

НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ МОНИТОРИНГА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ

К. Л. Антонов, В. А. Поддубный, Ю. И. Маркелов,
А. Г. Бувечич, А. Н. Медведев, И. Л. Манжуров
ФГБУН Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН
(Екатеринбург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2017 г.

Обсуждаются проблемы получения объективных данных об антропогенной эмиссии парниковых газов в Арктике. Представлены результаты мониторинга CO_2 , CH_4 и H_2O в приземной атмосфере острова Белый в летние периоды 2015–2017 гг. Зафиксировано повышение концентрации CO_2 на 3,1 ppt в год, что в полтора раза превышает среднегодовой глобальный прирост. Содержание остальных парниковых газов не изменилось. На примере локальных измерений показаны возможности метода флюид-локации атмосферы для моделирования средних эффективных полей концентраций метана и идентификации его источников без привлечения информации о мощности и расположении эмиссии.

Ключевые слова: парниковые газы, углеродный цикл, инвентаризация, мониторинг, остров Белый, обратные траектории, метод флюид-локации атмосферы.

Введение

Климатическая система планеты — сложный многомерный неравновесный объект, изменяющийся в различных пространственных и временных масштабах. Все большее научное признание получает утверждение, что непрерывный рост активной деятельности человека может привести к частичной или коренной перестройке климата планеты [1].

Современные параметры глобального климата остаются оптимальными для развития цивилизации, однако темпы их изменения за последние десятилетия беспрецедентны. Так, по данным NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) и NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), 2016 г. стал самым жарким за всю историю наблюдений с 1880-х и третьим годом подряд с температурным рекордом. Средняя глобальная температура воздуха выросла на 1,1°C с конца XIX в. и на 0,99°C с середины XX в. [2]. Это создает множество экологических и техногенных угроз, последствия

реализации которых труднопредсказуемы для развития человечества и биоты в целом. Поэтому исследования механизмов изменения климатической системы и развитие методов прогнозирования ее динамики актуальны с научной точки зрения, а также имеют большое практическое значение, так как обеспечивают информационную основу для разработки экономических и политических мер, направленных на смягчение последствий изменения климата.

Известно, что климатические эффекты наиболее сильно выражены в арктической зоне планеты. По сравнению с другими регионами здесь быстрее растет среднегодовая температура приземного слоя воздуха, резко сокращается продолжительность снежного периода, возрастают темпы таяния льдов и вечной мерзлоты. По данным Всемирной метеорологической организации, в 2016 г. в некоторых районах российской Арктики температура воздуха была

Таблица 1. Вклад различных парниковых газов в парниковый эффект

Общий ПЭ (по данным [8])		Антропогенный ПЭ (по данным [7; 9])		ПГП за 100 лет*
Газ	Вклад, %	Газ	Вклад, %	
Водяной пар H ₂ O	36—72	Диоксид углерода CO ₂	~ 80	1
Диоксид углерода CO ₂	9—26	Метан CH ₄	18—19	25
Метан CH ₄	4—9	Закись азота N ₂ O	< 1	298
Озон O ₃	3—7	Гексафторид серы SF ₆	< 1	22 800
		Перфторуглероды (ПФУ)	< 1	140—11 700
		Гидрофторуглероды (ГФУ)	< 1	6500—9200

* ПГП — потенциал глобального потепления с осреднением за 100 лет.

на 6—7°C выше долгосрочных средних показателей [3]. Эти явления обусловлены так называемым арктическим усилением [4]. Оно связано как с особенностями общей циркуляции атмосферы и глобальных переносов тепловой энергии, так и с локальными процессами в полярных широтах, которые способны создать эффект положительной обратной связи, например изменение альbedo, эмиссия углерода в результате таяния вечной мерзлоты, высвобождение газогидратов, закисление океана и т. д.

С первых докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) ООН наиболее вероятной причиной потепления считается увеличение содержания в атмосфере парниковых газов (ПГ), прежде всего диоксида углерода, метана, закиси азота и других антропогенных примесей, усиливающих парниковый эффект (ПЭ). Прямая зависимость климата от концентрации атмосферного углекислого газа была подтверждена относительно недавно с использованием реконструированных за последние 720 тыс. лет данных о параметрах климата Земли на основе анализа антарктических ледяных кернов [5]. Поэтому все существующие модели и вычислительные системы для прогнозирования климата опираются на сценарии изменения объемов эмиссии парниковых газов и аэрозолей — главных оптически активных компонентов атмосферы. От наличия и достоверности исходных данных о параметрах источников и стоков ПГ и аэрозолей в существенной мере зависят и результаты прогнозных оценок.

Для удобства сопоставления степени воздействия на климат различных составляющих атмосферы и оценки их возможного вклада в ПЭ принята концепция радиационного форсинга — внешне обусловленного изменения энергетического баланса в атмосфере [6]. Основные ПГ в порядке их вклада в общий парниковый эффект (связанный как с природными, так и с антропогенными факторами): водяной пар, двуокись углерода, метан и озон (табл. 1). Вопрос о вкладе аэрозолей в парниковый

эффект до сих пор остается дискуссионным: одни аэрозоли могут вызывать потепление, другие — наоборот, похолодание. По некоторым оценкам суммарный радиационный форсинг аэрозолей может достигать 10% [7].

Антропогенный парниковый эффект, т. е. эффект, вызванный ПГ, поступающими в атмосферу в результате антропогенной эмиссии, на 80% связан с диоксидом углерода; на метан приходится 18—19%, на остальные ПГ — менее 1%. К основным антропогенным источникам ПГ принято относить сжигание топлива и изменение землепользования в результате вырубки лесов и развития сельского хозяйства. Водяной пар не рассматривается в Киотском протоколе [10], так как изменения его концентраций в атмосфере (ни антропогенные, ни естественные) не зарегистрированы. Разрушающие озон вещества, дающие небольшой парниковый эффект, также не приводятся, поскольку они запрещены к использованию и подлежат особому учету.

