

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 в летний период

П.Н. Антохин¹, О.Ю. Антохина¹, М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹,
Д.К. Давыдов¹, Т.К. Складнева¹, А.В. Фофонов¹, М. Sasakawa², Т. 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 23.11.2016 г.

На основе данных сети мониторинга парниковых газов JR-STATION, аномалий приземной температуры (АТ) и критериев блокирования, предложенных Tibaldi S. и Molteni F. (ТМ), исследованы изменения концентрации метана в периоды атмосферного блокирования над Западной Сибирью. Проанализированы летние сезоны с 1 июня по 31 августа с 2005 по 2013 г. Каталог блокирований, полученный в работе, содержит 13 событий, отобранных на основании анализа изменчивости критерия ТМ, а также продолжительных АТ, рассчитанных на основании данных реанализа ECMWF Era-Interim. Для выделенных событий исследовались наличие очагов природных пожаров и предшествующие блокингу аномалии осадков. Все события разделены на две группы по пространственному охвату (граничные блокинги, захватывающие только часть Западной Сибири, и секторные, полностью охватывающие территорию Западной Сибири) и три группы по времени стационарирования (5–6, 7–9 и >10 дней). Выяснено, что практически все события блокирования влияют на повышение концентрации метана, независимо от времени стационарирования и пространственного охвата, но степень влияния зависит от характера блокинга и сопутствующих ему условий. Это позволило выделить четыре основные группы, характеризующие связь «блокинг–концентрация метана»: «масштабный–длительный блокинг/обширные пожары» (максимально влияние блокирований), «масштабный–длительный блокинг/аномальные осадки до блокинга/локальные пожары» (вторая по степени влияния), «короткий блокинг/без доп. условий» (третья), «секторный–длительный блокинг/локальные пожары» (минимальное влияние).

Ключевые слова: климат, метан, парниковые газы, концентрация, атмосферное блокирование, аномалии приземной температуры воздуха, природные пожары, атмосферные осадки; climate, methane, greenhouse gases, concentration, atmospheric blocking, surface air temperature anomalies, natural fires, precipitation.

Введение

Атмосферный метан, наряду с CO₂, является важнейшим парниковым газом. Влияние метана на климатическую систему осуществляется через его способность поглощать излучение Земли в инфракрасной области спектра, а также его участие во многих фотохимических реакциях в атмосфере. Радиационный форсинг метана, составляющий в настоящее время около 1 Вт/м², сравним с форсингом

углекислого газа (около 1,7 Вт/м²) [1]. Концентрация метана в атмосфере определяется балансом его эмиссии с поверхности Земли и разрушения в реакции с гидроксильным радикалом ОН. Источники эмиссии метана включают антропогенные – связанные с деятельностью человека (использование ископаемого топлива, выращивание риса, животноводство, свалка и обработка отходов, сжигание биомассы) и естественные, такие как водно-болотные территории, термитники и океаны [1].

Существенное влияние на глобальный баланс метана оказывают экосистемы высоких и средних широт [2]. Значительная часть эмиссий метана здесь связана с богатыми торфом болотами, находящимися в относительно узкой полосе от 50 до 70° с.ш. [3], в основном сосредоточенными на территории России. Для болот Западной Сибири запас углерода оценивается величиной 70 ГтС [4], а суммарные эмиссии метана по различным оценкам составляют от 1 до 20 МтCH₄/год [5, 6].

* 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); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Motoki Sasakawa (Sasakawa.motoki@nies.go.jp); Toshinobu Machida (tmachida@nies.go.jp).

Обладая гигантскими запасами углерода, Сибирь играет существенную роль в его глобальном бюджете. Однако ее экосистемы уязвимы при глобальном изменении климата вследствие нарушения баланса между первичным производством углерода и дыханием, высвобождением углерода при таянии вечной мерзлоты и увеличением числа лесных пожаров при более теплом климате [7]. Режим болот и в целом природный цикл метана зависят от региональных и глобальных изменений климата и, в свою очередь, влияют на них [7–9]. С точки зрения метаногенеза наиболее значимым является летний период, а важнейшими переменными, определяющими потоки метана, — температура и влагосодержание почвы. Так, в модели естественных эмиссий CH_4 из влажных экосистем, используемой в ИФА РАН [9], полный поток метана определяется температурой, увлажненностью и содержанием углерода в почве. Кроме того, учитывается, что метаногенез в почве возможен только в анаэробных условиях при положительных температурах и характеризуется экспоненциальной зависимостью от температуры. Также эмиссия метана линейно зависит от влагосодержания почвы.

Климатические вариации температурно-влажностного режима отдельных регионов, в том числе Западной Сибири, определяются огромным числом факторов. Важнейший из них — изменчивость повторяемости ситуаций атмосферного блокирования (блокингов) [11, 12]. Результаты, полученные в [12], демонстрируют, что блокирование над Западной Сибирью вносит около половины в общую изменчивость циркуляции средней тропосферы в этом регионе, о чем свидетельствует разложение на естественные ортогональные функции полей геопотенциала 500 гПа. Кроме того, авторами [11] было установлено, что коэффициент корреляции количества атмосферных осадков и повторяемости блокингов в Западной Сибири для летних месяцев довольно высок и достигает 0,6–0,7. Результаты ряда научных работ свидетельствуют, что, по модельным оценкам, в XXI в. ожидается увеличение повторяемости блокингов в Евро-Атлантическом секторе и в целом в Северном полушарии [13]; рост числа блокингов ожидается и на территории Азии в летний период [14]. Изменение характера блокирования летом во внутриконтинентальных районах Евразии в сторону увеличения продолжительности может привести к изменению температурно-влажностного режима экосистем высоких и средних широт, таянию мерзлоты, увеличению числа пожаров. В работе [10] проанализировано влияние основных параметров атмосферного воздействия на эмиссии метана. Авторы резюмируют, что с разницей в приповерхностной температуре в Западной Сибири по расчетам с различными моделями в наибольшей степени связана разница в значениях эмиссий метана.

К сожалению, такой важный вопрос, как влияние блокингов на состав атмосферы фоновых районов, оказывается весьма скудно освещенным. Подчеркнем, что речь идет именно о влиянии на естественную эмиссию метана, а не об увеличении

антропогенной составляющей. В свою очередь, без понимания степени влияния блокингов на эмиссии метана природными экосистемами невозможно строить какие-либо прогнозы на основе различных сценариев будущих изменений блокингов. Попытаемся сформулировать, в чем же заключаются основные сложности выявления подобных связей.

В целом режим блокирования можно описать как квазистационарный процесс, характеризующийся наличием баротропного антициклона большой амплитуды и «расщеплением» западного переноса воздушных масс на две энергетически равнозначные ветви [15, 16]. В летний период подобный режим циркуляции характеризуется:

1) повышением приземной температуры воздуха в области антициклона по мере его формирования, которое чаще приобретает уже экстремальный характер к стадии заполнения антициклона. Этому способствуют как адвекция воздуха из субтропиков, так и поступление солнечной радиации в отсутствие облачности. Подавлению конвективной облачности способствует уменьшение градиента температуры по высоте, сопровождающее развитие блокирующего антициклона;

2) замкнутым типом движения воздушных масс, при котором все газовые и аэрозольные составляющие атмосферы накапливаются в ограниченном блокингом пространстве.

