
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

**АНАЛИЗ ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ ТРОПОМІ АНОМАЛИЙ
КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАНА НАД ВЫГОРЕВШИМИ В 2018–2019 гг.
ТЕРРИТОРИЯМИ БОРЕАЛЬНО-АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ
ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

© 2020 г. Е. В. Черепанова^а, *, Н. В. Феокистова^а, М. А. Чудакова^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”,
Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 12.07.2020 г.

Представлены результаты пространственно-временного анализа динамики концентраций метана над территорией Якутии за период май–сентябрь 2018–2019 гг. по ежедневным данным аппаратуры ТРОПОМІ, установленной на спутнике Sentinel-5 многоспутниковой системы мониторинга окружающей среды Copernicus и других космических аппаратов. Обнаружены устойчивые области повышенных концентраций метана не только во время лесных пожаров, но и в постпожарные периоды над горячими предыдущих лет, вероятно, обусловленные активизацией процессов подтаивания вечной мерзлоты. Выявлены внутрисезонные тренды динамики концентраций метана над выгоревшими и фоновыми территориями. Проанализированы возможные причинно-следственные связи наблюдаемых явлений. Установлено, что в среднем аномальные значения концентрации CH₄ над вновь горимыми областями превышают фоновые на 5–15 ppb в июле–сентябре 2018 и 2019 гг. и на 10–15 ppb над прошлогодними горячими в период с мая по сентябрь.

Ключевые слова: космический мониторинг, дистанционное зондирование Земли, пространственно-временной анализ, пожары, эмиссии, метан, ТРОПОМІ/Sentinel-5, глобальная многоспутниковая система

DOI: 10.31857/S0205961420050048

ВВЕДЕНИЕ

Метан является одним из трех основных парниковых газов, и его содержание характеризуется высокими темпами роста в индустриальный период (Роль метана в изменении климата, 2018). Исследования последних десятилетий показали, что в арктическо-бореальной зоне наблюдается постоянный рост концентраций метана (Анисимов, Кокорев, 2015; Киселев, Решетников, 2013; Космач и др., 2015; Yurganov et al., 2019; Zou et al., 2019). Северные экосистемы вносят значительный вклад в общий бюджет метана, но пока высока неопределенность, какие именно источники и в какой степени влияют на увеличение концентраций метана в атмосфере (Киселев, Решетников, 2013).

Лесные пожары являются одним из важных источников эмиссий газовых примесей, включая метан, и аэрозолей в атмосферу (Бондур, 2011, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Jacob et al., 2016). Интенсивность пожаров и объемы эмиссий вредных веществ в атмосферу подвержены значительным сезонным колебаниям в зависимости от ти-

пов растительного покрова и региональных климатических особенностей (Бондур, Гордо, 2018; Бондур и др., 2016; 2019а, б; Lappalainen et al., 2014, 2016).

Следует отметить, что многие процессы, ведущие к выбросам CH₄, в том числе в результате природных пожаров, еще слабо изучены, отличаются высокой временной и территориальной изменчивостью и зависят от множества факторов, что в итоге может приводить к значительным расхождениям в оценках. Возникновение повышенных концентраций CH₄ в атмосфере северных регионов России, обусловленных естественными причинами (выбросы при пожарах, из болот, растепление вечной мерзлоты), затрудняют обнаружение и оценку объемов выбросов CH₄ и других парниковых газов в результате деятельности нефтегазодобывающих и перерабатывающих предприятий (Бондур, 2010). Глубокий анализ эмиссий от пожаров и иных природных источников (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016) позволяет достоверно оценить вклад антропогенных источников, в первую очередь объектов нефтегазового

комплекса в изменения концентраций парниковых газов над территорией России.

Большинство существующих методик оценок стока и источников CH_4 строится с использованием математических методов из предположения примерного паритета между источниками и стоками, то есть при большей погрешности в оценке стока CH_4 менее точно оценивается интенсивность его суммарного источника (Роль метана в изменении климата, 2018).

Привлечение и анализ данных регулярного космического мониторинга бореально-арктической зоны позволит сократить неопределенности в существующих оценках (Kulmala et al., 2015, 2016).

Многоспутниковые космические системы мониторинга обеспечивают большую обзорность, объективность и достоверность получаемых данных, высокую оперативность обнаружения и предоставления информации об источниках возгорания, а также их последствиях для различных экосистем и объектов инфраструктуры (Бондур, Савин 1993, Бондур, 2010, 2011, 2015). Преимуществом использования данных ДЗЗ для исследования динамики содержания вредных примесей, в том числе метана, в атмосфере является непрерывность и глобальность наблюдений за эмиссиями и их потенциальными источниками (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Jacob et al., 2016).

Использование современных методов обработки и анализа данных ДЗЗ позволяет успешно решать задачи выявления и оценки площадей выгоревших территорий, определения степени повреждения растительного покрова, а также оценки объемов эмиссий вредных газов в атмосферу в результате природных пожаров (Бондур, 2011, 2015; Бондур, Гордо, 2018; Бондур и др., 2016, 2019а, б). Обработка ежедневных данных космического мониторинга позволяет получать количественные оценки пространственно-временной динамики, необходимые для дальнейшего анализа и моделирования процессов эмиссии, накопления и стока метана в атмосфере бореально-арктической зоны (Бондур и др., 2020; Анисимов, Кокорев, 2015). На сегодняшний день у существующих и планируемых спутниковых приборов точность достаточна для проведения оценок глобальных и региональных потоков метана.

Дальнейшее развитие комплексного использования данных, полученных в результате дистанционного мониторинга, и кадастрами выбросов, полученных по данным наземных измерений, имеет решающее значение для лучшего понимания процессов эмиссии метана и последующего развития климатической политики (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Kulmala et al., 2015, 2016; Lappalainen et al., 2016; Jacob et al., 2016).

В настоящей работе исследованы возможности использования продукта CH_4 offline (общее

содержание метана в тропосфере над сушей), получаемые с прибора TROPOMI спутника Sentinel-5, входящего в состав многоспутниковой системы глобального мониторинга Copernicus Европейского Космического Агентства. На примере удаленных крупных выгоревших лесных территорий в республике Саха были оценены концентрации общего содержания метана и выявлены его аномалии над горячами, а также проанализирована внутрисезонная динамика среднемесячных концентраций CH_4 за 2018–2019 годы.

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ

Более шестидесяти процентов территории России относится к районам вечной мерзлоты, представляющих собой большой, чувствительный к климату резервуар органического углерода с высоким потенциалом его распада и переноса в атмосферу в виде углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4). Естественные механизмы эмиссии метана в регионе зависят от множества факторов, таких как температура активного слоя почвы, ее влажность, уровень болотных вод, мощность торфяных пластов на болотах, осадочные отложения на дне карстовых озер, содержание метана в многолетней мерзлоте, изменение pH в Северном Ледовитом океане, особенно в дельтах крупных рек и др. (Киселев, Решетников, 2013).

Республика Саха (Якутия) занимает большую часть бореально-арктической вечномерзлотной зоны Восточной Сибири и является одним из наиболее пожароопасных субъектов России (Бондур и др., 2016; 2019а, б; 2020). В регионе преобладают низовые пожары в лиственных лесах, возникающие чаще всего вследствие грозových разрядов либо неосторожного обращения с огнем. В результате воздействия огня происходит полное уничтожение напочвенного покрова, полностью или частично выгорают поверхностные органогенные горизонты, и, как следствие, резко изменяется гидротермический режим почв и увеличивается глубина сезонно-талого слоя. Притом, что растительный покров почти полностью восстанавливается в течение 50 лет после пожара, уровень многолетней мерзлоты стабилизируется гораздо медленнее (Чевычелов, 2019).

