

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.513.510.42

**Влияние атмосферного блокирования в Западной Сибири
на изменение концентрации метана и углекислого газа
в зимний период**

**П.Н. Антохин¹, О.Ю. Антохина¹, М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹,
Д.К. Давыдов¹, А.В. Козлов¹, А.В. Фофонов¹,
M. Sasakawa², T. Machida^{2*}**

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

²National Institute for Environmental Studies,
16-2 Onogawa, 305-8506, Tsukuba, Japan

Поступила в редакцию 4.12.2018 г.

Предложен механизм влияния атмосферного блокирования на газовый и аэрозольный состав приземного слоя атмосферы в зимний период. Согласно этому механизму рост концентрации метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂) наблюдается в циклонической части блокинга, сформированной адвекцией полярных воздушных масс и чаще локализованной в южных районах Западной Сибири. Увеличение концентрации происходит за счет уменьшения высоты пограничного слоя атмосферы и формирования инверсии. Для подтверждения предложенного механизма исследована изменчивость CH₄ и CO₂ в фоновых районах Западной Сибири (сеть JR-STATION, Japan–Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) в периоды атмосферного блокирования. Всего было проанализировано 12 периодов блокирования. Оказалось, что в период блокирования концентрация CH₄ и CO₂ возрастает в большей части событий для станций, расположенных на юге Западной Сибири. Средняя разница концентрации CH₄ между периодами блокингов и периодами, предшествующими им, составила 133 млрд⁻¹ (диапазон изменчивости от 50 до 370 млрд⁻¹), для CO₂ – 9,5 млн⁻¹ (диапазон изменчивости от 4 до 17 млн⁻¹). Средний рост концентрации в период блокирования составил для CH₄ 48 млрд⁻¹/день (максимальное значение 182 млрд⁻¹/день, минимальное – 12 млрд⁻¹/день), для CO₂ – 3 млн⁻¹/день (максимальное значение 9 млн⁻¹/день, минимальное – 1 млн⁻¹/день). Средний прирост для CH₄ составил 268 млрд⁻¹, для CO₂ – 17 млн⁻¹.

Ключевые слова: атмосферное блокирование, метан, углекислый газ, концентрация, JR-STATION, зимний период, высота пограничного слоя, приземное давление; atmospheric blocking, methane, carbon dioxide, concentration, winter period, JR-STATION, height of the boundary layer, surface pressure.

Введение

Согласно выводам, приведенным экспертами МГЭИК в Пятом оценочном докладе [1], влияние человека на климатическую систему очевидно и является основной причиной потепления, наблюдаемого с середины XX в. Причем большая доля антропогенного изменения климата обусловлена выбросами углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄). Радиационный форсинг метана, составляющий в настоящее время около 1 Вт/м², сравним с форсингом углекис-

лого газа (около 1,7 Вт/м²) [2]. На данный момент осуществляется множество непрерывных наблюдений, в рамках которых с высокой точностью измеряется содержание парниковых газов в атмосфере, позволяя оценить их многолетнюю изменчивость. Однако в целом климатическая система очень сложна, а атмосферу можно рассматривать как глобальный постоянно действующий химический реактор. Поэтому для составления полной картины пространственно-временной изменчивости климатически значимых параметров атмосферы необходимы мониторинговые измерения. Особенно важны такие наблюдения на территории Сибири, играющей огромную роль в глобальном балансе углерода. Однако до недавнего времени на такой огромной территории не существовало регулярной сети мониторинга [3].

Для заполнения существующего пробела в наблюдениях за парниковыми газами на территории Западной Сибири в рамках международного российско-японского сотрудничества между Институтом

* Павел Николаевич Антохин (apn@iao.ru); Ольга Юрьевна Антохина (olgayumarchenko@gmail.com); 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); Motoki Sasakawa (Sasakawa.motoki@nies.go.jp); Toshinobu Machida (tmachida@nies.go.jp).

оптики атмосферы (ИАО СО РАН) и Национальным институтом исследований окружающей среды (NIES, г. Цукуба, Япония) в 2000-х гг. была создана сеть мониторинга JR-STATION (Japan–Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network) [3–5]. Накопленный к настоящему времени ряд данных позволяет оценить тенденции долговременных изменений концентрации CO_2 и CH_4 в Сибирском регионе и сравнить их с данными из других регионов Земли, а также исследовать внутрисезонную изменчивость концентраций и факторов, которые непосредственно ее определяют. В работе [6] оценена изменчивость CO_2 при прохождении фронтов. В работе [7] были сделаны оценки изменчивости концентрации метана для летнего сезона и установлено, что большую роль наряду с болотными экосистемами играют пожары, спровоцированные процессами атмосферного блокирования. Влияние пожаров на концентрацию CO_2 оказалось менее значительным [8], особенно с учетом более существенной трендовой составляющей по сравнению с CH_4 [3].

В данной работе мы фокусируем внимание на зимнем сезоне, имеющем ряд важных особенностей с точки зрения исследования источников парниковых газов, но освещенном в меньшей степени. Условия формирования поля концентраций CH_4 и CO_2 в Западной Сибири существенно отличаются для теплого и холодного сезонов [3, 5]. Согласно данным многолетних измерений, проводимых в Западной Сибири [9], для годового хода концентрации обоих газов характерно наличие зимнего максимума. На заболоченных территориях в летний период проявляется также вторичный максимум концентрации CH_4 . В холодный период года мощность антропогенных источников обоих газов существенно возрастает, а эмиссия метана болотными экосистемами Западной Сибири снижается. Также ослабевают их основные стоки: падает уровень концентрации радикала OH , реакция с которым является основным каналом выведения CH_4 из атмосферы, и практически отсутствует поглощение CO_2 растительностью. Поэтому, большую роль приобретают антропогенные источники CH_4 и CO_2 [10] и накопление их эмиссий при определенных условиях [11].