В расчетах антропогенных эмиссий парниковый эффект от разных ПГ приводится к «общему знаменателю» и выражается в CO₂-эквиваленте с помощью потенциала глобального потепления (ПГП) со 100-летним сроком осреднения (см. табл. 1). ПГП показывает, насколько 1 т того или иного газа дает больший эффект, чем 1 т CO₂. Например, метан обладает в 25 раз большей радиационной активностью, чем CO₂, а закись азота — почти в 300 раз. Несмотря на это, суммарный массовый вклад в парниковый эффект диоксида углерода является доминирующим из-за огромных объемов его поступления в атмосферу. По соотношению годовых эмиссий CO₂ за счет природных и антропогенных источников доля последних составляет лишь 4%, основной эмитент углекислоты — дыхание биоты [11].

Подробные оценки углеродного баланса, связанного с антропогенной эмиссией CO₂, представляются в периодических докладах МГЭИК. В табл. 2, составленной по материалам 5-го оценочного доклада 2013 г. [7], приведены среднегодовые балансы

Таблица 2. Глобальный кумулятивный запас антропогенного CO₂ в индустриальную эру (Гт) и среднегодовые балансы за последние десятилетия (Гт/год) по данным [7]

Параметр	1750—2011, всего	1980—1989	1990—1999	2000—2009	2002—2011
Запас в атмосфере (доля от общей эмиссии)	240 ± 10 (43%)	3,4 ± 0,2 (49%)	3,1 ± 0,2 (39%)	4,0 ± 0,2 (45%)	4,3 ± 0,2 (47%)
Сжигание ископаемого топлива	375 ± 30	5,5 ± 0,4	6,4 ± 0,5	7,8 ± 0,6	8,3 ± 0,7
Нетто-поток «океан — атмосфера»	-155 ± 30	-2,0 ± 0,7	-2,2 ± 0,7	-2,3 ± 0,7	-2,4 ± 0,7
Нетто-поток «земля — атмосфера»	20 ± 45	-0,1 ± 0,8	-1,1 ± 0,9	-1,5 ± 0,9	-1,6 ± 1,0
В том числе:					
изменение землепользования	180 ± 80	1,4 ± 0,8	1,5 ± 0,8	1,1 ± 0,8	0,9 ± 0,8
остаточный сток в наземные экосистемы	-160 ± 90	-1,5 ± 1,1	-2,6 ± 1,2	-2,6 ± 1,2	-2,5 ± 1,3
Вклад океана в общий сток, %	49	57	46	47	49
Вклад наземных экосистем, %	51	43	54	53	51

углерода за последние три десятилетия, а также кумулятивный запас антропогенного CO₂ в атмосфере в индустриальную эру. Отрицательные значения для потоков «океан — атмосфера» и «земля — атмосфера» указывают на поглощение углерода этими резервуарами. Ошибки соответствуют 90%-ным доверительным интервалам.

С 1750 г. до настоящего времени суммарная эмиссия CO₂ составила 555 Гт, из которых 240 Гт (43%) остается в атмосфере. Остальная часть была поглощена морскими (155 Гт) и наземными (160 Гт) экосистемами примерно в одинаковой пропорции. Интересно, что сток в наземные экосистемы, нетронутые в результате антропогенной деятельности, почти компенсировал эмиссию, связанную с изменением землепользования (нетто-поток +20 Гт значимо не отличается от нуля). Это явление связано с наличием отрицательной обратной связи: повышенное содержание углерода и азота в атмосфере приводит к интенсификации фотосинтеза и росту биомассы, в результате чего количество CO₂ в атмосфере снижается. Кроме того, глобальное потепление вызывает увеличение продолжительности вегетационного периода и, как следствие, расширение площади лесов и рост биомассы [7]. Особенно ярко этот эффект выражен в последние десятилетия. Нетто-поток «земля — атмосфера» становится отрицательным, т. е. наземные экосистемы обеспечивают чистый сток CO₂. Однако в целом темпы роста антропогенной эмиссии CO₂ (сжигание топлива плюс землепользование) превышают темпы его поглощения наземными и морскими экосистемами примерно

в 1,6 раза (за последние три десятилетия). Поэтому запас углерода в атмосфере продолжает расти.

В 2015 г. среднее содержание двуокиси углерода в атмосфере планеты впервые превысило уровень 400 ppm, а метана — 1845 ppb. Среднегодовой абсолютный прирост за последние 10 лет составил 2,08 ppm и 6,0 ppb соответственно [12; 13]. Резкий рост концентраций ПГ произошел именно в индустриальную эпоху, в период активной хозяйственной деятельности. До 1750 г., по оценкам МГЭИК, уровни CO₂ и CH₄ составляли 180—290 ppm и 720 ppb соответственно. По некоторым оценкам, к 2100 г. содержание двуокиси углерода в атмосфере достигнет 540—970 ppm в зависимости от сценариев социально-экономического развития человечества [9].

Таким образом, основным предметом исследований возмущающих воздействий на климатическую систему являются процессы поступления, перераспределения и удаления оптически активных компонентов, формирующих текущий состав атмосферы. В сфере изучения ПГ можно выделить два ключевых направления: (1) оценка состава и объемов антропогенных выбросов и (2) изучение природных процессов поступления и удаления из атмосферы углеродсодержащих соединений.

В направлении изучения природных процессов основное внимание сосредоточено на экспериментальных и теоретических оценках баланса углеродных потоков (нетто-обменов экосистем) в различных биомах и природно-климатических зонах [14; 15], особенно в лесных и болотных экосистемах [16—19],

Таблица 3. Станции мониторинга ПГ в АЗРФ [24]

Станция	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Период наблюдений	Программа наблюдений
«Териберка»	69°12' с. ш.	35°06' в. д.	40	С 1988 г.	CO ₂ , CH ₄ с 1996 г.
«Новый порт»	67°41' с. ш.	72° 53' в. д.	11	С 2002 г.	CO ₂ , CH ₄
«Тикси»	71°35' с. ш.	128°55' в. д.	15	С 2011 г.	CO ₂ , CH ₄

а также зависимостей этих процессов от биотических и абиотических факторов [20]. В оценке антропогенных выбросов ПГ, несмотря на значительные достижения в этой области (совершенствование приборов и методов измерений на отдельных источниках и дистанционного зондирования атмосферы из космоса, разработка эффективных математических методов и программных средств и др.), до сих пор основным способом получения информации является использование расчетных методик, основанных на применении удельных коэффициентов эмиссии для различных промышленных и сельскохозяйственных процессов, а также других видов деятельности [21]. Эти методы используются для инвентаризации выбросов ПГ в крупных городах и регионах, а также для оценки эффективности экологической политики, направленной на снижение воздействия на окружающую среду [22; 23]. Однако в получаемых таким образом данных имеются значительные неопределенности и сложности верификации. Для их уменьшения требуются дополнительные исследования, наиболее перспективными из которых являются объективные оценки параметров источников ПГ по данным наземных приборных измерений. Основным инструментом для решения подобных задач является мониторинг — постоянные наблюдения или длительные ряды непрерывных наблюдений.

В Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) систематические наблюдения за содержанием парниковых газов проводит Росгидромет на трех основных станциях — «Териберка», «Новый порт» и «Тикси». Наиболее длительный ряд наблюдений получен на станции «Териберка» (табл. 3).

Результаты этого мониторинга показывают, что среднегодовые уровни и межгодовой прирост содержания углекислого газа и метана в северных широтах опережают аналогичные показатели, осредненные в глобальном масштабе [13; 24]. Так, по всем указанным станциям концентрация CO₂ уже в 2014 г. превысила 400 ppт, а в целом на планете этот рубеж был достигнут только в 2015 г. Локальные концентрации CH₄, зафиксированные Росгидрометом, на 80—100 ppб превышают текущий глобальный уровень 1845 ppб и продолжают увеличиваться опережающими темпами. Это может быть связано со сравнительно невысокой способностью северных наземных и морских экосистем к поглощению углерода, особенностями атмосферной

циркуляции в полярных широтах, а также наличием локальных природных и антропогенных источников парниковых газов.

Для подробного исследования процессов эмиссии и поглощения ПГ, а также моделирования и прогнозирования возможных климатических эффектов необходимы данные с более развитой региональной сети мониторинга. С учетом размеров территории российской Арктики количество действующих станций мониторинга недостаточно. Кроме того, на этих станциях не проводятся высокочастотные прецизионные измерения, которые требуются при решении обратных задач для идентификации и оценки параметров источников примесей и восстановления полей их концентраций, а также для оценки потоков на границе «поверхность — атмосфера».

Целью настоящего исследования является анализ локальных измерений содержания основных парниковых газов в приземной атмосфере заполярного острова Белый, а также квазидвумерные расчеты средних эффективных полей концентраций метана методом флюид-локации атмосферы без привлечения априорной информации о мощности и расположении источников его эмиссии.

Материалы и методы

Высокочастотные прецизионные измерения концентраций парниковых газов в приземной атмосфере острова Белый (Ямало-Ненецкий автономный округ) проведены Институтом промышленной экологии Уральского отделения РАН (ИПЭ УрО РАН) совместно с некоммерческим партнерством «Российский центр освоения Арктики» (Салехард) в рамках летних экспедиционных кампаний 2015—2017 гг. Остров расположен в Карском море, в 5—10 км к северу от полуострова Ямал. Он относится к биоклиматической подзоне В [25]. Наземная экосистема представлена арктической тундрой; основная растительность — мхи, карликовые кустарники и пушица. В почвах преобладают аллювиально-морские отложения [26]. Рельеф плоский (прибрежная равнина) с максимальными высотами не более 12 м над уровнем моря.

Пункт мониторинга размещался в районе полярной метеостанции им. Попова на северо-западном берегу острова (73,32° с. ш., 70,05° в. д.) (рис. 1). Для измерений использовался лазерный газоанализатор «Picarro Model G2401» («Picarro Inc.», США), который



Рис. 1. Расположение пункта мониторинга парниковых газов на острове Белый, Ямало-Ненецкий АО (подложка Google Earth, 2017) (слева); общий вид места исследований (справа, фото А. Г. Бувевича)

обеспечивает одновременное определение концентраций в атмосфере CO_2 , CH_4 , CO и H_2O с высокой точностью в автоматическом непрерывном режиме. Контроль аппаратного дрейфа и погрешности измерений выполнен в ходе регулярной калибровки с использованием стандартных поверочных газовых смесей отечественного производства. Отбор проб воздуха осуществлялся на высоте 7–10 м. Метеорологические параметры фиксировались с помощью метеостанции «Viasala AWS310».

В 2015 г. измерения проводились с 15 июля по 17 августа, длительность измерений составила 765 ч, в 2016 г. — с 8 июля по 30 августа, длительность — 1269 ч, в 2017 г. — с 14 июля по 31 августа, длительность — 1176 ч. Отметим, что с сентября 2017 г. измерения продолжают в непрерывном режиме. Полученные первичные данные были обработаны статистическим фильтром на основе логнормального распределения и приведены к среднечасовым значениям.

Исследование пространственно-временной неоднородности распределения локальных источников вокруг точки мониторинга (расчетный радиус 0–10 км) проведено путем сравнительного анализа метеорологических условий (направлений и скоростей ветра) и полученных временных серий концентраций ПГ. Для идентификации удаленных источников (расчетный радиус 10–1000 км) использован метод флюид-локации атмосферы (ФЛА) [27; 28], основанный на совместном анализе траекторий движения воздушных потоков и результатов приборных измерений концентраций примесей. Метод

ФЛА является гибридным Эйлера — Лагранжа вариантом методов статистики обратных траекторий (COT) [29–31], в нем впервые объединены статистический анализ и решение уравнений переноса примеси вдоль траекторий движения воздушных (лагранжевых) частиц. Методы COT — эффективный инструмент для анализа переноса загрязняющих атмосферу веществ и определения их возможных источников. По результатам длительных наблюдений они обеспечивают установление связи между фактом повышенного содержания примеси в районе ее регистрации и траекторией движения воздушных масс. ФЛА в отличие от COT позволяет не только определять вероятные местоположения источников примеси, но и оценивать средние мощности их эмиссии, а также восстанавливать среднее эффективное поле концентраций.

Результаты и обсуждение

В летние периоды 2015–2017 гг. в приземной атмосфере острова Белый нами зафиксировано монотонное повышение концентрации CO_2 в среднем на 3,1 ppm в год, что в полтора раза превышает среднегодовой прирост этого газа на планете. Содержание остальных парниковых газов значительно не изменилось (табл. 4). При этом средние уровни CO_2 оказались ниже, а CH_4 — выше глобального фона, что свидетельствует о значимости локальных процессов углеродного цикла в районе измерений. Глобальный фон для летнего сезона 2015–2016 гг. составлял по CO_2 396–400 ppm, по CH_4 — 1,845–1,855 ppm [13]. По водяному пару в приземной атмосфере

острова Белый в 2017 г. отмечено небольшое снижение, хотя в целом на планете не регистрируются ни антропогенные, ни природные изменения его концентрации.

