

УДК 551.510.411

## Исследование пространственного распределения $\text{CO}_2$ и $\text{CH}_4$ в приземном слое атмосферы Западной Сибири с использованием мобильной платформы

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Д.К. Давыдов, А.В. Козлов,  
А.В. Фофонов, В.Г. Аршинова\*

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

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.

Представлены результаты крупномасштабного исследования распределений углекислого газа и метана, проведенного на территории Западной Сибири в 2018–2019 гг. с использованием портативного газоанализатора Picarro G4301. Анализ полученных данных позволил восстановить пространственное распределение фоновых концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  с высоким разрешением. Выявленные неоднородности распределения  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  обусловлены как воздействием экосистем, характерных для разных регионов Западной Сибири, так и особенностями их сезонных циклов.

*Ключевые слова:* состав атмосферы, парниковые газы, пространственное распределение; atmospheric composition, greenhouse gases, spatial distribution.

### Введение

В настоящее время одной из наиболее важных проблем, отнесенной мировым сообществом к «большим вызовам», является глобальное потепление и обусловленное им изменение окружающей среды. Глобальное потепление было спрогнозировано 40 лет назад как возможный отклик природы на усиливающиеся антропогенные выбросы парниковых газов [1]. В последние годы оно получило еще одно веское подтверждение своего существования на фоне естественных многолетних колебаний климата [2, 3]. Оно заключается в том, что все предыдущие похолодания и потепления были региональными, а нынешнее охватывает весь земной шар. Согласно последним оценкам Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) радиационное воздействие долгоживущих парниковых газов (ПГ) за период с 1990 по 2018 г. возросло на 43%, при этом доля  $\text{CO}_2$  в этом повышении составила 81% [4]. И, несмотря на предпринимаемые меры, выбросы парниковых газов не уменьшаются [5].

Обеспокоенность мирового сообщества складывающейся ситуацией стала причиной создания международных сетей прецизионных измерений парнико-

вых газов. К настоящему времени введены в эксплуатацию: Глобальный углеродный проект под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО – Global Atmosphere Watch), Глобальная система мониторинга (NOAA/ESRL's), Международная интегрированная система наблюдений за углеродом (ICOS – Integrated Carbon Observation System) и ряд других [6–8]. Они позволяют исследовать крупномасштабные пространственно-временные вариации парниковых газов. Например, в [9] зафиксирована несинхронность временного хода концентрации  $\text{CO}_2$  в больших регионах, таких как Африка и Южная Америка. Наряду с этим более плотные сети позволяют выделить и мезомасштабные неоднородности в распределении парниковых газов [10].

Рост антропогенных выбросов ПГ в атмосферу, который в основном происходит в крупных промышленных центрах, и неоднородность покрытия поверхности растительностью сильно затрудняют количественную оценку их эмиссии и поглощения. Несмотря на то, что большинство станций наблюдений за ПГ располагаются в фоновых районах, на величину их концентраций в континентальных областях значительно влияют как антропогенные, так и биогенные источники. Разделение же природных и антропогенных компонентов углеродного цикла имеет решающее значение для корректировки систем обратного моделирования с использованием данных измерений *in situ* [11].

Сибирь – один из ключевых регионов Северного полушария, где наблюдаются наиболее заметные климатические изменения, особенно в арктической

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

зоне [12, 13]. В 2000-х гг. Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) в рамках международного сотрудничества с Национальным институтом исследований окружающей среды (NIES, Япония) на территории Сибири была создана сеть мониторинга парниковых газов JR-STATION – Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network [14]. Она охватывает значительную часть Западно-Сибирской равнины между 54,5° и 63,2° с.ш. и 62,3° и 85,0° в.д. Станции JR-STATION разнесены на расстояние от 300 до 900 км друг от друга. Для технического обслуживания наиболее удаленных от ИОА СО РАН станций 4 раза в год организуются регулярные выездные экспедиции: в марте, июне, августе и октябре. В ходе каждой поездки преодолевается расстояние ~7000 км. В связи с этим появилась идея установить портативный газоанализатор нового поколения G4301 (Picarro Inc., США) на экспедиционный автомобиль. Это сделало возможным проведение измерений концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> во время движения между станциями с высоким пространственным разрешением. Настоящая работа посвящена результатам измерения парниковых газов на территории Западной Сибири в приземном слое атмосферы во время таких поездок.

## 1. Методы

Анализатор Picarro G4301 позволяет измерять концентрации углекислого газа и метана с частотой 1 Гц с погрешностью 0,4 млн<sup>-1</sup> и 3 млрд<sup>-1</sup> соответственно. Принцип его работы основан на методе спектроскопии внутриврезонаторного затухания (Cavity Ring-Down Spectroscopy – CRDS) [15].

### 1.1. Пробоподготовка

Известно, что пары H<sub>2</sub>O влияют на точность измерений большинства оптико-электронных газоанализаторов, используемых для определения содержания в воздухе малых газовых составляющих. В частности, авторы [16] указывают на то, что спектроскопические методы чувствительны к вариациям содержания водяного пара в воздухе из-за изменения степени уширения атмосферным давлением линий поглощения, используемых для измерения концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Большинство газоанализаторов, производимых фирмой Picarro, одновременно с CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O и CO измеряют также и содержание в воздухе водяного пара, поэтому при пересчете концентраций этих газов в сухом воздухе используется коррекция на содержание H<sub>2</sub>O в воздухе. Однако она дает удовлетворительные результаты при объемной доле водяного пара < 0,7% и < 0,6% для CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> [17]. В связи с этим в [17] рекомендуют полностью осушать пробу воздуха до ее подачи в газоанализатор. Помимо процессов уширения линий, на точность измерений может также повлиять

изменение коэффициента отражения многослойных диэлектрических зеркал в зависимости от содержания водяного пара в анализируемом воздухе при его прохождении через оптический резонатор [18], в частности, вследствие проникновения молекул H<sub>2</sub>O внутрь многослойного покрытия [19].