На сегодня сведения об изменчивости приземной концентрации CH_4 и CO_2 в Западной Сибири в зимний период немногочисленны, еще меньше сведений, касающихся причин этой изменчивости. Можно предположить, что при отсутствии стоковой части в балансе CH_4 и CO_2 на фоне относительно стабильной мощности локальных антропогенных источников эмиссий в зимний период наибольшую роль в изменчивости концентраций должны играть условия циркуляции атмосферы. Как правило, появление высоких концентраций газов и аэрозолей, особенно в районах с высокой антропогенной нагрузкой, связано с циркуляционными условиями, способствующими формированию приземных температурных инверсий [11–16]. В этом случае рост концентраций обусловлен уменьшением толщины слоя атмосферы, в котором могут разбавляться поступающие загрязнения (уменьшение объема рассеяния) [12].

Кроме того, важным фактором является трансграничный перенос малых газовых составляющих и аэрозолей из более загрязненных районов в менее загрязненные [17–19]. В этом случае определяющую роль играют траектории переноса и мощность удаленных источников примесей. Оценка обоих этих факторов важна и для исследования каждого из них требуется индивидуальный подход.

Цель данной работы — оценка влияния атмосферных блокирований (или блокингов) на изменчивость зимних концентраций CH_4 и CO_2 . Известно, что с блокированием связаны экстремальные похолодания в зимний период [20], с которыми могут быть связаны крупномасштабные аномалии газового состава атмосферы. Поскольку блокирование способствует изоляции отдельных районов, а следовательно, и локализации источников выбросов CH_4 и CO_2 , по изменению концентрации газов в изолированных точках в период блокинга с помощью решения обратной задачи можно восстановить мощность источников в этих изолированных районах [21].

Методика и данные исследования

В представленной работе проанализирована изменчивость концентраций метана и углекислого газа на основе данных измерений сети станций JR-STATION, которая описана в большом количестве работ, в частности расположение станций и основные характеристики приведены в [4–6]. Для анализа использованы средние дневные значения (с 13:00 до 17:00 по местному времени) за каждый зимний период 2005–2016 гг., наблюдавшийся с ноября по февраль включительно. Анализ проводился для восьми станций: Азово (AZV), Березоречка (BRZ), Карасевое (KRS), Игрим (IGR), Ноябрьск (NOY), Демьянское (DEM), Саввушка (SVV), Ваганово (VGN). Для некоторых из периодов также было сделано сравнение с данными, взятыми из базы Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMSv16r1; URL: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-ghg-inversions/>).

Для анализа атмосферной циркуляции использованы данные реанализа Era-Interim [22] за 12 часов UTC. Были использованы следующие величины: высота геопотенциала 500 гПа (Z_{500}), зональная и меридиональная компоненты скорости ветра на уровне 500 гПа, потенциальная температура на динамической тропопаузе ($PV-\theta$), приземное давление (P) и высота пограничного слоя (ВПС).

Алгоритм идентификации атмосферного блокирования

Согласно результатам работы [23] для территории Западной Сибири наиболее оптимальным критерием определения ситуации блокирования является критерий, предложенный S. Tibald, F. Molteni [24] на основе публикации [25], а затем модифицированный D. Baggiopedro et al. [26] (использование широкого диапазона (Δ) в формулах (1) и (2)):

$$\text{GHGS} = \frac{Z(\varphi_0) - Z(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s}, \quad (1)$$

$$\text{GHGN} = \frac{Z(\varphi_n) - Z(\varphi_0)}{\varphi_n - \varphi_0}, \quad (2)$$

где GHGS (geopotential height gradient south) – южный градиент геопотенциала, GHGN (geopotential height gradient north) – северный градиент геопотенциала; Z – высота изобарической поверхности 500 гПа; широты: $\varphi_n = 80^\circ$ с.ш. $\pm \Delta$; $\varphi_0 = 60^\circ$ с.ш. $\pm \Delta$; $\varphi_s = 40^\circ$ с.ш. $\pm \Delta$, $\Delta = -5, 0; -2, 5; 0; 2, 5; 5, 0$.

При расчете по формулам (1) и (2) для параметра $\varphi \pm \Delta$ выбиралось максимальное значение из пяти: $\varphi \pm 5^\circ$, $\pm 2, 5^\circ$, 0. Блокирующей считается ситуация, при которой $\text{GHGS} > 0$, $\text{GHGN} < -10$ м/°φ. Первое условие GHGS является основным в определении наличия блокинга. Второе условие, вспомогательное, означает, что к северу от блокинга должен существовать сильный западный поток; таким образом из «каталога блокирования» исключаются случаи аномального смещения струйного течения умеренных широт на юг. Для Западной Сибири добавление условия GHGN позволило обнаружить всего 5% подобных случаев во всем проанализированном ряде блокирующих ситуаций [23]. Поэтому мы используем его в основном для автоматической идентификации блокингов.

Что касается анализа долговременной изменчивости блокирований и ее связи с полями метеорологических величин, то в представленной работе он основан на идентификации так называемых мгновенных блокингов (МБ) (Local Instantaneous Blocking [23, 27] – локальный блокинг в конкретный срок). В эту категорию были включены все ситуации, удовлетворяющие критериям (1) и (2) хотя бы за один срок наблюдений на одной долготе из диапазона 60–90° в.д.

Основой для выборки отдельных событий было выполнение условия $\text{GHGS} > 0$ в течение 5 и более суток. Оценивалось поведение GHGS для каждой из долгот в диапазоне от 60 до 90° в.д., если хотя бы для одной из долгот соблюдались указанные выше условия. Само событие рассматривалось на втором этапе, когда каждый из выбранных случаев анализировался на основании распределения PV-θ и линий тока поля скорости на уровне 500 гПа. Исследование поведения PV-θ позволяет детально взглянуть на процессы опрокидывания волн Россби [28], приводящие к появлению блокирования, и понять, насколько на самом деле каждый блокинг затрагивает территорию Западной Сибири.