Очевидно, что режим блокирования оказывает значимое влияние не только на аномалии температуры и осадков в регионе, но и на эмиссии метана. Но априори сложно предположить, как меняется концентрация CH_4 в период блокирования. Главная сложность заключается в том, что эмиссия метана зависит не только от температуры воздуха, но и, в значительной степени, от условий увлажненности, т.е. накопления влаги в болотных системах, которое предшествовало блокингу и повышению температуры. Таким образом, блокирование проявляется в Западной Сибири по-разному в зависимости от конфигурации и продолжительности ситуации, и при этом ему могут предшествовать абсолютно разные условия по осадконакоплению. Учитывая эти факты, необходимо исследовать целый ряд различных ситуаций для понимания влияния блокирования.

Существует еще один важный фактор, о котором не следует забывать. Известно, что продолжительные события блокирования (СБ), такие как летом 2010 г. [17, 18] на европейской территории России или 2012 г. в Сибири [19], сопровождаются лесными и торфяными пожарами. А, как известно, горение биомассы также является значимым источником эмиссии метана [1]. И на данный момент не ясно, сопровождаются ли все более или менее длительные СБ над Западной Сибирью природными пожарами или это касается только редких случаев сверхэкстремальных событий типа 2012 г.

Целью нашего исследования является изучение изменения концентрации метана в периоды блокирования, анализ условий увлажненности и очагов возгорания, сопутствующих этим периодам, для летних сезонов с 2005 по 2013 г.

Методика и данные

Атмосферный метан и температура воздуха (на станциях)

Территория Западной Сибири – это единственный регион в России, где имеется распределенная сеть фоновых мониторинга парниковых газов. В период с 2002 по 2008 г. ИОА СО РАН и Национальный институт исследования окружающей среды (NIES, Япония) ввели в эксплуатацию восемь автоматических измерительных постов для наблюдения за приземными концентрациями метана и углекислого газа в фоновых районах Сибири (проект JR-STATION) [20]. Накопленные к настоящему времени уникальные сведения позволяют провести

полноценное исследование воздействия синоптических процессов на пространственно-временную изменчивость указанных газов в фоновых условиях.

Вариации количества метана анализируются с использованием данных измерений на постах, достаточно равномерно распределенных по территории Западной Сибири (рис. 1). Координаты постов приведены в табл. 1.

Измерения на постах ведутся круглосуточно и круглогодично с интервалом 1 ч. Благодаря оригинальной системе калибровки поверочными газовыми смесями погрешность измерений концентрации CH_4 не превышает 5 ppb. Для оценки влияния СБ отбирались данные с 13 до 17 ч местного времени с 2005 по 2013 г.

Таблица 1

Характеристики измерительных постов сети мониторинга в Западной Сибири

Пост	Начало измерений	Расположение	Широта	Долгота	Высота н.у.м., м	Высота уровней, м
BRZ	Февраль 2002	Березоречка, Томская обл.	56°09' с.ш.	84°20' в.д.	150	5, 20, 40, 80
KRS	Июнь 2004	Карасево, Томская обл.	58°15' с.ш.	82°25' в.д.	50	35, 67
IGR	Сентябрь 2004 Июль 2013	Игрим, ХМАО	63°12' с.ш.	64°25' в.д.	25	24, 47
NOY	Июнь 2005	Ноябрьск, ЯНАО	63°27' с.ш.	75°46' в.д.	100	21, 43
DEM	Июнь 2005	Демьянское, Тюменская обл.	59°47' с.ш.	70°52' в.д.	75	45, 63
SVV	Декабрь 2006 Декабрь 2013	Саввушка, Алтайский край	51°20' с.ш.	82°07' в.д.	400	27, 52
AZV	Декабрь 2007	Азово, Омская обл.	54°42' с.ш.	73°2' в.д.	100	29, 50
VGN	Июнь 2008	Ваганово, Челябинская обл.	54°30' с.ш.	62°19' в.д.	200	42, 85

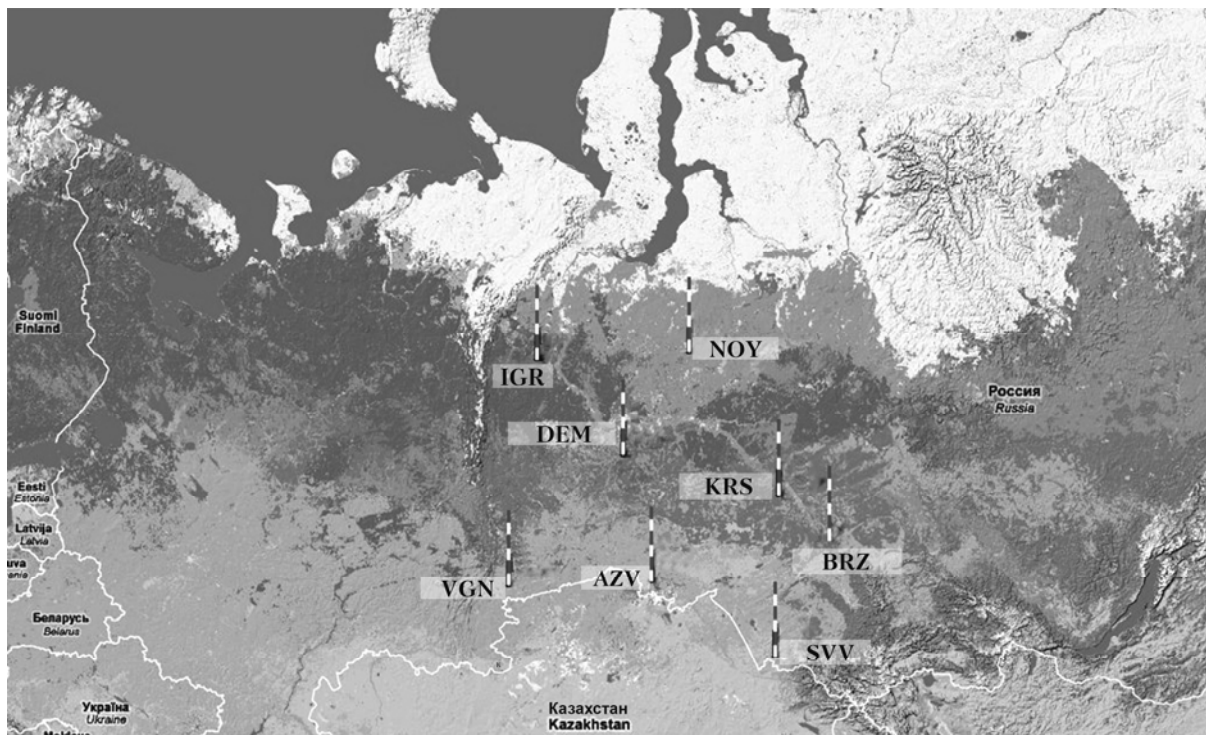


Рис. 1. Расположение станций мониторинга парниковых газов на территории Западной Сибири

Атмосферные блокинги

Исследование циркуляции атмосферы проведено на основе данных Европейского реанализа ECMWF Era-Interim (с сеткой $1,5 \times 1,5$) [21]. В качестве основного объективного критерия для обнаружения и анализа СБ был использован критерий Tibaldi и Molteni (TM) [22]. Согласно TM рассчитываются следующие градиенты геопотенциальных высот:

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

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

где Z — высота изобарической поверхности 500 гПа (Z_{500}); $\varphi_n = 80^\circ$ с.ш. $\pm \Delta$, $\varphi_0 = 60^\circ$ с.ш. $\pm \Delta$, $\varphi_s = 40^\circ$ с.ш. $\pm \Delta$, $\Delta = 0^\circ, \pm 4,5^\circ, \pm 3^\circ, \pm 1,5^\circ$.