Чтобы избежать возможного влияния вышеупомянутых факторов на точность измерений концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> при использовании газоанализатора G4301 на автомобиле, была создана система предварительной пробоподготовки воздуха. Основное ее предназначение – полное удаление влаги из анализируемой пробы и стабилизация давления на входе в газоанализатор. Схематический рисунок системы пробоподготовки и схема размещения воздухозаборного устройства и газоанализатора Picarro G4301 в автомобиле Renault Duster представлены в [20]. Окружающий воздух поступает от воздухозаборника к газоанализатору по трубке Synflex 1300 (внешний диаметр 6 мм, внутренний – 4 мм, EATON Corp., PLC). Для уменьшения времени прокачки через подводящие тракты и повышения эффективности системы осушения используется предварительный насос (NMP-50, KNF Neuberger GmbH), который нагнетает пробу в коалесцентный фильтр (MC 104-F10, Camozzi Pneumatic LLC), предотвращающий попадание в систему жидкокапельной воды. Далее анализируемый воздух проходит первую стадию удаления из него водяного пара с помощью мембранного осушителя (MD-110-72F-4, Perma Pure LLC). Поддержание постоянного расхода пробы обеспечивается регулятором расхода с обратным клапаном (AS1001F, SMC Pneumatic Co., Ltd.). Окончательное осушение достигается путем установки в тракт сменного картриджа, наполняемого перхлоратом магния (Mg(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>). Непосредственно перед входом в газоанализатор, имеющим встроенный насос, устанавливается тройниковый соединитель для выравнивания давления за счет отвода избыточного воздуха через ротаметр, используемый для начальной установки расхода воздуха регулятором AS1001F. С выхода газоанализатора проанализированная проба подводится к внешней трубке нафионовой мембраны для продувки сухим воздухом с целью повышения эффективности ее действия.

### 1.2. Геопозиционирование

Для определения местоположения автомобиля во время движения к газоанализатору подключается приемник ГЛОНАСС BU-353. Все измеряемые параметры регистрируются с помощью специально созданного программного обеспечения, позволяющего в режиме реального времени сводить данные измерений концентраций CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и координаты мобильной платформы в локальной базе данных MySQL, формируемой на встроенном в анализатор компьютере. Визуальный контроль измерений осуществляется с помощью планшетного компьютера посредством удаленного рабочего стола, подключаемого к G4301 по каналу связи локальной Wi-Fi сети.

### 1.3. Калибровка и обработка полученных данных

Непосредственно перед проведением экспедиции и сразу после производится калибровка газоанализатора G4301 с использованием поверочных газовых смесей (ПГС, табл. 1) для определения поправочных коэффициентов.

Таблица 1

Концентрации поверочных газовых смесей и показания газоанализатора Picarro G4301 при проведении калибровки

ПГС	CO <sub>2</sub> , млн <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> , млрд <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> (G4301), млн <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> (G4301), млрд <sup>-1</sup>
№ 1	339,17	1685,17	335,01 ± 0,16	1669,78 ± 0,81
№ 2	365,40	1988,74	360,78 ± 0,17	1968,74 ± 0,85
№ 3	390,24	2283,61	385,35 ± 0,17	2261,48 ± 0,86

Поскольку очевидно, что по курсу следования автомобиля значительная часть данных была отягощена антропогенной составляющей (выбросы автомобилей на трассе), то в ходе последующей обработки «фоновые» значения восстанавливались с использованием метода базовой линии [20]. Базовое значение концентрации определялось по ее минимальным значениям на анализируемом участке маршрута. В случаях сильной загруженности автомобильных трасс для получения фоновых значений концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> осуществлялись периодические отклонения от маршрута в наветренную сторону. Подобный подход был реализован в [21].

## 2. Результаты и обсуждение

Исследование неоднородностей пространственного распределения концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> на территории Западной Сибири с использованием портативного газоанализатора Picarro G4301 проводилось в ходе четырех мобильных кампаний: в конце октября – начале ноября 2018 г.; марте, июне и августе 2019 г.

### 2.1. Пространственное распределение углекислого газа (осень 2018 г.)

На рис. 1 (цв. вкладка) приведен пример пространственного распределения углекислого газа, полученного в ходе первой кампании. Из рис. 1, *a* видно, что наиболее загружены автомобильные трассы между Новосибирском, Омском и Челябинском, что стало причиной высоких концентраций CO<sub>2</sub> как на отдельных участках дороги, так и в районах крупных населенных пунктов.

Несмотря на существенное влияние выбросов автотранспорта на проводимые измерения, использование метода базовой линии позволило восстановить распределение «фоновой» концентрации CO<sub>2</sub>

в приземном слое атмосферы над значительной частью территории Западной Сибири. Так, например, из рис. 1, *b*, на котором также приведены значения молярной доли CO<sub>2</sub>, измеренные на станциях JR-STATION и с помощью мобильного комплекса при их посещении, видно, что они достаточно хорошо согласуются. Самые низкие уровни фоновой концентрации CO<sub>2</sub> в октябре-ноябре 2018 г. наблюдались на участках Томск – Карасево, Демьянское – Ноябрьск и Тобольск – Ялуторовск (56,7° с.ш., 66,4° в.д.), где средние значения составили 410,1 ± 1,1, 410,7 ± 1,6 и 411,5 ± 1,5 млн<sup>-1</sup> соответственно.