В результате анализа были выбраны следующие периоды, которые мы условно отнесли к различным группам на основе пространственной локализации циклона и антициклона в блокирующем образовании [27]:

– дипольные: 18–22, 26–29 ноября 2006 г. (одно событие), 3–12, 16–21 января 2008 г. (одно событие), 13–22 декабря 2008 г., 31 декабря 2010 г. – 6 января 2011 г., 15–22 декабря 2011 г., 12–18 декабря 2012 г., 31 декабря 2015 г. – 4 января 2016 г.;

– монополярные: 15–21 января 2011 г.;
– комбинированные «диполь + монополь»: 23 января – 6 февраля 2005 г., 1–12 декабря 2005 г., 15–22 января 2012 г. (одно событие), 23 января – 9 февраля 2012 г.;

– неопределенные (проблемы с идентификацией): 4–28 января 2006 г. (не идентифицирован GHGS при условии $\varphi_0 = 60^\circ$ с.ш. $\pm \Delta$, $\varphi_s = 40^\circ$ с.ш., поэтому для φ_0 и φ_s было задано смещение на север согласно [23]).

Для всех 12 событий, за исключением января 2011 г., преобладает дипольная конфигурация блокирования; даже если стадия монополя присутствует на каком-либо из этапов в периоды максимальной интенсификации (опрокидывания), конфигурация становится дипольной. К неопределенным был отнесен довольно продолжительный период в январе 2006 г., когда были зафиксированы два периода блокирования с небольшим промежутком с помощью изменения центральной широты блокирования [23]. Подобные случаи редки, но они встречаются.

Оценки влияния атмосферного блокирования

Для оценки влияния блокингов над Западной Сибирью на изменчивость высоты пограничного слоя и величину приземного давления были рассчитаны пространственные распределения коэффициентов корреляции повторяемости мгновенного блокирования с полями давления и высоты пограничного слоя. Для анализа влияния отдельных блокингов рассчитывались средние концентрации в период блокирования и до блокирования (бралось сопоставимое число дней), а также скорости роста концентраций парниковых газов в период блокирования.

Результаты исследований

Особенности зимнего блокирования

На рис. 1 приведена долговременная изменчивость повторяемости МБ с 1980 по 2018 г. (ноябрь – февраль). В этот период можно выделить три интервала с разными характеристиками изменчивости: 1980–1988, 1989–2003, 2004–2018 гг. В настоящее время продолжается период, характеризующийся более высокой повторяемостью блокирования наряду с более высокой дисперсией. Начало последнего периода совпадает с началом работы сети JR-STATION.

На рис. 2 (цв. вкладка) показаны распределения коэффициентов корреляции повторяемости блокингов, приземного давления и высоты пограничного слоя за 2004–2017 гг. для каждого исследуемого месяца. На основе полученных распределений для давления и температуры [29], а также анализа отдельных событий [29, 30] можно сформулировать следующие ключевые особенности блокирования в зимний период. В целом конфигурация блокирования в летний [29] и зимний сезоны схожа.

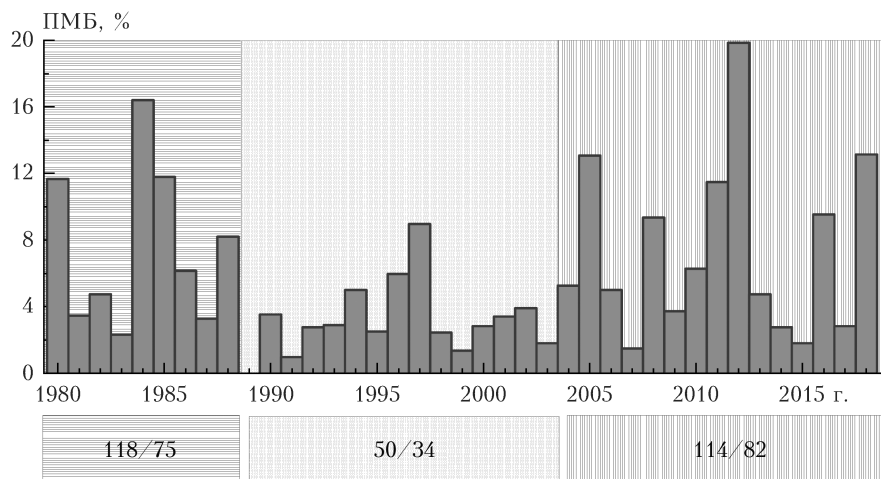


Рис. 1. Долговременная изменчивость повторяемости МБ (ПМБ) в Западной Сибири в зимний период (повторяемость в 1980 г. — это суммарная повторяемость за ноябрь — декабрь 1979 г. и январь — февраль 1980 г. и т.д.). Разными штриховками выделены периоды с разными характеристиками изменчивости. Внизу приведены данные среднее/дисперсия за период

Чаще всего установление блокирования характеризуется вторжением арктического воздуха в низкие (средние) широты по восточной периферии блокирующего антициклона или гребня и адвекцией тепла по его западной периферии в умеренные (высокие) широты. Гребню и адвекции тепла в средней и верхней тропосфере в поле геопотенциала соответствует высокое давление, а ложбине и адвекции холода — низкое. Поле приземной температуры реагирует на процесс формирования блокинга в соответствии с траекториями перемещения теплого и холодного воздуха: температура растет в северных широтах и уменьшается в южных.

Несмотря на то что на верхних уровнях, а также в приземном слое атмосферы в период блокинга явно виден диполь с меридиональным обращением температуры и геопотенциала, в поле приземного давления наблюдается повсеместный рост (рис. 2, *P*). Эта особенность связана со свойствами холодного воздуха в зимний период. В условиях радиационного выхолаживания холодный воздух, зажатый в ложбине блокинга, быстро опускается на нижние уровни, где создает повышенное давление. В свою очередь, в антициклоне блокинга давление высокое на всех уровнях, включая приземный слой, в силу баротропности антициклона. Таким образом, на нижних уровнях тропосферы в период стационарирования блокинга давление повсеместно повышено.

