate Change Guidelines, *Global Biogeochem. Cy.*, 23, <https://doi.org/10.1029/2008gb003299>, 2009.
- Yin, Y., Chevallier, F., Ciais, P., Broquet, G., Fortems-Cheiney, A., Pison, I., and Saunois, M.: Decadal trends in global CO emissions as seen by MOPITT, *Atmos. Chem. Phys.*, 13433-15, 13451, <https://doi.org/10.5194/acp-15-13433-2015>, 2015.
- Yoshida, Y., Kikuchi, N., Morino, I., Uchino, O., Oshchepkov, S., Бриль, А., Саеки, Т., Шутгенс, Н., Тун, Г. К., Вунч, Д., Роел, С. М., Wennberg, P. O., Griffith, D. W. T., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Connor, B., Rettinger, M., Sussmann, R., Ahonen, P., Heikkinen, P., Kyrö, E., Mendonca, J., Strong, K., Hase, F., Dohe, S., and Yokota, T.: Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1533-1547, <https://doi.org/10.5194/amt-6-1533-2013>, 2013.
- Ивер Квок, К. Э., Мюллер, Д., Калдоу, К., Лебег, Б., Мёнстер, J. G., Rella, C. W., Scheutz, C., Schmidt, M., Ramonet, M., Warneke, T., Broquet, G., and Ciais, P.: Оценки выбросов метана с использованием камерных экспериментов и экспериментов по выбросу трассирующих веществ для городской станции очистки сточных вод, *Атмосфера. Meas. Tech.*, 8, 2867,2853- <https://doi.org/10.5194/amt-8-2853-2015>, 2015.
- Завала-Арайза, Д., Лайон, Д. Р., Альварес, Р. А., Дэвис, К. Дж, Харрис, Р., Херндон, С. К., Карион, А., Корт, Е. А., Ламб, В. К., Lan, X., Marchese, A. J., Pacala, S. W., Robinson, A. L., Shepson, P. B., Sweeney, C., Talbot, R., Townsend-Small, A., Yacovitch, T. I., Zimmerle, D. J., and Hamburg, S. P.: Согласование расходящихся оценок выбросов метана от нефти и газа, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 112, 15597-15602, <https://doi.org/10.1073/pnas.1522126112>, 2015.
- Zhang, B.: Magnitude, spatio-temporal variability and environmental controls of methane emissions from global rice fields: Implications for water management and climate mitigation, *Glob. Change Biol.*, 1246-1263, 30,2016.

- Zhang, B. and Chen, G. Q.: China's CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Emissions: Оценка снизу вверх и сравнительный анализ, *Ecol. In- dic.*, 112-12247,, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.01.022>, 2014.
- Zhang, G., Zhang, J., Liu, S., Ren, J., Xu, J., and Zhang, F.: Methane in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and Its Adjacent Marine Area: Речное поступление, высвобождение из осадочных пород и атмосферные потоки, *Биогеохимия*, 71-84, 91, 2008.
- Zhang, Y., Xiao, X., Wu, X., Zhou, S., Zhang, G., Qin, Y., and Dong, J.: A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000-2016, *Sci. Data*, 1-134,, <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.165>, 2017.
- Zhang, Z., Zimmermann, N. E., Kaplan, J. O., and Poulter, B.: Modeling spatiotemporal dynamics of global wetlands: comprehensive evaluation of the new sub-grid TOPMODEL parameterization and uncertainties, *Biogeosciences*, 1387-1408, 13, 2016.
- Zhang, Z., Fluet-Chouinard, E., Jensen, K., McDonald, K., Hugelius, G., Gumbrecht, T., Carroll, M., Prigent, C., and Poulter, B.: Development of the global synthetic map of Wetland Area and Dynamics for Methane Modeling (WAD2M), in preparation, 2020.
- Zhao, Y., Saunois, M., Bousquet, P., Lin, X., Berchet, A., Hegglin, M. I., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Hauglustaine, D. A., Szopa, S., Stavert, A. R., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Bekki, S., Deushi, M., Jöckel, P., Josse, B., Kinnison, D., Kirner, O., Marécal, V., O'Connor, F. M., Plummer, D. A., Revell, L. E., Rozanov, E., Stenke, A., Strode, S., Tilmes, S., Dlugokencky, E. J., and Zheng, B.: Inter-model comparison of global hydroxyl radical (OH) distributions and their impact on atmospheric methane over the 2000-2016 period, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 13701-13723, <https://doi.org/10.5194/acp-19-13701-2019>, 2019.
- Zhao, Y., Saunois, M., Bousquet, P., Lin, X., Berchet, A., Hegglin, M. I., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Dlugokencky, E. J., Langenfelds, R. L., Ramonet, M., Worthy, D., and Zheng, B.: Influences of hydroxyl radicals (OH) on top-down estimates of the global and regional methane budgets, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2019-1208>, на рассмотрении, 2020.
- Zheng, B., Chevallier, F., Ciais, P., Yin, Y., and Wang, Y.: О роли перехода от пламени к тлению в сезонном цикле выбросов африканских пожаров, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 11998-h12007, <https://doi.org/10.1029/2018GL079092>, 2018a.
- Zheng, B., Chevallier, F., Ciais, P., Yin, Y., Deeter, M. N., Worden, H. M., Wang, Y., Zhang, Q., and He, K.: Rapid decline in carbon monoxide emissions and export from East Asia between years 2005 and 2016, *Environ. Res. Lett.*, 13, 044007, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab2b3>, 2018b.
- Zhu, Q., Liu, J., Peng, C., Chen, H., Fang, X., Jiang, H., Yang, G., Zhu, D., Wang, W., and Zhou, X.: Моделирование выбросов метана из природных болот путем разработки и применения модели TRIPLEX-GHG, *Geosci. Model Dev.*, 7, 981-999, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-981-2014>, 2014.
- Zhu, Q., Peng, C., Chen, H., Fang, X., Liu, J., Jiang, H., Yang, Y., and Yang, G.: Estimating global natural wetland methane emissions using process modelling: spatio-temporal patterns and contributions to atmospheric methane fluctuations, *Glob. Ecol. Bio- geogr.*, 959-972, 24, 2015.
- Zhuang, Q., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W., Prinn, R. G., McGuire, A. D., Steudler, P. A., Felzer, B. S., and Hu, S.: Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: Ретроспективный анализ с использованием модели биогеохимии на основе процессов, *Glob. Biogeochem. Cy.*, GB301018,, <https://doi.org/10.1029/2004gb002239>, 2004.
- Zhuang, Q., Chen, M., Xu, K., Tang, J., Saikawa, E., Lu, Y., Melillo, J. M., Prinn, R. G., and McGuire, A. D.: Реакция глобального потребления почвой атмосферного метана на изменения атмосферного климата и выпадения азота, *Global Biogeochem. Cy.*, 27, 650-663, <https://doi.org/10.1002/gbc.20057>, 2013.