

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.510.411:528.855:551.501.6

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(32-40)

А.В. УРБАН*, А.С. ПРОКУШКИН*, М.А. КОРЕЦ*,
А.В. ПАНОВ*, К. ГЕРБИГ**, М. ХАЙМАНН**

*Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 28, Россия, nastimoti@mail.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru, alexey.v.panov@gmail.com

**Институт биогеохимии общества Макса Планка, 07745, Йена, ул. Ханса Кнолля, 10, Германия, gerbig@bgc-jena.mpg.de, martin.heimann@bgc-jena.mpg.de

ВЛИЯНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

Одним из важнейших вопросов в атмосферных исследованиях содержания парниковых газов является определение территории (футпринта), оказывающей влияние на их концентрации, регистрируемые на высотных мачтах. Выявление суммарного сезонного футпринта (зона влияния) для концентраций парниковых газов, непрерывно измеряемых на мачте обсерватории ZOTTO высотой 301 м за вегетационный период (май–сентябрь) с 2008 по 2012 г. (за исключением 2011 г.), было выполнено на основе стохастической транспортной модели STILT. Результаты показали, что сезонный футпринт для обсерватории ZOTTO за четыре исследуемых года превысил $6,9 \cdot 10^6$ км², а 75 %-й футпринт варьировал от $1,9$ до $2,3 \cdot 10^6$ км². Для этого же периода с помощью данных спутникового картографирования растительного покрова России (Russian Land Cover, по данным MODIS за 2014 г.) было выявлено, что в сезонном 75 %-м футпринте наибольшую площадь занимают болота, а затем (по убыванию) лиственные леса, смешанные леса, светлохвойные вечнозеленые леса, лиственные леса, тундра, темнохвойные вечнозеленые леса, луга и остальные классы. При этом анализ вкладов индивидуальных ячеек, составляющих футпринт, показал, что в большей степени на формирование концентраций парниковых газов, регистрируемых на высотной мачте ZOTTO, влияют типы растительности в непосредственной близости к мачте, а именно болота, смешанные леса, светлохвойные и темнохвойные насаждения.

Ключевые слова: футпринт, обсерватория ZOTTO, RLC-карты, стохастическая транспортная модель STILT, углекислый газ, метан.

A.V. URBAN*, A.S. PROKUSHKIN*, M.A. KORETS*,
A.V. PANOV*, CH. GERBIG**, M. HEIMANN**

*Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences — a Separate Subdivision of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, stroenie 28, Russia, nastimoti@mail.ru, prokushkin@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru, alexey.v.panov@gmail.com

**Max Planck Institute for Biogeochemistry, 07745, Jena, Hans-Knoell-Str. 10, Germany, gerbig@bgc-jena.mpg.de, martin.heimann@bgc-jena.mpg.de

INFLUENCE OF THE UNDERLYING SURFACE ON GREENHOUSE GAS CONCENTRATIONS IN THE ATMOSPHERE OVER CENTRAL SIBERIA

A crucial issue in atmospheric studies on greenhouse gas content involves assessing the representativeness (footprint) having influence on their concentrations measured by tall towers. In this study, the Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model was used to estimate seasonal cumulative footprint climatology for greenhouse gases measurements obtained on the 301-meter-high Zotino Tall Tower Observation Facility (ZOTTO) for the growing seasons (May–September) from 2008 to

2012 (with the exception of 2011). Results showed that the ZOTTO seasonal concentration cumulative footprint climatology for four years reached 6.9×10^6 km² and the 75 % cumulative footprints varied from 1,9 to $2,3 \times 10^6$ km². For the same period, the Russian Land Cover map based on MODIS data for 2014 was used to estimate the impact of land cover surrounding the ZOTTO tower on concentration measurements. The analysis showed that in the 75 % seasonal cumulative footprint the largest area is occupied by bogs, followed (in decreasing order) by larch, mixed, light-coniferous evergreen forests, grassland, and by other classes. Furthermore, analysis of the contributions from individual cells making up a footprint showed that the largest influence on formation of greenhouse gas concentrations as recorded by ZOTTO comes from the types of vegetation growing in the immediate vicinity of the tall tower, namely bogs, mixed forests, and light and dark coniferous forest stands.

Keywords: footprint, ZOTTO observatory, RLC maps, Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model, carbon dioxide, methane.

ВВЕДЕНИЕ

Углекислый газ (CO₂) и метан (CH₄) представляют собой основные углеродсодержащие парниковые газы (ПГ), которые влияют на радиационный баланс Земли и, следовательно, на ее климат [1]. Подавляющая часть научного сообщества связывает современные изменения климата исключительно со значительным ростом концентраций этих важных газов в атмосфере с начала промышленной революции (1750 г.) [2]. Увеличение содержания ПГ подтверждается результатами анализа ледовых кернов, взятых в Антарктиде [3], и современными непрерывными инструментальными наблюдениями за концентрациями CO₂ и CH₄ [4–6].