Блокирующей считается ситуация, при которой $\text{GHGS} > 0$, $\text{GHGN} < -10$ м/градус широты (GHGS — gradient of geopotential height (south), далее в тексте GS). Первое условие показывает наличие обращения меридионального градиента Z_{500} , характерного для блокирующей ситуации. Второе условие означает, что к северу от блокинга должен существовать сильный западный поток; таким образом из «каталога блокирования» исключаются случаи аномального смещения на юг струйного течения умеренных широт. В работе [23] было показано, что условие (2) выполняется для подавляющего большинства событий блокирования длительностью более 5 сут (для Западной Сибири).

В виду ряда особенностей [23], связанных с обнаружением блокингов в летний период над Западной Сибирью, использование лишь объективного критерия обнаружения блокирований является недостаточным. Разумеется, это касается только выборки отдельных СБ для решения прикладных задач, а не автоматического подсчета средней повторяемости. Поскольку блокирование в атмосфере представляет для нас интерес с точки зрения аномалий температурного режима, для уточнения результатов объективного анализа мы исследовали также аномалии температурного режима для летних сезонов на основе долгопериодных диаграмм, которые были получены следующим образом: для каждого года с 2005 по 2013 рассчитывались среднеширотные значения температуры (в широтном секторе $50-70^\circ$ с.ш.) для каждой долготы в интервале $50-100^\circ$ в.д. и каждого дня с 1 июня по 31 августа. Эти же значения предварительно вычислялись для среднемноголетних температур с 1979 по 2013 г. Далее рассчитывалась разность температур конкретного года и среднемноголетнего показателя (широта, день).

Все обнаруженные СБ были классифицированы по временному и пространственному признакам. Они были разделены на три группы по времени: 5–6, 7–9 и >10 дней, и две по пространству: секторные (охват блокингом всей исследуемой террито-

рии) и граничные (большая часть блокинга находится в соседнем регионе).

Дополнительные характеристики

Для того чтобы получить более адекватную картину, согласно поставленной во введении задаче, анализ влияния СБ проведен с учетом сведений об аномалиях атмосферных осадков, предшествующих блокингу, а также о возникновении пожаров в период блокирования. Для этого были отобраны сведения о смоговых ситуациях (дым от пожаров, мгла, фиксируемые в районе станций измерения метана, от двух и более дней) из архива gr5.ru.

Разумеется, для комплексной оценки влияния такого фактора, как увлажненность, необходимы детальные исследования данных об обводненности болотных территорий. В нашем случае необходима хотя бы косвенная интегральная оценка количества поступившей влаги до момента наступления блокинга. Для этой цели мы построили среднемесячные карты распределения аномалий атмосферных осадков (АО) по данным GPCC Deutscher Wetterdienst [24]. Кроме того, для выбранных из базы GPCC случаев для ряда станций сделаны оценки суточной динамики атмосферных осадков с использованием данных [25].

Результаты расчетов

На рис. 2 (вкладка) показаны долгопериодные диаграммы аномалий температур воздуха (АТ) для всех летних сезонов с 2005 по 2013 г., а также значения меридионального градиента геопотенциала (GS, условие (1) [22]). На диаграммах полужирными линиями показаны величины $\text{GS} > 0$, а тонкими $\text{GS} > -2$, что позволяет детальнее взглянуть на природу так называемых «волн тепла» над Сибирью в летний период. Кроме того, на рис. 2 продемонстрированы случаи $\text{GS} < -10$, которые, напротив, должны характеризовать аномально холодные периоды летом. Приведенные диаграммы, с одной стороны, достаточно хорошо иллюстрируют, насколько сильно АТ приземного воздуха в умеренных широтах зависят от меридионального градиента геопотенциала, с другой стороны, показывают, что для некоторых событий эта связь не столь очевидна. В первую очередь, это касается положительных АТ. Вероятнее всего, дело заключается в том, что критерий TM [22], разработанный для Евро-Атлантического региона, где градиенты GS достаточно высоки, несколько иначе работает в Западной Сибири. Над Азией летом градиенты гораздо менее выражены, поэтому при выделении СБ мы ориентировались как на показатель GS, так и на величину АТ. Хотя, безусловно, этот вопрос нуждается в детальном анализе. В табл. 2 приведены даты событий блокирований, выделенные нами на основе данных, показанных на рис. 2. Рассмотрим более подробно события, представленные в табл. 2.

В первую очередь отметим события, с идентификацией которых проблем не возникло. Для них характерно хорошее совпадение показателя GS и АТ.

Это блокинг июля 2005 г. (рис. 2, а) и июля 2006 г. (рис. 2, б). В июле 2007 г. наблюдались два секторных события с небольшим перерывом (рис. 2, в). На основании АТ мы отнесли это событие не к 6–8-дневным событиям, а событиям длительностью более 10 дней. В 2010 г. зафиксирован секторный блокинг, сопровождающийся сильными положительными АТ в конце июля–начале августа (рис. 2, е). Неплохое соответствие показателя GS отмечено для блокирования конца июня 2011 г. (рис. 2, ж) и событий июня, июля 2013 г. (рис. 2, и).

Для коротких (5 дней) граничных событий августа 2005 и июля 2008 г. не выявлены сильные положительные АТ, поэтому, несмотря на то что условие $GS > 0$ выполнялось в течение 5 дней, мы не включили эти события на данном этапе. Подобная ситуация является скорее исключением, а не правилом, так как чаще мы наблюдали обратную ситуацию: для сильных положительных АТ в течение 5 и более дней критерий GS показывал наличие блокирования меньшей продолжительности, зачастую менее 5 дней, что не позволяло включить его в каталог. В основном это было характерно для событий в июне и августе. Так, ориентируясь в большей степени на АТ, мы отобрали в каталог события июня 2006 г., августа 2009 г., начала июня 2011 г., а также июня 2012 г. Одно из этих СБ — это самое известное событие летнего блокирования в Западной Сибири. Речь идет о событии июня–июля 2012 г., сроки которого пришлось несколько скорректировать (причем как в июне, так и в июле) на основе АТ. На рис. 2, з хорошо видно, что, несмотря на то что аномалии температуры характерны и для западной части (ст. Ваганово, Игрим),

здесь условие блокирования не выполняется вовсе. Поэтому для западных районов в июне 2012 г. мы, в качестве исключения, ориентировались только на АТ. Подчеркнем, что сделано это исключительно из-за хорошо известной обусловленности блокированием аномалий температуры в июне 2012 г. [23]. Таким образом, для 2012 г. мы получили несколько отличающиеся даты блокирования в западных и восточных районах. В дальнейшем эти районы будут рассмотрены отдельно друг от друга.

Даты стационарирования СБ в табл. 2 приведены совместно со сведениями о возникновении природных пожаров, если таковые фиксировались в период блокинга. Кроме того, исследование поведения атмосферных осадков до момента наступления блокирования позволило сделать предварительные выводы об увлажненности, предшествующей блокингу. В результате оказалось, что существенные положительные аномалии атмосферных осадков (рис. 3) действительно предшествовали (или сопровождали) некоторые события блокирования, а СБ в июле 2007 г. предшествовали 2 мес с повышенным количеством осадков.