Обнаружение лесных пожаров в регионе ведется только с использованием космических средств без привлечения авиации. Малонаселенность и труднодоступность многих территорий Якутии способствует распространению пожаров на значительные площади. Большую часть лесных площадей в регионе составляют так называемые зоны контроля. Власти могут принять решение не тушить пожары на территориях, если нет прямой угрозы населенным пунктам и экономическим объектам, а само спасение лесов считается экономически невыгодным. Однако нет достоверных данных, каковы

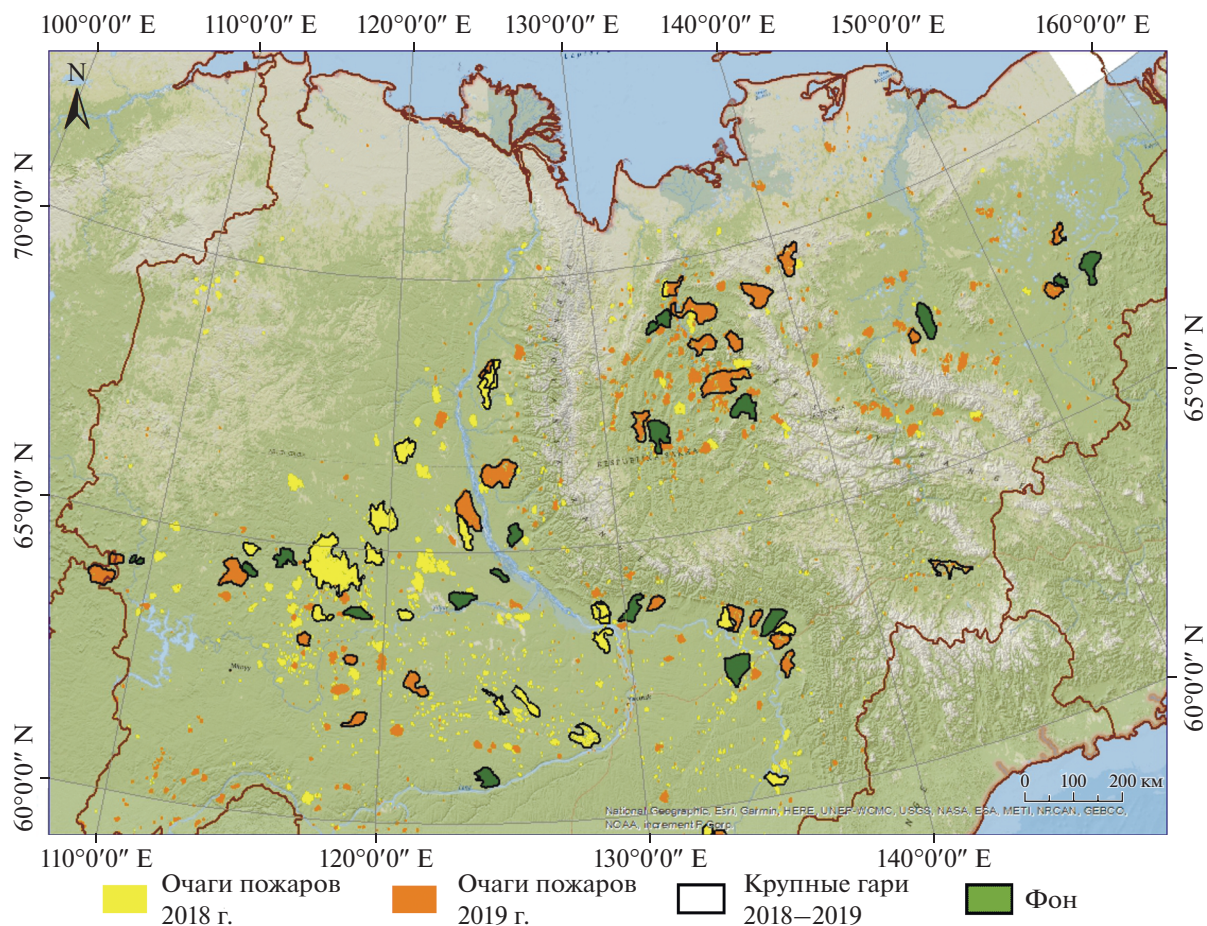


Рис. 1. Очаги пожаров (MOD/MYD 14 Hotspot/Fire) и крупные гари (MCD 64 Burned Area) площадью более 400 км², выявленные в Якутии по данным космического мониторинга со спутников TERRA/AQUA в пожароопасный период 2018–2019 гг.

последствия эмиссий вредных загрязняющих веществ от крупных природных пожаров.

Выбор летнего сезона 2018–2019 гг. был определен тем, что в этот период Якутия наиболее сильно пострадала от пожаров за последние годы. Пожары такого масштаба случались в 2012–2014 годах, однако 2019 стал рекордным за последние 5 лет (Бондур и др., 2020; Воронова и др., 2020; Краткий государственный доклад..., 2019).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования были использованы данные с различных спутников: Метеор, Aqua/Terra, Sentinel-5 Precursor. По данным спутника «Метеор-М» № 2, прибор КМСС, проводился контроль очагов горения, а также шлейфов от пожаров. На основе анализа информационных продуктов MODIS были выявлены генерализованные площади, пройденные пожарами в период в 2018 и 2019 гг. на рассматриваемой территории.

На рис. 1 представлено пространственное распределение очагов пожаров, полученных по данным анализа информационных продуктов MOD14/MYD14 Hotspot/Fire и MCD 64 Burned Area с прибора MODIS для пожароопасных сезонов 2018 и 2019 годов (Giglio, Justice et al., 2015; MODIS Collection 6 NRT Hotspot). Всего на территории Якутии было обнаружено свыше 70 тыс. очагов пожаров (Hotspots) в 2018 году и более 106 тыс. в 2019 году. По данным продукта MCD 64 Гари (Burned Area) с прибора MODIS на территории Якутии в 2018 году выявлено 389 выгоревших участков с площадями более 10 км², а в 2019 году – 687 участков. Большая часть площадей выгорела в июле–августе. Суммарная площадь выгорания лесных территорий в рассматриваемом регионе за сезон 2018 года превысила 33 тыс. км², а в 2019 году составила почти 48 тыс. км².

Для выявления аномалий концентраций общего содержания метана, вызванных лесными пожарами, использовались данные запущенного в 2017 году спутника Copernicus Sentinel-5P

(TROPOMI). Прибор TROPospheric Monitoring (TROPOMI), работающий на борту спутника Copernicus Sentinel-5P, предназначен для анализа химического состава атмосферы. Ширина полосы съемки составляет ~2600 км на земной поверхности. Типичный размер пикселя (в нади́р) составляет $7 \times 3.5 \text{ км}^2$ для всех спектральных диапазонов, за исключением ультрафиолетового UVWI ($7 \times 28 \text{ км}^2$) и коротковолнового инфракрасного SWIR ($7 \times 7 \text{ км}^2$) (Veefkind et al., 2012).

Для измерения метана в приборе (TROPOMI) используется коротковолновый инфракрасный диапазон (SWIR) 2305–2385 нм. Чувствительность прибора падает при больших зенитных углах Солнца, но имеет лучшее пространственное разрешение по сравнению с данными, получаемыми в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне (MWIR, LWIR). В связи с этим, данные этого прибора рекомендуется использовать для изучения содержания метана над материковой частью бореально-арктической зоны РФ в летний сезон.

Выявление и анализ аномалий концентраций метана по данным TROPOMI на исследуемой территории в условиях ограниченных возможностей съемки (облачность, низкие углы съемки, аэрозольное загрязнение) представляли основной интерес при проведении настоящего исследования. Во-первых, в отличие от остальных газовых примесей метан можно отнести к долгоживущим. Концентрация метана мало зависит от высоты в интервале от поверхности Земли до тропопавзы, что обусловлено большой скоростью перемешивания по высоте в пределах 0–12 км (1 мес.) в сравнении со временем жизни метана (8–12 лет) в атмосфере (Роль метана..., 2018; Анисимов, Кокорев, 2015).

Во-вторых, так как территория расположена в пределах зоны вечной мерзлоты, помимо эмиссий метана непосредственно от пожаров (биогенный метан) можно предположить наличие источников эмиссий от болот (бактериальный метан) и в результате таяния вечной мерзлоты (термогенный метан). Последний источник также связан с распространением на исследуемой территории едомы – положительной формы рельефа арктических и субарктических равнин Восточной Сибири, представляющей собой возвышенности, окруженные речными долинами или озерными котловинами. Едомы сложены четвертичными отложениями с ископаемыми льдами и мелкобугристой поверхностью, обладают очень высоким содержанием органического углерода (до 2% по массе) (Репина, 2015).

При проведении настоящего исследования за период май–сентябрь 2018–2019 гг. по ежедневным данным TROPOMI были рассчитаны недельные и среднемесячные данные по общему содержанию метана в тропосфере. Алгоритм

восстановления CH_4 чувствителен к наличию облачности и аэрозолям, поэтому даже недельные композиты не позволяют получить полное покрытие территории. Однако, как рассматривалось выше, метан имеет свойство накапливаться в тропосфере, поэтому для проведения анализа возможно использование осредненных за месяц данных.