Проанализируем распределение коэффициентов корреляции для высоты пограничного слоя (рис. 2, ВПС), а также полученные значения для исследуемых районов (табл. 1). Видно, что связь условий блокирования и ВПС высока. Минимальные коэффициенты характерны для ноября, что согласуется с выводами относительно связи повторяемости блокирования, приземного давления и температуры воздуха. Невысокие коэффициенты обусловлены наименьшей повторяемостью блокингов в ноябре по сравнению с остальными месяцами (декабрь — февраль). Видно, что только в ноябре существует значимая связь между вариациями блокирования и ВПС для северных станций (Игрим, Ноябрьск). Для остальных месяцев максимальные коэффициенты корреляции характерны для южных станций. Максимальные по модулю коэффициенты получены для районов станции Азово, Савлушка и Березоречка в январе и декабре. Для районов станций Игрим и Ноябрьск связи между блокированием и ВПС в период с декабря по февраль не наблюдается.

Влияние атмосферного блокирования на концентрацию парниковых газов

При анализе изменчивости концентраций CH_4 и CO_2 в зимний период обратила на себя внимание схожесть их поведения, поэтому была произведена

Таблица 1

Коэффициент корреляции повторяемости блокирования и ВПС в районе станций измерений

Месяц	AZV	BRZ	DEM	IGR	NOY	KRS	SVV	VGN
Ноябрь	-0,41	-0,23	-0,58	-0,62	-0,53	-0,52	-0,21	-0,54
Декабрь	-0,81	-0,76	-0,41	-0,12	-0,27	-0,66	-0,73	-0,58
Январь	-0,79	-0,79	-0,46	-0,02	-0,25	-0,69	-0,78	-0,67
Февраль	-0,56	-0,71	-0,46	-0,14	-0,25	-0,69	-0,69	-0,53

Примечание. Достоверный коэффициент при уровне значимости 0,05 составляет 0,48, при уровне значимости 0,01 составляет 0,61.

оценка степени связи CH_4 и CO_2 для каждого зимнего сезона с 2004–2005 до 2016–2017 гг. В табл. 2 приведены максимальные, минимальные и средние коэффициенты корреляции для каждой станции. Высокая степень связи, о которой можно судить на основании данных табл. 2, свидетельствует о преобладании общих для обоих газов механизмов изменчивости.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции концентраций CH_4 и CO_2 для зимних сезонов

Значение	AZV	BRZ	DEM	IGR	NOY	KRS	SVV	VGN
min	0,48	0,40	0,59	0,68	0,42	0,50	0,60	0,72
max	0,90	0,81	0,83	0,83	0,76	0,81	0,80	0,88
Среднее	0,74	0,67	0,71	0,76	0,61	0,72	0,69	0,83

Перейдем к результатам анализа изменения концентрации CH_4 и CO_2 в периоды событий блокирования. В табл. 3 (цв. вкладка) разными цветами обозначены три категории событий: с откликом (отмечен рост концентрации), без отклика (нет роста концентрации) и отсутствие данных. Под таблицей приведены диаграммы, показывающие суммарный вклад всех категорий для каждой станции. Если событие представлено несколькими периодами (и отклик был зафиксирован в один из периодов), то считалось, что это событие с откликом.

Наименьшее число случаев с откликом зафиксировано для станций Игрим, Ноябрьск, Ваганово, хотя правомерно делать вывод о наличии или отсутствии отклика только для станции Игрим, так как для остальных двух станций было недостаточно измерений в исследуемые периоды. Наименьшее количество событий блокирования без отклика зафиксировано для станций Азово, Карасевое и Саввушка. При этом стоит отметить, что для станции Саввушка было недостаточно измерений в исследуемые периоды. Станции Березоречка и Демьянское занимают промежуточное положение между двумя описанными выше категориями, несмотря на то что станция Демьянское находится ближе к категории северных станций (Игрим, Ноябрьск). В целом полученное распределение согласуется с распределением коэффициентов корреляции повторяемости блокирования и ВПС: большее влияние блокинги оказывают на южные станции. Для иллюстрации приведем пример изменения концентрации в период блокирования 31 декабря 2010 г. – 6 января 2011 г.

На рис. 3 (цв. вкладка) для этого периода показаны распределения PV- θ и линии тока поля скорости ветра на 500 гПа. Хорошо видно, как в процессе опрокидывания волны в западные и северо-западные районы исследуемого региона поступают теплые воздушные массы, которые формируют блокирующий антициклон. В свою очередь, в юго-восточных районах за счет адвекции полярных воздушных масс формируется циклоническая часть блокинги. Пример хорошо иллюстрирует то, что максимальное влияние оказывает именно циклоническая

часть блокирующего образования, сформированная полярными воздушными массами, поскольку отклик концентрации зафиксирован только на станциях, попадающих под ее влияние (см. табл. 3).

На рис. 4 (цв. вкладка) приведены графики изменчивости основных исследуемых характеристик для станции Азово в зимний период 2010–2011 гг. Для нее зафиксировано одно из наибольших увеличений концентрации. Отчетливо видно, что в первый обозначенный период блокирования (рис. 4, в, штриховка) происходят скачкообразный рост приземного давления и уменьшение высоты пограничного слоя (рис. 4, з). Эти изменения приводят к росту концентрации газов в приземном слое (рис. 4, а). Рост концентрации в период блокирования зафиксирован также по данным SAMS (рис. 4, б).

На рис. 5 (цв. вкладка) приведена изменчивость основных исследуемых характеристик для станции Игрим. Видно, что для периода блокинги конца декабря – начала января также характерно увеличение приземного давления, однако уменьшения ВПС не происходит (рис. 5, з). Напротив, в период блокирования высота пограничного слоя в районе станции Игрим растет. Концентрация газов (рис. 5, а, б) снижается в период блокинги. Этот пример объясняет слабый отклик концентрации на возникновение условий блокирования в северных районах. В антициклонической части блокинги, где происходит адвекция теплых воздушных масс, ВПС увеличивается, несмотря на рост приземного давления.