На основе сводных данных о длительности и охвате событий блокирования в период 2005–2013 гг., температурно-влажностном режиме, сопутствующем этим событиям, и признаков очагов возгорания в период блокингов была сделана классификация событий блокирования по степени влияния на концентрацию метана (табл. 3). Данная классификация включает пять групп, объединенных по ряду признаков. На основе проведенной классификации предлагаются дальнейшие алгоритмы исследования поведения метана во время блокираний.

Таблица 2

События блокирования и их характеристики

Тип СБ по масштабу	Секторные	Тип СБ по продолжительности (дни)		
		5–6	7–9	>10
		06.2006: 2–7.06 08.2009: 14–19.08, 21–25.08	07.2005: 22–28.07 (дым от пожаров 26.07–12.08 IGR, ¹ NOY, 28.07 KRS) 07.2006: 10–18.07 (дым от пожаров 22–23.07 NOY, 18–23.07 KRS, 21–22.07 BRZ)	07.2007: 02–07.07, 11–16.07 (дым от пожаров 15–17.07 IGR) 06.2012: 9–16.06, 28.06–03.07 07.2012: 17–21.07 (дым от пожаров 22.06–29.07 NOY; мгла, дым от пожаров июль–июль KRS, 20.06–30.07 DEM, 19.06–29.07 BRZ) 07.2013: 16–27.07 (дым от пожаров 22–26.07 IGR, 21–31.07 NOY; мгла 25.07–10.08 KRS, 28.07–10.08 DEM)
06.2011: 23–28.06 06.2013: 22.06–5.07 (ослабление 28–29.07)	08.2010: 27.07–7.08 (дым от пожаров 2–13.08 VGN, 2–8.08 AZV) 06.2011: 1–10.06			

¹ Здесь и далее в таблице названия станций сокращены (полные названия приведены в табл. 1).

Изменение концентрации метана для событий атмосферного блокирования

Группа	Даты СБ	Станция	h	CH _{4dev} месяц, ppb			AT (СБ), °C			CH _{4dev} (СБ), ppb				
				июнь	июль	август	СБ-1	СБ-2	СБ-3	СБ-1	СБ-2	СБ-3		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
V	2006 г. 10–18.07	BRZ	в	-41							-27			
			н	53							-15			
		DEM	в	12				2,9				-10		
			н	10								-12		
		IGR	в	-4				5,8				-5		
			н	1								-1		
		NOY	в	-22				4,3				-30		
			н	-21								-4		
		PRB	в	–				3,1				-8		
			н	–								-7		
IV	2010 г. 27.07–7.08	IGR	в		-47	-1	5,6				-3			
			н		-44	-9						-7		
		NOY	в		-7	4	-0,5					21		
			н		-9	13						37		
		PRB	в		-8	-17	-1,3					-14		
			н		-12	-16						-13		
		VAG	в		-27	2	5,4					4		
			н		-20	4						10		

Отклонения в.у. = [-3; 4], mean = 0,5; н.у. = [-7; 10], mean = 1,5*

III	2006 г. 2–07.06	IGR	в	-3,8			3,0				-14				
			н	1,4							-9				
		NOY	в	–			6,9					–			
			н	–								–			
	2009 г. 14–25.08	BRZ	в			0	–					-13			
			н			-4						-17			
		IGR	в			17	3,4					22			
			н			15						24			
		PRB	в			19	5,0					2			
			н			29						20			
		VAG	в			5	1,8					-13			
			н			4						-12			
		2011 г. 1: 1–09.06 2: 23–28.6	BRZ	в	23			–	–				15	–	
				н	-1									-9	–
	IGR		в	6			7,5	7,4				36	-5		
			н	12									54	-4	
	NOY		в	-17			9,5	7,4				-20	-32		
			н	-19									-6	-20	
	PRB		в	11			–	–				2	15		
			н	11									6	13	
	VAG	в	-24			-2,2	-1,0				-37	-15			
		н	-23									-32	-11		
	2013 г. 22.06–5.07	BRZ	в	39			–					39			
			н	15								20			
DEM		в	5			-1,5					-5				
		н	4								-6				
IGR		в	40			2,1					39				
		н	36								37				
NOY		в	20			-1,0					14				
		н	31								–				
PRB		в	4			-2,7					-3				
		н	-2								-7				
VAG		в	77			0					84				
		н	71								80				

Отклонения в.у. = [-32; 39], mean = 7,4; н.у. = [-20; 54], mean = 11,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
II	2012 г. (IGR) 15–20.06 29.06–4.07 11–20.07	IGR	в	26	0		10,4	7,5	2,8	63	51	18	
			н	20	3								60
	2007 г. 2–16.07	BRZ	в		11		–				10		
			н		2						6		
		DEM	в		32		4,9				13		
			н		32								
		IGR	в		49		6,8				106		
			н		60								
		PRB	в		43		4,4				36		
			н		45								

Отклонения в.у. = [13; 106], mean = 47,8; н.у. = [10; 117], mean = 49,1

I	2005 г. 22–28.07	IGR	в		67		8,7				437			
			н		–									–
		BRZ	в		–1		–				–18			
			н		–9									–17
	2012 г. 1: 9–16.06 2: 23.06–3.07 3: 17–21.07	AZV	в	–	–						17	57		
			н	–	–									18
		DEM	в	20	–		10,7	9,1	9,8			–	–	
			н	19	–									
		NOY	в	18	–		12,4	–	–			21	–	
			н	20	–									
		PRB	в	29	–		8,0	2,2	8,0			35	37	
			н	39	–									
		VAG	в	–1	–16		1,6	1,5	4,2			4	6	
			н	6	–12							10	12	
		2013 г. 1: 16–28.07 2: 25.07–14.08 (по пожарам)	DEM	в		0	23	5,8				–9	63	
				н		–6	21							
	IGR		в		45	–	5,7				95	–		
			н		42	–								95
	NOY		в		14	–10	10,3				–3	18		
			н		20	–21								–8
	PRB		в		2	47	4,9				12	76		
			н		4	56								19
	VAG		в		79	–	–1,1				93	–		
			н		73	–								95

Отклонения в.у. = [17; 95], mean = 46,5*; н.у. = [18; 95], mean = 56,51

Примечания: *h* – уровни измерения (для всех стагнаций в – верхний, н – нижний согласно табл. 1, для станции BRZ – нижний 3, верхний 2); CH_{4dev} – отклонение концентрации метана в месяц блокирования от его среднего значения в этот месяц за период 2005–2013 гг.; ΔT (СБ) – отклонение температуры воздуха (среднее для двух уровней) для отдельных СБ от среднемесячного значения за период 2005–2013 гг.; CH_{4dev} (СБ) – отклонение концентрации метана для отдельных СБ от его среднего значения в этот месяц за период 2005–2013 гг. Полу жирным обозначены ключевые сведения, на основе которых рассчитывается дальнейшая результирующая информация по каждой группе СБ: максимальные и минимальные отклонения CH_4 (в скобках), а также среднее (mean) всех отклонений CH_4 для каждого из двух уровней. * – расчет произведен без учета аномальной величины в июле 2005 г.