Решение проблемы роста концентраций ПГ в атмосфере, а именно поиск возможных путей его сокращения, интересует как научное сообщество, так и политиков и зависит главным образом от степени понимания глобального цикла углерода. В последние десятилетия за счет быстрого увеличения количества постов наблюдений за содержанием атмосферных газов (Мировой центр данных по парниковым газам, <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/cgi-bin/wdcgg/catalogue.cgi>) знания о процессах и механизмах, вовлеченных в круговорот углерода, значительно расширились. В первую очередь, к таким постам относятся станции долговременного инструментального мониторинга концентраций ПГ с использованием высотных мачт. Мачты высотой более 200 м позволяют исследовать конвективный пограничный слой атмосферы (в течение дня), в котором воздух хорошо смешивается, что способствует сглаживанию и объединению потоков углерода из разных источников в единый сигнал [7]. Кроме того, в ночное время они дают возможность апробировать остаточный слой приземной атмосферы. Он расположен выше ночного пограничного слоя, поэтому в нем сохраняется динамическое состояние атмосферы, а содержание ПГ соответствует уровню предыдущего дня [8]. Концентрации ПГ, измеренные на высотных мачтах, — это интегрированный сигнал для некоторой территории, содержащий информацию об обменных потоках между наземными экосистемами и атмосферой.

Одним из важнейших вопросов в атмосферных исследованиях содержания ПГ является определение пространственной репрезентативности получаемых измерений. Согласно принятой в научном сообществе терминологии [7, 9, 10], футпринт (или зона влияния) — это территория вокруг высотной мачты, эмиссионные потоки с которой оказывают влияние на формирование концентраций ПГ, регистрируемых на мачте за определенный интервал времени. Сведения о площади футпринта и его изменчивости необходимы как для надежного масштабирования полученных измерений атмосферных газов, так и для дальнейших оценок бюджета углерода на региональном уровне с помощью инверсионного моделирования («top-down» подход).

В настоящей работе представлены результаты анализа временной изменчивости площади футпринта для концентраций углеродсодержащих ПГ, непрерывно измеряемых на 301-метровой мачте Zotino Tall Tower Observatory (обсерватория ZOTTO, www.zottoproject.org, географические координаты: 60°48' с. ш., 89°21' в. д., 114 м над ур. моря) за период с 2008 по 2012 г. Для этого же периода на базе результатов спутникового картографирования растительного покрова России (TerraNorte Russian Land Cover (TerraNorte RLC), основанной на данных сканирующего спектрорадиометра среднего разрешения (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) за 2014 г.), выявлены основные классы подстилающей поверхности, которые оказывают влияние на формирование концентраций ПГ, измеряемых на мачте обсерватории ZOTTO [11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обсерватория ZOTTO расположена на левом берегу р. Енисей в 20 км западнее пос. Зотино Туруханского района Красноярского края. В физико-географическом отношении этот район находится

на восточной окраине Западно-Сибирской равнины, в краевой части Кеть-Сымской низменности. Тип климата — континентальный с суровой снежной зимой и умеренно теплым влажным летом. По данным метеостанции Бор, которая находится в 100 км севернее обсерватории, за период с января 1936 г. по декабрь 2013 г. среднегодовая температура воздуха была равна $-3,7^{\circ}\text{C}$, средняя температура января $-24,2^{\circ}\text{C}$, июля $-17,8^{\circ}\text{C}$, суммарное годовое количество осадков составляло 536 мм. Район обсерватории, согласно лесорастительному районированию И.А. Короткова, относится к Сымско-Дубческому округу среднетаежных лесов [12].

Футпринт был рассчитан с помощью стохастической транспортной модели Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT), размещенной на сервере Института биогеохимии общества Макса Планка (г. Йена, Германия). В основе этой модели лежит расчет траекторий движения ансамбля индивидуальных частиц в некотором объеме воздуха от места их выделения с подстилающей поверхности до точки измерения концентраций ПГ на высотной мачте (рецептор) через обратное инвертирование временной шкалы путем решения системы уравнений Лагранжа. В наших расчетах ансамбль состоял из 100 частиц, где моделировалось движение каждой индивидуальной частицы, поэтому в конечном результате получался репрезентативный футпринт одного измерения концентраций ПГ. Передвижение каждой частицы представлялось как стохастический процесс, параметризованный компонентами ветра и турбулентными ковариациями. В качестве входных параметров модели STILT были подготовлены метеорологические поля (данные предоставлены Европейским центром прогноза погоды, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://www.ecmwf.int/>) для периода с января 2008 г. по декабрь 2012 г. (исключая май 2011 г.) с пространственным и временным разрешением $0,25 \times 0,25^{\circ}$ и 3 ч соответственно. В анализе использовано время пути частицы, равное 240 ч.