Анализ зависимостей концентраций ПГ одновременно от скорости и направления ветра указывает на значимое влияние локальных источников при формировании приземных уровней этих примесей в атмосферном воздухе. По CO_2 отмечена сильная изменчивость во времени процессов эмиссии и стоков вблизи пункта мониторинга (рис. 2). Видно, в 2015 г. наземная экосистема обеспечивала преимущественно поглощение диоксида углерода, поскольку пониженные концентрации наблюдались при восточных и юго-восточных ветрах, что соответствует перемещению воздуха над территорией острова до его поступления в точку измерения. Но в 2016—2017 гг. интенсивность этого процесса резко снизилась. По CH_4 в рассматриваемые периоды экосистема острова оставалась устойчивым нетто-эмитентом, так как для относительно слабых восточных и юго-восточных ветров фиксировались повышенные концентрации.

Количественные оценки показали, что приземные уровни CH_4 , формируемые над островом, были в среднем на 0,04—0,07 ppm выше показателей,

Таблица 4. Содержание основных парниковых газов в атмосфере острова Белый в летний период 2015—2017 гг.

Год наблюдения	Концентрации парниковых газов, ppm (среднее ± стандартное отклонение)		
	CO_2	CH_4	H_2O
2015	388,3 ± 4,4	1,942 ± 0,042	0,992 ± 0,205
2016	392,5 ± 2,5	1,943 ± 0,046	0,978 ± 0,226
2017	394,5 ± 2,4	1,951 ± 0,048	0,819 ± 0,183
Среднегодовой прирост, ppm	+3,1	+0,004	-0,086

обусловленных ветровым переносом с моря. В то же время разница концентраций CO_2 от наземной экосистемы острова по сравнению с морской в 2015 г. составляла -4,37 ppm (это означает нетто-сток углерода), а в 2016—2017 гг. она изменялась от +0,06 до +0,78 ppm. Наибольший вклад острова в эмиссию метана и диоксида углерода был отмечен в условиях аномально высокой температуры воздуха 2016 г. (до 25—26°C), которая предположительно вызвала интенсификацию процессов высвобождения углерода из вечной мерзлоты, а также имела другие негативные последствия для заполярной природы.

В ходе экспедиции 2016 г. нами обнаружены случаи локальной деградации арктического

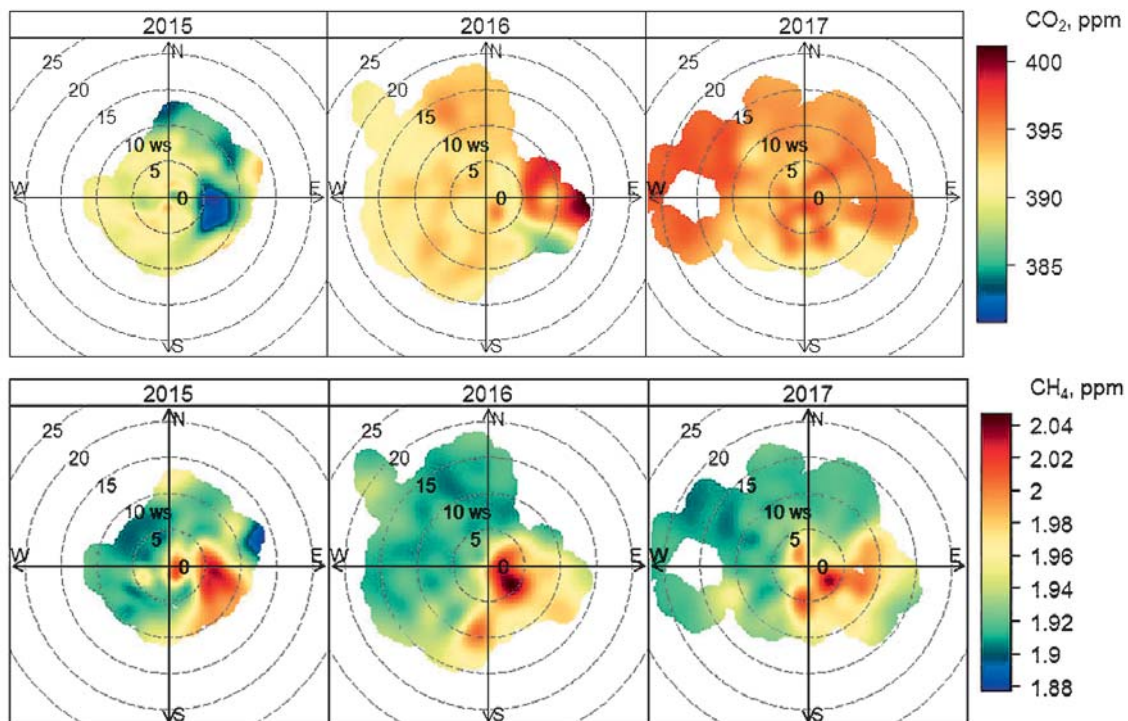


Рис. 2. Зависимости концентраций парниковых газов от направлений и скоростей ветра, указывающие на возможное пространственное распределение локальных источников их эмиссии и поглощения в окрестности острова Белый в летний период 2015—2017 гг.