V. Событие 10–18 июля 2006 г. отнесено в отдельную группу. Это единственное событие, во время которого не было зафиксировано увеличения концентрации метана ни на одной станции. Несмотря на то что в период, следующий за блокированием, на востоке Западной Сибири (Ноябрьск, Парабель, Березоречка) зафиксированы признаки пожаров, возникших в результате длительной засухи, предшествующей блокингу, а в западных районах, напротив, перед блокированием зафиксирована поло-

жительная аномалия осадков (Игрим) (рисунок не приводится). Можно было ожидать повышения концентрации метана в период блокинга хотя бы в одном случае: случае пожаров для восточных станций либо для комбинации волны тепла, следующей за аномалией осадков, для западных станций. В табл. 3 приведены сведения об отклонениях концентрации метана от нормы в период блокирования июля 2006 г. Видно, что концентрации метана в период блокирования были либо близки к норме,

либо ниже нормы. Причины отсутствия отклика могут заключаться в неудачной комбинации условий, сопутствующих блокированию, или же в неучете некоего третьего фактора. Этот вопрос нуждается в дальнейшем анализе.

IV. В данную категорию было отнесено событие конца июля—начала августа 2010 г. — граничное событие длительностью более 10 сут, сопровождающееся существенным подъемом температуры на западе региона и несущественным влиянием на увеличение концентрации метана в целом для территории Западной Сибири (см. табл. 3). Отклонение концентрации метана от нормы для западных станций составило в среднем от 0,5 до 1,5 ppb для верхнего и нижнего уровней соответственно. Для этого события характерно наличие дымов от пожаров на южных станциях (Ваганово, Азово) без предшествующей аномалии атмосферных осадков. По графику, приведенному для станции Ваганово (рис. 4, *a*), видно, как в конце июля начинает возрастать концентрация метана, а для периода блокинга в целом (см. табл. 3) характерны хоть и не большие, но положительные отклонения. Особенно заметен рост концентрации метана по сравнению с пониженными значениями в июне и июле. Повышение метана не зафиксировано на станции Игрим, находящейся, судя по отклонениям температуры от нормы, так же как и Ваганово, в зоне влияния блокинга. Причиной таких различий может являться отсутствие пожаров на этой станции.

III. Данная категория объединяет события блокирования продолжительностью в среднем 5–8 сут, все эти события приурочены к началу и концу летнего сезона. В периоды блокирований данной группы не было зафиксировано свидетельств возникновения пожаров (см. табл. 2), и этим событиям не предшествовали периоды выпадения большого количества осадков (за исключением одного события второй половины июня 2011 г. (рис. 3, *в*, вкладка, 4, *б*)). Отклонения концентрации метана от нормы составили в среднем 7,4 и 11,5 ppb для верхнего и нижнего уровней соответственно. Изменчивость концентрации метана для событий IV группы вполне можно было бы отнести к «чистому» эффекту волн тепла, связанных с блокированием. Детальный анализ результатов, приведенных для этой группы событий, пока не позволяет сделать однозначных и четких выводов относительно влияния периодов аномально высоких температур на концентрацию метана. Так, для многих событий блокирования, действительно, отмечены положительные отклонения CH_4 от своей многолетней нормы. Но есть и исключения. Например, в период аномальной температуры июня 2011 г. на станции Ноябрьск, напротив, концентрация метана была ниже нормы. Также пока не ясна роль величины отклонения температуры от нормы, хотя в этом вопросе все очень сильно зависит от способа расчета АТ за период блокинга.

II. В категорию отнесено событие июля 2007 г., а также события июня, июля 2012 г. для станции Игрим, так как здесь температурно-влажностный

режим в период блокирования складывался иначе, чем в остальных районах Западной Сибири летом 2012 г. (см. рис. 2, *з*, 3, *г*, 4, *в*). События данной категории — это крупные секторные события длительностью 7 дней и выше, характеризующиеся существенными аномалиями атмосферных осадков, предшествующими блокингу. Характер возникновения пожаров в период блокинга этой группы довольно своеобразен, что затрудняет оценку его вклада. Например, для события 2007 г. признаки пожаров отмечены только для трех дней на станции Игрим, а в 2012 г., на станции Игрим, в отличие от остальных (см. табл. 2), не было зафиксировано дымов. Но без исследования траекторий переноса воздушных масс нельзя однозначно исключить этот фактор для данной станции.

Существенное повышение концентрации метана для событий этой категории видно довольно отчетливо (см. табл. 3) и составляет в среднем 47,8 и 49,1 ppb для верхнего и нижнего уровней соответственно. Из-за сочетания нескольких факторов для таких СБ сложнее всего определить степень их влияния. Можно лишь только сформулировать некоторые предположения. Случай повышенных потоков метана летом 2007 г. был детально рассмотрен в работе [26] на примере станций Демьянское и Карасевое. В качестве основной причины высоких эмиссий авторы предположили аномально высокие осадки в мае, июне 2007 г. (см. рис. 3, *a*, *б*). Мы бы хотели обратить внимание на вариации метана на станции Игрим (рис. 4, *г*), где превышение концентрации в период блокинга было выше, чем на станциях, рассматриваемых в работе [26], ст. Карасевое и Демьянское. На станции Карасевое (рис. 4, *г*) в этот период сначала происходит рост концентрации метана, к середине июля концентрация падает, затем начинает снова расти, но уже после снижения температуры. На станции Игрим увеличение концентрации метана продолжилось в течение всего СБ. Эти различия могут быть обусловлены пожарами, которые фиксировались только в районе станции Игрим (см. табл. 2). Кроме того, стоит отметить, что район станции Игрим положительная аномалия осадков частично затронула только в мае, а в июне количество осадков было близко к норме (см. рис. 3, *a*, *б*). Таким образом, блокирование определено влияет на повышение концентрации метана для событий этой группы, однако еще предстоит четко определить вклад факторов, связанных с блокингом: «чистого» влияния волн тепла и пожаров.

I. К этой категории отнесены секторные СБ длительностью 7 и более дней: июль 2005 г., июнь—июль 2012 г. (для всех станций, за исключением станции Игрим), июль 2013 г. (см. рис. 4, *д*, *е*). События характеризуются обширным распространением очагов возгорания и существенными положительными аномалиями температуры для всей Западной Сибири. Причем в течение всего периода осадков выпадает крайне мало. Это не удивительно, для севера Западной Сибири летние периоды 2012