Для района обсерватории ЗОТТО была определена территория (домен) с географическими координатами от 50° до 77° с. ш. и от 55° до 102° в. д., состоящая из множества индивидуальных ячеек (размером $1/12^{\circ}$ по широте и $1/8^{\circ}$ по долготе). Площадь выбранного домена превышает $6,9 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, что соответствует 4 % от континентальной поверхности Земли. Внутри домена для каждой ячейки за заданный интервал времени модель рассчитывала вклад определенного класса подстилающей поверхности в регистрируемую на мачте концентрацию ПГ. Зона влияния (или футпринт), получаемая в модели STILT, — это чувствительность мольной доли газов, переносимых в точку измерения (x_r) за определенное время (t_r), к эмиссии ПГ с подстилающей поверхности $F(x_i, y_j, t_m)$. Иными словами, футпринт измеряет вклад источника/стока в величину регистрируемой на мачте концентрации ПГ. Поэтому единицей измерения футпринта является $\text{млн}^{-1}/(\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}))$. Математически футпринт выражается формулой:

$$f(x_r, t_r | x_i, y_j, t_m) = \frac{m_{\text{air}}}{h \bar{p}(x_i, y_j, t_m)} \frac{1}{N_{\text{tot}}} \sum_{p=1}^{N_{\text{tot}}} \Delta t_{p,i,j,k}, \quad (1)$$

где m_{air} — молекулярный вес воздуха; h — высота объема, в котором растворяется выделенный с поверхности ПГ; $\bar{p}$ — средняя плотность для всех частиц; N_{tot} — число частиц; $\Delta t_{p,i,j,k}$ — общее количество времени, которое частица p находилась в определенном объеме i, j, k в течение времени t [13].

Площадь футпринта была смоделирована для каждых 3 ч с 1 января 2008 г. по 31 декабря 2012 г. Далее трехчасовые значения последовательно суммировались, чтобы получить его месячное, сезонное (май–сентябрь) и годовое значение. В данной статье представлены результаты анализа площадей сезонного футпринта для 4 лет: 2008, 2009, 2010 и 2012 гг. Данные за 2011 г. были исключены по техническим причинам.

Для выявления динамики изменения площади сезонного футпринта в течение исследуемых 4 лет были определены границы, которые соответствовали 75 % от максимального вклада (75 %-й футпринт), а вклады пикселей превышали $10^{-5} \text{ млн}^{-1}/(\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}))$.

Для сезонных суммарных футпринтов (75 %-й футпринт) исследуемых лет нами было рассмотрено пространственное распределение вкладов различных классов подстилающей поверхности. В работе использовались карты TerraNorte RLC, в которых представлена классификация земного покрова территории России с пространственным разрешением 230 м, где при выделении классов растительности применялся алгоритм локально-адаптивной классификации [14]. Эти карты основаны на данных спутникового наблюдения спектрорадиометром MODIS, размещенным на борту спутника Terra. Карты RLC, по данным 2014 г., включают более 50 классов земной поверхности, из которых 27 находятся в зоне охвата измерений обсерватории ЗОТТО. Присутствующие классы были сгруппированы нами в 16 агрегированных классов (см. таблицу).

Классы земной поверхности RLC, присутствующие в футпринте обсерватории ZOTTO, до и после их агрегирования

Номер класса в RLC, по [14]	Название класса	Название агрегированного класса	Номер агрегированного класса
1	Темнохвойные вечнозеленые леса	Темнохвойные вечнозеленые леса	1
2	Светлохвойные вечнозеленые леса	Светлохвойные вечнозеленые леса	2
3	Лиственные леса	Лиственные леса	3
4	Лиственничные леса	Лиственничные леса	4
23	Лиственничные редины		
10	Смешанные леса с преобладанием хвойных пород	Смешанные леса	5
11	Смешанные леса		
12	Смешанные леса с преобладанием лиственных пород		
9	Лиственные кустарники	Лиственные кустарники	6
8	Луга	Луга	7
15	Прибрежная растительность	Прибрежная растительность	8
17	Травянистая тундра	Тундровая растительность	9
16	Кустарничковая тундра		
18	Кустарниковая тундра		
13, 19	Открытые грунты и выходы горных пород	Открытые грунты и выходы горных пород	10
20	Реки и водоемы	Реки и водоемы	11
6, 7, 21	Болота	Болота	12
24	Свежие гари	Свежие гари	13
26	Пахотные земли	Пахотные земли	14
31	Урбанизированные территории	Прочие классы	15
32	Вечные снега и льды		
5	Хвойные вечнозеленые кустарники		
14	Степи		
30	За пределами РФ/нет данных	Нет данных	16

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарная годовая площадь охвата высотной мачты обсерватории ZOTTO составляет около $6,9 \cdot 10^6$ км². Следует отметить существенную несимметричность площади футпринта для мачты ZOTTO, что обусловлено особенностями циркуляции атмосферы. Так, в регионе преобладает западный перенос воздушных масс и достаточно часто барические образования передвигаются с шельфа Северного Ледовитого океана в глубь материка. Вклад подстилающей поверхности в пределах выбранной территории (домена) в регистрируемые концентрации ПГ закономерно снижается (с 10^{-2} до 10^{-9} млн⁻¹/(мкмоль/(м²·с)) по мере удаления от точки измерений (рис. 1). Площадь сезонного (вегетационный период) 75 %-го футпринта для 2008, 2009, 2010 и 2012 гг. варьировала от 1,9 до $2,3 \cdot 10^6$ км², что хорошо согласуется с оценками измерений ПГ на высотных мачтах (около 10^6 км²), представленными в работе [7], а также с данными для мачт высотой <100 м (от 10^3 до 10^5) [10].