Для станции Азово с начала блокирования (29 декабря 2010 г.) до максимального накопления эмиссий (5 января 2011 г.) концентрация CH_4 увеличилась на 239 млрд⁻¹, а CO_2 – на 24 млн⁻¹. Для того чтобы вычислить средние увеличения концентрации в период блокирования, были посчитаны две величины: рост концентрации за сутки (рост) и разница между концентрацией до и в период блокинги (разница). В табл. 3 приведены сведения о том, для каких станций и событий рассчитана та или иная величина. В основном второй показатель рассчитывался для блокингов с устойчивым положением циклонической части, в отличие от первого показателя, который в большей степени подходил для ситуаций с выраженным ростом концентрации, но без стационарирования. Для некоторых событий были рассчитаны оба показателя. Средняя разница концентрации CH_4 между периодами блокингов и периодами, предшествующими им, составила 133 млрд⁻¹ (диапазон изменчивости от 50 до 370 млрд⁻¹), для CO_2 – 9,5 млн⁻¹ (диапазон изменчивости от 4 до 17 млн⁻¹). Средний рост концентрации в период блокирования составил для CH_4 48 млрд⁻¹/день (максимальное значение 182 млрд⁻¹/день, минимальное – 12 млрд⁻¹/день), для CO_2 – 3 млн⁻¹/день (максимальное значение 9 млн⁻¹/день, минимальное – 1 млн⁻¹/день). Средний прирост для CH_4 составил 268 млрд⁻¹, для CO_2 – 17 млн⁻¹. Таким образом, для станций с откликом в периоды блокирования зачастую формировались максимальные зимние концентрации парниковых газов.

Заключение

Исследовано влияние уникальных по степени изменения метеорологических параметров условий атмосферного блокирования на изменение химического состава атмосферы в приземном слое воздуха. Показано, что зимние атмосферные блокировки в Западной Сибири имеют в основном дипольную структуру (циклон – антициклон) с более выраженной, чем в летний период, циклонической частью, обусловленной адвекцией холода из полярной области. На основе исследования связи повторяемости атмосферных блокировок и таких параметров, как приземное давление, температура и высота пограничного слоя, предложен наиболее вероятный механизм влияния блокирования на газовый и аэрозольный состав атмосферы в зимний период.

Согласно предложенному механизму рост концентрации наблюдается в циклонической части блокировки в южных районах Западной Сибири. Увеличение концентрации происходит за счет уменьшения высоты пограничного слоя атмосферы и формирования приземной инверсии. Несмотря на то что рост приземного давления характерен для всего блокирующего образования, высота пограничного слоя атмосферы уменьшается только в его циклонической части.

Для подтверждения предложенного механизма исследована изменчивость концентрации CH_4 и CO_2 в фоновых районах Западной Сибири в периоды атмосферного блокирования. Данные получены на станциях сети мониторинга парниковых газов JR-STATION. Всего было проанализировано 12 периодов блокирования. Анализ данных показал, что в период блокирования концентрации CH_4 и CO_2 возрастают в большей части событий для станций, расположенных на юге Западной Сибири. Средняя разница концентрации CH_4 между периодами блокировок и периодами, предшествующими им, составила 133 млрд^{-1} (диапазон изменчивости от 50 до 370 млрд^{-1}), для CO_2 – $9,5 \text{ млн}^{-1}$ (диапазон изменчивости от 4 до 17 млн^{-1}). Средний рост концентрации в период блокирования составил для CH_4 $48 \text{ млрд}^{-1}/\text{день}$ (максимальное значение $182 \text{ млрд}^{-1}/\text{день}$, минимальное – $12 \text{ млрд}^{-1}/\text{день}$), для CO_2 – $3 \text{ млн}^{-1}/\text{день}$ (максимальное значение $9 \text{ млн}^{-1}/\text{день}$, минимальное – $1 \text{ млн}^{-1}/\text{день}$). Средний прирост для CH_4 составил 268 млрд^{-1} , для CO_2 – 17 млн^{-1} .

Атмосферное блокирование является одной из важных причин возникновения и усиления температурных инверсий в атмосфере, относящихся к метеорологическим условиям, которые обуславливают экстремальные увеличения концентрации малых газовых составляющих и аэрозолей в приземном слое воздуха. Даже для фоновых условий увеличения концентрации в периоды блокирований значимы. В дальнейшем подобные исследования необходимо провести для городских условий (например, на основе данных TOR-станции [31]), так как на урбанизированной территории эффект воздействия атмо-

сферного блокирования, вероятно, будет еще более ощутимым.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-05-00119, 17-05-00374), Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

1. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. *Climate Change 2007: The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. (eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007. 40 p.
3. Давыдов Д.К. Исследование изменения состава воздуха на территории Западной Сибири с применением автоматизированных комплексов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2018. 177 с.
4. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г., Краснов О.А., Machida T., Maksutov Sh. Sh., Недзлэк Ф., Рамонет М., Суас Ф., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонент над территорией Сибири и некоторые его результаты. 1. Газовый состав // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 11. С. 948–955.
5. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous measurements of methane from a tower network over Siberia // Tellus B. 2010. V. 62, N 5. P. 403–416.
6. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Рассказчикова Т.М., Фофанов А.В., Machida T. Изменения концентрации CO_2 в разные сезоны года при прохождении атмосферных фронтов по территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 24–31.
7. Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Складнева Т.К., Фофанов А.В., Sasakawa M., Machida T. Влияние атмосферного блокирования в Западной Сибири на изменение концентрации метана в летний период // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 5. С. 393–403.
8. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Краснов О.А., Симоненков Д.В., Фофанов А.В., Черников С.А. Изменение концентрации диоксида углерода в периоды летнего атмосферного блокирования над Западной Сибирью // Тезисы XII Сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу. 2017. С. 11–12.
9. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г., Максюттов Ш.Ш., Machida T., Фофанов А.В. Пространственная и временная изменчивость концентрации CO_2 и CH_4 в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192; Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Inoue G., Maksyutov S.S., Machida T., Fofonov A.V. Spatial and temporal variability of CO_2 and CH_4 concentrations in the surface atmospheric layer over West Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 1. P. 84–93.
10. Белан Б.Д., Креков Г.М. Влияние антропогенного фактора на содержание парниковых газов в тропосфере. 1. Метан // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 4. С. 361–373.

11. Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Crescot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J. Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: A meso-scale quantification by generalized atmospheric inversion // *Biogeosciences*. 2015. V. 12, N 18. P. 5393–5414.
12. Ахметшина А.С. Инверсии температуры воздуха как фактор, влияющий на уровень загрязнения пограничного слоя атмосферы (на примере г. Томска): дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2015. 210 с.
13. Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // *Оптика атмосф. и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.
14. Devasthale A., Thomas M.A. An investigation of statistical link between inversion strength and carbon monoxide over Scandinavia in winter using AIRS data // *Atmos. Environ.* 2012. V. 56. P. 109–114.
15. Hou P., Wu S. Long-term Changes in Extreme Air Pollution Meteorology and the Implications for Air Quality // *Sci. Rep.* 2016. V. 6, N 1. P. 23792.
16. Lawrence E. Atmospheric pollution during spells of low-level air temperature inversion // *Atmos. Environ.* 1967. V. 1, N 5. P. 561–576.
17. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Фофонов А.В. Блокирующая роль Уральских гор в трансграничном переносе примесей из Европы в Азию // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 11. С. 937–941; *Atokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Fofonov A.V.* The blocking role of the Ural Mountains in the transborder transfer of impurities from Europe to Asia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 3. P. 242–246.
18. Виноградова А.А., Васильева А.В. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; *Vinogradova A.A., Vasileva A.V.* Black carbon in air over northern regions of Russia: Sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.
19. Freitag S., Clarke A.D., Howell S.G., Kapustin V.N., Campos T., Brekhovskikh V.L., Zhou J. Combining airborne gas and aerosol measurements with HYSPLIT: A visualization tool for simultaneous evaluation of air mass history and back trajectory consistency // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 107–128.
20. Mokhov I.I., Semenov V.A. Weather and Climate Anomalies in Russian Regions Related to Global Climate Change // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2016. V. 41, N 2. P. 84–92.
21. Антохин П.Н., Пененко А.В., Антохина О.Ю. Алгоритм восстановления вертикального распределения мощностей источников и стоков субстанции в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 1. С. 49–56.
22. Dee D.P., Uppala S.M., Simons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayshi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljars A.C.M., Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kalberg P., Kohler H., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., Rosnay P., Taroloto C., Thépaut N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137, N 656. P. 553–597.
23. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Зоркальцева О.С., Девятова Е.В. Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть I: Особенности обнаружения, объективные критерии и их сравнение // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 10. С. 34–45.
24. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // *Tellus*. 1990. V. 42A. P. 343–365.
25. Lejenäs H., Okland H. Characteristics of northern hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data // *Tellus A.* 1983. V. 35, N 5. P. 350–362.
26. Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Lupo A.R., Hernandez E. A Climatology of Northern Hemisphere Blocking // *J. Clim.* 2006. V. 19, N 6. P. 1042–1063.
27. Pelly J.L., Hoskins B.J. A new perspective on blocking // *J. Atmos. Sci.* 2003. V. 60. P. 743–755.
28. Masato G., Hoskins B.J., Woollings T.J. Wave-breaking characteristics of mid-latitude blocking // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 138, N 666. P. 1285–1296.
29. Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Девятова Е.В., Мартынова Ю.В. Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть II: Долговременные вариации и их связь с климатической изменчивостью в Азии // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 3. С. 16–27.
30. Antokhina O.Y., Antokhin P.N., Devyatova E.V., Martynova Y.V. Wintertime Atmospheric Blocking Events over Western Siberia and Their Effect on Surface Temperature Anomalies // *Atmos.* 2018. V. 9. P. 72.
31. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОР-станции ИОА СО РАН // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853.

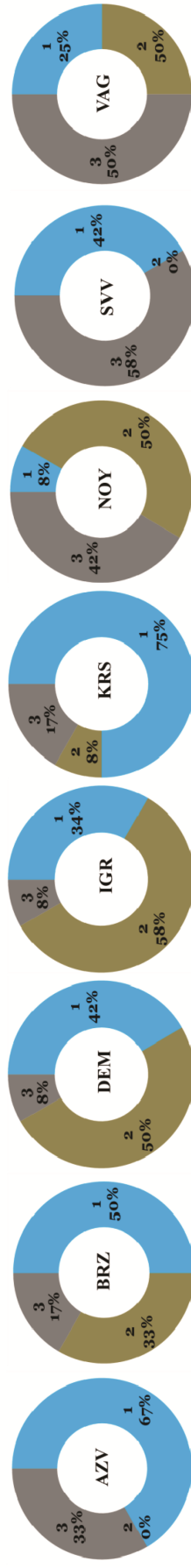
P.N. Antokhin, O.Yu. Antokhina, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov, A.V. Fofonov, M. Sasakawa, T. Machida. The impact of atmospheric blocking in Western Siberia on changes in carbon dioxide and methane concentrations in winter.

The paper proposes a mechanism for the influence of atmospheric blocking on the gas and aerosol composition of the surface layer of the atmosphere in the winter period. According to the mechanism proposed, an increase in the concentrations is observed in the cyclonic part of the blocking formed by the advection of polar air masses and more often localized in southern regions of Western Siberia. The increase in the concentrations occurs due to a decrease in the height of the boundary layer and the formation of inversion. To confirm the mechanism proposed, the variability of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) concentrations was studied in background regions of Western Siberia (JR-STATION – Japan-Russia Siberian Tower Inland Observation Network) during periods of atmospheric blocking. A total of 12 blocking periods were analyzed. It turned out that during the blocking period, the concentrations of CH₄ and CO₂ increase in most of the events for the stations located in the south of Western Siberia. The average difference in the CH₄ concentrations between the blocking periods and the periods preceding the blockings was 133 ppb (range of variability is from 50 to 370 ppb), for CO₂, 9.5 ppm (range of variability is from 4 to 17 ppm). The average growth rate of the concentration during the blocking periods was 48 ppb/day for CH₄ (the maximum is 182 ppb/day, the minimum is 12 ppb/day), and for CO₂, 3 ppm/day (the maximum is 9 ppm/day, the minimum is 1 ppb/day). The average increase for CH₄ was 268 ppb, and for CO₂, 17 ppm.