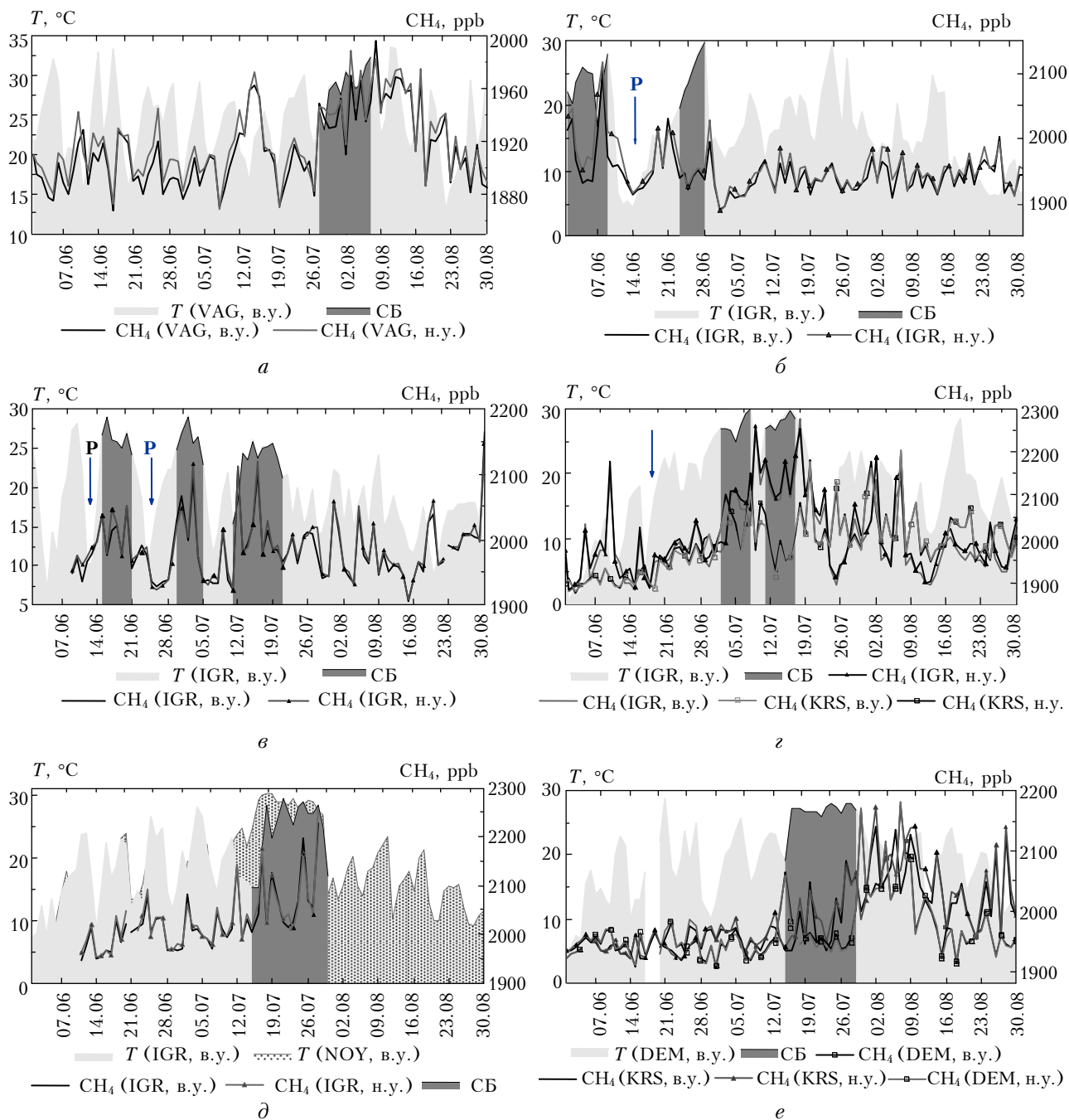


Рис. 4. Вариации концентрации метана (CH_4) и температуры воздуха (T) на сети JR-STATION (см. табл. 1, рис. 1) с 1 июня по 31 августа: *a* – Ваганово, 2010 г.; *б* – Игрим, 2011 г.; *в* – Игрим, 2012 г.; *г* – Карасовое, Игрим, 2007 г.; *д* – Игрим, 2013 г.; *е* – Карасовое, Демьянское, 2013 г. Темными полосами обозначены границы событий блокирования; в.у. – верхний уровень, н.у. – нижний уровень

и 2013 г. стали одними из самых жарких за последние 70 лет [данные NCEP/NCAR, http://cci-reanalyzer.org/Reanalysis_monthly/tseries.php]. Для событий этой группы характерно существенное увеличение концентрации метана: средние показатели составляют 46,5 и 56,5 для верхнего и нижнего уровней соответственно.

Некоторые вопросы возникают при анализе данных табл. 2 для СБ июля 2013 г. На первый взгляд может показаться, что увеличение концен-

трации значительно только для станции Игрим. Но если посмотреть графики изменения концентрации (см. рис. 4, *е*) и связать их с динамикой пожароопасной обстановки, все становится на свои места. В данных, приведенных на рис. 4, *д*, *е*, видна некоторая задержка между изменениями на станции Игрим (см. рис. 4, *д*) и станциях Карасовое и Демьянское (см. рис. 4, *е*). Здесь, вероятно, сказалось влияние пожаров, так как начало ситуации дымной мглы на станциях Карасовое и Демьянское было

зафиксировано позже, чем для остальных станций, и ситуация сохранялась до середины августа (см. табл. 3). Устойчивому сохранению пожароопасной обстановки способствовало отсутствие дождей на севере Западной Сибири с начала лета. Таким образом, для событий рассматриваемой группы предстоит определить вклад в увеличение концентрации CH_4 отдельных факторов, связанных с блокингом, т.е. «чистого» влияния волн тепла и пожаров.

Заключение

На основе данных сети мониторинга парниковых газов JR-STATION, аномалий приземной температуры реанализа Era-Interim, критериев блокирования, предложенных Tibaldi S. и Molteni F., исследованы изменения концентрации метана в периоды атмосферного блокирования над Западной Сибирью. В работе были проанализированы летние сезоны с 1 июня по 31 августа с 2005 по 2013 г., в результате в каталог блокирования были включены 13 событий.

Оказалось, что практически все СБ сопровождаются повышением концентрации метана, независимо от времени стационарирования и пространственного охвата. Однако степень влияния СБ отличается и зависит от характера блокинга и сопутствующих ему условий. На основании этих различий в работе выделены четыре основные группы, характеризующие связь «блокинг – концентрация метана». Первая группа – это секторные блокинги длительностью 7 сут и более, в основном середины июля. Этим событиям предшествовали засушливые периоды, а в период блокинга были зафиксированы обширные очаги пожаров. Среднее увеличение концентрации метана для событий первой группы составляет 46,5 и 56,5 ppb для верхнего и нижнего уровней соответственно. Вторая группа – это в основном секторные события июня, июля, происходящие с небольшим перерывом и общей длительностью более 10 сут. Этим событиям предшествовали периоды интенсивных дождей, а для исследуемых станций признаки пожаров зафиксированы только в одном случае. Среднее увеличение концентрации метана во время событий второй группы составляет 47,8 и 49,1 ppb для верхнего и нижнего уровней соответственно. Третья группа представлена секторными и граничными событиями начала и конца летнего сезона, иногда происходящими с перерывом. За исключением одного случая, этим событиям не предшествовали аномальные условия увлажненности, не были зафиксированы пожары. Повышение концентрации метана в среднем составляет 7,4 и 11,5 ppb для верхнего и нижнего уровней соответственно. Четвертая группа – это граничные блокинги длительностью более 10 сут, которым предшествовали засушливые периоды, а в период блокирования фиксировались признаки пожаров. Причем все эти условия наблюдались только на территории, подверженной блокированию. Повышение концентрации метана для событий четвертой группы составило в среднем 0,5 до 1,5 ppb.

Таким образом, максимально влияние на концентрации метана оказывают СБ по типу «масштабный-длительный блокинг/обширные пожары», вторыми по значимости являются блокинги типа «масштабный-длительный блокинг/аномальные осадки до блокинга/локальные пожары», третья группа блокирований – «короткий блокинг начала-конца лета/без доп. условий», четвертая – «секторный-длительный блокинг/локальные пожары».