Анализ подстилающей поверхности, проведенный на основе классификации TerraNorte RLC, показал, что сезонный 75 %-й футпринт обсерватории ZOTTO для исследуемых 4 лет включал примерно одинаковый набор классов растительности (рис. 2). Наибольшую площадь занимали болота ($20 \pm 2,1$ %) и далее по убыванию, %: лиственничники — $14,4 \pm 4,1$, смешанные леса — $12,1 \pm 1$, светлохвойные вечнозеленые леса — $10,3 \pm 0,3$, лиственные леса — $10,1 \pm 0,9$, тундра — $9,9 \pm 3,7$, темнохвойные вечнозеленые леса — $7,6 \pm 0,5$, луга — $5,7 \pm 2,6$ и остальные классы — $9,9 \pm 3,4$.

Относительно слабая нарушенность территории футпринта высотной мачты обсерватории ZOTTO и ее расположение в глубине континента определяет формирование отчетливого ежегодного сезонного цикла в содержании атмосферного CO₂, свидетельствующего о процессах поглощения и выделения углекислого газа подстилающей поверхностью. По нашим наблюдениям, годовой минимум в концентрации CO₂ регистрируется в конце июля — начале августа ($372,6$ млн⁻¹ в среднем за 2009–2011 гг.), а годовой максимум в январе–феврале ($402,0$ млн⁻¹ в среднем за тот же период). Разность между зимними и летними концентрациями, равная $29,4$ млн⁻¹, отражает величину годового поглощения атмосферного CO₂ экосистемами Сибири [8]. Согласно последним оценкам, растительность азиатской части Северной Евразии представляет собой сток атмосферного CO₂ в размере 770 ± 700 Мт

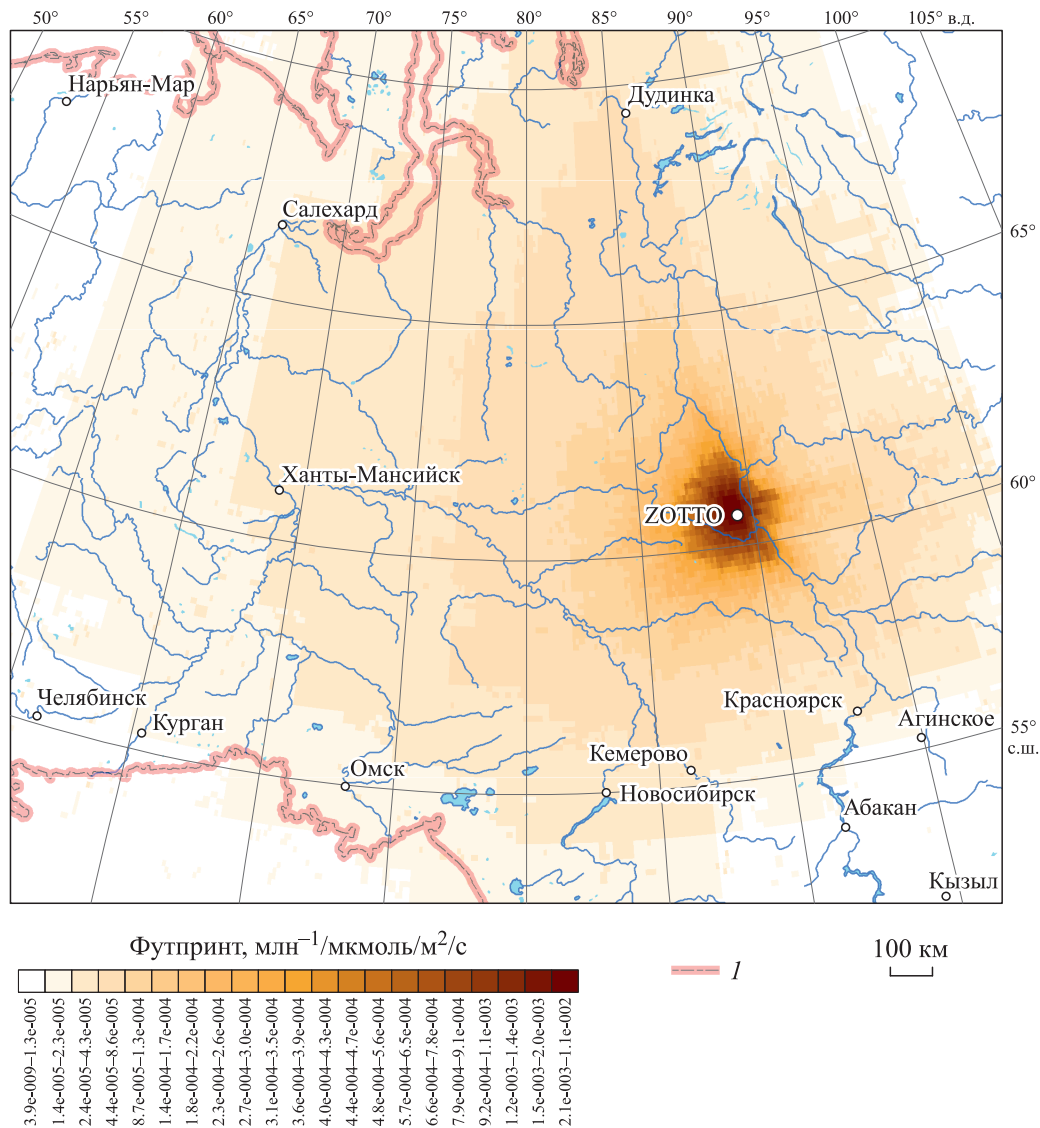


Рис. 1. Средний интегрированный сезонный футпринт для измерений концентраций парниковых газов на обсерватории ZOTTO, рассчитанный (высота 301 м) на основе обратных траекторий (10 дней), для каждого трех часов с 1 мая по 30 сентября в течение четырех лет (2008, 2009, 2010 и 2012 гг.).