Самый высокий фоновый уровень содержания углекислого газа (431,0 ± 2,2 млн<sup>-1</sup>) наблюдался в западных районах между Челябинском и Курганом, что обусловлено переносом воздушных масс из западных регионов, отягощенных антропогенной нагрузкой, и почти полным отсутствием фотосинтетической активности в этот период года. На обратном пути, при следовании из Челябинска в Томск, измерения проходили в условиях, определявшихся многоцентровым циклоном с двумя системами фронтов, охватившим практически всю территорию Западной Сибири. Один из центров циклона находился южнее Норильска, а другой – в районе Ханты-Мансийска. Ось ложбины протянулась с северо-востока на юго-запад. На участке маршрута между Челябинском и Омском автомобиль передвигался в теплой субтропической воздушной массе. В районе Калачинска (75 км восточнее Омска) он пересек систему фронтов, произошло резкое падение температуры окружающего воздуха, и дальнейшие измерения производились уже в арктической воздушной массе с преобладанием ветра с северной составляющей. В результате был зарегистрирован резкий спад концентрации CO<sub>2</sub>, и ее среднее фоновое значение на отрезке от Калачинска до Томска составило 412,7 ± 1,3 млн<sup>-1</sup>.

### 2.2. Пространственное распределение метана (осень 2018 г.)

Пространственное распределение концентрации метана, полученное на территории Западной Сибири в октябре-ноябре 2018 г., приведено на рис. 2 (цв. вкладка). Оно характеризуется ярко выраженным положительным широтным градиентом концентрации CH<sub>4</sub> от степных районов на юге к заболоченным территориям на севере. В отличие от углекислого газа существенного влияния автотранспорта на измерения концентрации метана не наблюдалось. Основные всплески концентрации метана, значительно превышавшие 2,0 млн<sup>-1</sup>, регистрировались в нефтегазодобывающих районах, вблизи газотранспортных систем и автозаправочных станций, реализующих метан в качестве моторного топлива. В частности, абсолютный максимум (4,408 млн<sup>-1</sup>) был зарегистрирован в непосредственной близости от компрессорной станции КС-6 Самсоновского линейно-производственного управления магистральных газопроводов ОАО «Газпром» (рис. 2, *a*), расположенной

в 30 км северо-восточнее наблюдательной станции «Демьянское».

В южных районах высокий уровень фоновых значений молярной доли  $\text{CH}_4$ , как и в случае с углекислым газом, наблюдался на протяженном отрезке маршрута между Челябинском и Курганом. Это доказывает, что измерения проходили в воздушной массе со значительной антропогенной нагрузкой.

Также повышенные концентрации метана, но уже природного происхождения, были зарегистрированы 28 октября 2018 г. при следовании автомобиля через водно-болотные угодья Чановского района Новосибирской области по маршруту Томск – Омск (рис. 2, б). Через 11 дней, когда автомобиль возвращался, озера и болота в этом районе уже были покрыты льдом, и эмиссия метана из них не сказалась на результатах измерений. Высокие фоновые концентрации в этом же районе были снова зарегистрированы в ходе июньской и августовской кампаний 2019 г., причем во время последней из них молярная доля  $\text{CH}_4$  превысила  $2,5 \text{ млн}^{-1}$ .

### 2.3. Сезонная изменчивость пространственного распределения $\text{CO}_2$ и $\text{CH}_4$

Проведение четырех кампаний позволило восстановить картину сезонной изменчивости фоновых концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы

сферы значительной части Западной Сибири. Их широтные и долготные трансекты приведены на рис. 3.

Из значений концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , усредненных для каждого из трансектов (рис. 4 и табл. 2), видно, что максимальные уровни  $\text{CO}_2$  наблюдались в марте 2019 г. Также следует отметить, что в холодный период года (как в октябре, так и в марте) распределение  $\text{CO}_2$  в приземном слое Западной Сибири было относительно равномерным и межквартильный размах (МКР) значений молярной доли  $\text{CO}_2$  в каждом из трансектов был небольшим. Это обусловлено тем, что в указанный период практически отсутствует суточный ход вследствие менее интенсивного вертикального перемешивания атмосферы и слабого экосистемного обмена, а фоновое содержание углекислого газа в атмосфере региона определяется в основном предысторией воздушной массы, в которой проводятся измерения.

Анализ данных, полученных в июне и августе 2019 г., был усложнен наложением суточной динамики  $\text{CO}_2$  на измерения, проводимые по маршруту, что сказалось на более высоких значениях МКР. Однако если сделать выборку дневных значений, когда нижние слои атмосферы хорошо перемешаны и идет интенсивное поглощение углекислого газа экосистемами, то можно заметить, что при возобновлении фотосинтеза в вегетационный период (июньская измерительная кампания) широтное распределение концентрации  $\text{CO}_2$  становится неравномерным. Так, из рис. 3 и 4 видно, что на участках маршрутов