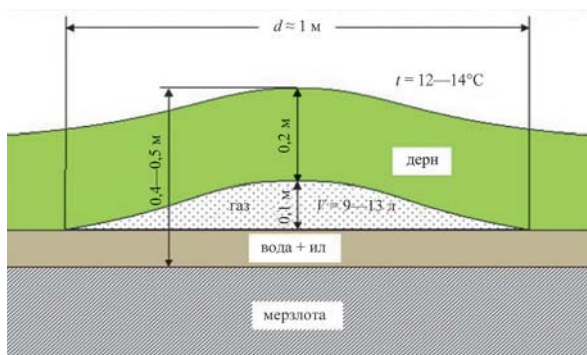


Рис. 3. Пример деградации арктического тундрового ландшафта на острове Белый — «тундровые газовые ловушки» (сверху, фото А. Г. Бувевича); схематическое изображение «газовой ловушки» в разрезе (снизу)

тундрового ландшафта. Это поверхностные газовые проявления в виде вздутия почвы, напоминающие «газовые ловушки» под слоем дерна (рис. 3). Каждое такое образование достигало 1—1,5 м в диаметре и 0,1—0,2 м в высоту. Примерный объем газа, сдерживаемого дерновым слоем, был определен расходом мером и изменялся для нескольких объектов в диапазоне 9—13 л. Всего в обследованном районе площадью примерно 20 км² обнаружено не менее 12 ловушек. Как правило, это были болотистые участки местности, где глубина оттаивания активного слоя вечной мерзлоты составляла 0,4—0,5 м, а температура воды — 6—7°C. Измеренная концентрация CO₂ и CH₄ внутри «газовых ловушек» — не менее 7000 ppm и 1200 ppm соответственно, что многократно превышает среднее содержание этих газов в приземной атмосфере. Обнаруженное явление подтверждает сильное влияние аномально высоких температур на активность поверхностных газовых проявлений в Арктике, которые могут служить дополнительным локальным источником эмиссии ПГ, повышая средние приземные концентрации по сравнению с уровнями, характерными для нормальных погодных условий. Значительно более крупные

участки поверхностных газовых проявлений и газовых выбросов в регионах наличия многолетнемерзлых пород описаны в работах других авторов [32; 33].

С целью определения зоны влияния возможных удаленных источников эмиссии ПГ на пункт мониторинга на острове Белый были проведены расчеты обратных траекторий воздушных потоков в 2015—2016 гг. Информация о динамике атмосферы взята из открытых баз данных: ECMWF¹ (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) и NOAA-NCEP/NCAR² (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США). Для расчета использован программный пакет HYSPLIT [34]. Длительность расчетных траекторий — 4 сут, высота старта — 10—500 м. Пространственное разрешение, соответствующее размерам ячеек эйлеровой сетки, составило 1×0,5° (рис. 4).

Зона влияния охватывает значительную территорию за Северным полярным кругом, включая Северный полюс, и имеет характерные размеры в несколько тысяч километров. В основном она располагается над морской поверхностью, островами Северной Земли и Шпицбергена, архипелагов Новая Земля и Земля Франца-Иосифа и в значительно меньшей степени — над северными территориями Евразии. При этом в указанный период измерений явно прослеживается различие синоптических условий — в отличие от июля в августе 2016 г. практически отсутствовал восточный перенос, что, несомненно, сказалось на результатах замеров.

В зоне влияния (области моделирования динамики атмосферы) методом ФЛА было построено среднее

¹ Public Datasets / European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. — URL: <http://apps.ecmwf.int/datasets/>.

² FTP archives of reanalysis data / National Oceanic and Atmospheric Administration. — URL: <ftp://arlftp.arl.noaa.gov/archives/reanalysis/>.

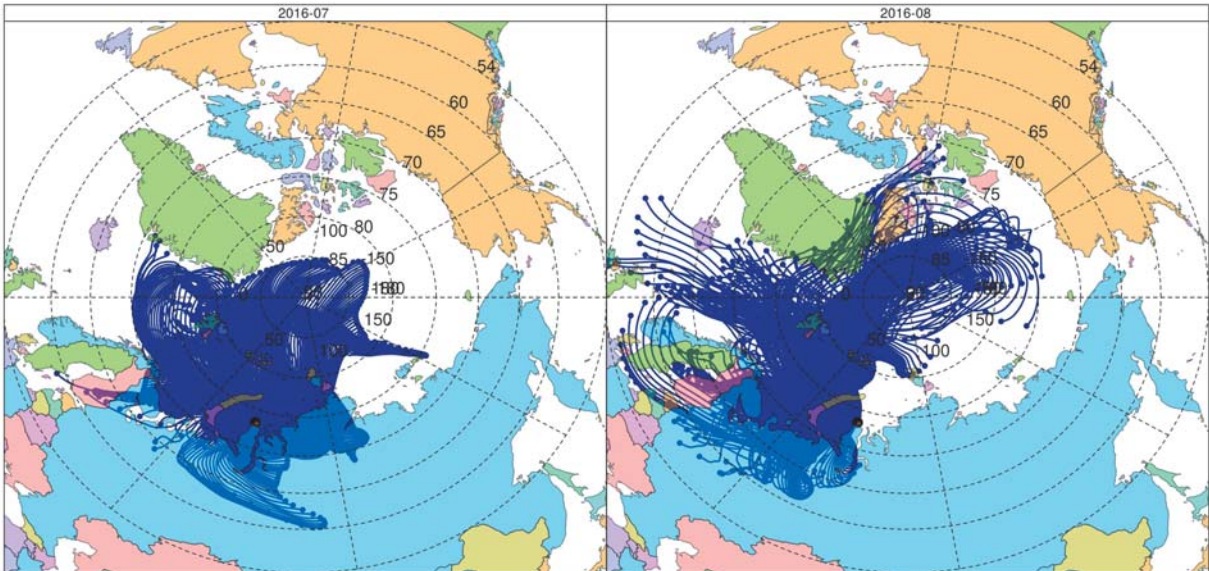


Рис. 4. Результаты расчета обратных траекторий воздушных потоков для определения зоны влияния на пункт мониторинга парниковых газов на острове Белый (черная точка). Приведены данные за июль-август 2016 г. для высоты старта 10 м

эффективное поле концентраций метана в июле-августе 2016 г. (рис. 5). Расчетные значения нормированы на среднюю за период наблюдения концентрацию на острове Белый — 1,924 ppb с учетом влажности воздуха.

Основные источники эмиссии метана расположены в материковой арктической части России (примерно Ямальский, Надымский, Пуравский районы Ямало-Ненецкого автономного округа). Качественно это согласуется с регионами активной добычи и переработки углеводородов. Однако следует отметить, что результаты над материковой частью карты можно рассматривать лишь как индикаторные — они характеризуют отдельные случаи прихода воздушных потоков с указанных территорий. Равномерная синяя область в восточной и юго-восточной частях обусловлена отсутствием воздушных переносов (обратных траекторий) из этих районов за период экспедиционных измерений, а не отсутствием в данной области источников эмиссии.