1 — граница РФ.

CO₂/год [15], при этом чистый экосистемный CO₂-газообмен в различных типах биогеоценозов Сибири варьирует от 10 г С/м² за сезон в тундрах до 270 г С/м² за сезон в темных хвойных лесах [16, 17].

Величина суммарного вклада болот (12 класс) в регистрируемые концентрации ПГ на обсерватории ZOTTO максимальна среди выделенных типов растительного покрова (рис. 3); кроме того, она также соответствует и наибольшему распространению этого класса (18,8 ± 2,6 %) в пределах футпринта. Болота разных типов занимают от 0,36 до 0,51 · 10⁶ км² сезонной зоны охвата и, как правило, охватывают территорию одного из крупнейших болотных комплексов мира, расположенного в Западной Сибири, площадью около 0,7 · 10⁶ км² [18]. Представляя собой чистый источник метана в атмосфере (величина эмиссии 2,93–6,06 Мт СН₄/год [19]), болотные биогеоценозы оказывают существенное влияние на формирование годовых пиков (зимнего в январе–феврале и летнего в августе) в содержании атмосферного метана, регистрируемого измерительным комплексом обсерватории ZOTTO. Согласно нашим наблюдениям, в период с мая 2009 г. по апрель 2013 г. концентрация метана в приземной атмосфере в летние месяцы составляла 1900–1941 млрд⁻¹, а в зимние — 1935–1967 млрд⁻¹. При этом ранее нами показано, что при продвижении на восток (с 62 по 113° в. д.) и сокращении