Методика проведения исследований состояла из нескольких этапов. На первом этапе анализировалось пространственное распределение и площади выгоревших территорий в 2018 и 2019 гг. по данным продукта MCD 64 Гари (Burned Area) с прибора MODIS. Для каждого пожарного сезона были получены генерализированные площади. Участки с общей площадью менее 400 км^2 были исключены из дальнейшего анализа, так как не соответствуют по масштабу сопоставления с данными TROPOMI (пространственное разрешение 10 км). Дополнительно были построены фоновые участки – это лесные территории, не подвергавшиеся воздействию огня за последние 5 лет (см. рис. 1). На втором этапе проводилась обработка ежедневных данных CH_4 TROPOMI и получение обобщенных еженедельных и ежемесячных значений CH_4 в период с мая по сентябрь за 2018 и 2019 гг. На заключительном этапе рассчитывались среднемесячные пространственные статистические характеристики (среднее, стандартное отклонение, максимальные и минимальные значения, число расчетных пикселей) распределения общего содержания CH_4 над фоновыми и выгоревшими территориями в мае–сентябре 2018, 2019 гг. По результатам расчетов были построены графики трендов динамики концентраций метана над выгоревшими территориями и проанализированы возможные причинно-следственные связи наблюдаемых явлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Предварительно был проведен анализ данных CH_4 TROPOMI на исследуемую территорию. Очевидно, что надежные результаты валидации космических данных могут быть получены при сопоставлении с данными наземных измерений, однако, удаленность и труднодоступность большей части территорий Якутии пока не позволяет организовать достаточную сеть станций наземного мониторинга. Поэтому на данном этапе использовался метод взаимного сопоставления временных серий CH_4 TROPOMI за 2018–2019 гг. Следует отметить несколько факторов, влияющих на завышение или занижение оценок эмиссий метана над рассматриваемой территорией при использовании данных TROPOMI.

Во-первых, практически на всех полученных осредненных данных на севере территории к юго-

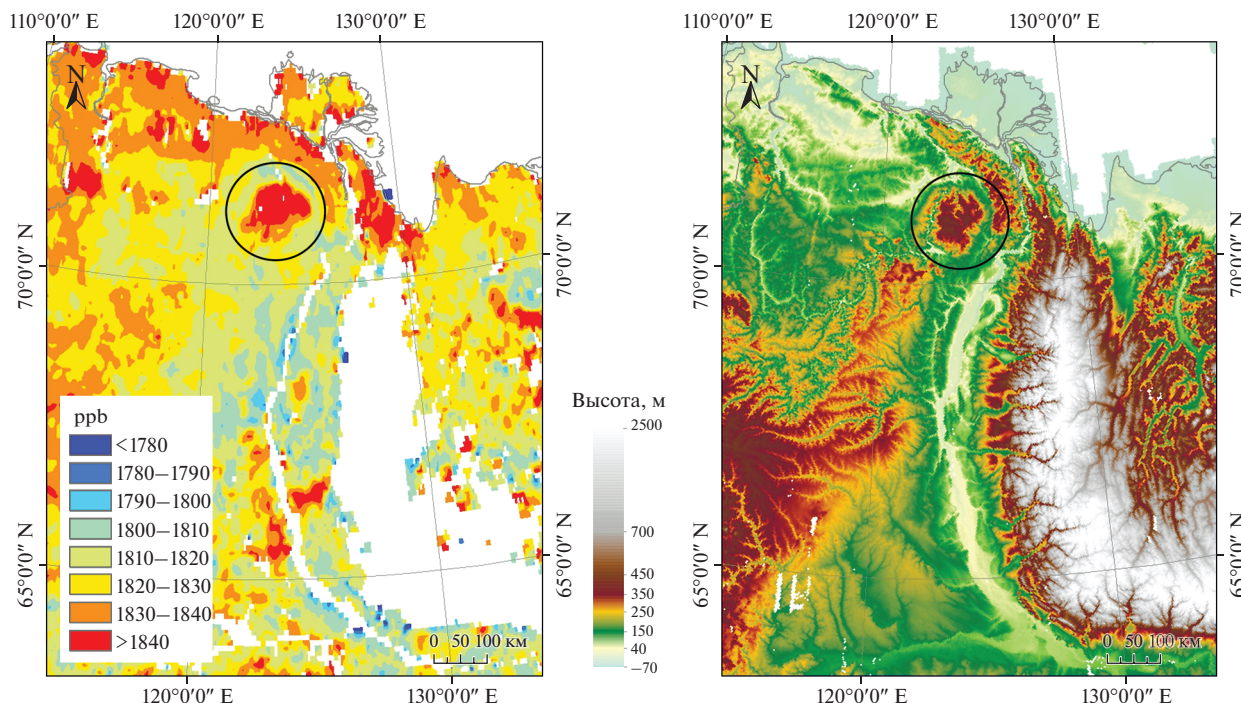


Рис. 2. Ложная аномалия CH_4 над возвышенностью Тигие-Сюрехтере, выявленная по данным ТРОПОМИ, прошедшим контроль качества (quality value > 50).

западу от дельты реки Лены наблюдается постоянная аномалия с повышенными значениями CH_4 над возвышенностью Тигие-Сюрехтере (см. рис. 2). Мы полагаем, что скорее всего это некорректные значения, которые прошли стандартный контроль качества по показателю шероховатости поверхности (surface roughness, пиксели со значением более 75 м не проходят контроль качества), в то время как, для данной возвышенности этот показатель составляет менее 50 м. Поэтому при проведении региональных оценок эмиссий метана необходимо внести уточнение в данные ТРОПОМИ, так как использование существующих валидных значений CH_4 может привести к искусственному завышению оценок эмиссий метана в среднем над регионом.

Во-вторых, в продукте ТРОПОМИ CH_4 offline представлено два варианта данных: общее содержание метана без учета систематической ошибки (default, стандартный) и общее содержание метана с учетом систематической ошибки (bias-corrected, скорректированный).

Расчет поправок для получения скорректированного продукта проводился в рамках стандартных работ по валидации на основе сопоставления значений концентраций газовых примесей, полученных по данным 22 станций TCCON (Сеть наблюдений за суммарными выбросами углерода) и данных ТРОПОМИ, полученных в пределах 2-х градусов (порядка 200 км) от станций. Усреднен-

ная систематическая ошибка (смещение) по всем станциям составляет -0.81 и -0.31% для стандартного и скорректированного XCH_4 ТРОПОМИ продуктов соответственно. То есть, согласно данным валидации (Hasekamp et al., 2019), значения концентраций метана, полученные по стандартному продукту ТРОПОМИ, систематически занижаются по сравнению с наземными измерениями, и использование скорректированных данных (bias-corrected CH_4) позволяет понизить разрыв в данных.

В рамках настоящего исследования была проведена предварительная оценка данных ТРОПОМИ на основе сопоставления стандартного и скорректированного продуктов на примере расчета еженедельного содержания метана для 24–31 августа 2018 г. Согласно результатам расчетов отклонения default CH_4 относительно значений bias-corrected CH_4 , наименьшая разница между данными до 5 ppb характерна для северных прибрежных территорий и участков крупных гарей. Для большей части территории скорректированные данные превышают значения стандартного продукта CH_4 на 10–20 ppb, что составляет порядка 10–20% в рамках рассматриваемого диапазона концентраций CH_4 (1780–1880 ppb), характерного для данного региона.

Это позволило сделать вывод о том, что для анализа концентраций метана в границах выгоревших территорий выбор типа продукта не имеет решающего значения, в то время как для анализа

динамики концентраций в целом по территории должно быть обосновано и принято решение, какой информационный продукт предпочтительнее. Сложность выбора типа продукта связана с отсутствием контрольных наземных данных, позволяющих валидировать спутниковые данные применительно к особенностям локальных условий. Следует отметить, что корреляция между данными TROPOMI и данными станции Sodankyla (сеть TCCON), расположенной в Финляндии на той же широте, что и тестовая территория, оказалась самой худшей из 22 станций (Hasekamp et al., 2019).

Таким образом, на основе предварительного анализа было принято решение для дальнейших расчетов использовать продукт default CH₄ TROPOMI offline с учетом контроля качества данных (quality value >50, учитывающие значения угла съемки, альbedo поверхности, аэрозольную оптическую толщину и другие параметры, влияющие на качество данных).

На рис. 3 и 4 представлены фрагменты исследуемой территории, и наглядно видно, что повышенные среднемесячные значения концентраций метана наблюдаются над большей частью территорий, пройденных огнем, на протяжении всего летнего сезона. Необходимо отметить, что на среднемесячных данных аномалии высоких значений CH₄ практически совпадают с границами выгоревших территорий.