Таблица 3

Сводные данные об изменении концентрации CH₄ и CO₂ на сети мачт JR-STATION

Начало измерений	Конец измерений	AZV		BRZ		DEM		IGR		KRS		NOY		SVV		VGN	
		CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂
23.01.2005	06.02.2005																
01.12.2005	12.12.2005																
04.01.2006	21.01.2006																
18.11.2006	22.11.2006																
26.11.2006	29.11.2006																
03.01.2008	12.01.2008																
16.01.2008	21.01.2008																
13.12.2008	22.12.2008																
31.12.2010	06.01.2011																
15.01.2011	21.01.2011																
07.12.2011	22.12.2011																
15.01.2012	22.01.2012																
23.01.2012	09.02.2012																
12.12.2012	18.12.2012																
31.12.2015	04.01.2016																



Примечания. 1 – отмечен рост концентрации; 2 – нет роста концентрации; 3 – отсутствие данных. Горизонтальные линии – среднее между периодом блокинга и периодом вне блокинга, вертикальные линии – скорость роста концентрации в период блокинга, перекрестные линии – оба показателя.

На диаграммах показан суммарный для 12 событий вклад событий с откликом, без отклика и при отсутствии данных. Полу жирным выделены периоды, объединенные в одно событие.

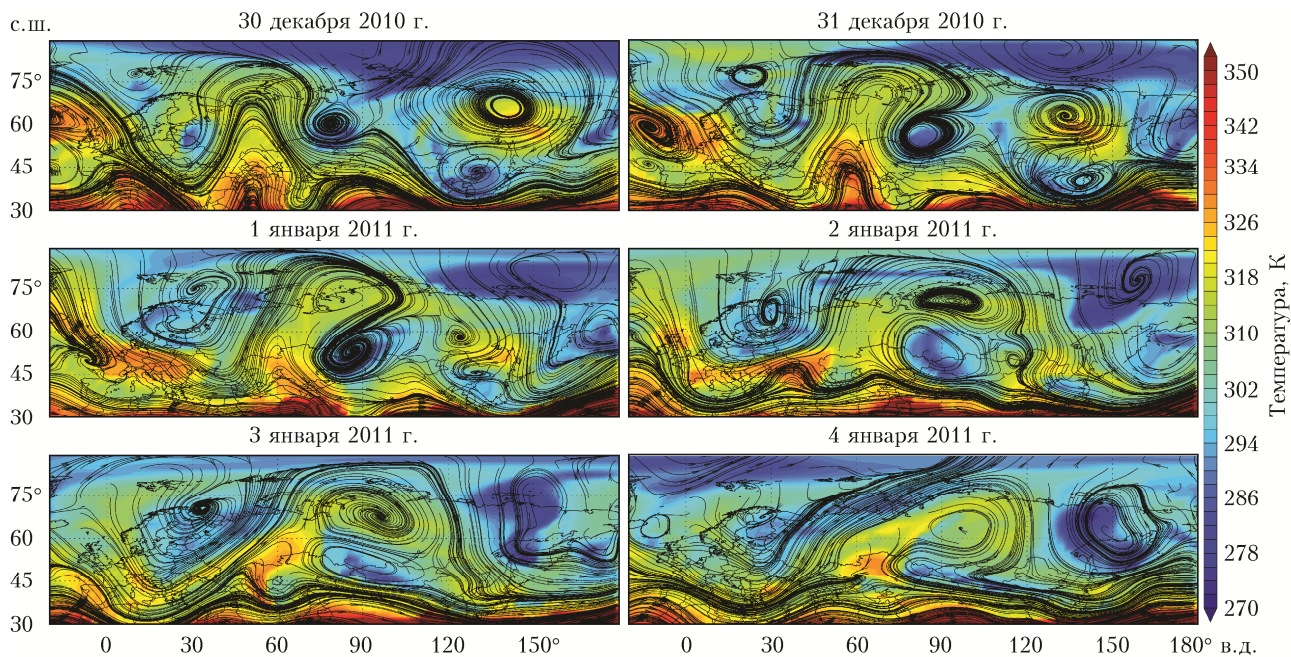


Рис. 3. Распределение PV- θ и линий тока поля скорости ветра на 500 гПа для периода блокирования декабрь 2010 г. – январь 2011 г. (30 декабря 2010 г. – дата, предшествующая блокированию)