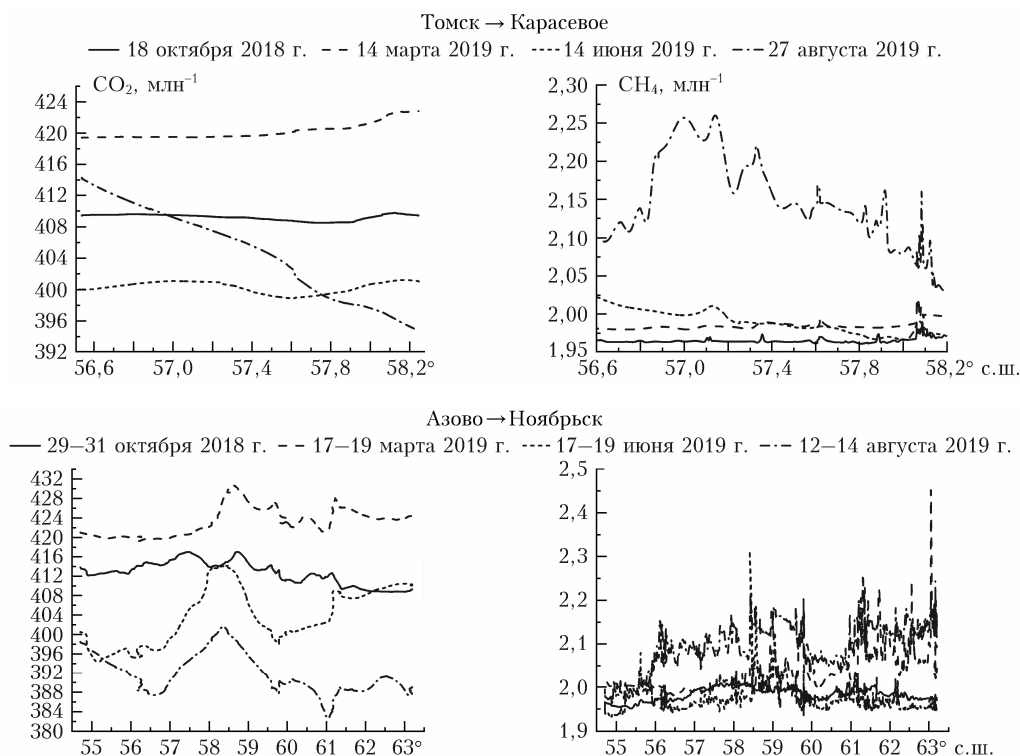


Рис. 3. Широтные и долготные трансекты фоновых концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы над территорией Западной Сибири. Начало

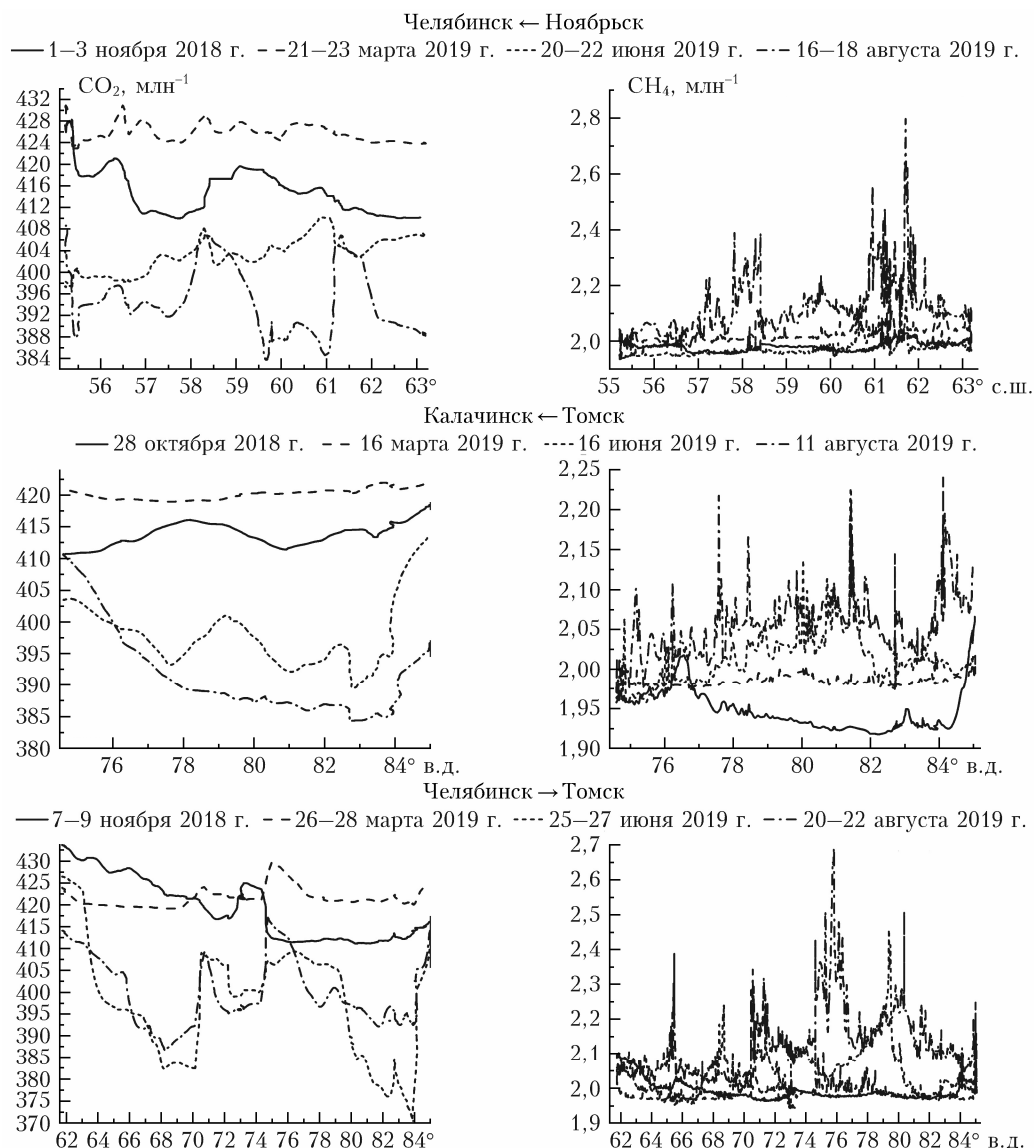


Рис. 3. Окончание

Азово – Ноябрьск и Ноябрьск – Челябинск отчетливо проявился положительный широтный градиент от южных районов к северным из-за запаздывания начала периода вегетации в последних. К августу же этот градиент заметно ослабевает.

В отличие от  $\text{CO}_2$  распределение  $\text{CH}_4$  имело более сложную пространственную и сезонную структуру. Так, в октябре 2018 г. пространственное распределение по всей территории было достаточно равномерным с уровнями концентрации, не превышавшими  $2,0 \text{ млн}^{-1}$ . Это обусловлено тем, что биогенная эмиссия метана в исследуемом регионе к этому моменту уже практически прекратилась, а его накопление в тонком приземном слое атмосферы вследствие антропогенных выбросов еще не набрало силу.

В марте 2019 г. антропогенная составляющая стала более заметной во всех районах, особенно в нефтегазодобывающих (от Тобольска до Ноябрьска).

В июне наблюдалась обратная картина. Возобновление биогенной эмиссии в теплых южных районах

привело к более высоким концентрациям метана, чем в северных.