В ранее проведенном исследовании постпожарного восстановления гарей 2005 года в Жиганском районе Якутии на основе индекса dNBR (Черепанова, Феоктистова, 2019) было выявлено, что к 2018 году все выгоревшие крупные территории в Жиганском районе восстановились (заросли молодняком) и характеризуются близкими к типичным значениям отражающих характеристик лиственных лесов (альbedo, NDVI, NBR). Было высказано предположение, что наличие ареалов с аномально высокими значениями CH₄, границы которых не совпадают с границами вновь выгоревших территорий, могут быть связаны с гарями предыдущих лет, что и было подтверждено на примере гарей 2018 года и обнаруженных над ними аномалий CH₄ в 2019 г. На рис. 3б, г показано, что в мае–июне 2019 года (в начале пожарного сезона) часть аномалий с превышением фоновых значений совпадает с гарями 2018 года. Дополнительно, на основе анализа временной серии продукта MCD 64 (MODIS) с 2002 по 2017 гг., было установлено, что часть аномально высоких областей концентраций CH₄ соответствует площадям, выгоревшим до 2018 г. Это косвенно указывает на то, что пожары предыдущих лет на этих участках запустили процессы оттаивания вечной мерзлоты, и, как следствие, активизировали источник эмиссий метана без смены типа растительного покрова.

В августе значения CH₄ для фоновых участков становятся более высокими и появляются новые ареалы повышенных значений концентраций CH₄ (1850–1860 ppb), совпадающие с границами гарей 2018 и 2019 года (см. рис. 4, а, б соответственно). В сентябре над выгоревшими участками также наблюдаются повышенные значения концентраций метана. Предположительно такой устойчивый повышенный фон концентраций CH₄ над гарями вне сроков горения связан с эффектом постпожарных эмиссий. Как указывалось ранее, длительные пожары (более 2 нед.) способствуют инициации процессов подтаивания вечной мерзлоты. После пожара изменяется альbedo поверхности, что влечет за собой изменения в тепловом балансе; также возможна активация процессов высвобождения метана из четвертичных отложений едом.

Для выявления сезонных трендов динамики концентраций метана над выгоревшими территориями были рассчитаны осредненные за месяц значения концентрации CH₄ в границах тестовых участков: выбранных гарей за 2018, 2019 гг. и фоновых территорий. Всего было проанализировано 47 участков выгоревших территорий с площадями от 400 до 7500 км² (18 гарей в 2018 г., 29 гарей в 2019 г.) и 17 участков фоновых территорий лиственных лесов, не подвергавшихся воздействию пожаров по крайней мере последние 5 лет (см. рис. 1).

На рис. 5 представлены распределения среднемесячных концентраций CH₄, полученные по спутниковым данным TROPOMI в 2018–2019 гг., для тестовых участков. Минимальные среднемесячные концентрации (1785–1815 ppb) выявлены в период май–июнь с постепенным нарастанием значений с июля по сентябрь как для выгоревших территорий, так и для фоновых значений. По полученным временным сериям данных были построены полиномиальные тренды 2-й степени, отражающие рост концентраций CH₄ над выгоревшими территориями с июля по сентябрь по сравнению с фоновыми лесными территориями.

На диаграммах размаха для фоновых участков видно, что медиана среднемесячных значений концентраций метана постепенно растет и достигает своего максимума в сентябре для 2018 г. — 1808 ppb (рис. 5, а), и в августе для 2019 г. — 1814 ppb (рис. 5, б). Предположительно сентябрьский максимум в 2018 году связан с более высокими температурами воздуха во второй половине сентября 2018 г. по сравнению с 2019 г. (см. рис. 6) и, как следствие, возникновением дополнительного пика горения лесных территорий в 2018 году по сравнению с практически полным прекращением пожаров в сентябре 2019 года (см. рис. 7).

Медианы среднемесячных значений концентраций метана в мае и июне для вновь горимых

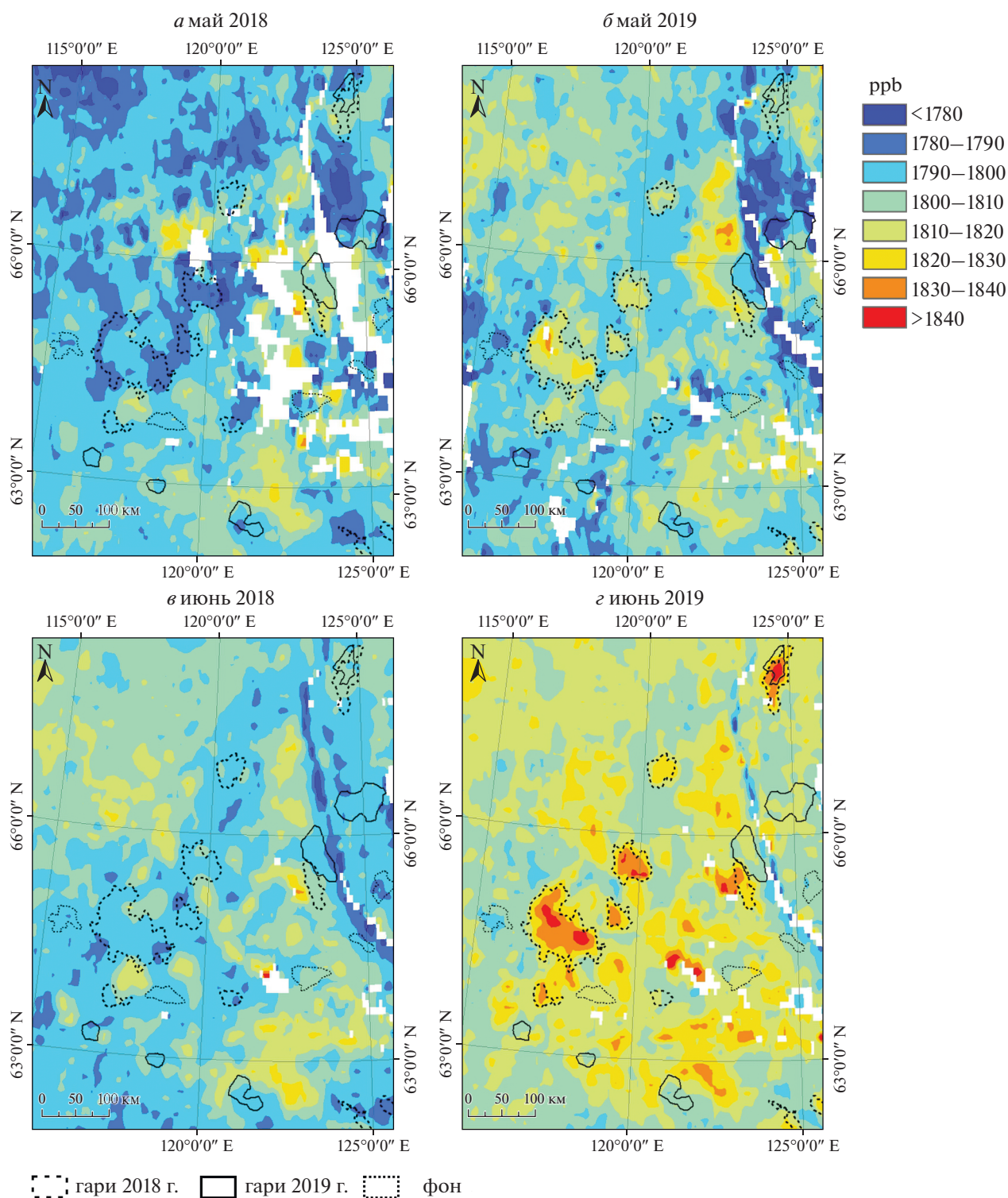


Рис. 3. Пространственное распределение среднемесячных концентраций метана, полученных по спутниковым данным ТРОПОМИ, над тестовыми участками в мае-июне 2018–2019 гг. (фрагмент исследуемой территории).

территорий близки к фоновым (см. рис. 5, а) и составляют 1795 ppb, однако в июле, с началом массового горения (см. рис. 7), разница между фоном (1803 ppb) и гарями 2018 года (1807 ppb) уже со-

ставляет 4 ppb. Максимальные превышения среднемесячных значений концентраций метана над фоновыми зафиксированы в августе и составили 15 ppb для 2018 г. и 17 ppb для 2019 г.