Дальнейшие исследования будут направлены на детализацию данной классификации, уточнение вклада различных источников в формирование повышенной концентрации метана в период блокирования, в частности на выяснение доли вклада эмиссий от пожаров и болотных экосистем для СБ первого и второго типов, а также аккумулирующей роли «замкнутой» циркуляции для длительных секторных блокирований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00119, Комплексной программы фундаментальных научных исследований Сибирского отделения РАН № П.2П «Интеграция и развитие» на 2017 г., проекта IX.135-6 «Исследование изменений компонент воздуха Сибирского региона, определяющих динамику радиационно значимых характеристик атмосферы», Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

1. *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. P. 433–497.
2. *Bousquet P., Ciais P., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Houglustaine D.A., Ptigent C., Van der Werf G.R., Peylin P., Brunke E.G., Carouge C., Langenfelds R.L., Lathiere J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Tyler S.C., White J.* Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability // *Nature (Gr. Brit.)*. 2006. V. 443, N 110. P. 439–443.
3. *Matthews E., Fung I.* Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area and environmental characteristics of sources // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 1987. V. 1, N 1. P. 61–86.
4. *Smith L.C., MacDonald G.M., Velichk A.A., Beilman D.W., Borisova O.K., Frey K.E., Kremenetski K.V., Sheng Y.* Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early Holocene // *Science*. 2004. V. 303, N 5656. P. 353–356.
5. *Andronova N.G., Kami I.L.* The contribution of USSR sources to global methane emission // *Chemosphere*. 1993. V. 26, N 1–4. P. 111–126.
6. *Пауков Н.С., Титлянова А.А., Палева М.В., Семенов А.М., Мироньчева-Токарева Н.П., Макаров В.И., Дубинин Е.В., Ефремов С.П.* Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // *Докл. РАН*. 1993. Т. 330, № 3. С. 388–390.
7. *Бажин Н.М.* Метан в атмосфере // *Сорос. образ. ж.* 2000. Т. 6, № 3. С. 52–57.
8. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Крехов Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh.Sh., Sasakawa Motoki,*

- Shimoyama Ko.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
9. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. Модельные оценки глобальных и региональных эмиссий метана влажными экосистемами // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2015. Т. 51, № 5. С. 543–549.
 10. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. Чувствительность эмиссии метана болотными экосистемами Западной Сибири к изменениям климата: мультимодельные оценки // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 4. С. 319–322.
 11. Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Martynova Yu.V., Mordvinov V.I. The effect of atmospheric blocking on the spatial distribution of atmospheric summertime precipitation over Eurasia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. V. 48. P. 012035.
 12. Park Y.-J., Ahn J.-B. Characteristics of atmospheric circulation over East Asia associated with summer blocking // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. V. 119. P. 726–738.
 13. Mokhov I.I., Timazhev A.V., Lupo A.R. Changes in atmospheric blocking characteristics within Euro-Atlantic region and Northern Hemisphere as a whole in the 21st century from model simulations using RCP anthropogenic scenarios // Global Planet. Change. 2014. V. 122. P. 265–270.
 14. Masato G., Woollings T., Hoskins B. Winter and summer northern hemisphere blocking in CMIP5 models // J. Geophys. Res. 2013. V. 118, N 3. P. 1179–1188.
 15. Pelly J.L., Hoskins B.J. A new perspective on blocking. 2003 // J. Atmos. Sci. V. 60. P. 743–755.
 16. Rex D.F. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. I. An aerological study of blocking action // Tellus. 1950. V. 2. P. 196–211.
 17. Еланский Н.Ф., Мохов И.И., Беликов И.Б., Березина У.В., Елохов А.С., Иванов В.А., Панкратова Н.В., Постыляков О.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Газовые примеси в атмосфере над Москвой летом 2010 г. // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 729–738.
 18. Zuyagintsev A.M., Blum O.B., Glaskova A.A., Kotelnikov S.N., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A., Lezina E.A., Miller E.A., Milyaev V.A., Popikov A.P., Semutnikova E.G., Tarasova O.A., Shalygina I.Yu. Anomalies of trace gases in the air of the European part of Russia and Ukraine in summer 2010 // Atmos. Ocean. Opt. 2011. T. 24, N 6. С. 536–542.
 19. Складнева Т.К., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю. Радиационный режим г. Томска в условиях дымной мглы // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 215–222.
 20. 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 (5). P. 403–416.
 21. Dee D.P., Uppala S.M., Simons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars 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., Tarolato C., Thepaut N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2011. V. 137, N 656. P. 553–597.
 22. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus. A. 1990. V. 42. P. 343–365.
 23. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Зоркальцева О.С. Атмосферные блокинг в Западной Сибири. Часть I: Особенности обнаружения, объективные критерии и их сравнение // Метеорол. и гидрол. 2017. (В печати).
 24. Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Ziese M., Rudolf B. GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle // Theor. Appl. Climatol. 2014. V. 115, N 1. P. 15–40.
 25. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR). 2008. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR>.
 26. Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., Arshinov M. Annual variation of CH₄ emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005–2009): A case of high CH₄ flux and precipitation rate in the summer of 2007 // Tellus B. 2012. V. 64. P. 17514.

Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Sklyadneva T.K., Fofonov A.V., Sasakawa M., Machida T. **The impact of atmospheric blocking in Western Siberia on a change in the methane concentration in summer.**

We estimated a change in the methane concentration during the periods of atmospheric blocking observed in summer time. Methane concentrations have been derived from continuous measurements carried from 2005 to 2013 in Siberia at Japan-Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network (JR-STATION). The blocking events were identified in accordance with Tibaldi and Molteni criteria and surface temperature anomalies with the use of the Era-interim reanalysis data. The events lasting more than five days have been included in the blocking event list (13 in total). All found events are separated into two groups by spatial coverage (bordering and sector) and three groups by duration (5–6, 7–9, >10 days). We analyzed these events for natural fires and precipitation anomalies before them. It was found that almost all blocking events selected caused an increase in the methane concentration independently of the duration and spatial coverage. The degree of impact differs depending on the blocking characteristics and concomitants. On the basis of these differences, four main groups are distinguished, characterizing the “blocking–methane concentration” connection: “large-long blocking/extensive fires” (maximum impact), “large-long blocking/abnormal rainfall before blocking/local fires” (next in degree of impact), “short blocking / without additional conditions” (the third), and “bordering-long blocking/local fires” (minimum impact).