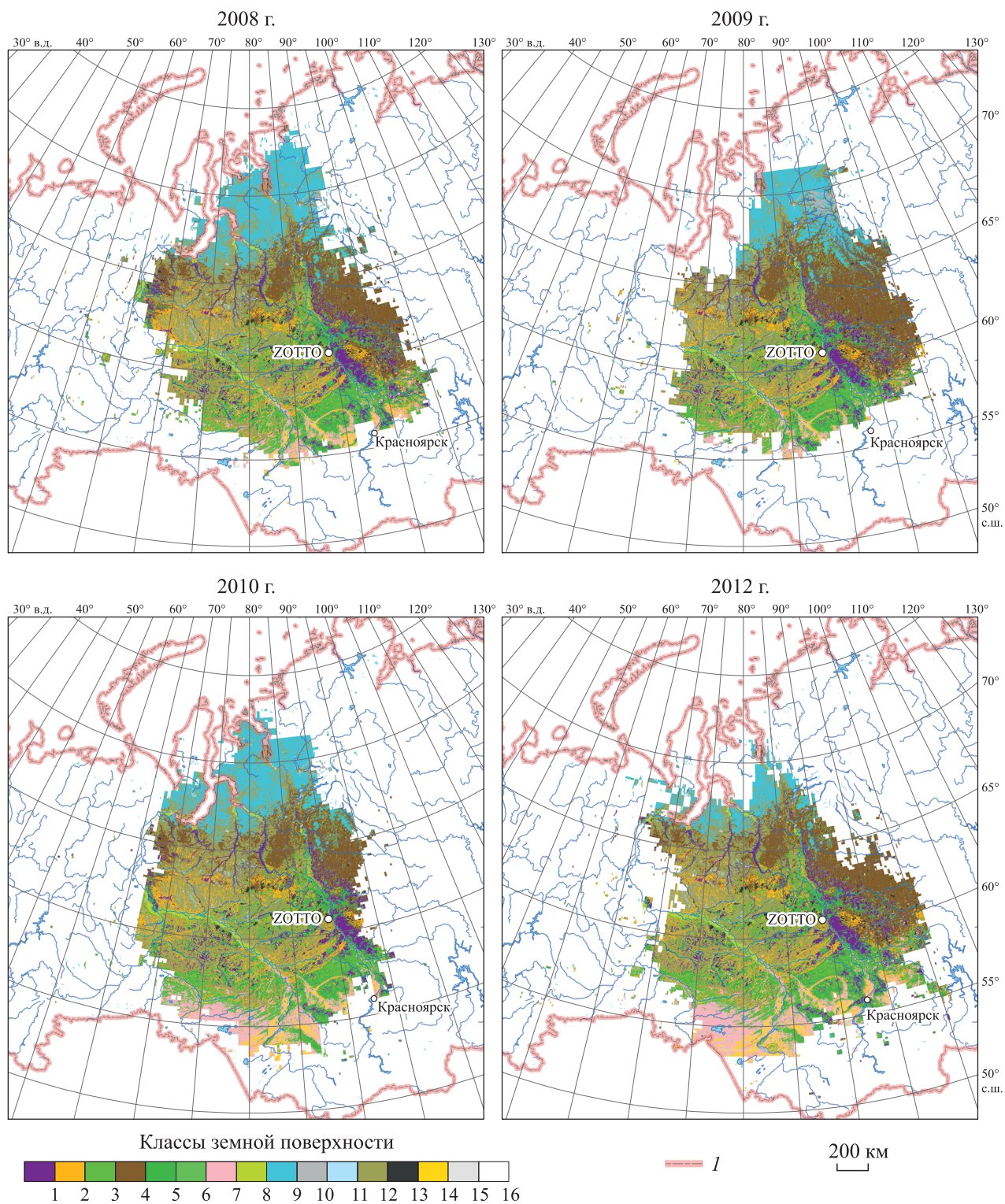


Рис. 2. Классы земной поверхности, составляющие сезонные 75 %-е футпринты обсерватории ZOTTO.

Классы земной поверхности — см. таблицу. *I* — граница РФ.

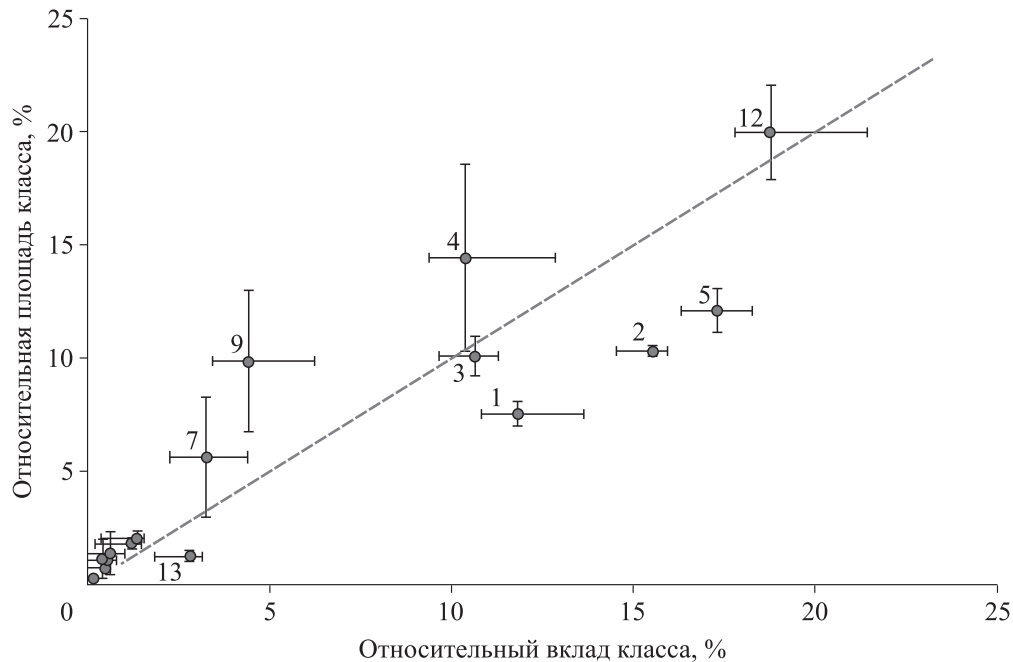


Рис. 3. Зависимость относительной площади класса подстилающей поверхности от его относительного вклада для 75 %-го футпринта обсерватории ZOTTO для исследуемых четырех лет (указаны средние значения и стандартные отклонения).

Классы земной поверхности — см. таблицу.

площадей заболоченных территорий прослеживается значимое снижение среднегодового содержания метана в атмосфере [11].

Территория в непосредственной близости к обсерватории ZOTTO (см. рис. 1) оказывает наибольшее влияние на измеряемые концентрации ПГ. Так, эмиссионные потоки ПГ из биогеоценозов, расположенных в радиусе 500 км, составляют более половины от всего сигнала, регистрируемого моделью. Окрестности обсерватории ZOTTO включают несколько иной набор классов растительности. Так, по результатам комплексных инвентаризационных исследований, проведенных в радиусе 100 км вокруг высотной мачты ZOTTO (14,4 % от суммарного футпринта), установлено, что преобладающие типы леса — это ельники и пихтачи зеленомошные (46 %). Они представлены главным образом насаждениями на заключительной стадии послепожарного восстановления и возрастом более 130 и 160 лет соответственно. Существенную площадь (12,3 %) занимают также послепожарные березняки и осинники, образованные разновозрастными насаждениями от 40–60 (лиственные молодняки с подростом хвойных) до более 90 лет (смешанные темнохвойно-лиственные насаждения с преобладанием лиственных пород). Дополнительную мозаичность в биогеоценологический покров территории вносят сосняки зеленомошные (8,3 %), сосняки лишайниковые (7,6 %), состоящие на 38 и 45 % соответственно из перестойных насаждений (более 200 лет), и кедрachi зеленомошные (1,8 %) [20]. Поэтому лесные экосистемы, а именно светлохвойные, темнохвойные и смешанные (1, 2 и 5 классы соответственно) леса (см. рис. 3), совместно оказывают наибольшее воздействие на концентрации ПГ, главным образом диоксида углерода, регистрируемые на базе обсерватории ZOTTO, в то время как площадь данных экосистем не превышает трети суммарного сезонного 75 %-го футпринта. Лиственный лес и редколесья (4 класс) покрывают восточную часть суммарного сезонного 75 %-й футпринта обсерватории ZOTTO и занимают его краевое положение. За счет удаленности от точки измерений и особенностей зональной циркуляции атмосферы (преобладание западного переноса воздушных масс) их вклад в концентрации ПГ существенно ниже вклада других типов лесных экосистем.