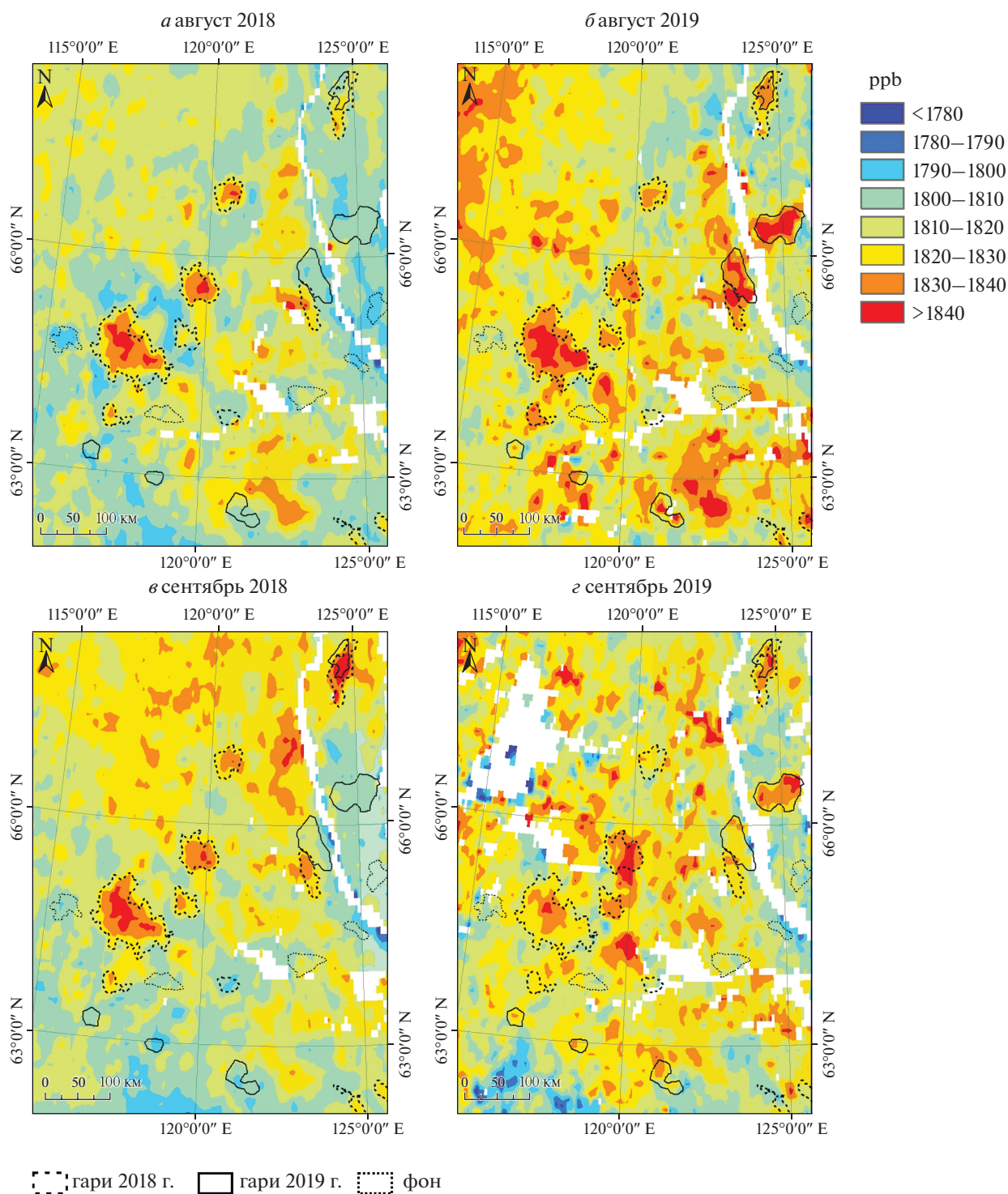


Рис. 4. Пространственное распределение среднемесячных концентраций метана, полученных по спутниковым данным TROPOMI, над тестовыми участками в августе–сентябре 2018–2019 гг. (фрагмент исследуемой территории).

В целом 2019 год характеризуется более высокими значениями концентраций метана. Так, в августе 2019 зафиксированы максимальные среднемесячные значения метана – 1843 ppb (см. рис. 5, е) за наблюдаемый период, в то время как в августе

2018 максимум не превышал 1834 ppb, а в сентябре 2018 г. – 1840 ppb (см. рис. 5, в).

Из рис. 5, г наглядно видно, что повышенные среднемесячные значения концентраций метана над гаями 2018 года наблюдаются и на протяжении

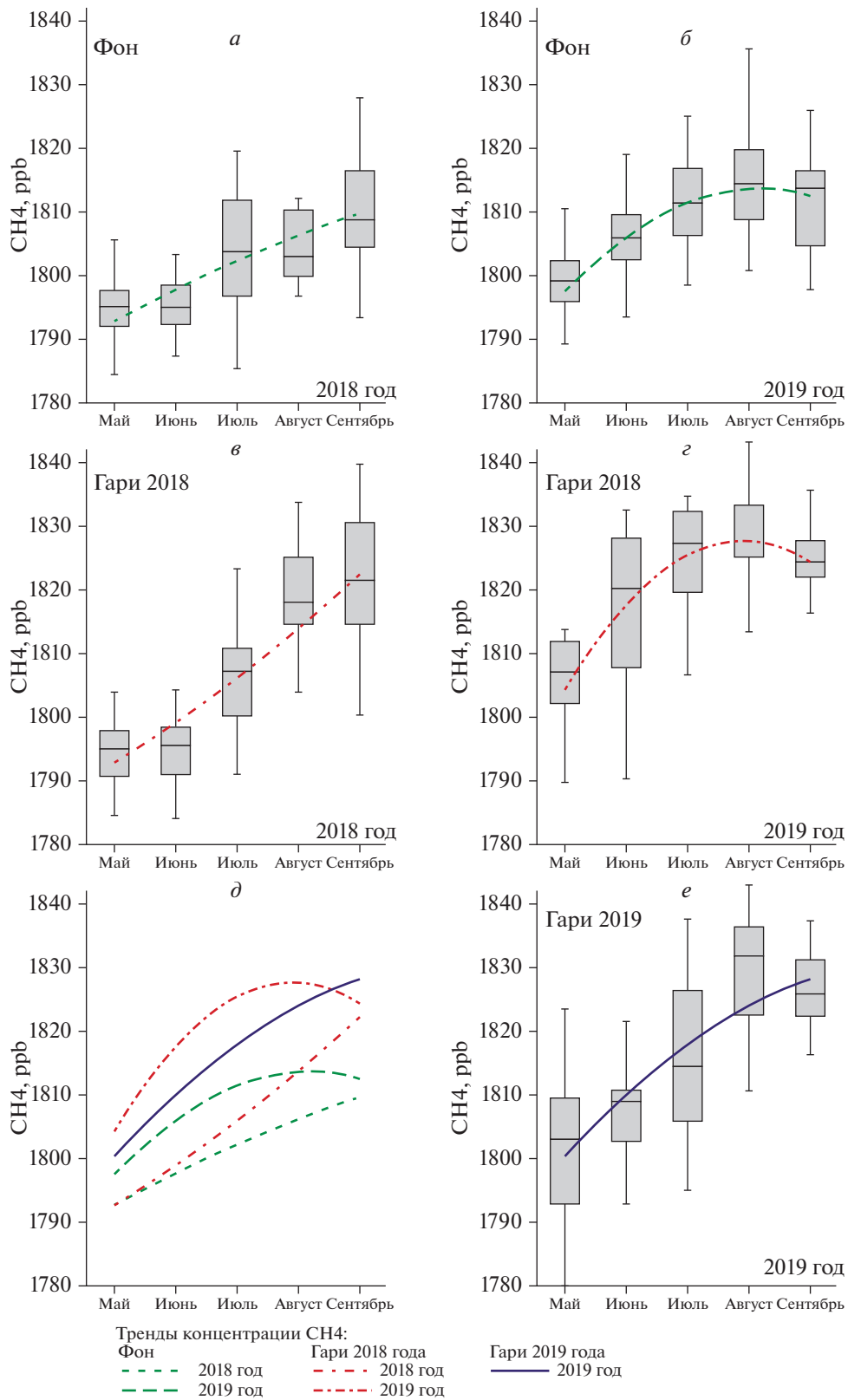


Рис. 5. Среднемесячные значения и тренды динамики общего содержания метана над тестовыми участками в Якутии, полученные по временным сериям TROPOMI за 2018 и 2019 гг.