К августу концентрации  $\text{CH}_4$  превысили  $2,0 \text{ млн}^{-1}$  практически на всей территории Западной Сибири, за исключением степных районов. При этом пространственное распределение в северных районах стало более неоднородным, по всей видимости, из-за различий в мощности эмиссии метана разными типами болотных экосистем, находящихся на территории Большого Васюганского болота.

На высокий уровень содержания метана в Томской области в августе также повлияли выбросы от лесных пожаров, бушевавших как на ее территории, так и в Восточной Сибири.

Полученные данные, с одной стороны, подтверждают результаты исследований проведенных в указанном регионе ранее [10, 22–25], с другой – результаты измерений в других регионах [26–28]. Вместе с тем измерения на мобильной платформе позволяют выявлять мезомасштабные неоднородности

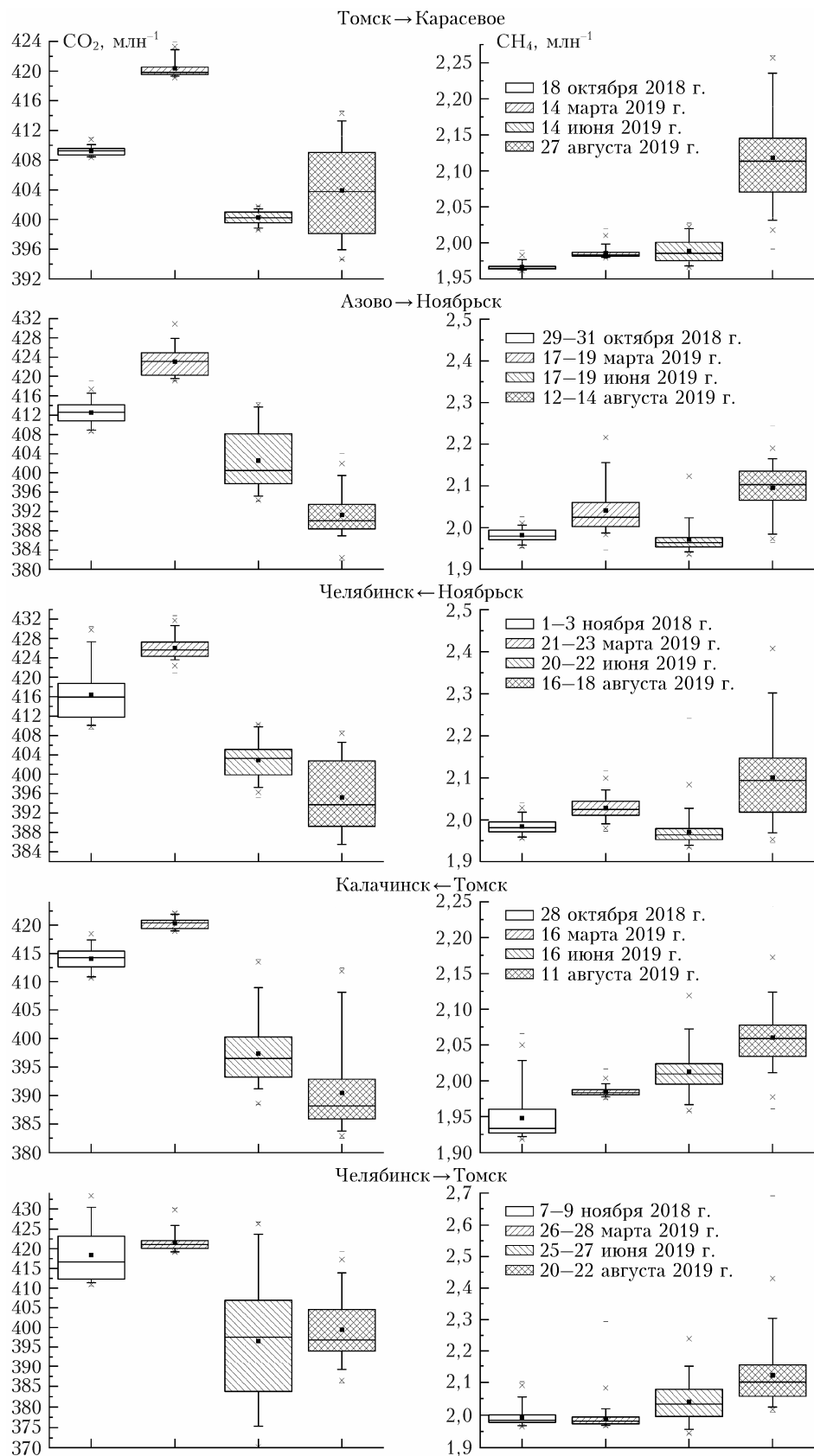


Рис. 4. Диаграмма размаха фоновых концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, построенная на основе статистического анализа данных, представленных на рис. 3. Верхние и нижние границы прямоугольников – третий и первый квартили соответственно; черный квадрат и горизонтальная линия внутри прямоугольника – среднее значение и медиана; «–» – минимальные и максимальные значения выборки; «x» – 1-й и 99-й перцентили; границы верхних и нижних «усов» – 1,5 МКР

Таблица 2

Концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, усредненные для каждого из трансектов и для территории Западной Сибири, охваченной мобильными измерениями