Полученные результаты носят предварительный характер, так как для расчетов были использованы достаточно короткие временные серии концентрации метана. Для их верификации

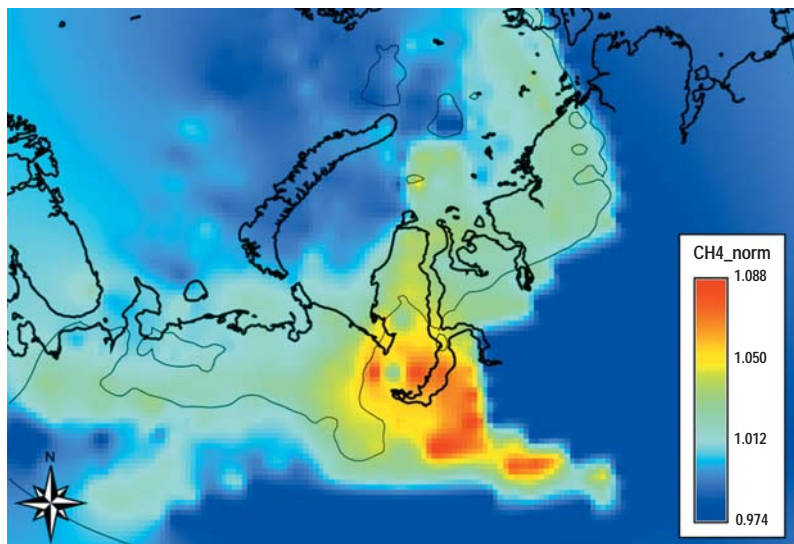


Рис. 5. Среднее эффективное поле концентраций метана в расчетной зоне влияния на пункт мониторинга на острове Белый в июле-августе 2016 г. Желтые-красные цвета показывают области пространства с повышенной интенсивностью эмиссии метана, т. е. вероятного расположения крупных поверхностных источников

необходимы длительные (желательно постоянные) измерения. С июля 2017 г. пункт мониторинга ПГ на острове Белый работает в непрерывном режиме, что дает возможность получать более достоверную и детальную информацию об источниках эмиссии и поглощения углеродсодержащих примесей в различные сезоны. По нашим оценкам, для организации эффективного контроля парниковых газов и их источников во всем арктическом регионе необходима система из трех автоматизированных станций высокочастотного прецизионного мониторинга.

Заключение

Выполняемые нами исследования в области изменения климата, разработки методов анализа данных наземного мониторинга парниковых газов, а также практический опыт проведения расчетных

инвентаризаций антропогенных эмиссий позволяют сделать следующие выводы.

Основным вопросом, требующим наиболее точного анализа, является строгое научное обоснование вклада антропогенной эмиссии парниковых газов в общий парниковый эффект, а также оценка эффективности мер по снижению этой эмиссии для замедления процессов глобального изменения климата.

Важным инструментом решения этой проблемы является расчетная инвентаризация парниковых газов, успешно используемая на международном уровне для сопоставления вкладов отдельных государств. Однако для получения объективных оценок на региональном уровне требуются детальное научно-методическое обоснование и разработка нормативно-технической документации, учитывающей специфику арктического региона (удельные показатели потребления ресурсов и энергии, коэффициенты эмиссии и поглощений и др.) и обеспечивающей достоверный учет выбросов ПГ на основных источниках эмиссий.

Для объективной оценки источников эмиссии и стоков ПГ необходимо развитие методов анализа данных наземного мониторинга как на фоновых территориях, так и в условиях антропогенной нагрузки. Помимо решения фундаментальных задач, связанных с процессами изменения климата, подобные методы могут использоваться для нахождения и оконтуривания территорий, являющихся крупными площадными источниками эмиссии газов, перспективными для поисков месторождений углеводородов.

Основная проблема мониторинга парниковых газов в арктических регионах — организация непрерывных длительных высокочастотных измерений для получения многолетних рядов данных концентраций CO₂ и CH₄, которая обусловлена объективными трудностями материально-технического, финансового и логистического обеспечения исследований.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Уральского отделения РАН, проекты № 15-15-2-50 и №18-9-2-25. Для измерений концентраций парниковых газов на острове Белый была частично использована аппаратура «ЦКП арктических экологических исследований ИПЭ УрО РАН».

Благодарность

Авторы выражают признательность Департаменту науки и инноваций Ямало-Ненецкого автономного округа и НП «Российский центр освоения Арктики» (Салехард) за материально-техническую и логистическую поддержку научных экспедиций на острове Белый, а также Е. В. Омельковой (ИПЭ УрО РАН) за помощь в обработке данных и подготовке графических материалов. При проведении

измерений в 2017 г. была использована аппаратура «ЦКП арктических экологических исследований ИПЭ УрО РАН».

Литература/References

1. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds R. K. Pachauri, L. A. Meyer; IPCC. Geneva, 2014, 151 p.
2. NOAA Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally. Eds K. Northon; NASA. [S. l.], 2017.
3. Nullis C. Provisional WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2016. World Meteorological Organization. [S. l.], 2016.
4. Serreze M. C., Barry R. G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, 2011, vol. 77, no. 1, pp. 85—96.
5. Kawamura K., Abe-Ouchi A., Motoyama H., Ageta Y., Aoki S., Azuma N., Fujii Y., Fujita K., Fujita S., Fukui K. et al. State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Science advances*, 2017, vol. 3, no. 2, e1600446. DOI: 10.1126/sciadv.1600446.
6. Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing Uncertainties. National Research Council. Washington, DC, The National Academies Press, 2005, 222 p.
7. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds T. F. Stocker et al. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013, 1535 p.
8. Kiehl J. T., Trenberth K. E. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bull. of the American Meteorological Society*, 1997, vol. 78, no. 2, pp. 197—208.
9. Парниковые газы — глобальный экологический ресурс: справочное пособие / Под ред. А. О. Кокорина. — М.: WWF России, 2004. — 136 с. Parnikovye gazy — global'nyy ekologicheskiy resurs: spravochnoe posobie. [Greenhouse gases — a global environmental resource: a reference book]. Pod red. A. O. Kokorina. Moscow, WWF Rossii, 2004, 136 p. (In Russian).
10. Киотский протокол к рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата / ООН. — [Б. м.], 1998. — 26 с. Kiotskiy protokol k ramochnoy konventsii Organizatsii Ob"edinennykh Natsiy ob izmenenii klimata. [The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change]. OON. [S. l.], 1998, 26 p. (In Russian).
11. Заварзин Г. А., Кудеяров В. Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // *Вестн. Рос. акад. наук.* — 2006. — Т. 76, № 1. — С. 14—24. Zavarzin G. A., Kudeyarov V. N. Pochva kak glavnyy istochnik uglekisloty i rezervuar organicheskogo