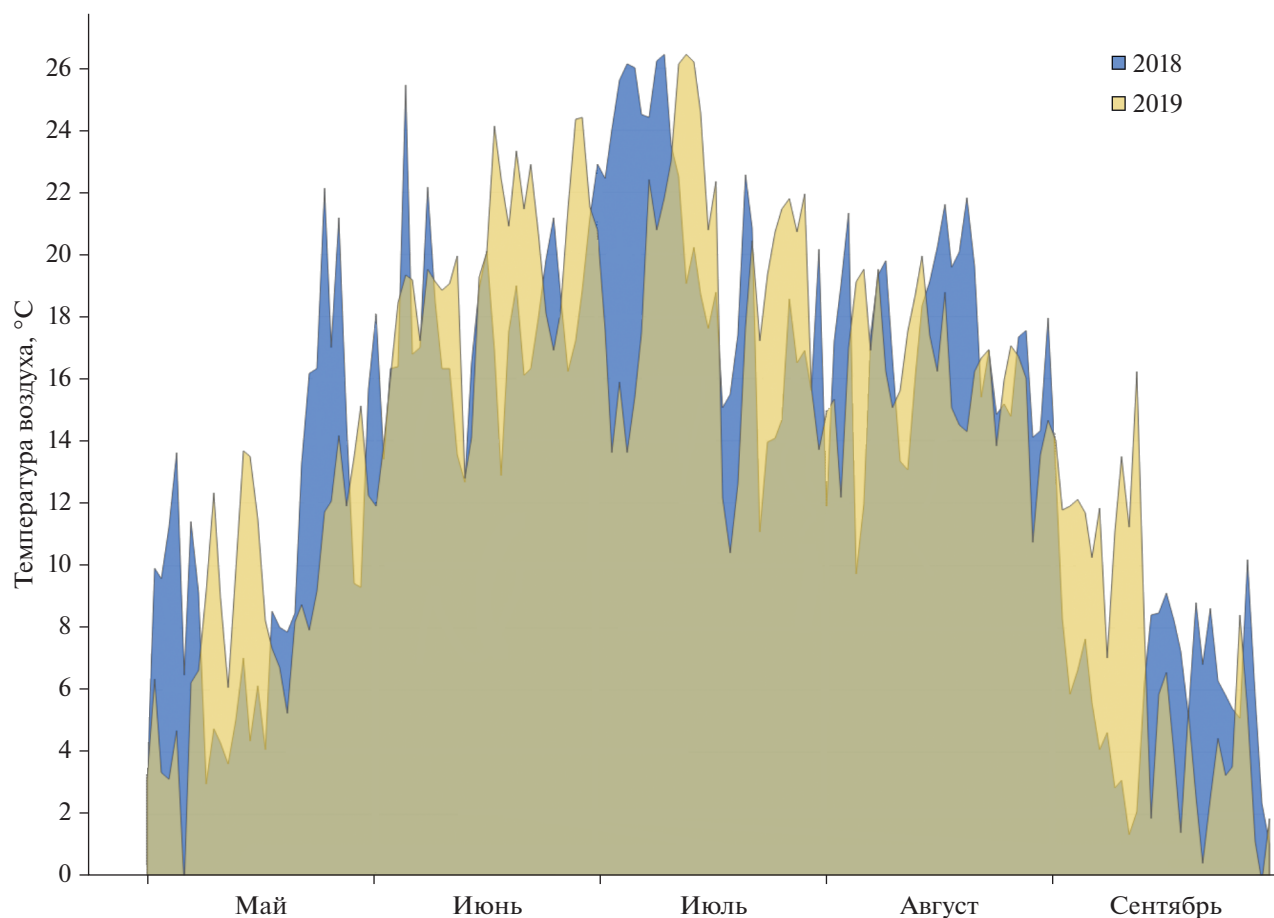


Рис. 6. График сезонного хода температуры воздуха по данным метеостанции в Якутске за летние сезоны 2018–2019 гг.

нии всего 2019 пожароопасного сезона. Максимальный разброс значений характерен для июня, что, вероятно, вызвано различной степенью разогрева подстилающей поверхности и скоростью подтаивания вечной мерзлоты.

Кривая динамики среднемесячных концентраций метана над фоновыми территориями (см. рис. 5, б) и прошлогодними горями (см. рис. 5, г) в 2019 г. похожи с максимумом в августе и постепенным снижением в сентябре. Интересно отметить, что вид тренда роста концентраций CH_4 над горями 2018 года по отношению к фоновым значениям в 2018 году аналогичен виду тренда аномалий CH_4 над горями 2019 года по отношению к фону в 2019 году (см. рис. 5, д). С мая по июнь (допожарный период) наблюдаются близкие тренды с разницей не более 5ppb. В июле, с активизацией пожаров (см. рис. 7), наблюдается систематическое появление значений, превышающих фоновые, и, как следствие, расхождение между аномальными и фоновыми трендами, достигающее максимума в сентябре (до 15 ppb).

Вид трендов динамики среднемесячных концентраций метана, в первую очередь, предподре-

деляются температурным режимом на территории (рис. 6), при котором минимальные значения концентрации CH_4 наблюдаются в мае при более низких температурах воздуха, постепенно увеличиваясь к августу и затем опять немного понижаясь в сентябре.

Из полученных результатов следует, что в 2019 году наблюдался более высокий фон концентраций метана по сравнению с 2018 годом. Это может объясняться влиянием различных факторов, включая более высокую интенсивность горения лесных территорий в июле–августе 2019 года (см. рис. 7). Для уточнения причин требуется проведение дополнительных исследований с привлечением данных космического мониторинга за более продолжительный период наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного пространственно-временного анализа динамики концентраций метана над территорией Якутии по данным космического мониторинга прибором TROPOMI/Sentinel-5 были выявлены области аномально высоких зна-

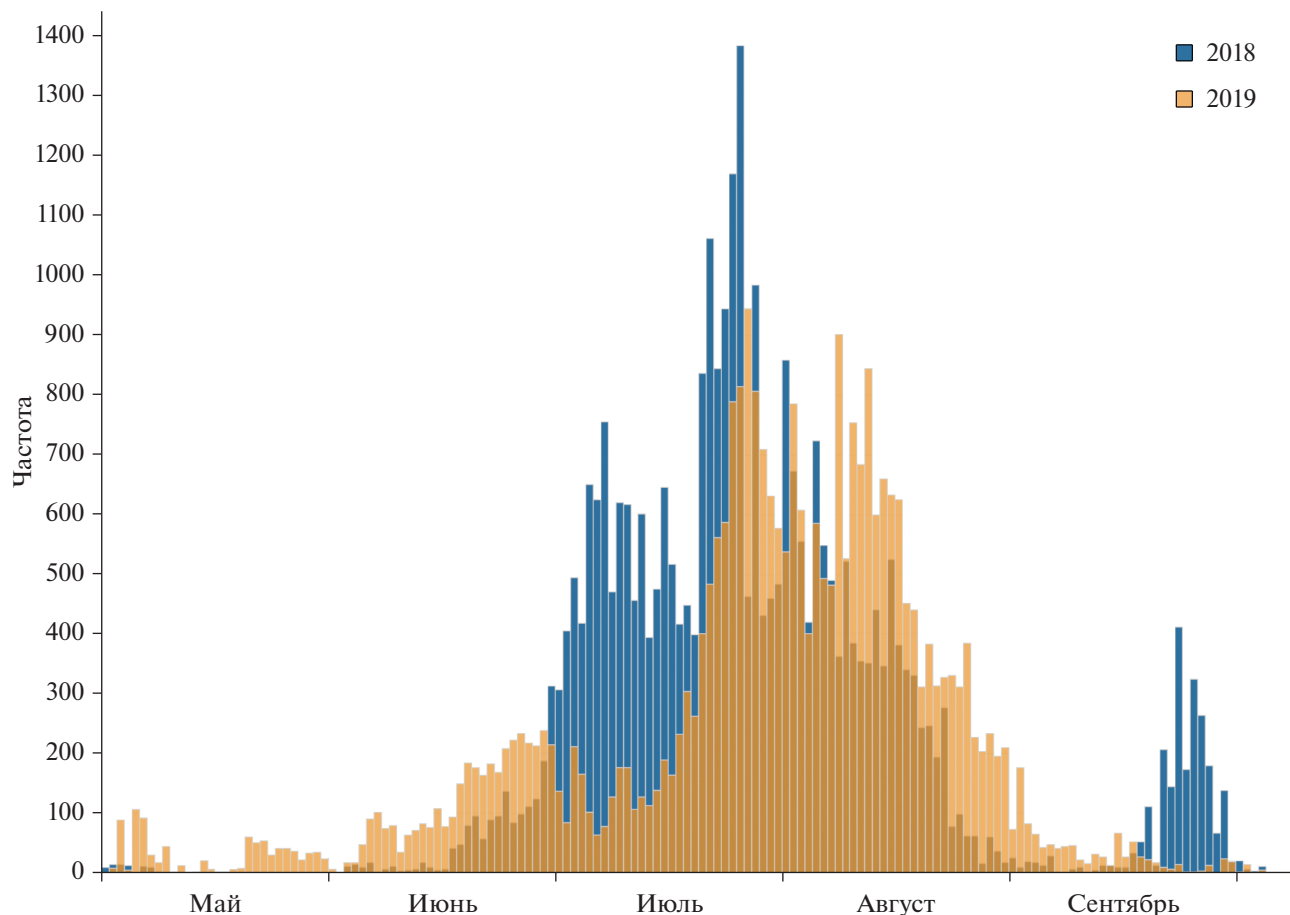


Рис. 7. Частота обнаружения пожаров по данным MODIS в границах тестовых участков за летние сезоны 2018–2019 гг.