Для территории Сибири характерно значительное влияние пожаров на уровень концентраций ПГ в атмосфере. Последние случаи крупномасштабных лесных пожаров в регионе, вызванных продолжительной засухой и аномальной жарой, были отмечены в 2006 и 2012 гг. В 2012 г. пожарные эмиссии, согласно [21], составили от 280 до 550 Мг С пирогенных ПГ. Площадь свежих гарей (13 класс) при этом достигла 28 206 км², или 1,3 % от суммарного сезонного 75 %-го футпринта [22]. Как следствие значительных выделений ПГ при горении фито- и мортмассы, нами регистрировались периодические

всплески в содержании CO_2 (более 500 млн^{-1}) и CH_4 (более 2800 млрд^{-1}). Среднемесячное значение концентрации CO_2 ¹ за июль 2012 г. составило $391 \pm 10 \text{ млн}^{-1}$, что на 14 и 9 млн^{-1} превышало значения 2011 и 2013 гг. соответственно. Среднемесячное содержание CH_4 ¹ в атмосфере за этот же период соответствовало $1984 \pm 114 \text{ млрд}^{-1}$, что на 80 млрд^{-1} больше, чем в 2011 и 2013 гг.

Территории Западной и Центральной Сибири характеризуются и существенными антропогенными эмиссиями ПГ. Так, на севере рассматриваемого региона локализованы самые крупные сырьевые базы жидких и газообразных углеводородов, где осуществляется около 50 % от всей нефтегазовой добычи страны. На юге располагаются крупнейшие российские угольные бассейны: Кузнецкий и Канско-Ачинский [23]. Активная добыча ископаемого топлива, сопровождающаяся сжиганием попутного газа и утечками природного газа, а также их потребление в урбанизированных районах южной Сибири (сжигание угля и дизельного топлива на ТЭС, эмиссии автотранспорта) предполагают значительные объемы ежегодно поступающих ПГ в атмосферу. При этом проведенный нами анализ футпринта высотной мачты обсерватории ZOTTO однозначно свидетельствует о том, что эти локальные источники ПГ входят в зону охвата измеряемых величин концентраций CO_2 и метана в атмосфере. Таким образом, количественная оценка их вклада в формирование концентраций ПГ в атмосфере Сибири, наряду с биогенными потоками, полученными на основе измерений чистого атмосферного CO_2 -газообмена, представляет собой важную задачу для понимания баланса ПГ данной территории и его прогноза в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты суммарной сезонной зоны влияния, полученные посредством транспортной модели STILT, свидетельствуют о том, что измерения концентраций ПГ, проводимые на высоте ПСА (301 м) обсерватории ZOTTO, характеризуют значительную территорию Сибири площадью более $6,9 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Площадь 75 %-го футпринта варьирует от 1,9 до $2,3 \cdot 10^6 \text{ км}^2$.

На основе карт TerraNorte RLC, где представлена классификация земного покрова территории России с пространственным разрешением 230 м, мы определили, что наибольший вероятный вклад в формирования концентраций ПГ, регистрируемых на высотной мачте ZOTTO, вносят болота, смешанные леса, а также светлохвойные и темнохвойные насаждения.

В перспективе полученные оценки позволяют определить количественный вклад каждого класса земной поверхности в измеряемые концентрации ПГ путем объединения рассчитанного футпринта с величинами чистого экосистемного обмена для основных классов подстилающей поверхности, получаемых на пяти микрометеорологических мачтах сети KrasFlax. Также они позволяют выявить вклад Северного Ледовитого океана в содержание CO_2 и CH_4 во внутриконтинентальной части Сибири, привлекая измерения их концентрации в прибрежной зоне около пос. Диксон. Кроме того, данный футпринт будет использован для оценки влияния ПГ, поступающих из р. Енисей и ее притоков. Последнее представляет собой приоритетную задачу в настоящее время. В связи с этим стоит отметить, что доля влияния выявленных типов растительного покрова может существенно измениться, поскольку их вклад будет зависеть не только от удаленности от высотной мачты, но также и от величин обменных потоков углерода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-45-243003 «Дыхание лесов Сибири: региональный анализ стоков и источников углерода атмосферы в экосистемах ключевых биоклиматических зон бассейна р. Енисей», Российского научного фонда (14-24-00113) и Российского фонда фундаментальных исследований (18-05-60203-Арктика).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бюллетень ВМО** по парниковым газам // Всемирная метеорологическая организация. — 2016. — № 12. — 8 с. [Электронный ресурс]. — https://library.wmo.int/pmb_ged/ghg-bulletin_12_ru.pdf (дата обращения 02.05.2017).
2. **IPCC, 2013**: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. T.F. Stocker. — United Kingdom: Cambridge University Press, 2013. — 1535 p.