- ugleroda na territorii Rossii. [Soil as the key source of carbon dioxide and reservoir of organic carbon on the territory of Russia]. *Vestn. Ros. akad. nauk*, 2006, vol. 76, no. 1, pp. 14—24. (In Russian).
12. *Blunden J., Arndt D. S.* State of the Climate in 2015. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2016, vol. 97, no. 8, pp. S1—S275.
13. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2016. [S. I.], WMO, 2017, 26 p.
14. *Baldocchi D., Falge E., Gu L., Olson R., Hollinger D., Running S., Anthoni P., Bernhofer C., Davis K., Evans R.* FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. of the American Meteorological Society*, 2001, vol. 82, no. 11, pp. 2415—2434.
15. *Canadell J. G., Mooney H. A., Baldocchi D. D., Berry J. A., Ehleringer J. R., Field C. B., Gower S. T., Hollinger D. Y., Hunt J. E., Jackson R. B., Running S. W., Shaver G. R., Steffen W., Trumbore S. E., Valentini R., Bond B. Y.* Commentary: Carbon Metabolism of the Terrestrial Biosphere: A Multitechnique Approach for Improved Understanding. *Ecosystems*, 2000, vol. 3, no. 2, pp. 115—130.
16. *Мигловец М. Н., Михайлов О. А., Загирова С. В.* Вертикальные потоки CH_4 и CO_2 в растительных сообществах мезоолиготрофного болота средней тайги // *Изв. Самар. науч. центра Рос. acad. nauk.* — 2014. — Т. 16, № 1-1. — С. 193—197.
- Miglovets M. N., Mikhaylov O. A., Zagirova S. V.* Vertikal'nye potoki SN_4 i SO_2 v rastitel'nykh soobshchestvakh mezoooligotrofnogo bolota sredney taygi. [Vertical CH_4 and CO_2 fluxes in plant communities of mesoooligotrophic Peatland of middle taiga]. *Izv. Samar. nauch. tsentra Ros. akad. nauk*, 2014, vol. 16, no. 1-1, pp. 193—197. (In Russian).
17. *Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Краев Г. Н.* Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // *Лесоведение.* — 2011. — № 6. — С. 16—28.
- Zamolodchikov D. G., Grabovskiy V. I., Kraev G. N.* Dinamika byudzheta ugleroda lesov Rossii za dva poslednikh desyatiletiya. [A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics in Russia]. *Lesovedenie*, 2011, no. 6, pp. 16—28. (In Russian).
18. *Winderlich J., Gerbig C., Kolle O., Heimann M.* Inferences from CO_2 and CH_4 concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes. *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, no. 7, pp. 2055—2068.
19. *Тимохина А. В., Прокушкин А. С., Онучин А. А. и др.* Динамика приземной концентрации CO_2 в среднетаежной подзоне Приенисейской Сибири // *Экология.* — 2015. — № 2. — С. 110—119.
- Timokhina A. V., Prokushkin A. S., Onuchin A. A., Panov A. V., Kofman G. B., Heimann M.* Dinamika prizemnoy kontsentratsii SO_2 v srednetaezhnoy podzone Prieniseyskoy Sibiri. [Variability of ground CO_2 concentration in the middle taiga subzone of the Yenisei region of Siberia]. *Ekologiya*, 2015, no. 2, pp. 110—119. (In Russian).
20. *Law B., Falge E., Gu L., Baldocchi D., Bakwin P., Berbigier P., Davis K., Dolman A., Falk M., Fuentes J.* Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, vol. 113, no. 1, pp. 97—120.
21. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. — [Б. м.], 2006.
- Rukovodyashchie printsiipy natsional'nykh inventarizatsiy parnikovykh gazov MGEIK*, 2006. [Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories MGEIK, 2006]. [S. I.], 2006. (In Russian).
22. *Kennedy C., Steinberger J., Gasson B., Hansen Y., Hillman T., Havranek M., Pataki D., Phdungsilp A., Ramaswami A., Mendez G. V.* Greenhouse gas emissions from global cities. *Environmental Science & Technology*, 2009, vol. 43, pp. 7297—7302.
23. *Krause R. M.* An assessment of the greenhouse gas reducing activities being implemented in US cities. *Local Environment*, 2011, vol. 16, no. 2, pp. 193—211.
24. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2016 год / Под ред. Г. М. Черногаева. — М.: Росгидромет, 2017. — 218 с.
- Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2016 god.* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2016]. Pod red. G. M. Chernogaeva. Moscow, Rosgidromet, 2017, 218 p. (In Russian).
25. *Walker D. A., Reynolds M. K., Daniëls F. J., Einarsson E., Elvebakk A., Gould W. A., Katerin A. E., Kholod S. S., Markon C. J., Melnikov E. S.* The circumpolar Arctic vegetation map. *J. of Vegetation Science*, 2005, vol. 16, no. 3, pp. 267—282.
26. *Walker D., Epstein H., Reynolds M., Kuss P., Kopecky M., Frost G., Daniëls F., Leibman M., Moskalenko N., Matyshak G. et al.* Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects. *Environmental Research Letters*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 015504 (17 pp). DOI:10.1088/1748-9326/7/1/015504.
27. *Poddubny V., Nagovitsyna E.* Retrieval of spatial field of atmospheric aerosol concentration according to data from local measurements: A modification of the method of back trajectory statistics. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 404—410.
28. *Поддубный В. А., Дубинкина Е. С.* Задача о пассивной локации атмосферы ветровыми потоками для оценки полей концентрации и определения источников примеси // *Оптика атмосферы и океана.* — 2017. — Т. 30, № 10. — С. 862—870.
- Poddubny V. A., Dubinkina E. S.* Zadacha o passivnoy lokatsii atmosfery vetrovymi potokami dlya otsenki poley kontsentratsii i opredeleniya istochnikov primesi.