чений концентраций метана, которые хорошо коррелируют по времени и пространству с границами крупных выгоревших областей с площадями более 400 км², включая гари предыдущих лет.

Полученные результаты подтверждают наличие эмиссий метана над выгоревшими территориями не только во время лесных пожаров, но и в постпожарные периоды во время восстановления растительного покрова, вызванные процессами подтаивания вечной мерзлоты. На основе анализа временных серий спутниковых данных для тестовых участков выявлены тренды динамики концентраций метана как для вновь выгоревших, так и для выгоревших ранее областей в пожароопасные сезоны 2018–2019 гг.

Установлено, что для исследуемой территории наблюдается устойчивая тенденция появления аномалий с осредненными ежемесячными значениями концентрации СН₄ выше фоновых на 5–15 ppb в июле–сентябре для вновь горимых областей, и на 10–15 ppb в период с мая по сентябрь для прошлогодних гарей.

Показано, что для анализа динамики аномальных концентраций общего содержания метана, связанных с выгоревшими территориями, возможно использование как стандартного продукта СН₄ offline (default), так и скорректированного СН₄ offline (bias-corrected). Однако для исследования динамики в целом по региону необходимо дополнительно обосновать выбор продукта либо использовать для анализа относительные величины. Установлено, что, хотя частота ежедневного покрытия данными над непосредственно горимыми площадями ниже, чем над фоновыми территориями из-за наличия постоянной облачности и дымовой завесы над крупными очагами пожаров, среднемесячные композиты хорошо отражают динамику эмиссий метана в пожароопасный сезон. Таким образом, данные космического мониторинга атмосферы с пространственным разрешением 10 км могут применяться для исследования процессов эмиссий метана в высокоширотных территориях преимущественно в летний период над крупными выгоревшими территориями с высокой степенью достоверности.

Рост числа и площадей неконтролируемых природных пожаров, деградация вечной мерзлоты в высокоширотных территориях приводит к изменению баланса парниковых газов в атмосфере, и, как следствие, усиливается негативное влияние на климатическую систему Земли в целом. Необходимо проводить дальнейшие исследования динамики аномальных зон высоких концентраций метана в атмосфере арктико-бореальной зоны, связанных с комбинированным воздействием различных источников эмиссий метана, таких как едомы, болота и пожары.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, MOST (Китай) и DST (Индия) в рамках научного проекта № 19-55-80021 и Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0306).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Кокорев В.А.* Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 1–14.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415060032>
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С.* Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216040186>
- Бондур В.Г., Гордо К.А.* Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55.
<https://doi.org/10.7868/S020596141803003X>
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416060105>
- Бондур В.Г., Мохов И.И., Воронова О.С., Ситнов С.А.* Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 года и тенденции 20-летних изменений // Докл. АН. Науки о земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 99–106.
<https://doi.org/0.31857/S2686739720050047>
- Бондур В.Г., Савин А.И.* Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Кладов В.Л., Гордо К.А.* Аномальная изменчивость пространственно-временных распределений природных пожаров и эмиссий вредных примесей на территории Европы по данным космического мониторинга // Докл. АН. 2019а. Т. 485. № 6. С. 745–749.
<https://doi.org/10.31857/S0869-56524856745-749>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В.* Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исслед. Земли из космоса. 2019б. № 3. С. 13–32.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019313-32>
- Воронова О.С., Зима А.Л., Кладов В.Л., Черепанова Е.В.* Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 года // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 70–82.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420010121>
- Киселев А.А., Решетников А.И.* Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов. Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2(96). С. 5–15.
- Космач Д.А., Сергиенко В.И., Дударев О.В., Куриленко А.В., Густафссон О., Семилетов И.П., Шахова Н.Е.* Метан в поверхностных водах окраинных морей Северной Евразии // ДАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 441–445.
- Краткий государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2018 году, Якутск. 2019.
<https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>
- Репина И.А., Аниферов А.А., Артамонов А.Ю.* Метан в атмосфере Арктики по данным дистанционного зондирования, приземных измерений и моделирования. Материалы III Международной научно-практической конференции “Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы III научно-практической конференции”. Майкоп. 2015. С. 191–199.
- Роль метана в изменении климата, под ред. д.х.н., проф. А.Г. Ишкова. Москва 2018, 135 с.
- Чевычелов А.П.* Лесные пожары в Якутии и их влияние на почвенный покров в аспекте прогнозируемого изменения климата // Вестник северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. 2019. 1(13). С. 55–67.
- Cherepanova E., Feoktistova N.* Multiscale remote sensing and GIS approach for monitoring of post-fire burn severity and vegetation recovery in high-latitude forest // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2019. V. 19. № 2.1. P. 965–972.
<https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.1/S08.125>
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D.* (2015). MCD64A1 MODIS/Terra + Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-01-23 from .
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>

- Hasekamp O., Lorente A., Hu H., Butz A., Joost aan de Brugh, Landgraf J. Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor Methane Retrieval, source: SRON ref: SRON-S5P-LEV2-RP-001, url: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBDMethane-retrieval>.
- Jacob D.J., Turner A.J., Maasakkers J.D., Sheng J., Sun K., Liu X., Chance K., Aben I., McKeever J., Frankenberg C. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions, *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 14371–14396. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016>
- Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G., Zimov S.A., Chapin F.S. III. Thermokarst Lakes as a Source of Atmospheric CH₄ During the Last Deglaciation. *Science*, 2007. V. 318. P. 633–636.
- Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kurten T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Hari P., Sorvari S., Bäck J., Bondur V., Kasimov N., Kotlyakov V., Matvienko G., Baklanov A., Guo H.D., Ding A., Hansson H.-C., Zilitinkevich, S.: Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative, *Atmos. Chem. Phys.*, 2015. V. 15. P. 13085–13096. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13085-2015>
- Kulmala Markku, Hanna K. Lappalainen, Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Yrjö Viisanen, Gennady Matvienko, Vladimir Melnikov, Alexander Baklanov, Valery Bondur, Nikolay Kasimov, Sergej Zilitinkevich. Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: grand challenges in the Arctic-Boreal context // *Geography. Environment. Sustainability*. 2016. № 2(9). P. 5–18. https://doi.org/10.15356/2071-9388_02v09_2016_01
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kurten T., Baklanov A., Shvidenko A. et al. Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land–atmosphere–ocean–society continuum in the Northern Eurasian region, *Atmos. Chem. Phys.*, 2016. V. 16. P. 14421–14461. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14421-2016>
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al. Pan Eurasian Experiment (PEEX) a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan- Eurasian arctic-boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. № 2(7). P. 13–48.
- MODIS Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL. Available on-line (<https://earthdata.nasa.gov/firms>). <https://doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.006>
- Veefkind J.P., Aben E.A.A., McMullan K., Forster H., de Vries J., Otter G., Visser H. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 2012. V. 120(SI). P. 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Yurganov L., Muller-Karger F., Leifer I. Methane increase over the Barents and Kara seas after the autumn pycnocline breakdown: satellite observations // *Advances in Polar Science*. 2019 V. 30(4). P. 382–390.
- Zou M.M., Xiong X.Z., Wu Z.H., Li S.S., Zhang Y., Chen L.F. Increase of Atmospheric Methane Observed from Space-Borne and Ground-Based Measurements, *Remote Sensing*, 2019. V. 11(8). P. 16. <https://doi.org/10.3390/rs11080964>

Analysis of Methane Concentration Anomalies over Burned Out Territories of the Boreal and Arctic Zone of Eastern Siberia in 2018–2019 Based on TROPOMI Satellite Data