¹ Дневные измерения концентрации ПГ с 13 до 17 ч местного времени на высоте 301 м.

3. Joos F., Spahni R. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years // PNAS. — 2008. — Vol. 105, Issue 5. — P. 1425–1430.
4. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.-F., Langenfelds R.L., Le Quéré C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L.P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., Van der Werf G.R., Voulgarakis A., Weele M. van, Weiss R.F., Williams J.E., Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks // Nature Geoscience. — 2013. — Vol. 6. — P. 813–823.
5. Betts R.A., Jones C.D., Knight J.R., Keeling R.F., Kennedy J.J. El Nino and a record CO₂ rise // Nature Climate Change. — 2016. — Vol. 6. — P. 806–810.
6. Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Онучин А.А., Панов А.В., Кофман Г.Б., Верховец С.В., Хайманн М. Многолетний тренд концентрации CO₂ в приземной атмосфере над Центральной Сибирью // Метеорология и гидрология. — 2015. — № 3. — С. 58–64.
7. Gloor M., Bakwin P., Hurst D., Lock L., Draxler R., Tans P. What is the concentration footprint of a tall tower? // Journ. Geophysical Research. — 2001. — Vol. 106. — P. 17831–17840.
8. Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Онучин А.А., Панов А.В., Кофман Г.Б., Хайманн М. Динамика приземной концентрации CO₂ в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири // Экология. — 2015. — № 2. — С. 110–119.
9. Winderlich J. Setup of a CO₂ and CH₄ Measurement System in Central Siberia and Modeling of its Results, Technical Reports 26. — Jena: Max Plank Institute Press, 2012. — 120 p.
10. Chen B., Zhang H., Coops C.N., Fu D., Worthy D.E.J., Xu G., Black T.A. Assessing scalar concentration footprint climatology and land surface impacts on tall-tower CO₂ concentration measurements in the boreal forest of central Saskatchewan, Canada // Theoretical and Applied Climatology. — 2014. — Vol. 18, Issue 1. — P. 115–132.
11. Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Панов А.В., Онучин А.А., Хайманн М. Временная изменчивость концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере среднетаежных экосистем Сибири // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2015. — № 2. — С. 112–121.
12. Коротков И.А. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России. — Красноярск: Изд-во Вычисл. центра СО РАН, 1994. — С. 29–47.
13. Lin J.C., Gerbig C., Wolfsy S.C., Andrew A.E., Daube B.C., Davis K.J., Grainger C.A. A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model // Journ. Geophysical Research. — 2003. — Vol. 108, Issue D16. — P. 4493–4508.
14. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Исследование Земли из космоса. — 2011. — Т. 8, № 4. — С. 285–302.
15. Kim J., Kim H.M., Cho C.-H., Boo K.-O., Jacobson A.R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Fedoseev N. Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux // Atmospheric chemistry and physics. — 2017. — Vol. 17. — P. 2881–2899.
16. Roser C., Montagnani L., Schulze E.-D., Mollicone D., Kolle O., Meroni M., Papale D., Bellili Marchesini L., Federici S., Valentini R. Net CO₂ exchange rates in three different successional stages of the «dark Taiga» of central Siberia // Tellus. — 2002. — Vol. 54B. — P. 642–654.
17. Чебакова Н.М., Выгодская Н.Н., Арнет А.Л., Белелли Маркесини Л., Курбатова Ю.А., Парфенова Е.И., Валентини Р., Верховец С.В., Ваганов Е.А., Шульце Е.-Д. Энерго- и массообмен и продуктивность основных экосистем Сибири (по результатам измерений методом турбулентных пульсаций). 2. Углеродный обмен и продуктивность // Изв. РАН. Сер. биол. — 2014. — № 1. — С. 65–75.
18. Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y. An image-based inventory of the spatial structure of west Siberian wetlands // Environmental Research Letters. — 2009. — Vol. 4. — P. 45015–45021.
19. Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Мачида Т., Максютков Ш.Ш. Эмиссия метана из болотных комплексов тайги Западной Сибири // Почвоведение. — 2014. — № 1. — С. 58–70.
20. Климченко А.В., Верховец С.В., Слинкина О.А., Кошурикова Н.Н. Запасы крупных древесных остатков в среднетаежных экосистемах Приенисейской Сибири // География и природ. ресурсы. — 2011. — № 2. — С. 91–97.
21. Konovalov I.B., Berezin E.V., Ciais P., Broquet G., Beekmann M., Handji-Lazaro S., Clerbaux C., Andreae M.O., Kaiser J.W., Schulze E.-D. Constraining CO₂ emissions from open biomass burning by satellite observations of co-emitted species: a method and its application to wildfires in Siberia // Atmospheric chemistry and physics. — 2014. — Vol. 14. — P. 10383–10410.
22. Антамошкина О.А., Корец М.А. Мониторинг состояния растительного покрова зоны охвата мачты Zotto по данным дистанционного зондирования // Вестн. Сиб. аэрокосм. ун-та. — 2015. — Т. 16, № 4. — С. 814–818.
23. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году. 2017 [Электронный ресурс]. — http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyy_doklady/ (дата обращения 13.04.2017).

Поступила в редакцию 19.05.2017

После доработки 20.10.2017

Принята к публикации 02.04.2019