Трансект (протяженность)	Дата	CO <sub>2</sub> , млн <sup>-1</sup>			CH <sub>4</sub> , млрд <sup>-1</sup>		
		Среднее	МКР	Медиана	Среднее	МКР	Медиана
Томск– Карасевое (310 км)	18.10.2018	409,2±0,5	0,9	409,2	1966,5±4,7	3,7	1964,4
	14.03.2019	420,4±1,1	1,0	419,8	1985,7±6,7	5,3	1983,4
	14.06.2019	400,2±0,9	1,4	400,2	1988,8±15,8	25,7	1985,7
	27.08.2019	403,9±5,8	10,9	403,7	2118,0±59,6	74,7	2113,4
Азово– Ноябрьск (1590 км)	29–31.10.2018	412,5±2,3	3,3	412,6	1981,8±15,1	23,3	1979,3
	17–19.03.2019	423,1±2,9	4,6	423,1	2040,9±54,2	57,5	2025,2
	17–19.06.2019	402,6±5,8	10,4	400,5	1971,0±34,5	22,7	1963,8
	12–14.08.2019	391,3±4,1	5,1	390,1	2095,5±51,9	70,2	2103,1
Ноябрьск– Челябинск (1500 км)	1–3.11.2018	416,4±5,1	6,9	415,9	1984,1±17,5	23,4	1981,3
	21–23.03.2019	426,0±2,2	2,9	425,6	2028,0±24,7	33,3	2024,7
	20–22.06.2019	402,9±3,6	5,2	403,3	1971,1±29,4	26,8	1964,1
	16–18.08.2019	395,2±7,1	13,5	393,7	2100,2±104,3	128,8	2093,3
Томск– Калачинск (820 км)	28.10.2018	414,1±1,9	2,8	414,3	1947,7±31,4	33,1	1933,4
	16.03.2019	420,3±0,9	1,5	420,4	1984,5±5,8	7,1	1983,2
	16.06.2019	397,4±5,4	7,1	396,5	2012,9±32,0	28,9	2009,4
	11.08.2019	390,4±6,6	7,0	388,2	2060,1±36,0	43,7	2058,8
Челябинск– Томск (1850 км)	7–9.11.2018	418,4±6,5	10,8	416,7	1993,0±25,8	23,1	1984,5
	26–28.03.2019	421,5±2,1	2,0	421,1	1987,4±24,0	21,0	1981,8
	25–27.06.2019	396,5±13,7	23,1	397,5	2040,5±63,8	83,3	2033,4
	20–22.08.2019	399,4±7,6	10,6	396,9	2120,8±90,6	95,8	2100,6
Западная Сибирь	18.10–9.11.2018	415,6±5,4	5,9	414,1	1980,5±26,69	26,1	1979,4
	14–28.03.2019	422,9±3,0	4,6	422,0	2011,4±41,23	46,8	2000,5
	14–27.06.2019	400,0±9,1	9,5	400,5	1999,2±54,18	58,9	1982,7
	11–28.2019	395,1±7,6	10,6	393,4	2100,5±81,7	084,6	2090,2

в распределении концентрации ПГ, вызванные природными или антропогенными источниками.

### Заключение

Проведенные в 2018–2019 гг. измерения концентрации CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> на территории Западной Сибири с использованием мобильной платформы впервые позволили восстановить картину их пространственного распределения с высоким разрешением, а также выявить ее сезонные особенности. Анализ результатов показал наличие как широтного градиента, так и мезомасштабных неоднородностей в пространственном распределении парниковых газов, в особенности метана. Медианные значения концентраций, наблюдавшихся на территории Западной Сибири в конце октября – начале ноября 2018 г., марте, июне и августе 2019 г., составили:

– для CO<sub>2</sub>: 414,1; 422,0; 400,5; 393,4 млн<sup>-1</sup> соответственно;

– для CH<sub>4</sub>: 1979,4; 2000,5; 1982,7; 2090,2 млрд<sup>-1</sup> соответственно.

Полученные в ходе мобильных кампаний данные могут быть использованы при оценке мощности антропогенных и природных источников CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, а также моделировании углеродного баланса сибирских экосистем. В дальнейшем планируется продолжение измерений концентраций парниковых газов

с использованием портативного газоанализатора для определения межгодовой изменчивости их содержания в атмосфере Западно-Сибирского региона.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту № АААА-А17-117021310142-5.

1. *McNutt M.* Times's up, CO<sub>2</sub> // *Science*. 2019. V. 365, N 6432. P. 411.
2. *George S.S.* Aberrant synchrony of present-day warming // *Nature*. 2019. V. 571, N 7766. P. 481–482.
3. *Neukom R., Steiger N., Gytmez-Navarro J.J., Wang J., Werner J.P.* No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era // *Nature*. 2019. V. 571, N 7766. P. 550–554.
4. *Бюллетень ВМО по парниковым газам № 15.* Содержание парниковых газов в атмосфере по данным глобальных наблюдений в 2018 году. 25 ноября 2019 г. // ВМО, Отдел исследований атмосферной среды, Департамент научных исследований, Женева. 6 с.
5. *Höhne N., den Elzen M., Rogelj J., Metz B., Fransen T., Kuramochi T., Olhoff A., Alcamo J., Winkler H., Fu S., Schaeffer M., Schaeffer R., Peters G.P., Maxwell S., Dubash N.K.* Emissions: world has four times the work or one-third of the time // *Nature*. 2020. V. 579, N 7797. P. 25–28.
6. *GAW Report No 206.* Workshop Proceedings of the 6th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2011), Wellington, New Zealand, 25–28 October 2011. 2012. 67 p.