[The problem of fluid location of the atmosphere for the estimation of pollution fields and retrieval of source]. *Optika atmosfery i okeana*, 2017, vol. 30, no. 10, pp. 862—870. (In Russian).

29. Ashbaugh L. L., Malm W. C., Sadeh W. Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park. *Atmospheric Environment* (1967), 1985, vol. 19, no. 8, pp. 1263—1270.

30. Stohl A. Trajectory statistics — A new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe. *Atmospheric Environment*, 1996, vol. 30, no. 4, pp. 579—587.

31. Seibert P., Kromp-Kolb H., Baltensperger U., Jost D., Schwikowski M., Kasper A., Puxbaum H. Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites. *Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere*, 1994, vol. 15, no. 9, pp. 689—693.

32. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Результаты аэрокосмических и экспедиционных исследований крупных выбросов газа на Ямале в районе Бованенковского месторождения // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (23). — С. 4—17.

Bogoyavlenskiy V. I., Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A. Rezul'taty aerokosmicheskikh i ekspeditsionnykh

issledovaniy krupnykh vybrosov gaza na Yamale v rayone Bovanenkovskogo mestorozhdeniya. [Results of aerial, space and field investigations of large gas blowouts near Bovanenkovo field on Yamal Peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2017, no. 3 (23), pp. 4—17. (In Russian).

33. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 4—15.

Bogoyavlenskiy V. I., Sizov O. S., Bogoyavlenskiy I. V., Nikonov R. A. Distantionnoe vyavlenie uchastkov poverkhnostnykh gazoprovyavleniy i gazovykh vybrosov v Arktike: poluostrov Yamal. [Remote identification of areas of surface gas manifestations and gas emissions in the Arctic: the Yamal Peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 3 (23), pp. 4—15. (In Russian).

34. Draxler R. R., Hess G. D. An Overview of the HYSPLIT-4 Modelling System for Trajectories, Dispersion and Deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, vol. 47, pp. 295—308.

Информация об авторах

Антонов Константин Леонидович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620990, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20), e-mail: antonov@ecko.uran.ru.

Поддубный Василий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620990, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20).

Маркелов Юрий Иванович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620990, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20).

Бувич Александр Геннадьевич, младший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620990, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20).

Медведев Александр Николаевич, кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620990, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20).

Манжуров Игорь Леонидович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620990, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20).

Библиографическое описание данной статьи

Антонов К. Л., Поддубный В. А., Маркелов Ю. И. и др. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 56—67. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.

SOME RESULTS OF GREENHOUSE GASES MONITORING IN THE ARCTIC REGION OF RUSSIA

Antonov K. L., Poddubny V. A., Markelov Yu. I., Buevich A. G., Medvedev A. N., Manzhurov I. L.

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russian Federation)

The research was carried out within the framework of the Project of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No.15-15-2-50. For measurement of greenhouse gases content on the Belyy Island, the equipment of the Center for Arctic Environmental Studies of the IIE UrB RAS was partially used.

Annotation

Problems of obtaining objective and reliable data on anthropogenic sources of greenhouse gases (GHG) in the Russian Arctic and their potential contribution to the overall greenhouse effect are discussed. Development of the technologies for modeling and forecasting the average “effective” fields of GHG concentrations and emission levels based on ground monitoring data proves to be promising direction.

The results of GHG measurements in 2015-2017 summertime from a high Arctic Belyy island (Russia) are presented. The atmospheric CO₂ concentration has increased by 3.1 ppm per year, which is 1.5 times higher than the mean annual global rate during last 10 years. However, the absolute CO₂ levels were significantly less than the global background, which exceeded 400 ppm in 2015. The content of the other GHGs has not changed. In summer tundra ecosystem was shown to remain a local net CH₄ source in comparison to marine ecosystem. The surface methane levels formed over the island were 0.04-0.07 ppm higher than those due to wind transport from the sea. Greatest effect was observed in the exceptionally hot summer of 2016, which was likely to cause the increased emission of carbon from permafrost.

To identify remote sources, the method of fluid-air locations was adapted, based on a joint analysis of backward trajectories and the results of GHG monitoring. The zone of influence of possible remote sources on the monitoring site was simulated. It covers a large area of the Arctic Circle and has a typical size of a few thousands kilometers. Constructed average “effective” field of methane concentrations indicated spatial distribution of potential sources. They are located in the regions of hydrocarbons production in the Russian Arctic. These preliminary results require verification on long-term GHG measurements.

Keywords: *greenhouse gases, carbon cycle, inventory, monitoring, Belyy Island, backward trajectories, method of fluid-air locations.*

Acknowledgements

The authors are grateful to the Department of Science and Innovation of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug and non-commercial partnership “Russian Center for the Arctic development” (Salekhard, YNAO) for technical and logistical support of scientific expeditions to Belyy Island, as well as to E.V. Omelkova (IPE UB RAS) for assistance in data processing and preparation of graphic materials.

Information about the authors

Antonov Konstantin Leonidovich, PhD, Head of Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the RAS, (20, Sofii Kovalevskoy st., Ekaterinburg, Russia, 620990, Russia, 620990), e-mail: antonov@ecko.uran.ru.

Poddubny Vasily Alekseevich, PhD, Leading Researcher, Head of Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the RAS, (20, Sofii Kovalevskoy st., Ekaterinburg, Russia, 620990, Russia, 620990).

Markelov Yury Ivanovich, PhD, Head of Laboratory, Head of Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the RAS, (20, Sofii Kovalevskoy st., Ekaterinburg, Russia, 620990, Russia, 620990).

Buevich Alexander Gennadiyevich, Junior Researcher, Head of Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the RAS, (20, Sofii Kovalevskoy st., Ekaterinburg, Russia, 620990, Russia, 620990).

Medvedev Alexander Nikolaevich, PhD, Scientific Secretary, Head of Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the RAS, (20, Sofii Kovalevskoy st., Ekaterinburg, Russia, 620990, Russia, 620990).

Manzhurov Igor Leonidovich, PhD, Leading Researcher, Head of Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the RAS, (20, Sofii Kovalevskoy st., Ekaterinburg, Russia, 620990, Russia, 620990).

Bibliographic description

Antonov K. L., Poddubny V. A., Markelov Yu. I. et al. Some results of greenhouse gases monitoring in the Arctic region of Russia. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 1 (29), pp. 56—67. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67. (In Russian).