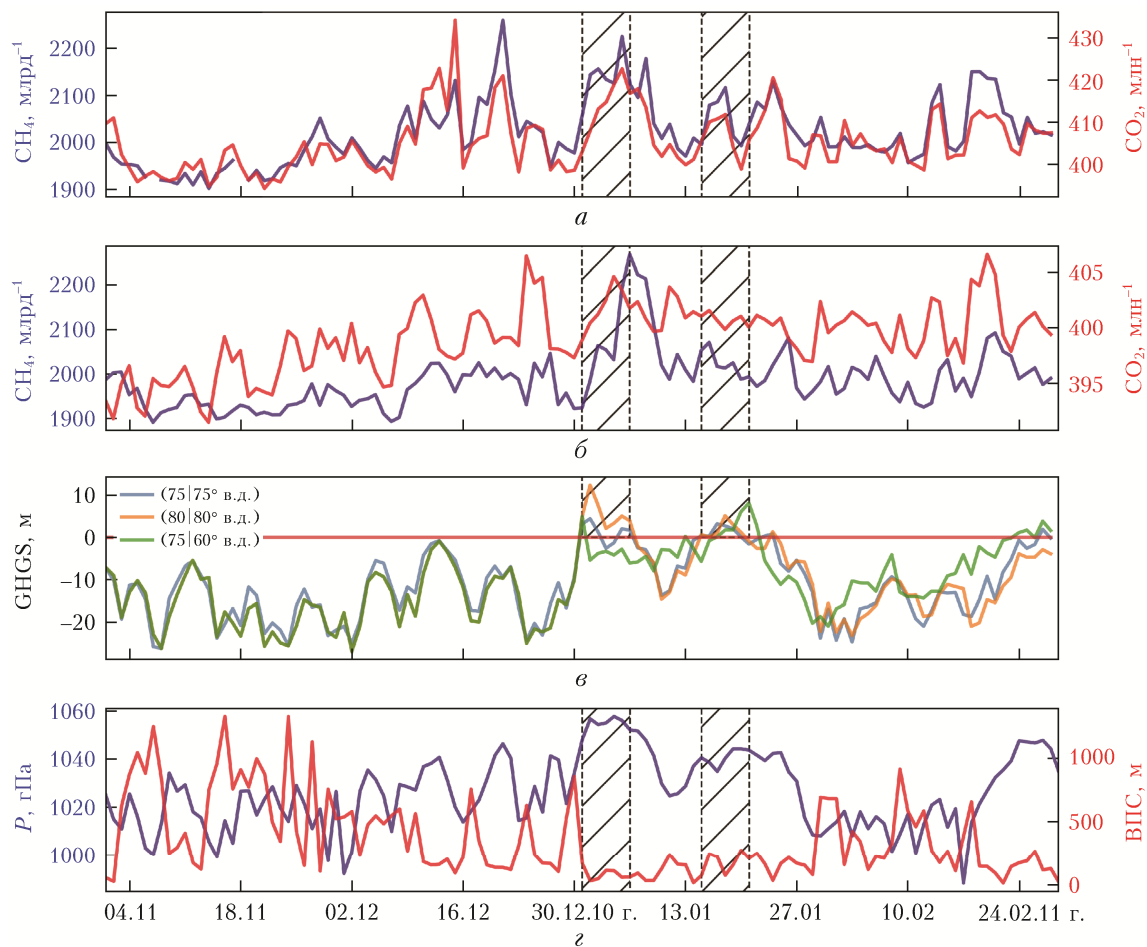


Рис. 4. Графики изменчивости для станции Азово: *а* – CH_4 , CO_2 (JR-STATION); *б* – CH_4 , CO_2 (CAMS v16r1); *в* – GHGS; *г* – приземное давление и высота пограничного слоя. GHGS рассчитан для наиболее показательных долгот, отдельно для ноября – декабря и января – февраля, расчетные долготы для этих периодов разделены знаком «|»

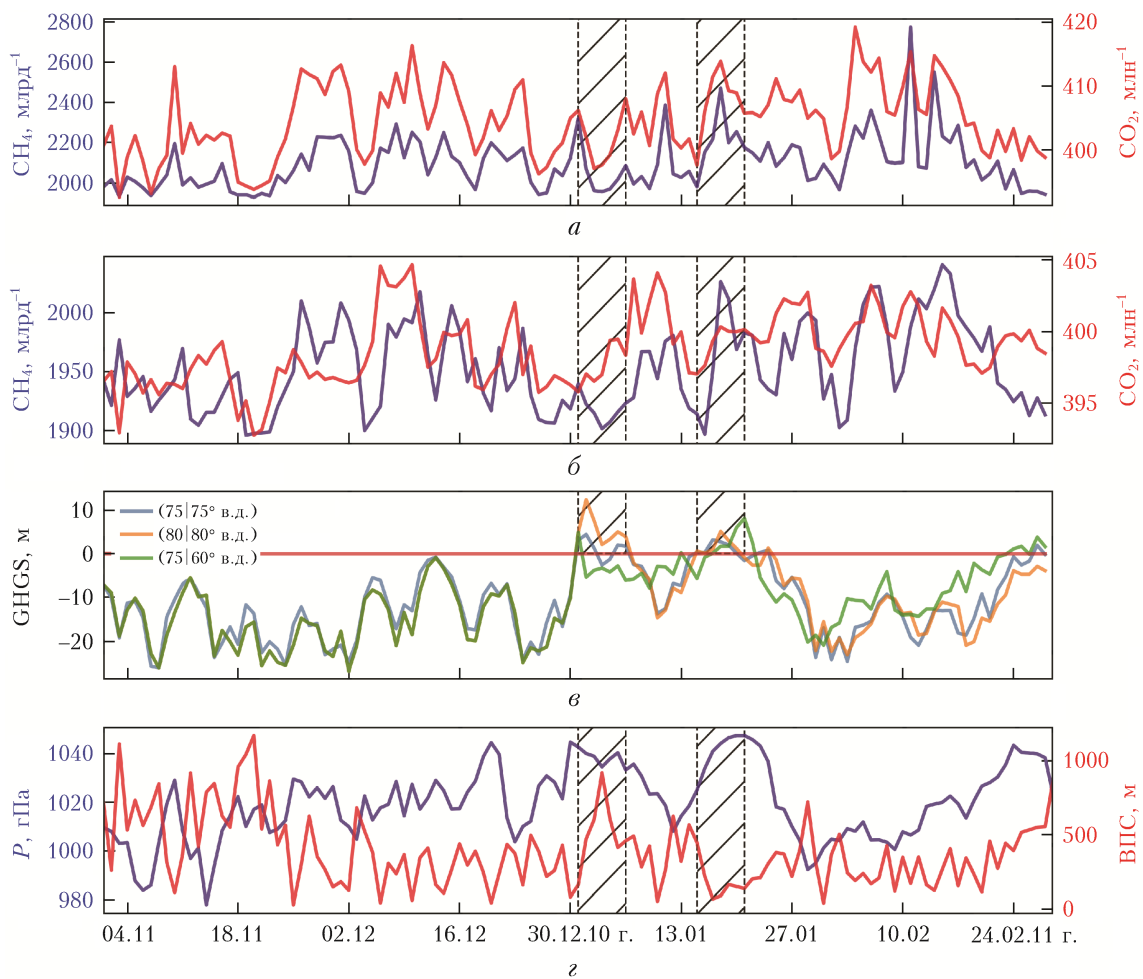


Рис. 5. Графики изменчивости для станции Игрим: *а* – CH₄, CO₂ (JR-STATION); *б* – CH₄, CO₂ (CAM5 v16r1); *в* – GHGS; *г* – приземное давление и высота пограничного слоя. GHGS рассчитан для наиболее показательных долгот, отдельно для ноября – декабря и января – февраля, расчетные долготы для этих периодов разделены знаком «|»