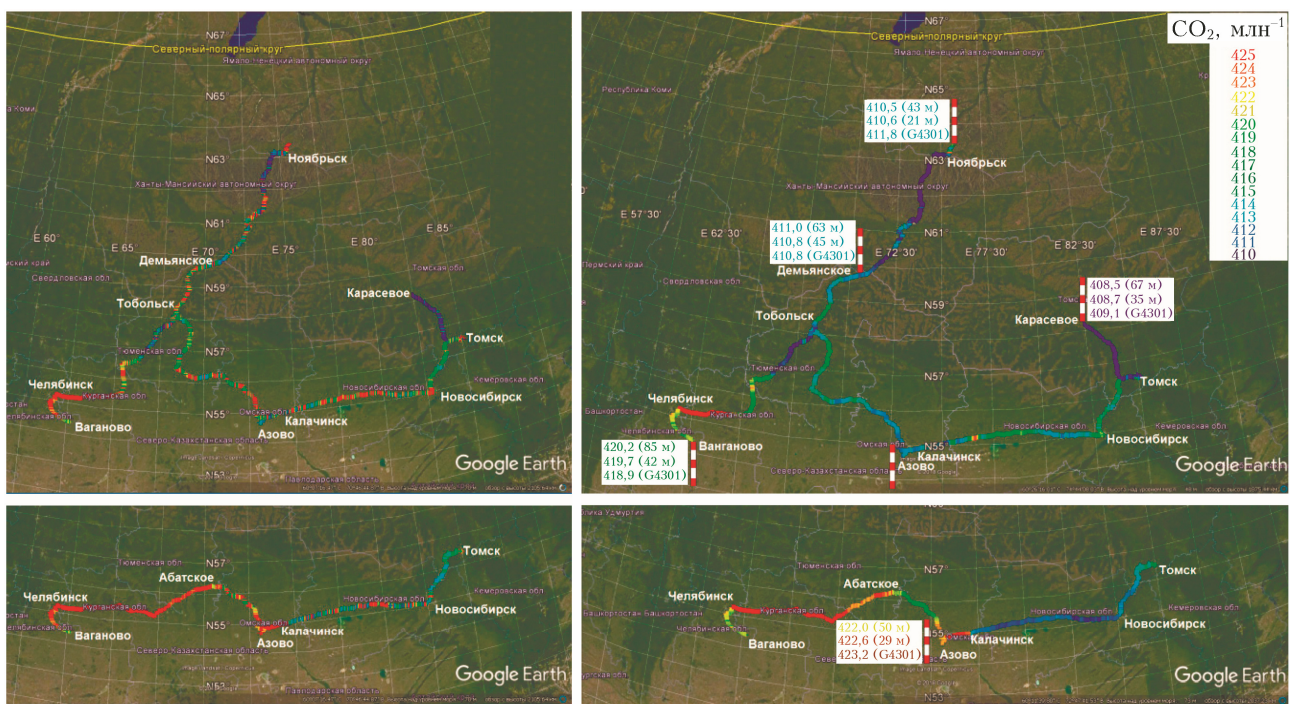
7. Andrews A.E., Kofler J.D., Trudeau M.E., Williams J.C., Neff D.H., Masarie K.A., Chao D.Y., Kitzis D.R., Novelli P.C., Zhao C.L., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M.J., Fischer M.L., Parker M.J., Lee J.T., Baumann D.D., Desai A.R., Stanier C.O., De Wekker S.F.J., Wolfe D.E., Munger J.W., Tans P.P. CO<sub>2</sub>, CO, and CH<sub>4</sub> measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: Instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 2. P. 647–687. DOI: 10.5194/amt-7-647-2014.
8. URL: <http://www.icos-infrastructure.eu/node/15/> (last access: 19.02.2020).
9. Rammig A. Tropical carbon sinks are out of sync // *Nature*. 2020. V. 579, N 7797. P. 38–39.
10. Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A., Sasakawa M., Machida T. Analysis of the Diurnal, Weekly, and Seasonal Cycles and Annual Trends in Atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> at Tower Network in Siberia from 2005 to 2016 // *Atmos.* 2019. V. 10, N 11. 689. DOI: 10.3390/atmos10110689.
11. Schmidt A., Rella C.W., Guçkede M., Hanson C., Yang Z., Law B.E. Removing traffic emissions from CO<sub>2</sub> time series measured at a tall tower using mobile measurements and transport modeling // *Atmos. Environ.* 2014. V. 97. P. 94–108. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.08.006.
12. Shepherd T.G. Effects of a warming Arctic // *Science*. 2016. V. 353, N 6303. P. 989–990.
13. Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalisation // *Tellus A*. 2016. V. 68. DOI: 10.3402/tellusa.v68.28234.
14. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davidov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous Measurement of Methane Concentration using 9-tower Network over Siberia // *Tellus B*. 2010. V. 62, N 5. P. 403–416.
15. Crosson E.R. A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor // *Appl. Phys. B*. 2008. V. 92, N 3. P. 403–408.
16. Chen H., Winderlich J., Gerbig C., Hofer A., Rella C.W., Crosson E.R., Van Pelt A.D., Steinbach J., Kolle O., Beck V., Daube B.C., Gottlieb E.W., Chow V.Y., Santoni G.W., Wofsy S.C. High-accuracy continuous airborne measurements of greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique // *Atmos. Meas. Tech.* 2010. V. 3. N 2. P. 375–386. DOI: 10.5194/amt-3-375-2010.
17. Nara H., Tanimoto H., Tohjima Y., Mukai H., Nojiri Y., Katsumata K., Rella C.W. Effect of air composition (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, and H<sub>2</sub>O) on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurement by wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy: Calibration and measurement strategy // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5, N 11. P. 2689–2701.
18. Сунца Л.Н., Луговской А.А., Сердюков В.И., Аршинов М.Ю. Изменение коэффициента отражения многослойных диэлектрических покрытий при вариации влажности среды // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 8. С. 601–608; Sinita L.N., Lugovskoi A.A., Serdyukov V.I., Arshinov M.Yu. Changes in the multilayer dielectric coating reflection coefficient under variation in the medium humidity // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 574–581.
19. Serdyukov V.I., Sinita L.N., Lugovskoi A.A. Influence of gas humidity on the reflection coefficient of multilayer dielectric mirrors // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 17. P. 4763–4768.
20. Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Fofonov A.V., Arshinova V.G. Heterogeneity of the spatial distribution of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations in the atmospheric surface layer over West Siberia: October–November 2018 // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11208. DOI: 10.1117/12.2539205.
21. Pérez I.A., Sánchez M.L., García M.A., Pardo N. An experimental relationship between airflow and carbon dioxide concentrations at a rural site // *Sci. Total Environ.* 2015. V. 533. P. 432–438.
22. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Исследование состава воздуха в различных воздушных массах // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 9. С. 752–759; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Study of air composition in different air masses // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 72–79.
23. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Краснов О.А., Максютов Ш.Ш., Machida T., Sasakawa Motoki, Фофонов А.В. Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом Западной Сибири в летний период // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 8. С. 670–681.
24. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Краснов О.А., Максютов Ш.Ш., Machida T., Панченко М.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Sasakawa Motoki, Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Исследование динамики концентрации парниковых газов на территории Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 9. С. 777–785.
25. Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Панов А.В., Колосов Р.А., Сиденко Н.В., Лаврич Й., Хайманн М. Межгодовая изменчивость концентрации диоксида углерода в атмосфере над центральной частью Сибири (по данным международной обсерватории ZOTTO за 2009–2015 гг.) // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 5. С. 20–29.
26. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Athani P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris I., Haverd V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetzjer E., Kaplan J.O., Kato E., Goldewijk K.K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauwet S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombarozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Neill C., Omar A.M., Ono T., Peregón A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Séférian R., Schweinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S. Global Carbon Budget 2019 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2019. V. 11, N 4. P. 1783–1838.