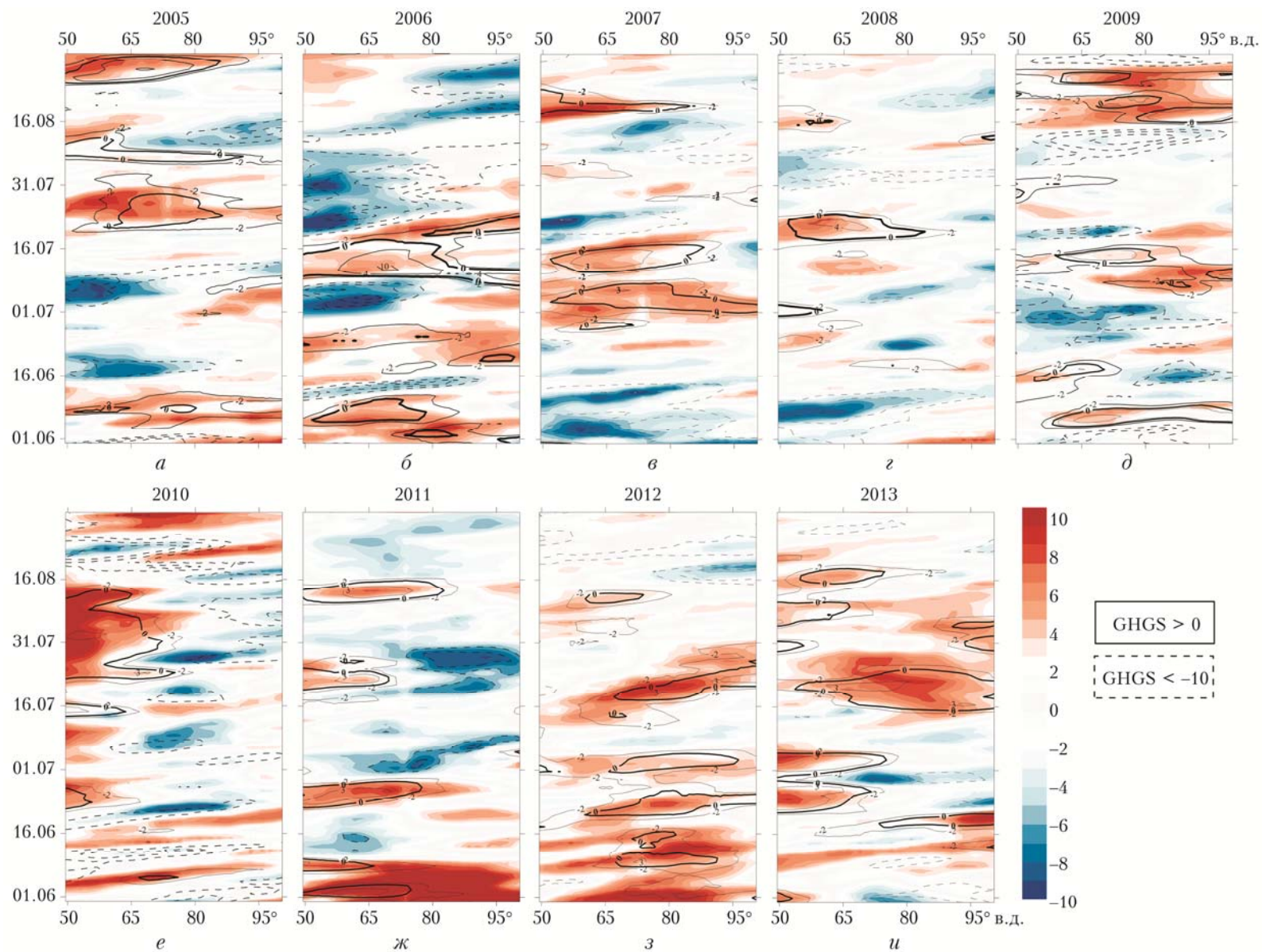


Рис. 2. Долготно-временные диаграммы аномалий приземной температуры воздуха и показателя обращения геопотенциала (GHGS), усредненных в широтных диапазонах в зависимости от локализации блокинга (в среднем около 50–70° с.ш.)

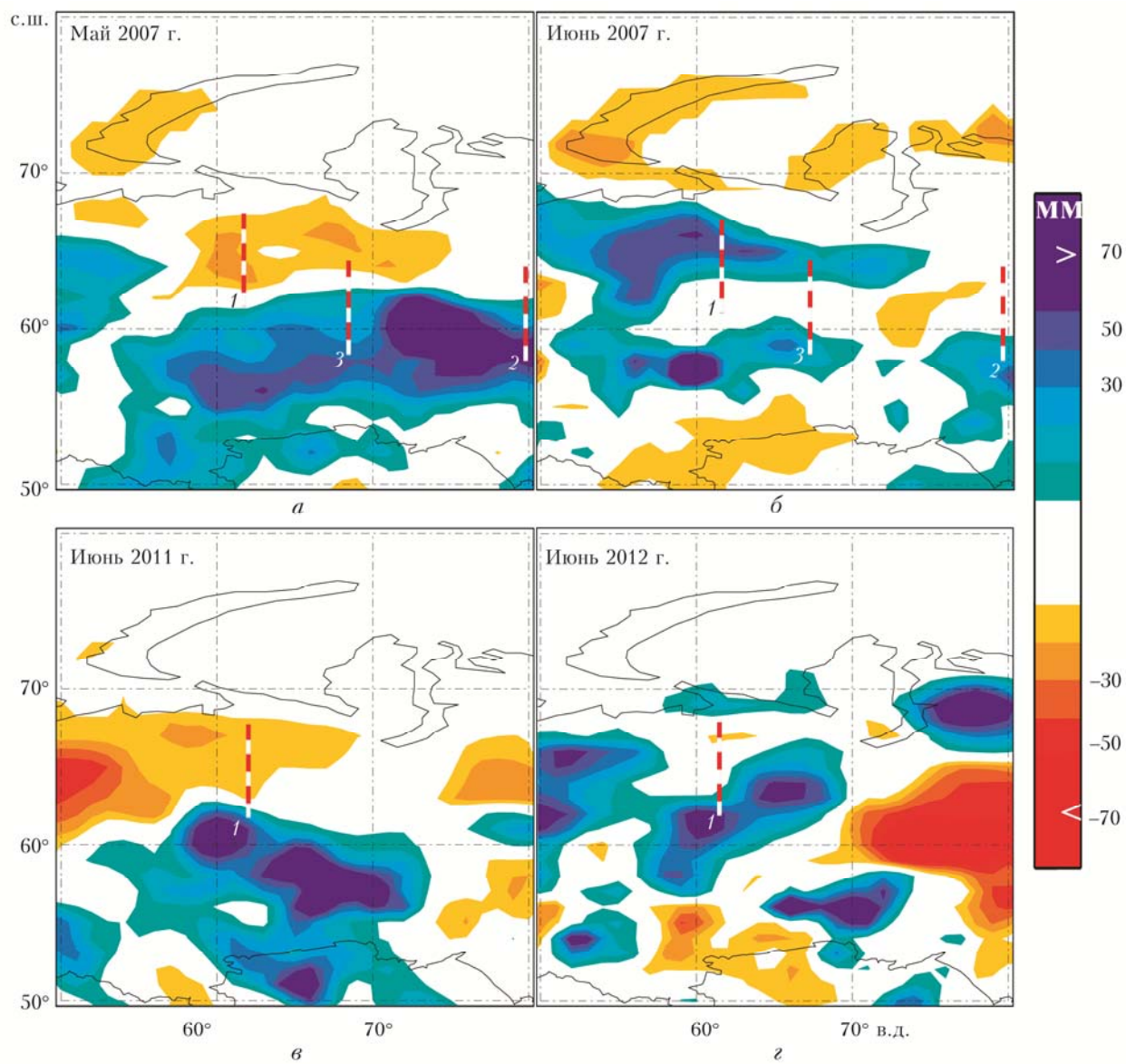


Рис. 3. Аномалии атмосферных осадков, сопутствующие некоторым событиям блокирования в Западной Сибири. Показаны станции: 1 – IGR, 2 – KRS, 3 – DEM (обозначения согласно табл. 1)