E. V. Cherepanova¹, N. V. Feoktistova¹, and M. A. Chudakova¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

The results of spatiotemporal analysis of methane concentration dynamics over Yakutia in the period of May–September 2018–2019 based on daily TROPOMI/Sentinel5 satellite data (from European Union’s Earth Observation Programme–Copernicus) are presented here. Stable areas of elevated methane concentrations were found not only during forest fires, but also in post-fire periods above the burnt areas of previous years, probably due to the activation of permafrost thawing processes. Intraseasonal trends of methane concentration dynamics over burnt and background areas have been revealed, as well as possible cause-effect relationships of the observed phenomena have been analyzed. It has been found that, on average, the anomalous values of CH₄ concentration over the newly burned areas exceeded the background by 5–15 ppb in July–September, and by 10–15 ppb over last year’s burns in the period from May to September.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, spatiotemporal analysis, fires, emissions, methane, TROPOMI/Sentinel-5

REFERENCES

- Anisimov O.A., Kokorev V.A. Comparative analysis of land, marine, and satellite observations of methane in the lower atmosphere in the Russian arctic under conditions of climate change / *Izvestiya. Atmospheric And Oceanic Physics*. 2015. V. 51. № 9. P. 979–991. DOI: 10.1134/S0001433815090030
- Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G. Satellite Monitoring of Wildfires during the Anomalous Heat Wave of 2010 in Russia // *Izvestiya, At-*

- mospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. № 9. P. 1039–1048. DOI: 10.1134/S0001433811090040.
- Bondur V.G., Ginzburg A.S.*, Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory of Russia Based on Space Monitoring // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466. № 2. P. 148–152. DOI: 10.1134/S1028334X16020045
- Bondur V.G., Gordo K.A., Kladov V.L.*, Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 9. P. 859–874. DOI: 10.1134/S0001433817090055
- Bondur V.G., Gordo K.A.*, Satellite monitoring of burnt-out areas and emissions of harmful contaminants due to forest and other wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. № 9. P. 955–965. DOI: 10.1134/S0001433818090104
- Bondur V.G., Mokhov I.I., Voronova O.S., Sitnov S.A.* Satellite Monitoring of Siberian Wildfires and Their Effects: Features of 2019 Anomalies and Trends of 20-Year Changes // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 492. № 1. P. 370–375. DOI: 10.1134/S1028334X20050049
- Bondur V.G.*, Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1090. DOI: 10.1134/S0001433816090103
- Bondur V.G., Savin A.I.* Design a system to monitor the environment for purposes relating to ecology and natural-resources // *Soviet J. Remote Sensing*. 1993. V. 10. № 6. P. 1078–1093.
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Cherepanova E.V.* Space Monitoring of the Effect of Natural Fires on the State of Different Types of Vegetation Cover in Federal Districts of the Russian Federation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019b. V. 55. № 9. P. 1238–1253. DOI: 10.1134/S000143381909010X
- Bondur V.G., Tsidilina M.N., Kladov V.L., Gordo K.A.* Irregular Variability of Spatiotemporal Distributions of Wildfires and Emissions of Harmful Trace Gases in Europe Based on Satellite Monitoring Data // *Doklady Earth Sciences*. 2019a. V. 485. Part 2. P. 461–464. DOI: 10.1134/S1028334X19040202
- Cherepanova E., Feoktistova N.* Multiscale remote sensing and GIS approach for monitoring of post-fire burn severity and vegetation recovery in high-latitude forest // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2019. V. 19. № 2.1. P. 965–972. DOI: 10.5593/sgem2019/2.1/S08.125
- Chevychelov A.P.* Lesnyye pozhary v Yakutii i ikh vliyaniye na pochvennyy pokrov v aspekte prognoziruyemogo izmeneniya klimata // *Vestnik severo-vostochnogo federalnogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle*. 2019. № 1(13). P. 55–67 (In Russian).
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D.* (2015). MCD64A1 MODIS/Terra + Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006 (Data set). NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-01-23 from. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>
- Hasekamp O., Lorente A., Hu H., Butz A., Joost aan de Brugh, Landgraf J.* Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor Methane Retrieval, source: SRON ref: SRON-S5P-LEV2-RP-001, url: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBDMethane-retrieval>.
- Jacob D.J., Turner A.J., Maasakkers J.D., Sheng J., Sun K., Liu X., Chance K., Aben I., McKeever J., Frankenberg C.* Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions, *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 14371–14396. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016>
- Kiselev A.A., Reshetnikov A.I.* Metan v Rossiyskoy Arktike: rezul'taty nablyudeniya i raschetov. Problemy Arktiki i Antarktiki [ethane in the Russian Arctic: results of observations and calculations] // *Problems of the Arctic and Antarctic*. 2013. № 2. P. 5–15.
- Kosmach D.A., Dudarev O.V., Kurilenko A.V., Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Gustafsson O.* Methane in the surface waters of northern Eurasian marginal seas // *Doklady Chemistry*. 2015. V. 465. № 2 P. 281–285.
- Kratkiy gosudarstvennyy doklad ob ekologicheskoy situatsii v Respublike Sakha (Yakutiya) v 2018 godu, Yakutsk 2019 [Brief state report on the environmental situation in the Republic of Sakha (Yakutia) in 2018, Yakutsk 2019] (In Russian) <https://minpriroda.sakha.gov.ru/doklady-o-sostojanii-okruzhajuschej-sredy>.
- Kulmala M., Lappalainen H.K., Petäjä T., Kurten T., Kerminen V.-M., Viisanen Y., Hari P., Sorvari S., Bäck J., Bondur V., Kasimov N., Kotlyakov V., Matvienko G., Baklanov A., Guo H.D., Ding A., Hansson H.-C., Zilitinkevich S.*: Introduction: The Pan-Eurasian Experiment (PEEX) – multidisciplinary, multiscale and multicomponent research and capacity-building initiative, *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 13085–13096. doi: 10.5194/acp-15-13085-2015
- Kulmala Markku, Hanna K. Lappalainen, Tuukka Petäjä, Veli-Matti Kerminen, Yrjö Viisanen, Gennady Matvienko, Vladimir Melnikov, Alexander Baklanov, Valery Bondur, Nikolay Kasimov, Sergej Zilitinkevich.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Program: grand challenges in the Arctic-Boreal context // *Geography. Environment. Sustainability*. 2016. № 2(9). P. 5–18. DOI: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_01
- Lappalainen H.K., Kerminen V.-M., Petäjä T., Kurten T., Baklanov A., Shvidenko A. et al.* Pan-Eurasian Experiment (PEEX): Towards a holistic understanding of the feedbacks and interactions in the land-atmosphere-ocean-society continuum in the Northern Eurasian region, *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 14421–14461. doi:10.5194/acp-16-14421-2016
- MODIS Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL. Available on-line (<https://earthdata.nasa.gov/firms>). doi: 10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.006
- Lappalainen H., Petäjä T., Kujansuu J., Kerminen V., Skorokhod A., Kasimov N., Bondur V. et al.* Pan Eurasian Experiment (PEEX) – a research initiative meeting the grand challenges of the changing environment of the northern pan- Eurasian arctic- boreal areas // *Geography. Environment. Sustainability*. 2014. № 2(7). P. 13–48.
- Repina I.A., Aniferov A.A., Artamonov A. Yu.* Metan v atmosfere Arktiki po dannym distantsionnogo zondirovaniya, prizemnykh izmereniy i modelirovaniya [ethane in the atmosphere of the Arctic according to remote sensing, surface measurements and modeling] // *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Prikladnyye*

- aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniyem sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy. Materialy III nauchno-prakticheskoy konferentsii". Maikop. 2015. P. 191–199 (In Russian).
- Rol metana v izmenenii klimata [The role of methane in climate change]. Ed. by A.G.Ishkov. Moscow, 2018. 135 p. (In Russian).
- Veefkind J.P., Aben E.A.A., McMullan K., Forster H., de Vries J., Otter G., Visser H.* TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 2012. V. 120(SI). P. 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Voronova O.S., Zima A.I., Kladov V.L., Cherepanova E.V.* Anomalnye pozhary na territorii Sibiri letom 2019 goda [Anomalous wildfires in Siberia in summer 2019] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 1. P. 70–82 (In Russian). DOI: 10.31857/S0205961420010121
- Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G., Zimov S.A., Chapin III F.S.* Thermokarst Lakes as a Source of Atmospheric CH₄ During the Last Deglaciation. *Science*. 2007. V. 318. P. 633–636.
- Yurganov L., Muller-Karger F., Leifer I.* Methane increase over the Barents and Kara seas after the autumn pycnocline breakdown: satellite observations // *Advances in Polar Science* 2019. V. 30. № 4. P. 382–390.
- Zou M.M., Xiong X.Z., Wu Z.H., Li S.S., Zhang Y., Chen L.F.* Increase of Atmospheric Methane Observed from Space-Borne and Ground-Based Measurements, *Remote Sensing*. 2019. V. 11. № 8. P. 16. <https://doi.org/10.3390/rs11080964>