27. Krasnova A., Kukumägi M., Mander U., Torga R., Krasnov D., Noe S.M., Ostonen I., Püttsepp U., Killian H., Uri V., Lxhmus K., Sxber J., Soosaar K. Carbon exchange in a hemiboreal mixed forest in relation to tree species composition // *Agric. For. Meteorol.* 2019. V. 275. P. 11–23.
28. Korkiakoski M., Tuovinen J.-P., Penttilä T., Sarkkola S., Ojanen P., Minkkinen K., Rainne J., Laurila T., Lohila A. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clear-cutting // *Biogeosciences.* 2019. V. 16, N 19. P. 3703–3723.

*M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov, A.V. Fofonov, V.G. Arshinova.* **Investigation of the spatial distribution of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the atmospheric surface layer over Western Siberia using a mobile platform.**

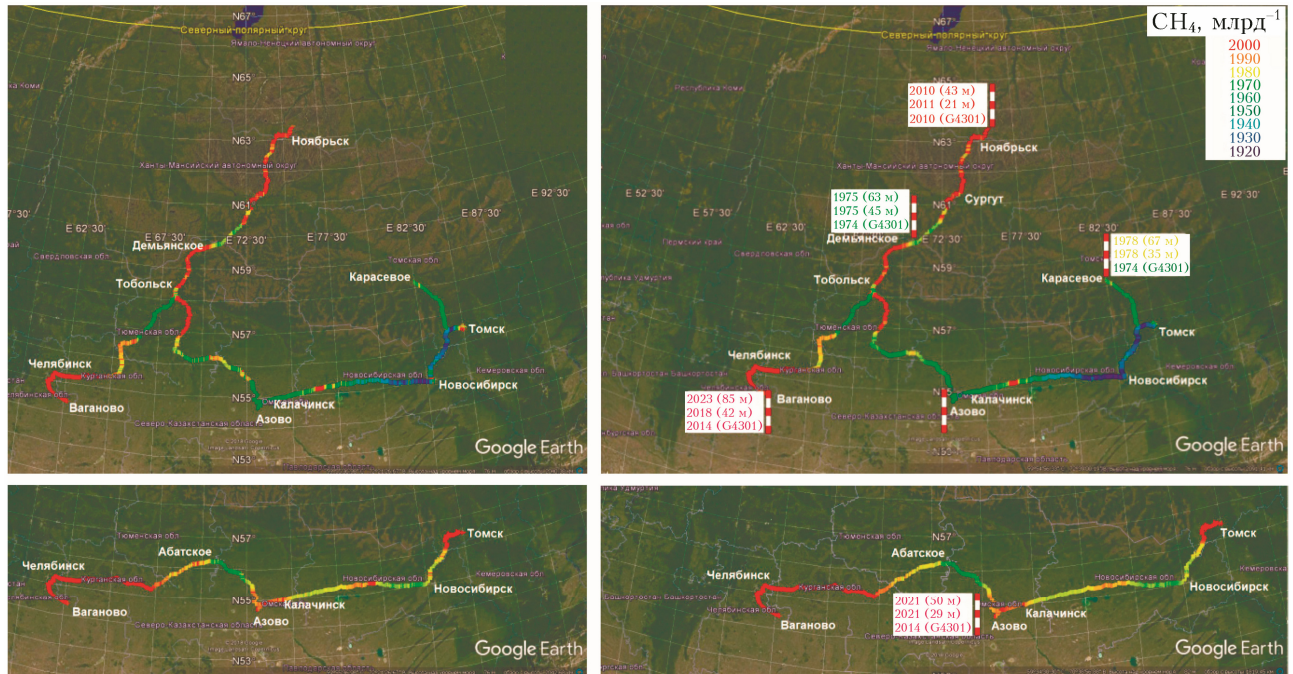
The results of a large-scale investigation of carbon dioxide and methane distribution carried out in Western Siberia in 2018–2019 using a Picarro G4301 portable gas concentration analyzer are presented. The analysis of the obtained data enabled the spatial distribution of background concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> to be retrieved with a high resolution. The revealed inhomogeneities in the CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> distribution is a result of both the effect of ecosystem features in different regions of Western Siberia and the characteristics of their seasonal cycles.



*а*

*б*

Рис. 1. Пространственное распределение концентрации CO<sub>2</sub> в приземном слое атмосферы Западной Сибири, полученное в ходе проведения мобильной кампании осенью 2018 г., по данным без фильтрации (*а*) и фоновых значений, восстановленных методом базовой линии (*б*); красно-белые столбики – станции сети JR-STATION



*а*

*б*



*в*



*г*

Рис. 2. Пространственное распределение концентрации  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы Западной Сибири, полученное в ходе проведения мобильной кампании осенью 2018 г., по данным без фильтрации (*а*); фоновых значений, восстановленных методом базовой линии (*б*), вблизи компрессорной станции КС-6 Самсоновского линейно-производственного управления магистральных газопроводов ОАО «Газпром» (*в*), в районе водно-болотных угодий Чановского района Новосибирской области (*г*)